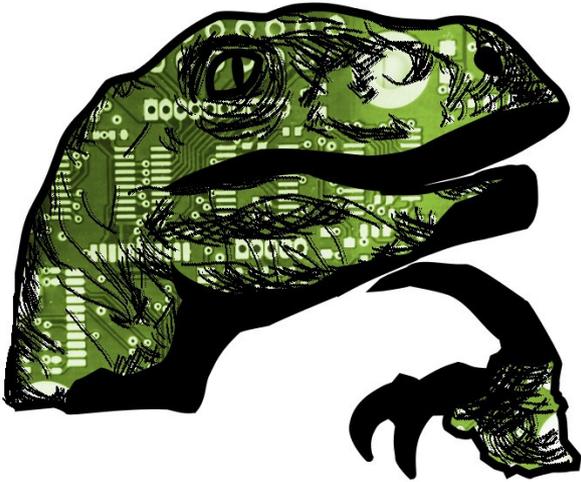


# Mythen der Elektronikentwicklung

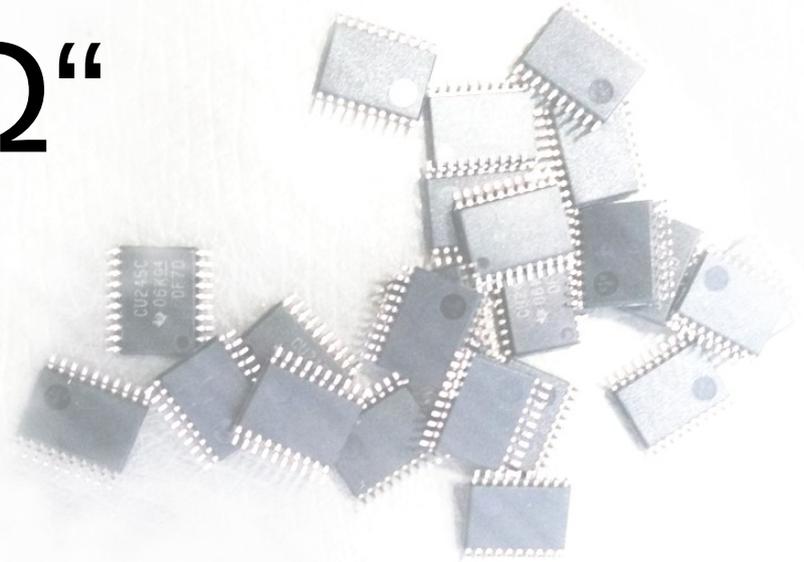


Lukas Salzburger  
salzburger@engineering-arts.net

*„Der Profi macht nur neue Fehler. Der Dummkopf wiederholt seine Fehler. Der Faule und der Feige machen keine Fehler.“*

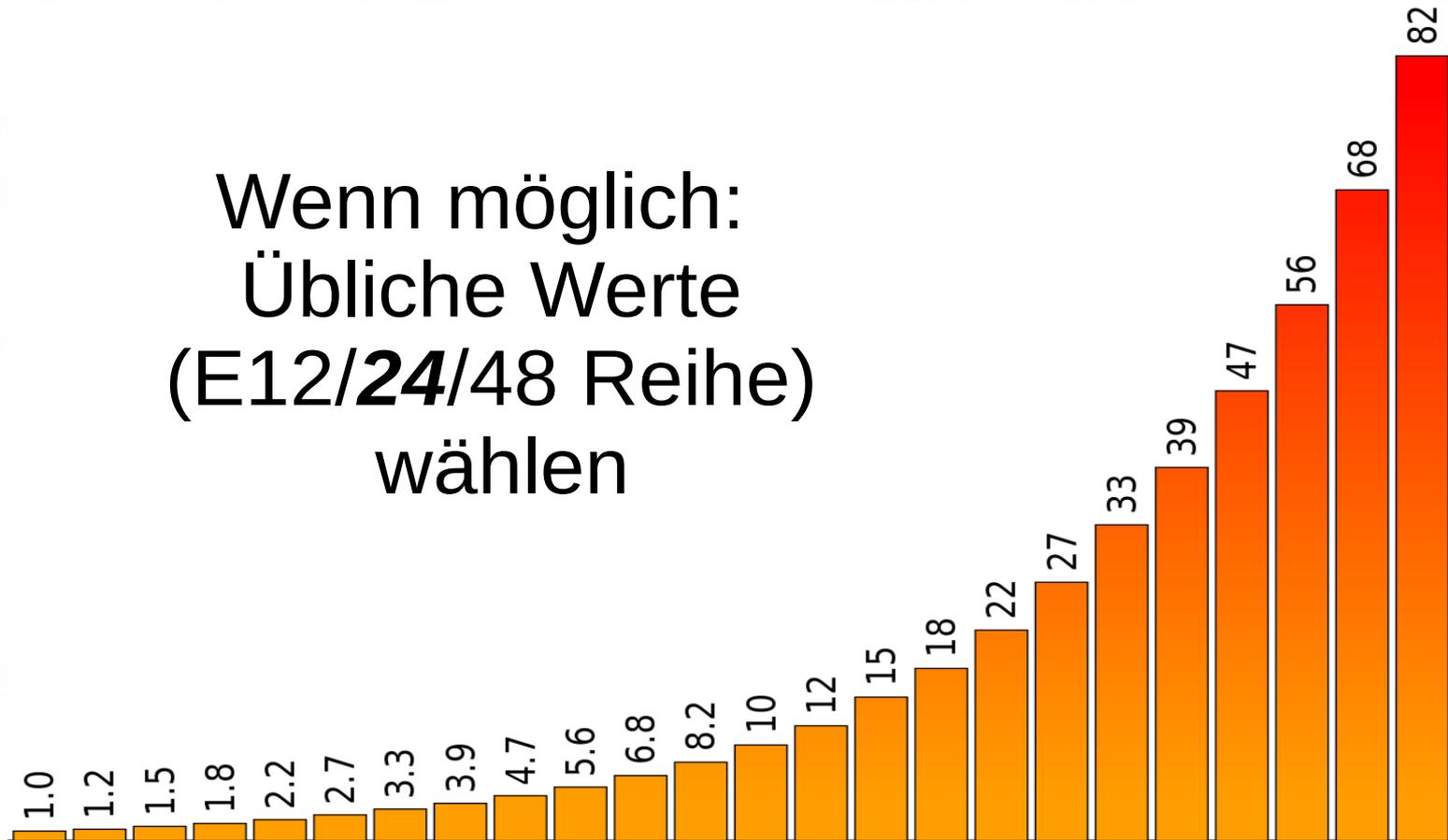
Oscar Wilde

„Der Widerstand hat  
4.223k $\Omega$ “



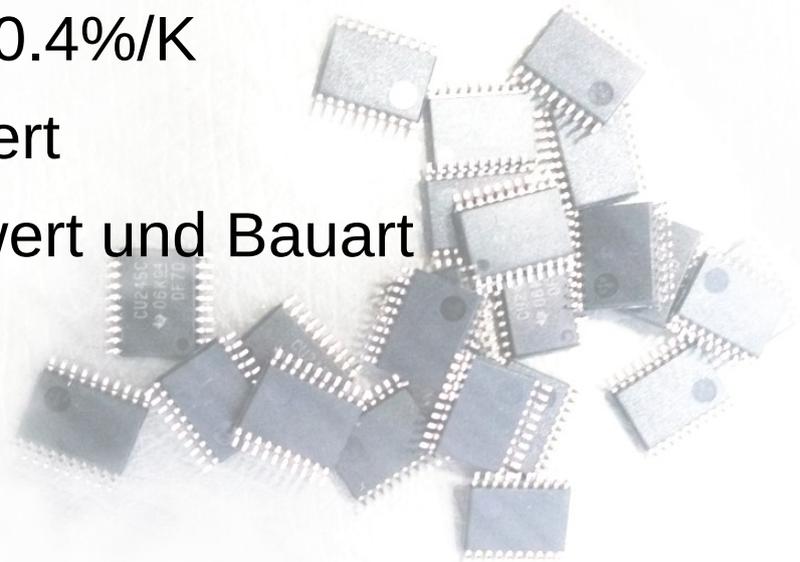
~~„Der Widerstand hat 4.223k $\Omega$ “~~

Wenn möglich:  
Übliche Werte  
(E12/**24**/48 Reihe)  
wählen



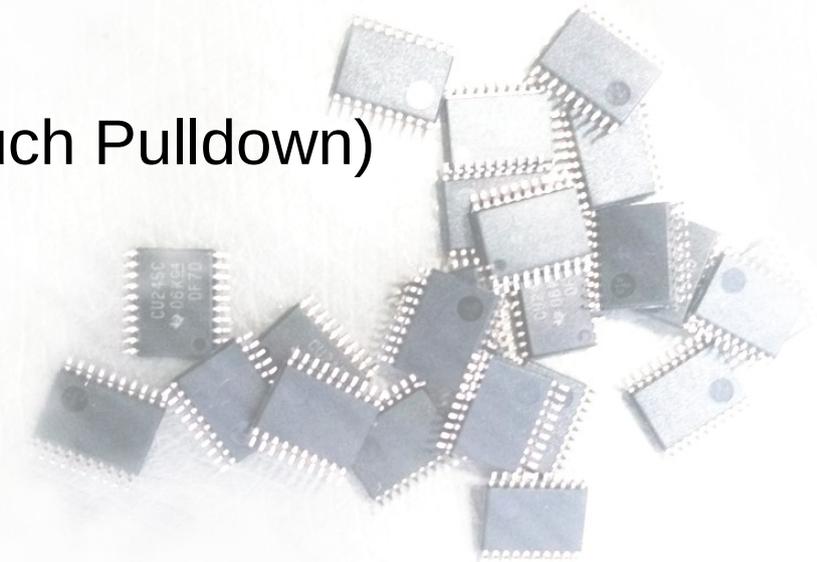
# ~~„Der Widerstand hat 4.223kΩ“~~

- Toleranz: 20%, 10%, 5%, 1%, 0.5%, 0.1%, 0.05%, 0.01%, ...
- Max. Verlustleistung (Power Rating): 0.05W .. >100W
- Spannungsfestigkeit: 30V .. >kV
- Temperaturkoeffizient (TK): 10ppm/K .. 0.4%/K
- Drift/Alterung: 0.05%/1000h ... undefiniert
- Rauschen: Abhängig von Widerstandswert und Bauart
- Feuer/Chemikalienbeständigkeit
- Zertifizierungen
- ...

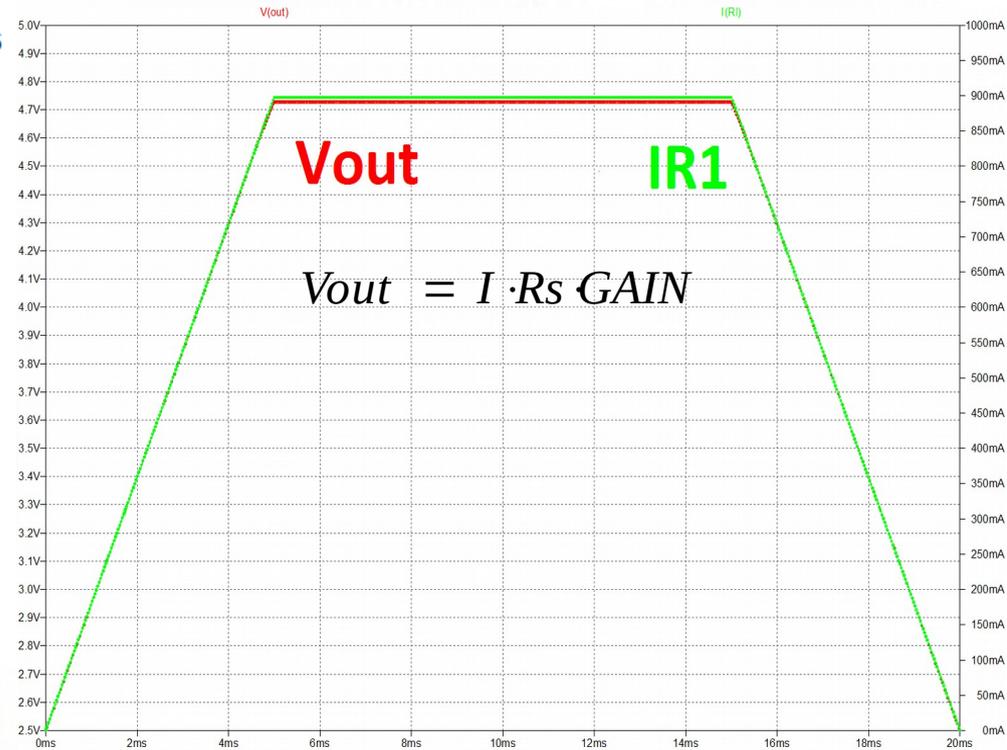
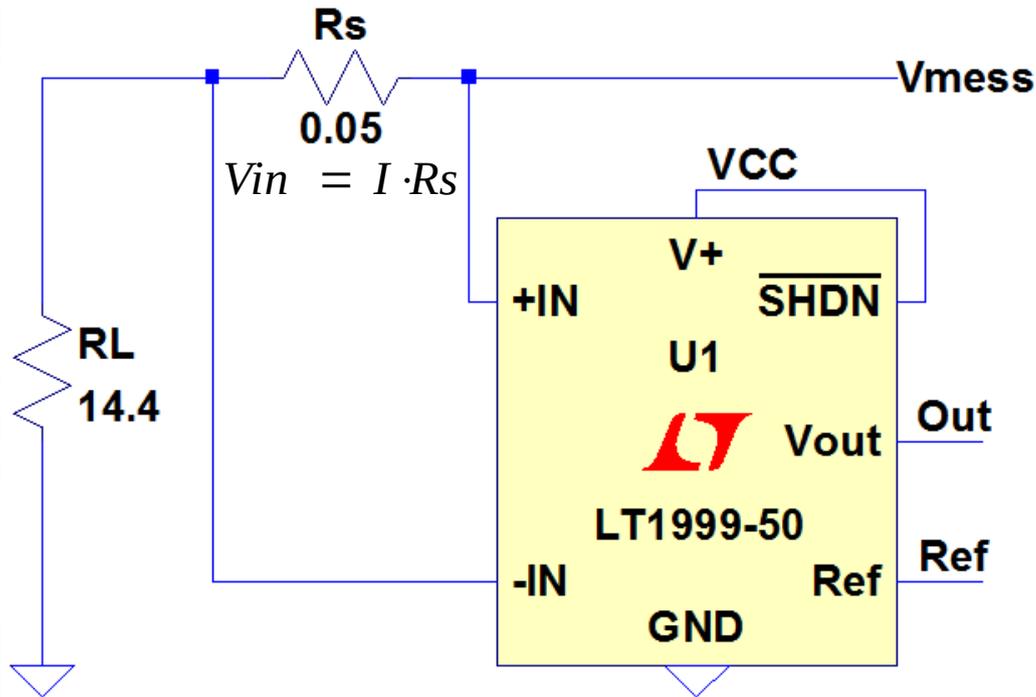


# Exkurs: Interne Pullupwiderstände bei MCs

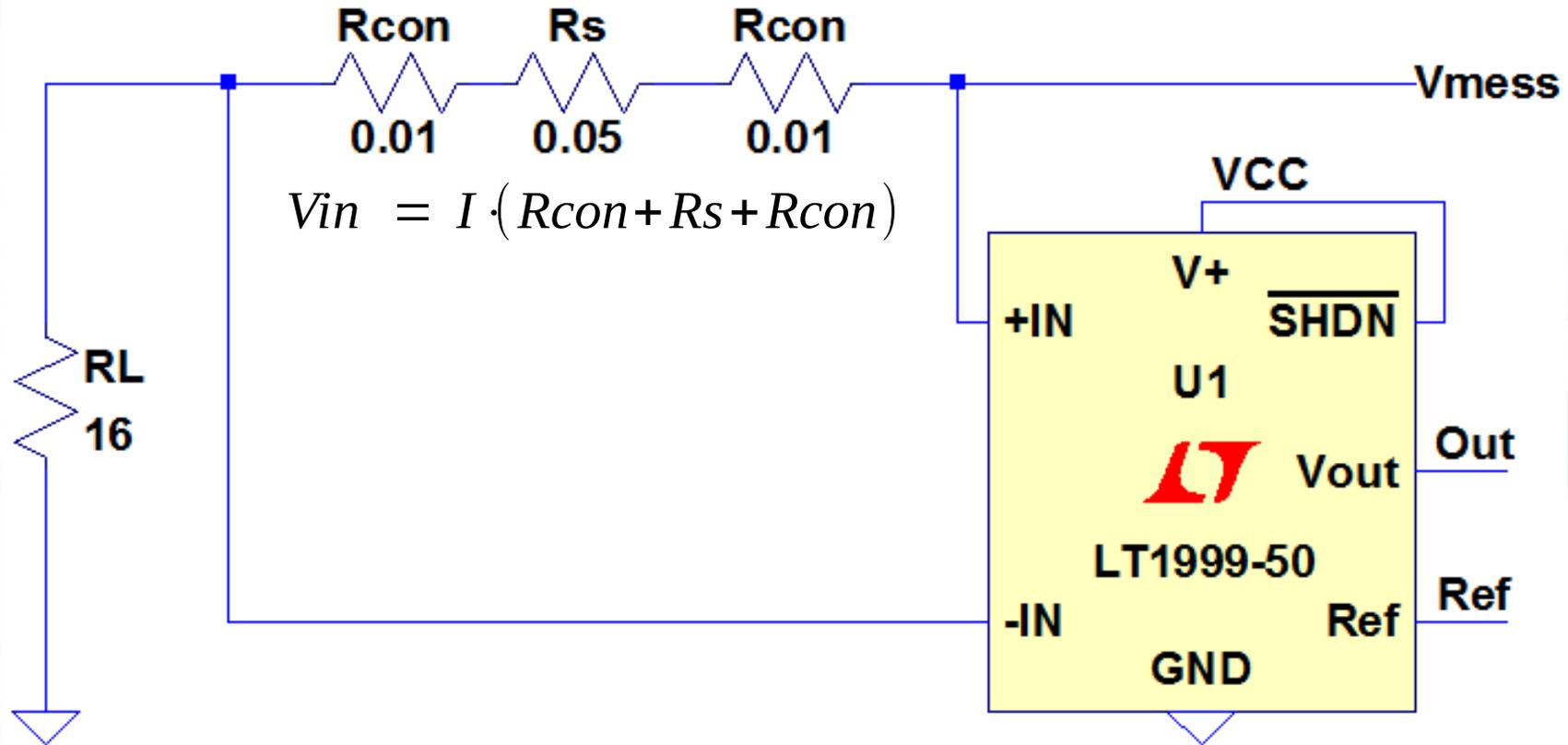
- Atmel AVR: 30k $\Omega$  bis 60k $\Omega$
- Microchip PIC: 50 $\mu$ A bis 400 $\mu$ A @5V<sub>dd</sub>
- ST STM32: 30k $\Omega$  bis 50k $\Omega$
- Freescale Kinetis EA: 30k $\Omega$  bis 50k $\Omega$
- Cypress PSoC 4: 3.5k $\Omega$  bis 8.5k $\Omega$  (auch Pulldown)



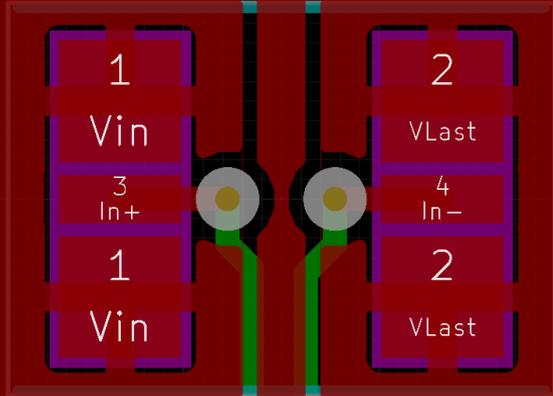
# „Strommessung mit Shunt“



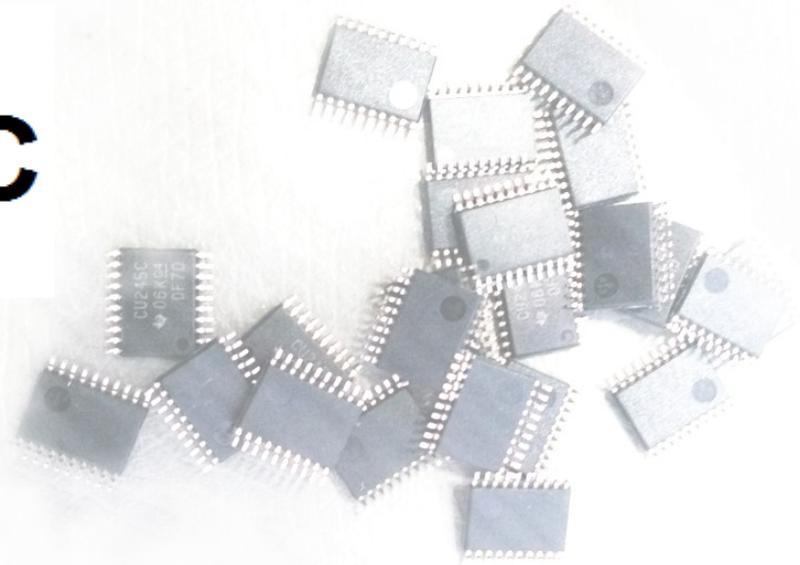
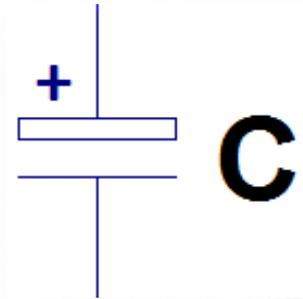
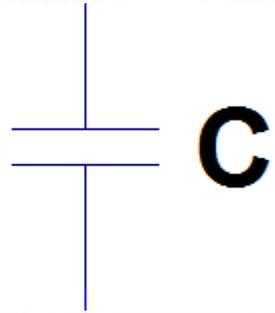
# „Strommessung mit realem Widerstand“



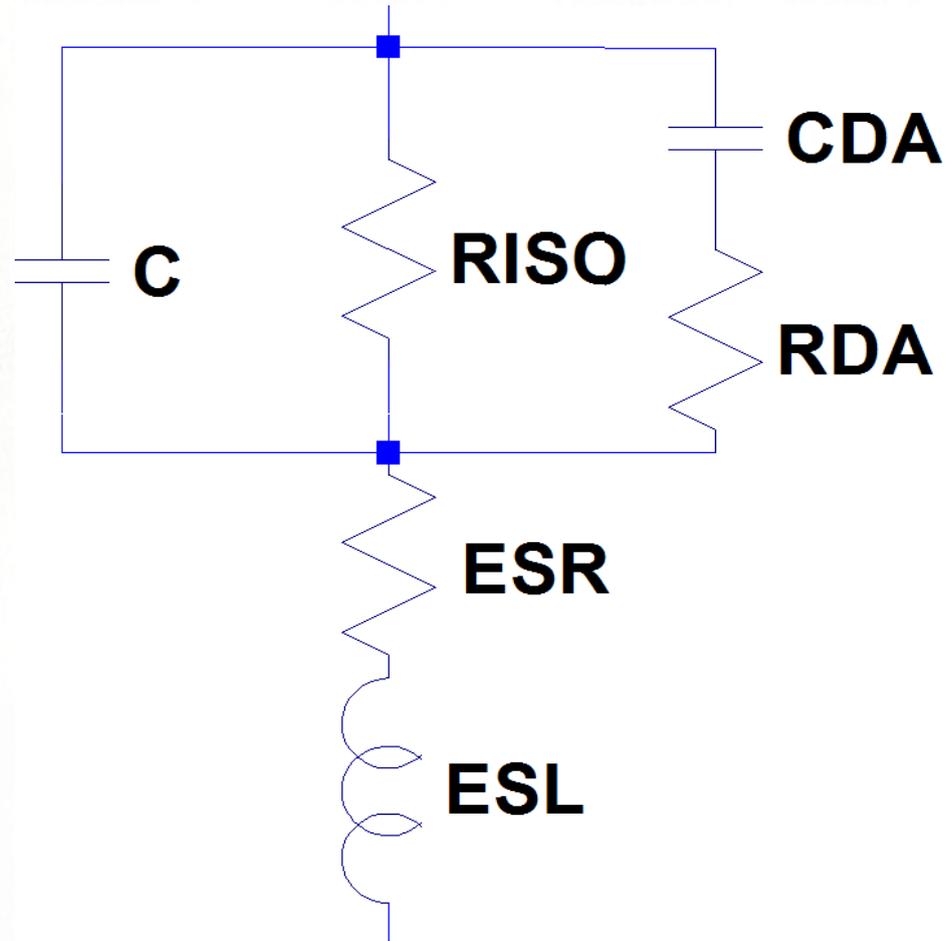
# Vierleitermessung verwenden!



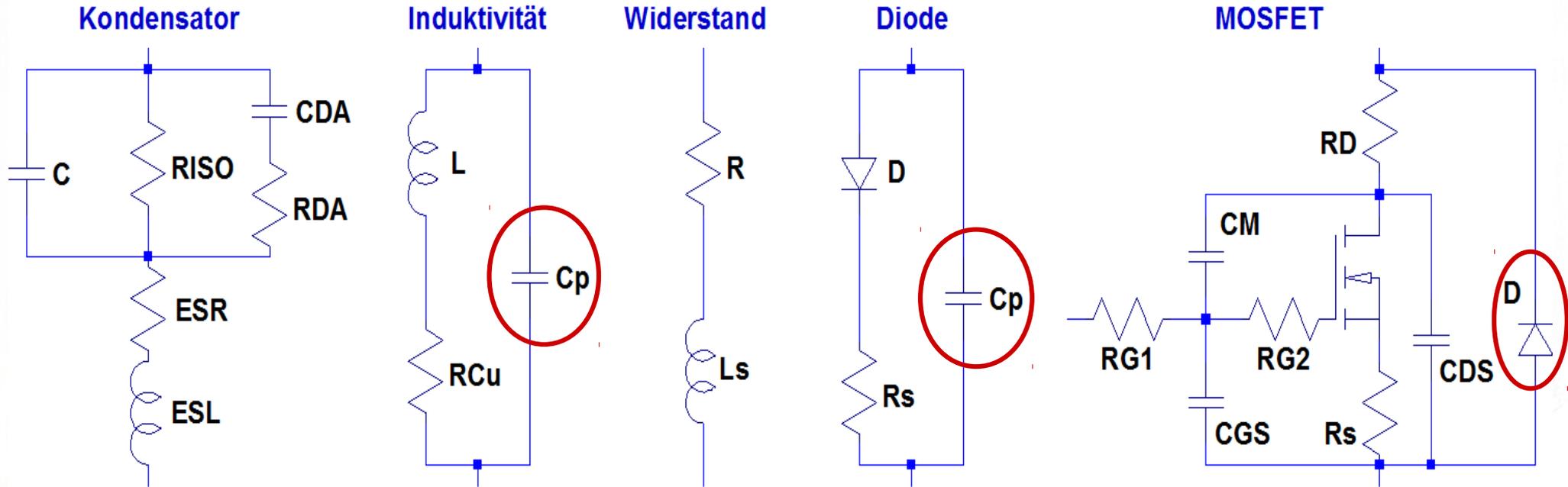
# Kondensatoren



# „Echte“ Kondensatoren



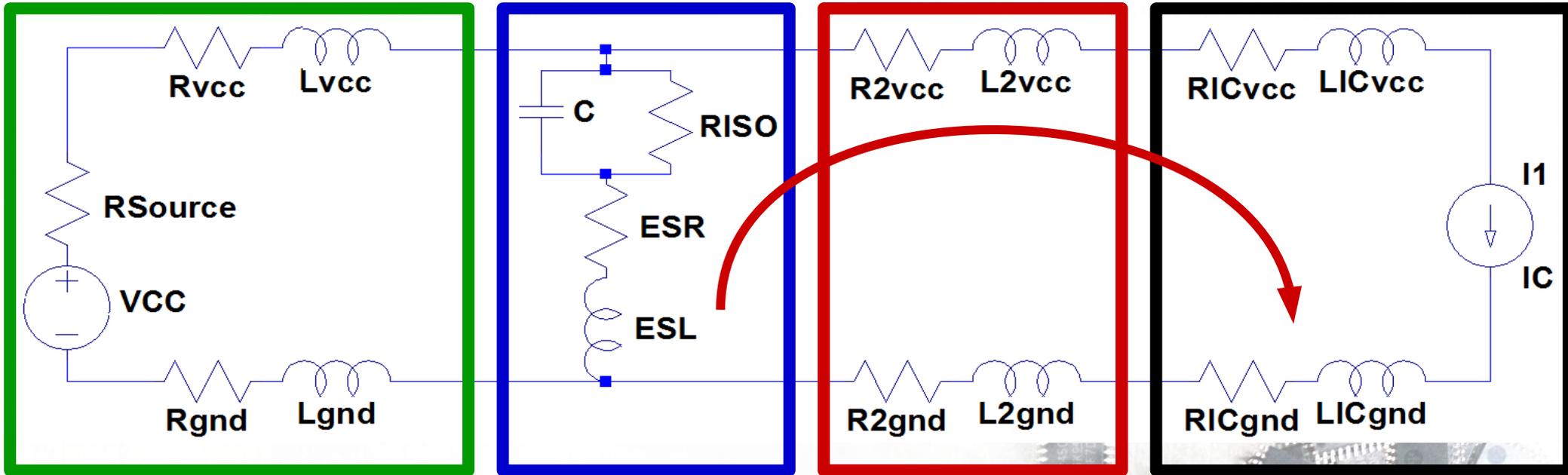
# Einschub: Reale Bauteile...



„Bypasskondensatoren:  
1x 2.2 $\mu$ F > 15x 100nF.  
Und auch kleiner und  
billiger.“



~~„2.2 $\mu$ F  $\rightarrow$  15 x 100nF & kleiner & billiger.“~~



Versorgung

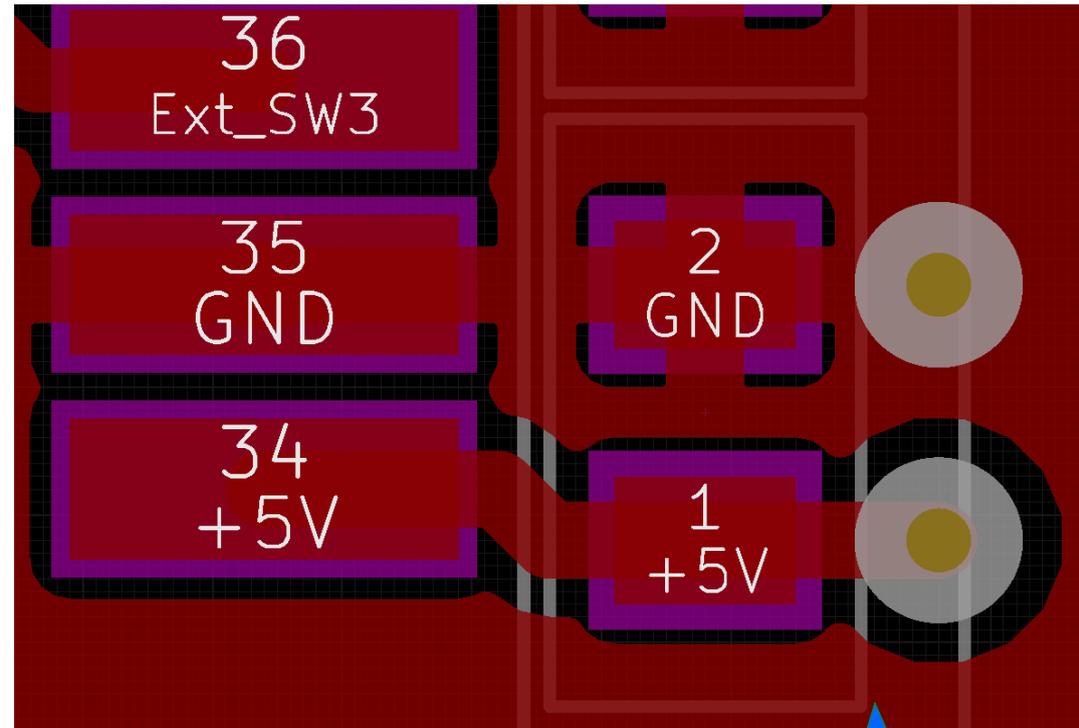
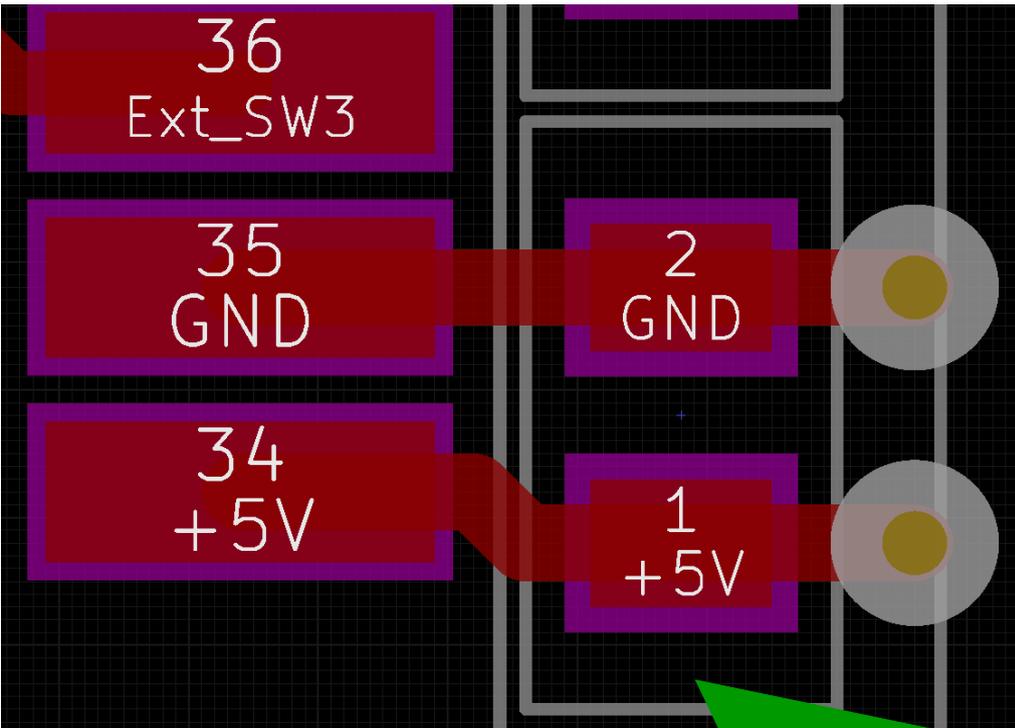
$C_{Bypass}$

Anschluss

IC

Bei Bypasskondensatoren zählt nicht die Kapazität

# Wie platziere ich einen Bypasscap „richtiger“?

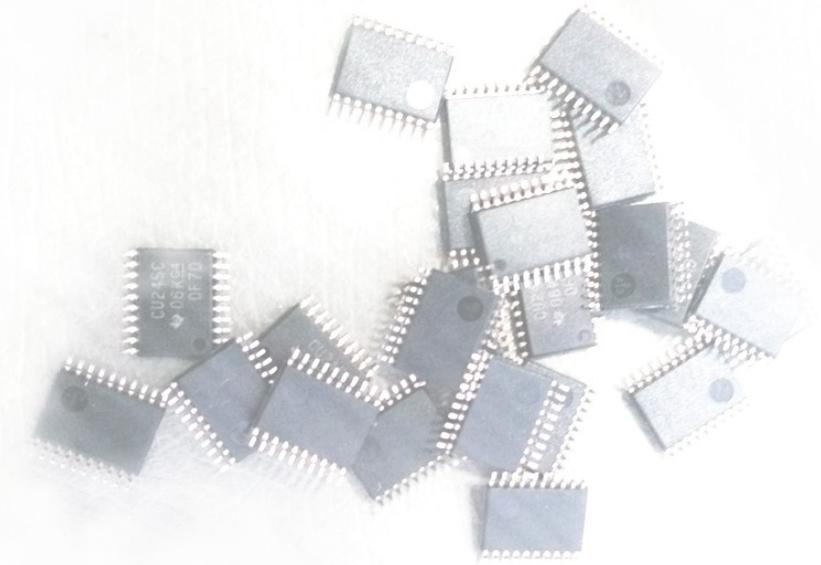


100nF X7R Keramikkondensator, Baugröße 0402,  $\geq 6.3V$

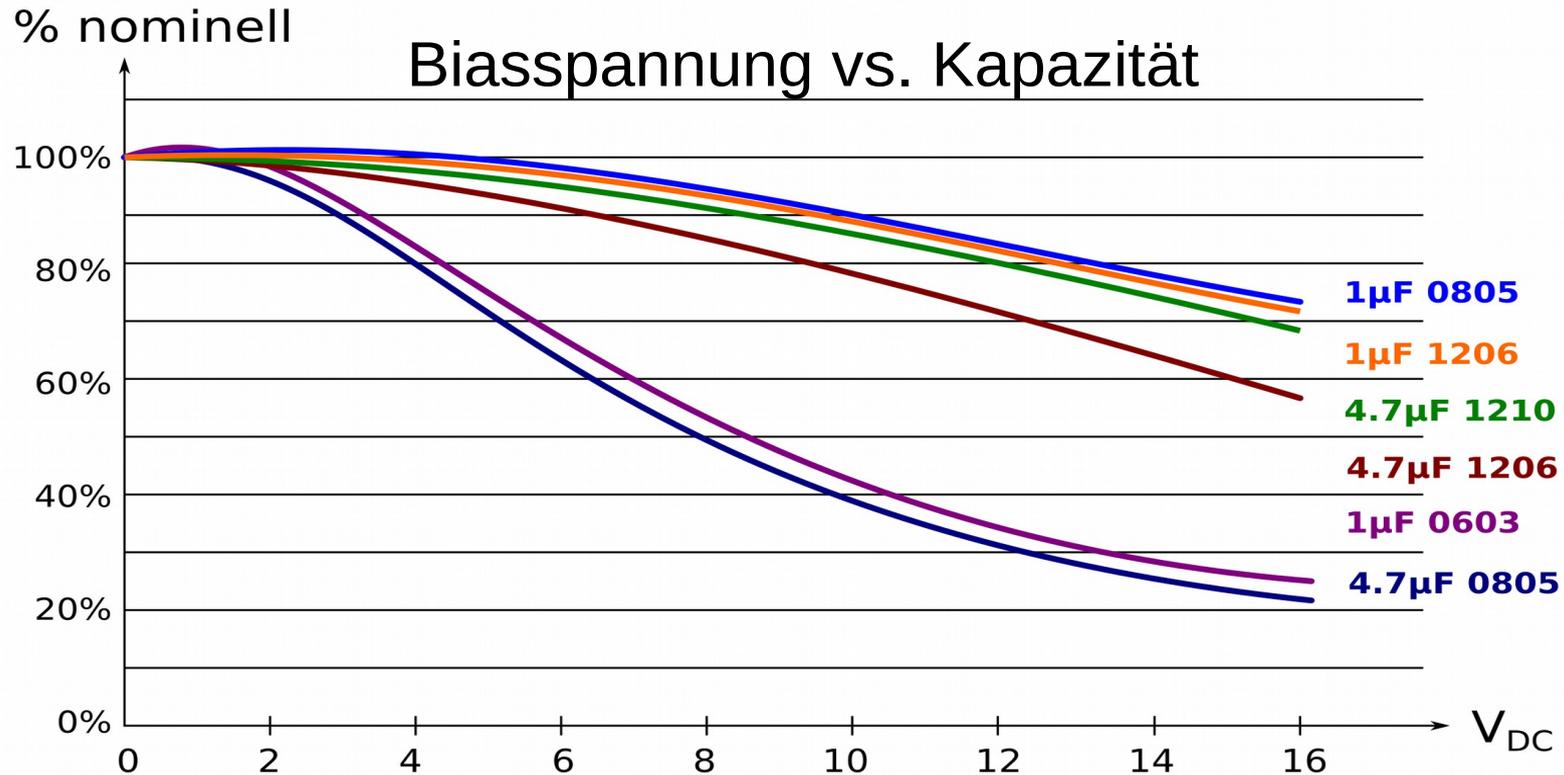
Fluten!?

(Bei BGAs kann die Sache anders aussehen....)

„Der Kondensator hat  
1  $\mu\text{F}$ “



# „Der Kondensator hat 1 $\mu\text{F}$ “



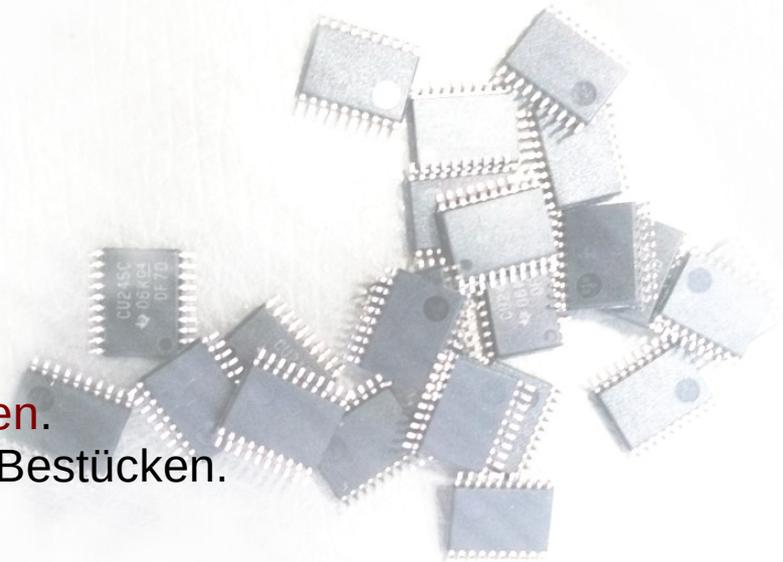
Zusätzlich: Temperatur- und Frequenzabhängigkeit,  
Alterung, Vorgeschichte, ...



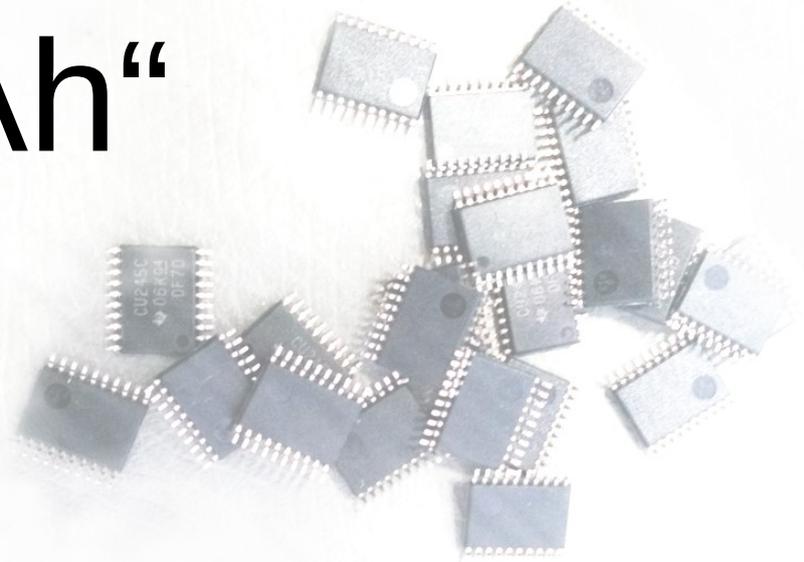
# NP0? C0G? X5R? X7R? Y5V? Z5U?????

- NP0 = C0G = Sehr temperaturstabil ( $\leq \pm 0.3\%$  zwischen  $-55^{\circ}\text{C}$  und  $+125^{\circ}\text{C}$ ), geringe Toleranzen, stabil, kaum „negative“ Effekte. Typ.  $< 1\text{nF}$ .  
Manchmal (z.B. TDK): NP0 bis  $150^{\circ}\text{C}$ , C0G bis  $125^{\circ}\text{C}$
- X7R:  $\pm 15\%$  Abweichung von  $-55^{\circ}\text{C}$  bis  $+125^{\circ}\text{C}$
- X5R: Bis  $+85^{\circ}\text{C}$
- X8R: Bis  $150^{\circ}\text{C}$
- Y5V:  $+22.. -82\%$  von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $85^{\circ}\text{C}$
- Z5U:  $+22.. -56\%$  von  $10^{\circ}\text{C}$  bis  $85^{\circ}\text{C}$  (!)

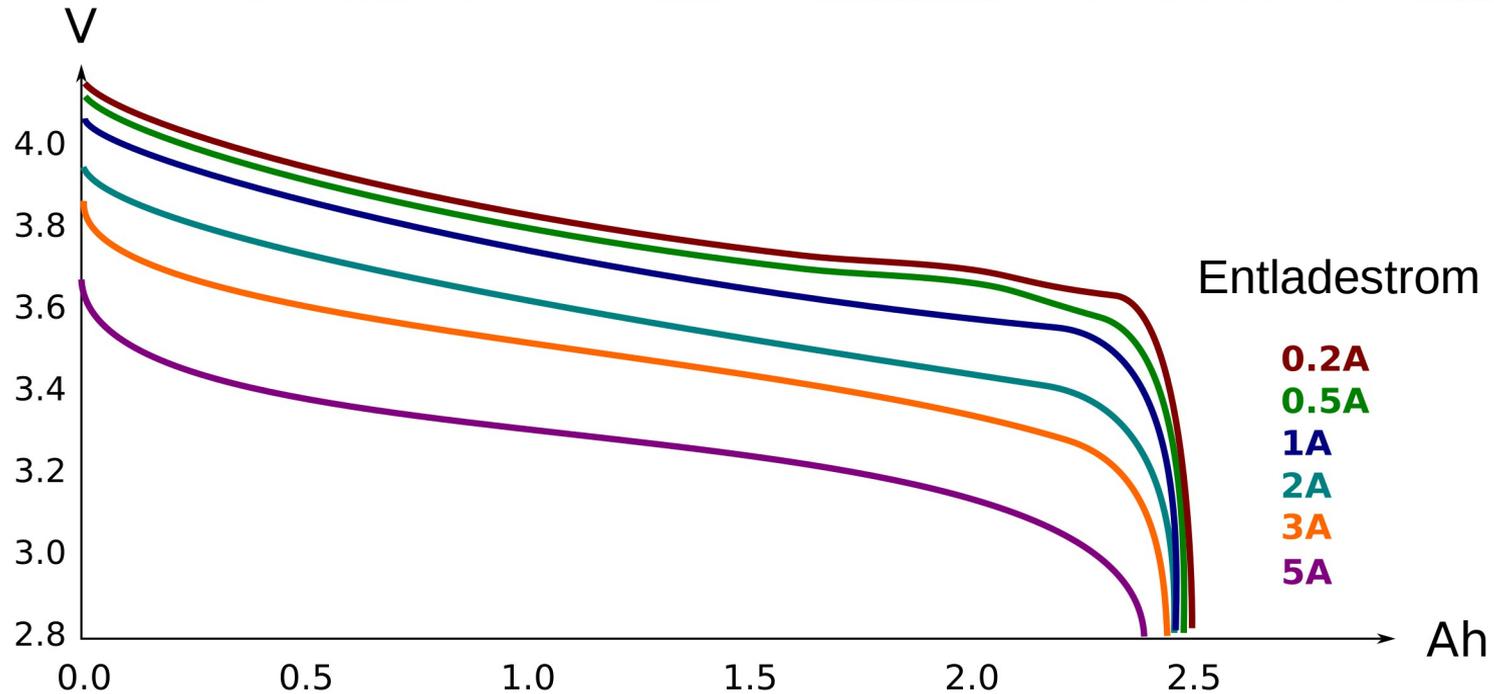
Empfehlung: (SMD) Kerkos beim Handlöten **vorwärmen**.  
80% der Ausfälle (angeblich) durch zu viel Kraft beim Bestücken.



„Die Batterie / Akku hat  
2600 mAh“



~~„Die Batterie / Akku hat 2600 mAh“~~



Zusätzlich: Temperaturabhängigkeit, Alterung, Vorgeschichte, ...

Im Datenblatt steht...

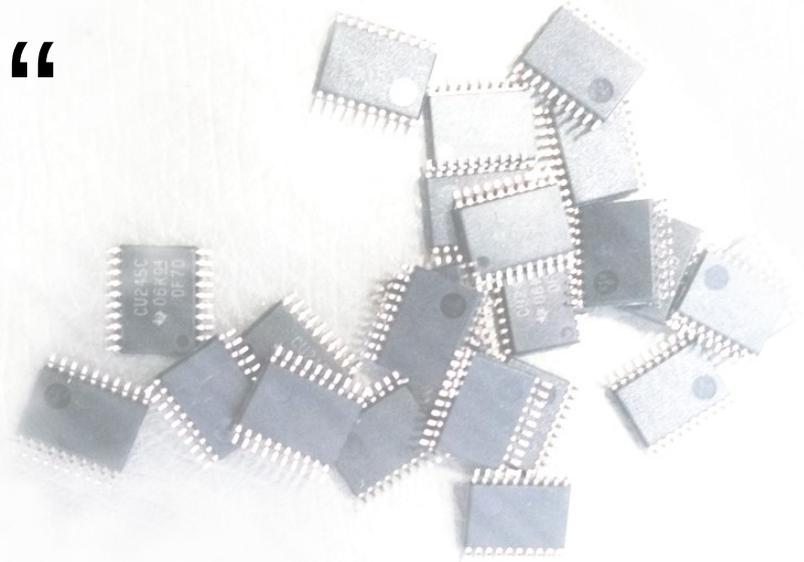


Das Datenblatt wird auch nur von  
Menschen geschrieben...

→ Errata + Versionsgeschichte



# Das Datenblatt Teil 2: „typical“



# Datenblatt „typical“

- „Typical on an IC data sheet means NOT TESTED.“ (*Maxim*)
- „The typical values are not tested and are not guaranteed on shipped production material.“ (*Texas Instruments*)
- „Typical values are all at **TA=25°C** conditions and represent the **most likely** parametric norm as determined **at the time of characterization**. Actual typical values **may vary over time** and will also depend on the application and configuration. The typical values are **not tested** and are **not guaranteed** on shipped production material.“ (*Diodes inc.*)

**Wenn kritisch → MIN / MAX verwenden!**

# Das Datenblatt Teil 3: „(Absolute) Maximum Ratings“



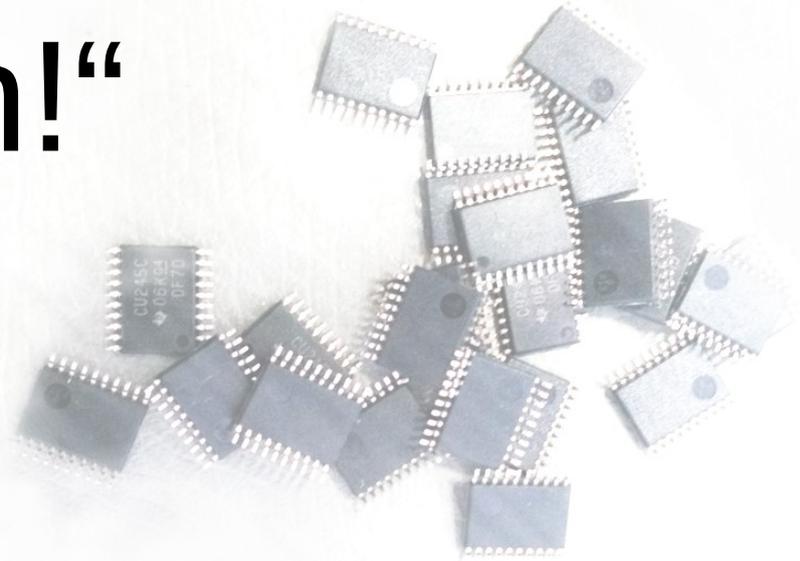
# Datenblatt „Absolute Maximum Ratings“

- „Stresses beyond those listed under 'Absolute Maximum Ratings' **may cause permanent damage** to the device. This is a **stress rating only** and functional operation of the device at these or other conditions beyond those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods **may affect device reliability.**“ (Atmel)
- „Absolute Maximum means do not exceed or the part may break.“ (*Maxim*)

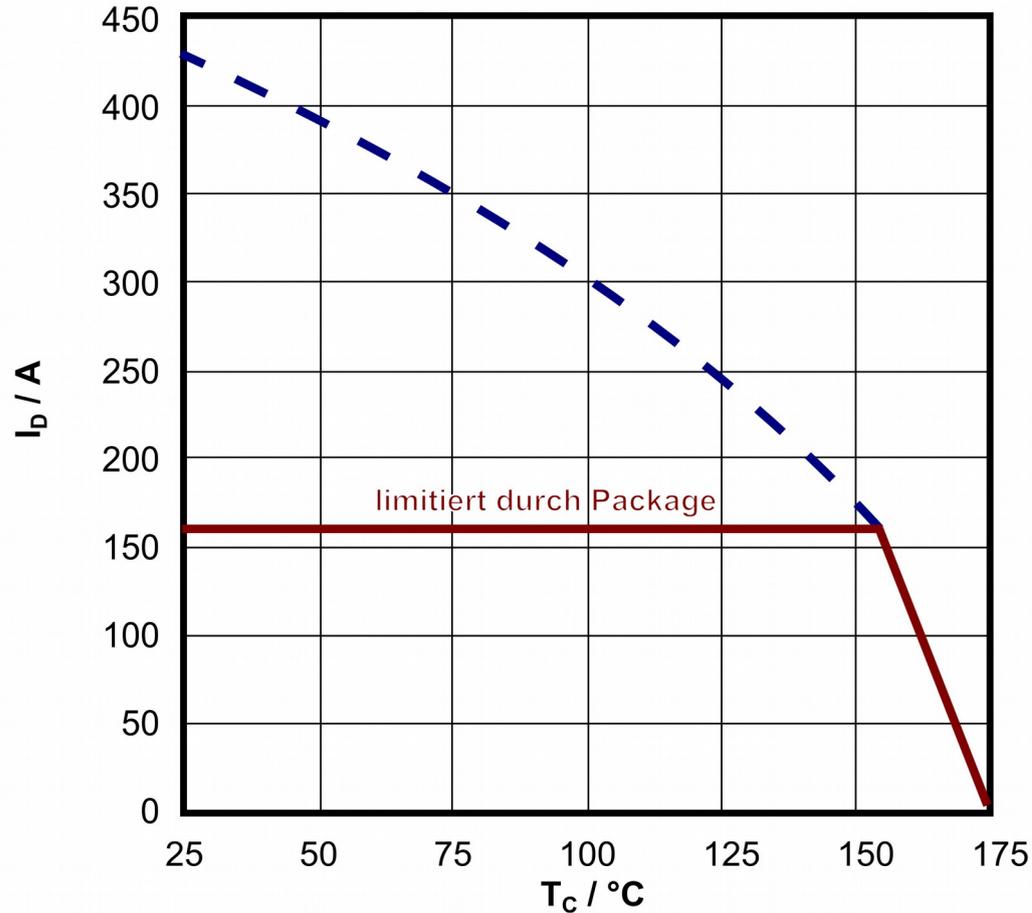


**„Electrical Characteristics“ verwenden!**

„Mein FET kann 429A  
schalten!“



~~„Mein FET kann 429A schalten!“~~



„Silicon Limited“  
„Package Limited“



„Meine  
Motortreiberschaltung  
kann 40A!“

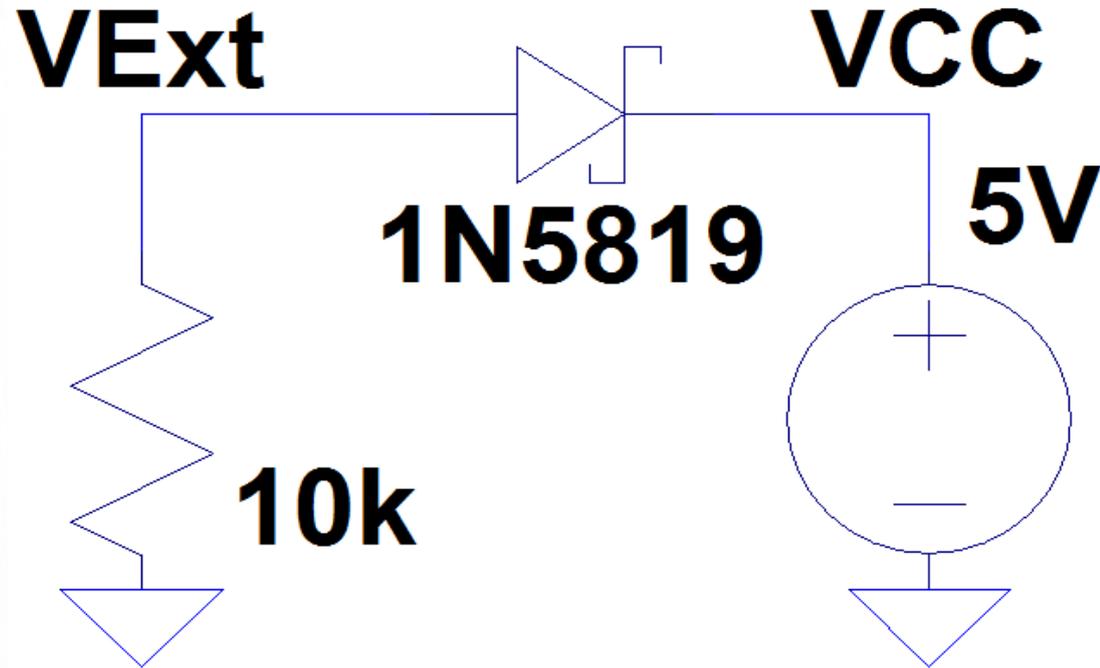


~~„Meine Motortreiberschaltung kann 40A!“~~

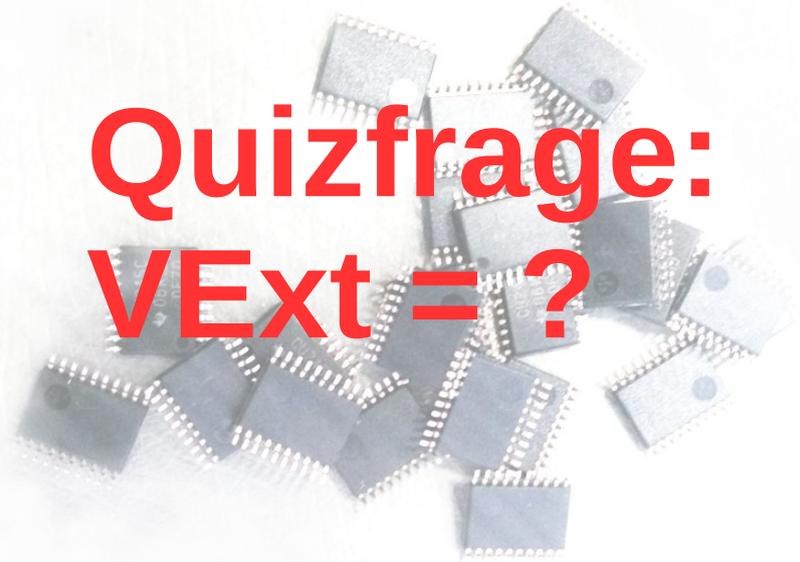
Aber nicht bei höheren Temperaturen, nicht ohne Kühlung, die Pinleiste kann nur 3A pro Pin und die Schraubklemme 20A bei Raumtemperatur!



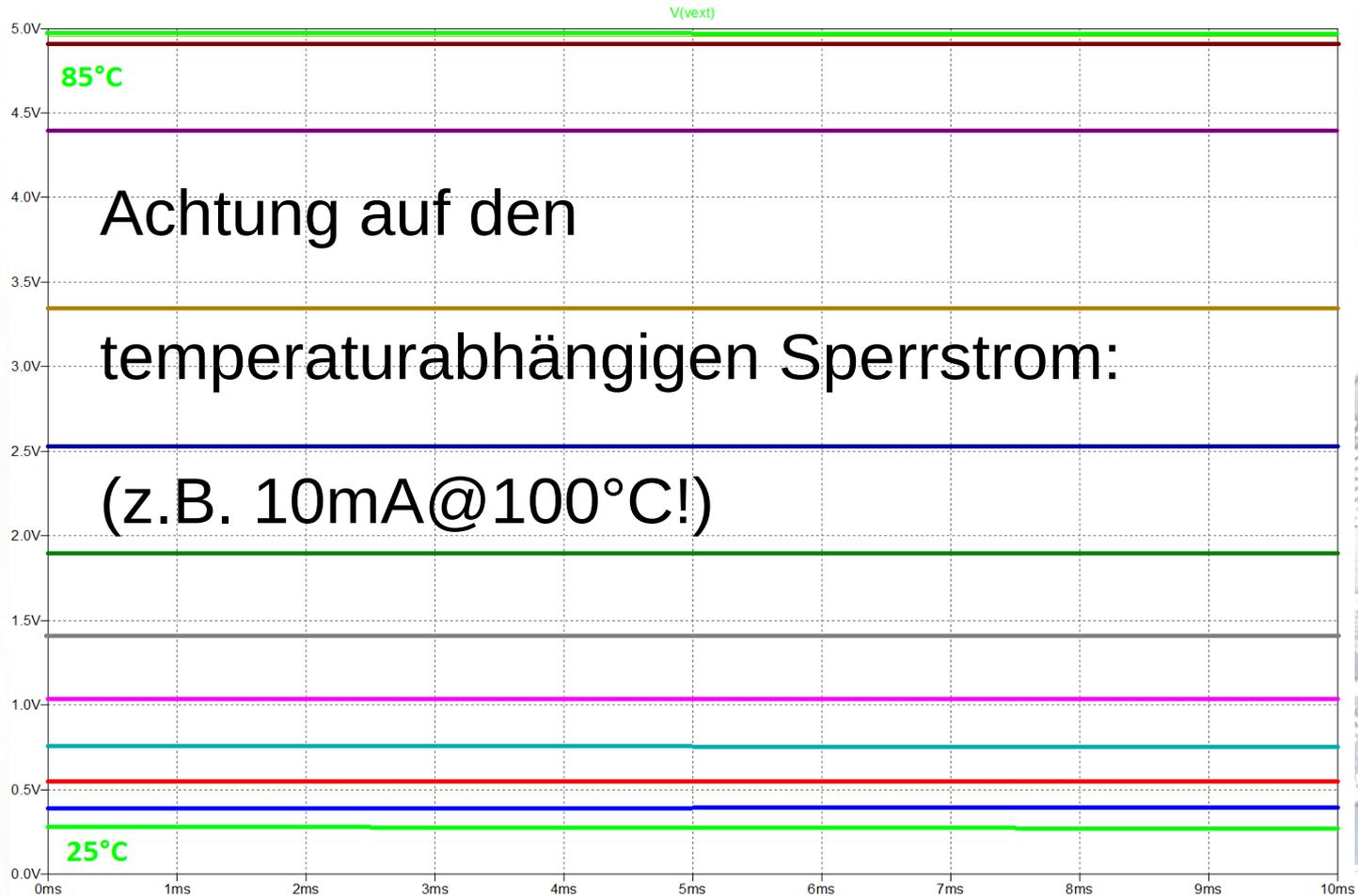
# „Schottkydioden sind super!“



Quizfrage:  
**VExt = ?**



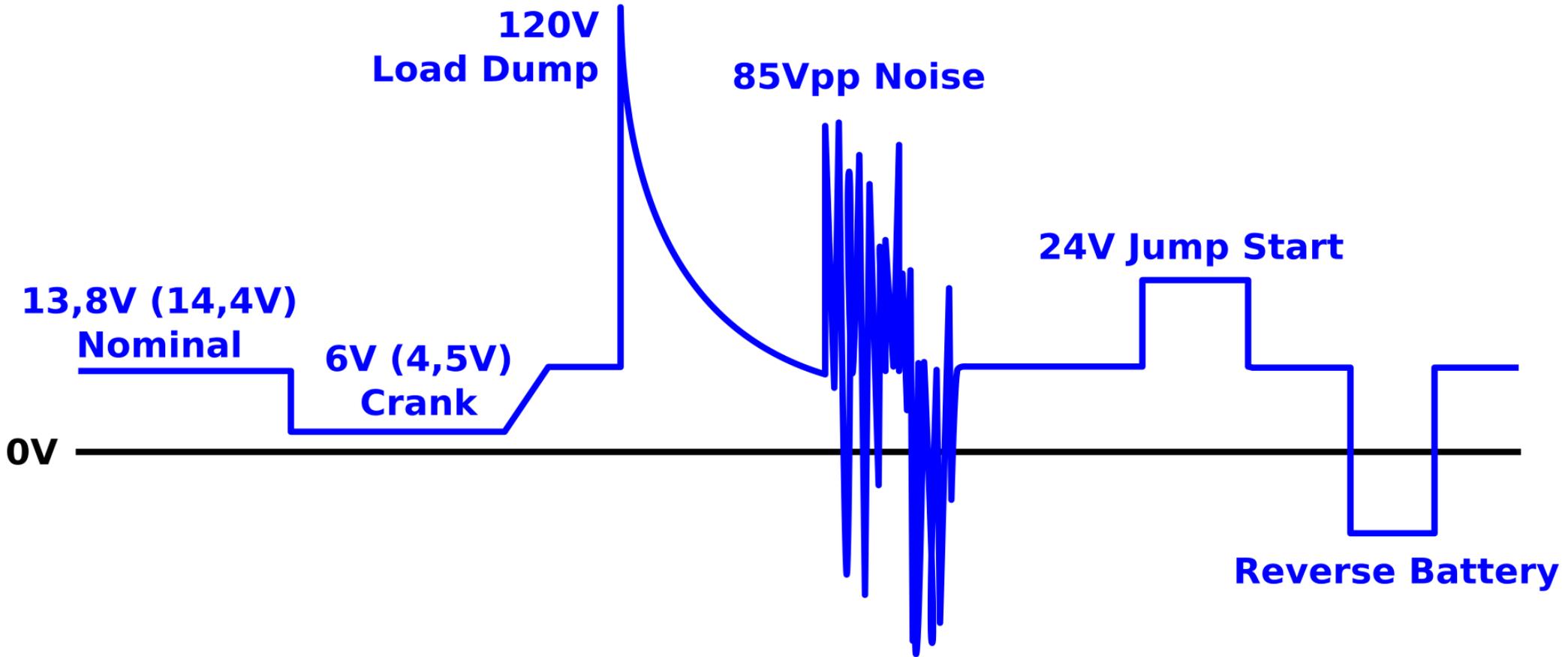
# Schottkydioden sind nicht immer geeignet...



# „12V Bordnetz im Auto“



# „12V Bordnetz im Auto“



„Automotive“ = -40 bis  
+125°C“



~~„Automotive“ = -40 bis +125°C~~

Nach AEC-Q100:

Grade 0: -40°C... +150°C

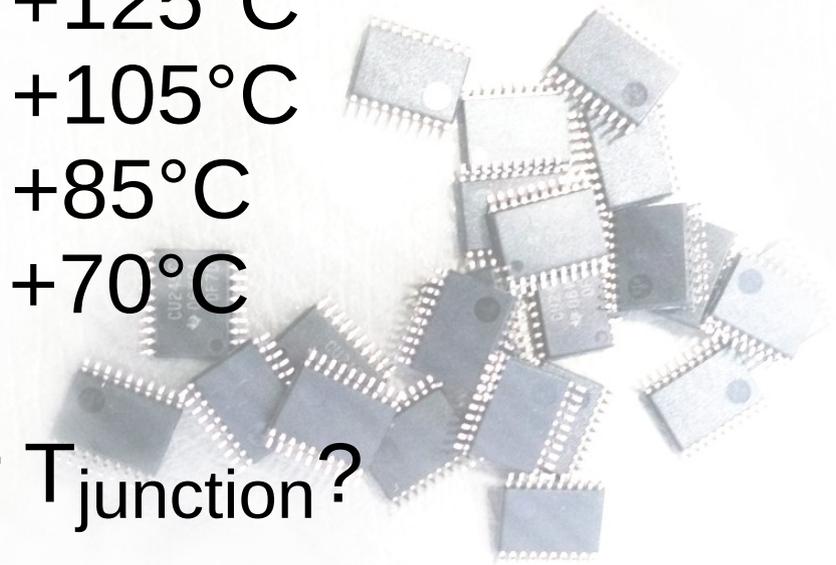
Grade 1: -40°C... +125°C

Grade 2: -40°C... +105°C

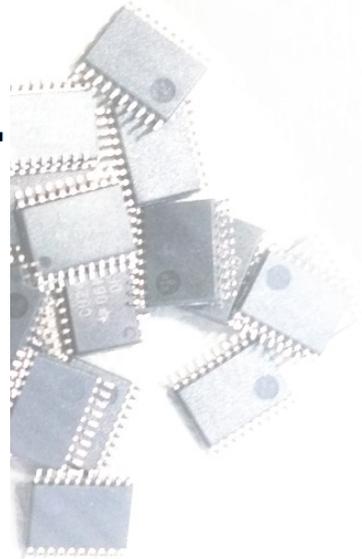
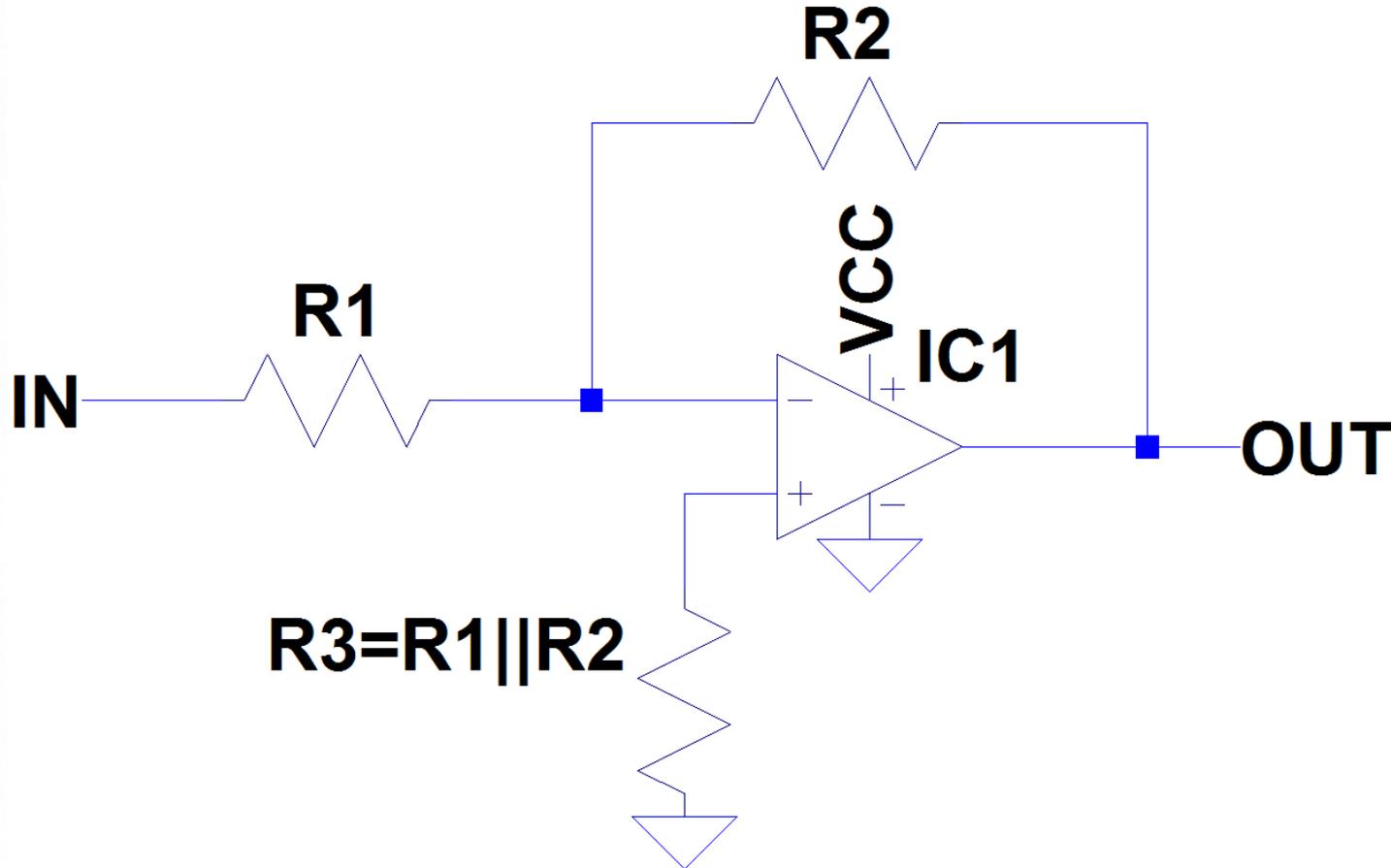
Grade 3: -40°C... +85°C

Grade 4: 0°C... +70°C

$T_{\text{ambient}}$ ,  $T_{\text{case}}$  oder  $T_{\text{junction}}$ ?



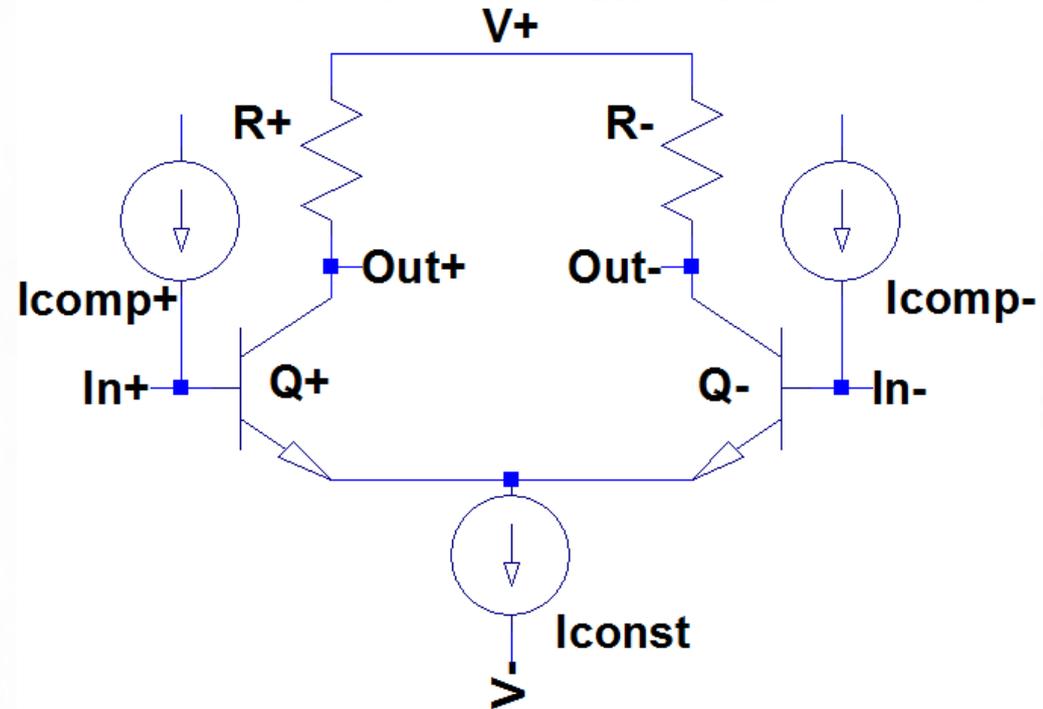
# „R3 kompensiert den Biasstrom“



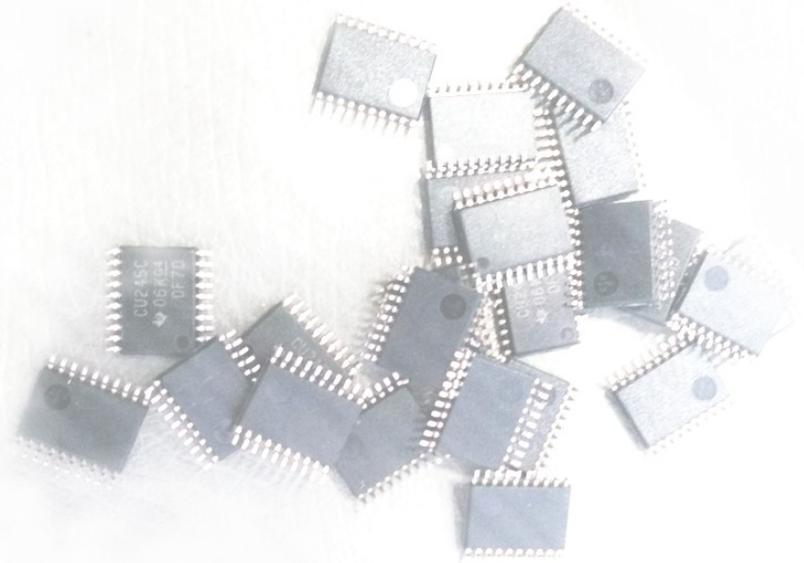
~~„R3 kompensiert den Biasstrom“~~

Nur bei bipolaren OPVs  
OHNE  
*Input Bias Current  
Compensation*

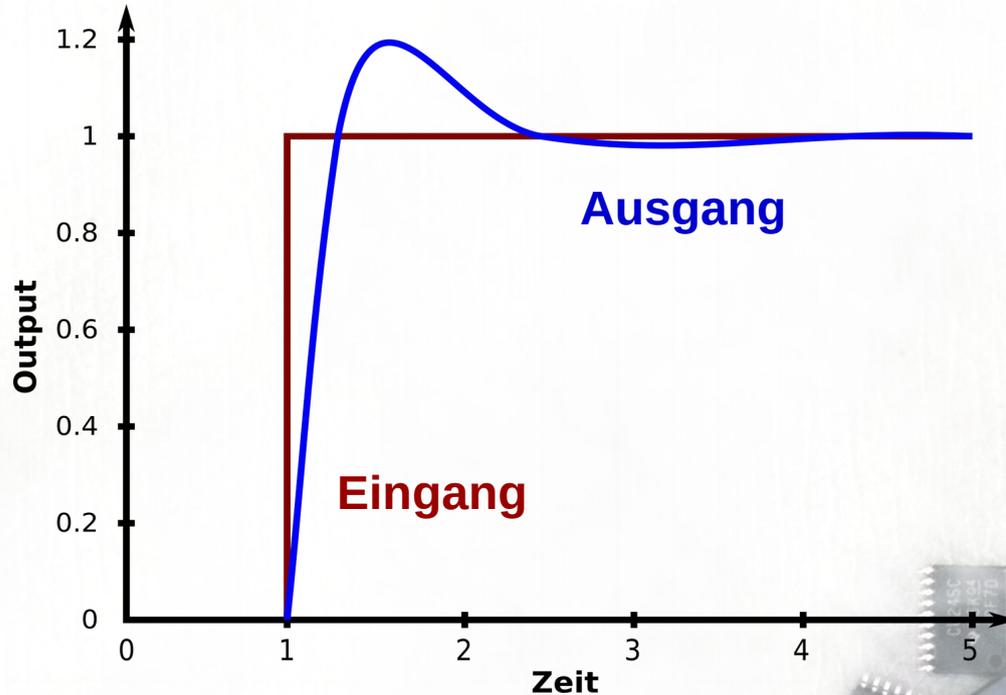
Q: Wie erkennt man  
kompensierte OPVs?  
A:  $I_b$  ist mit  $\pm$  spezifiziert



„Moderne OPVs sind stabil“



~~„Moderne OPVs sind stabil“~~

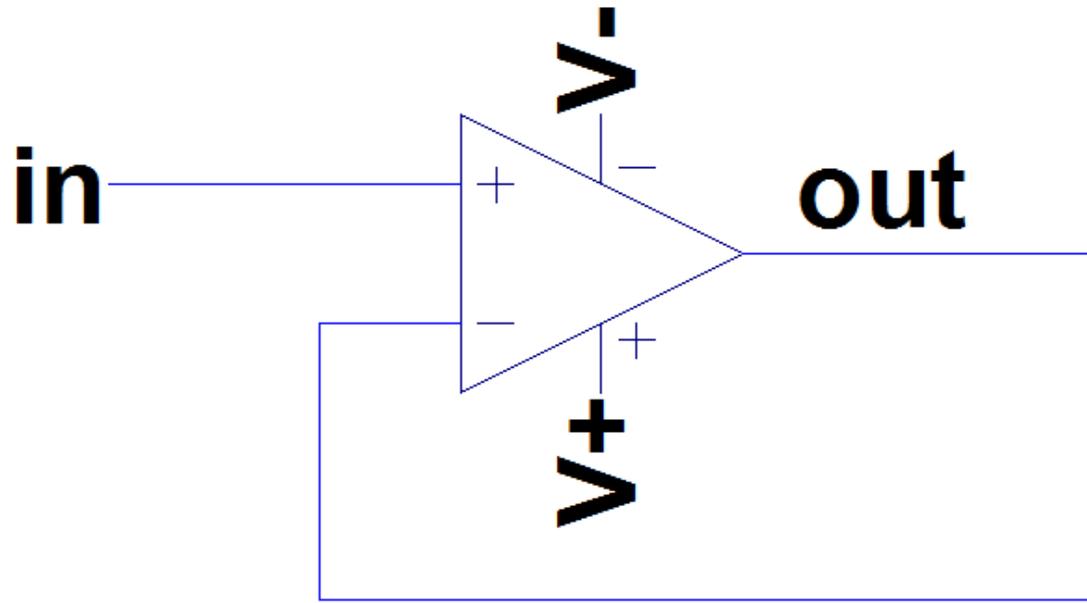


Overshoot @  $G=1 < 2.3\text{dB}$  ( $\sim$ Faktor 1.3)

$\rightarrow >45^\circ$  Phase Margin  $\rightarrow$  Ok

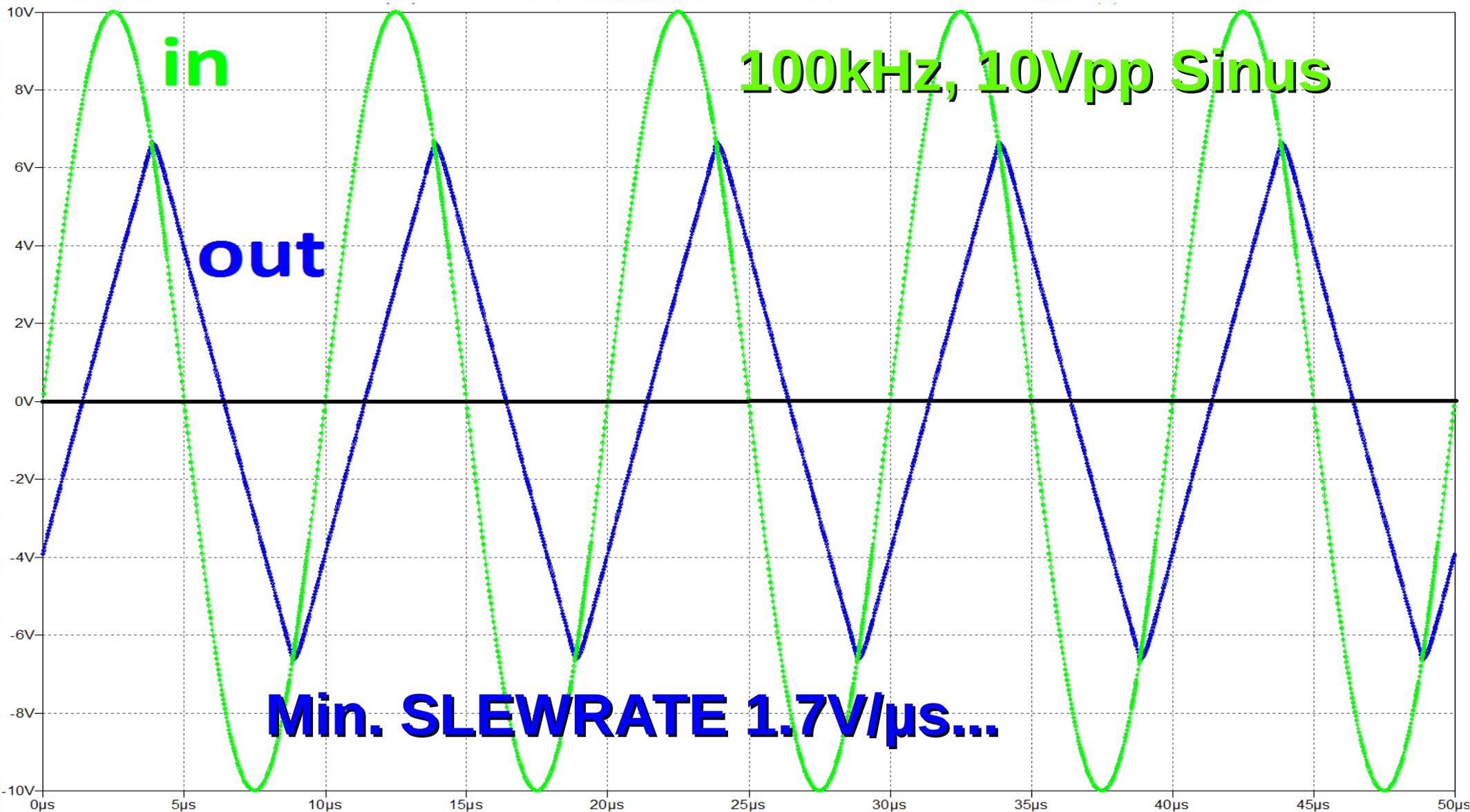


# „Ein schneller OPV“

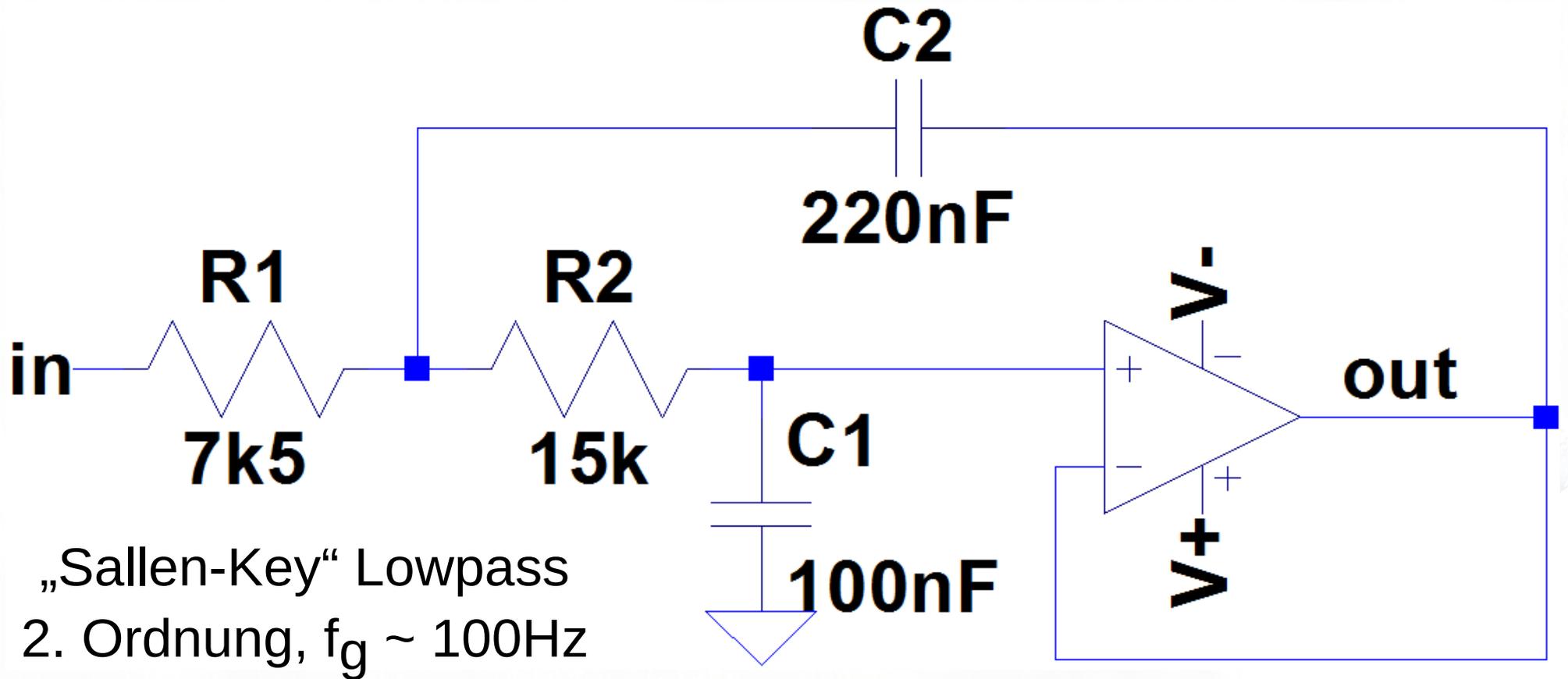


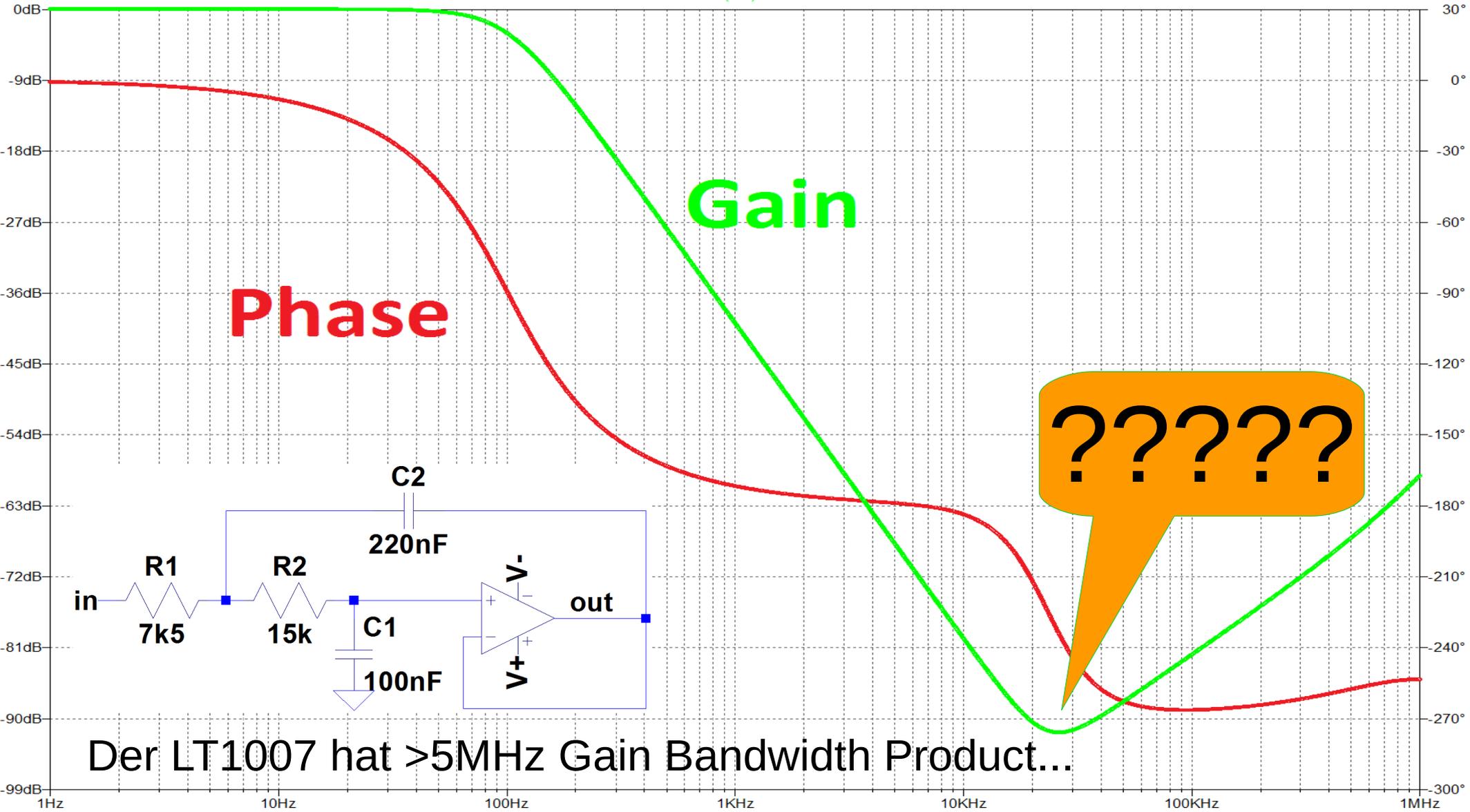
(LT1007) GBP  $>5\text{MHz}$ ,  $\pm 15\text{V}$  Versorgung,  
100kHz  $10\text{V}_{\text{pp}}$  Sinus am Eingang



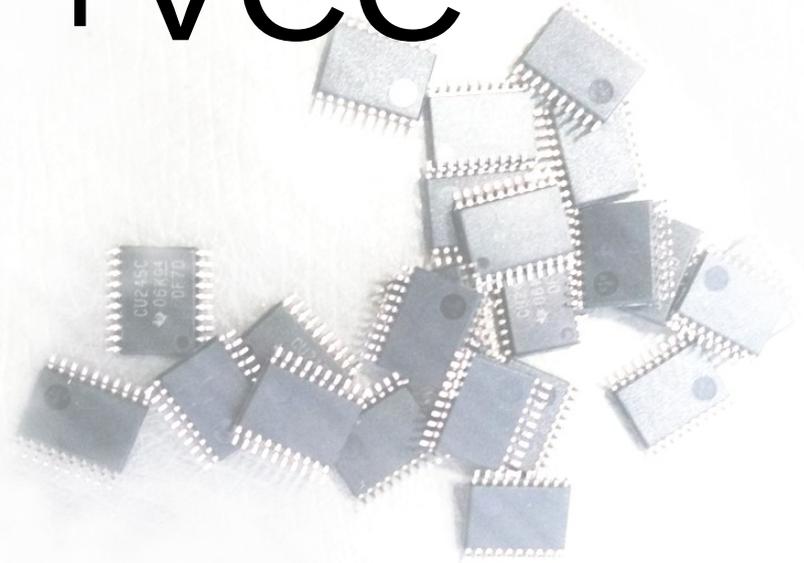


# „Aktive Filter sind super“





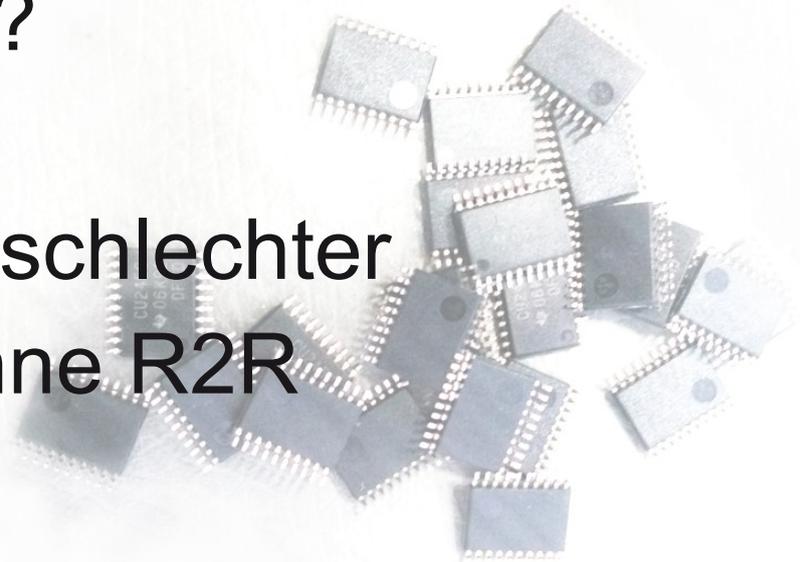
„Rail to Rail =  
von  $-V_{CC}$  bis  $+V_{CC}$ “



~~„Rail to Rail = von  $-V_{CC}$  bis  $+V_{CC}$ “~~

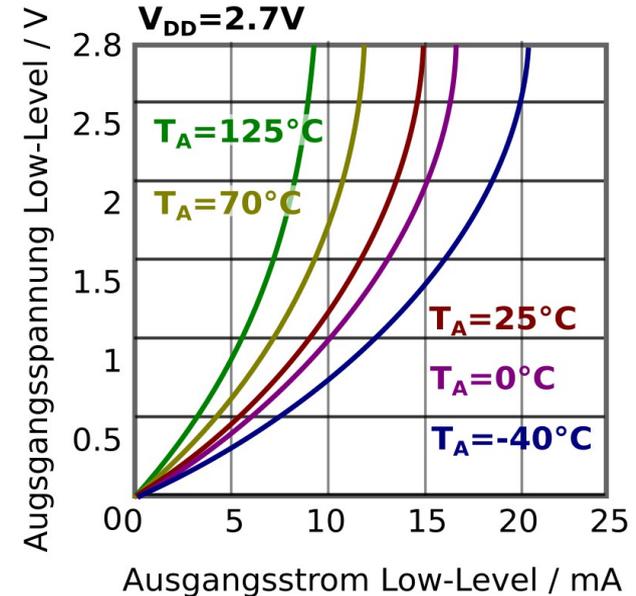
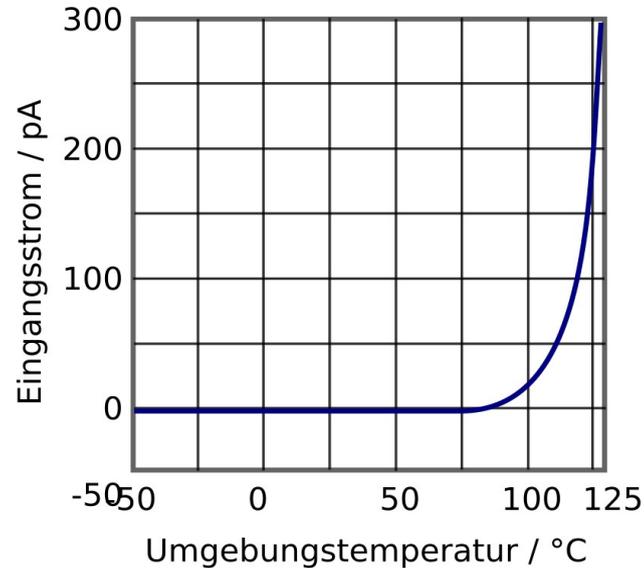
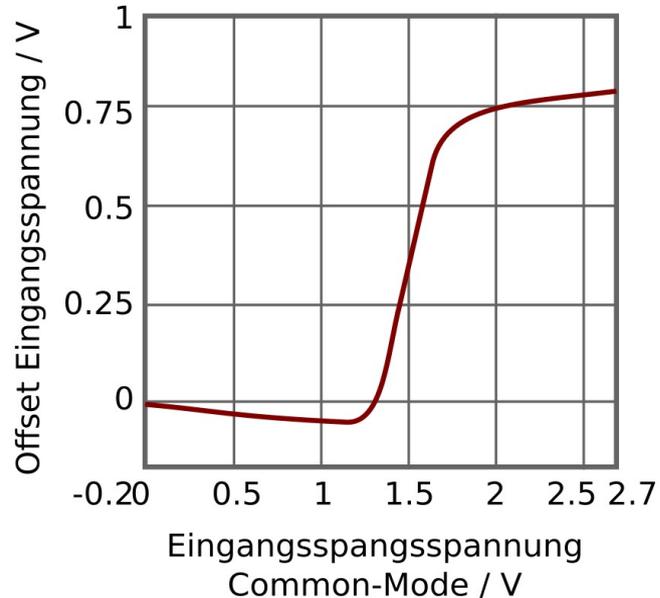
Eingang? Ausgang?  
Ein- und Ausgang?  
Welche Last?

Bonus: Eigenschaften schlechter  
als bei Varianten ohne R2R

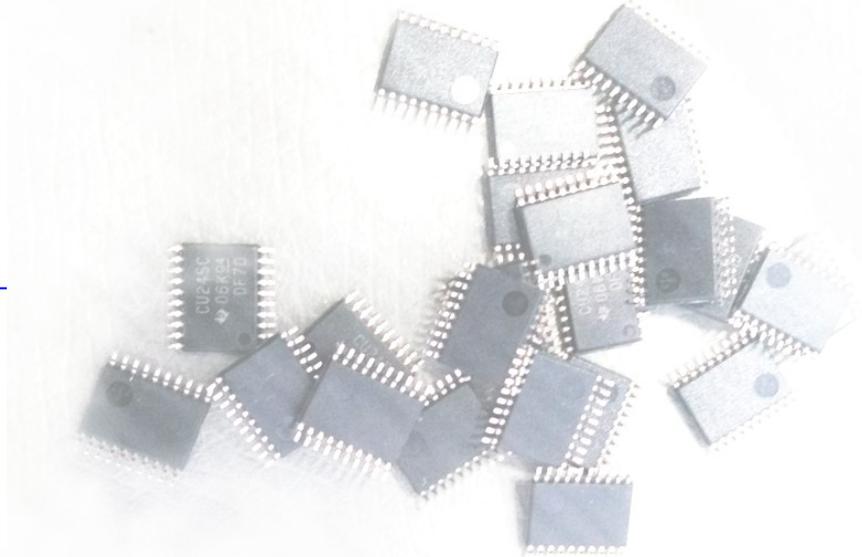
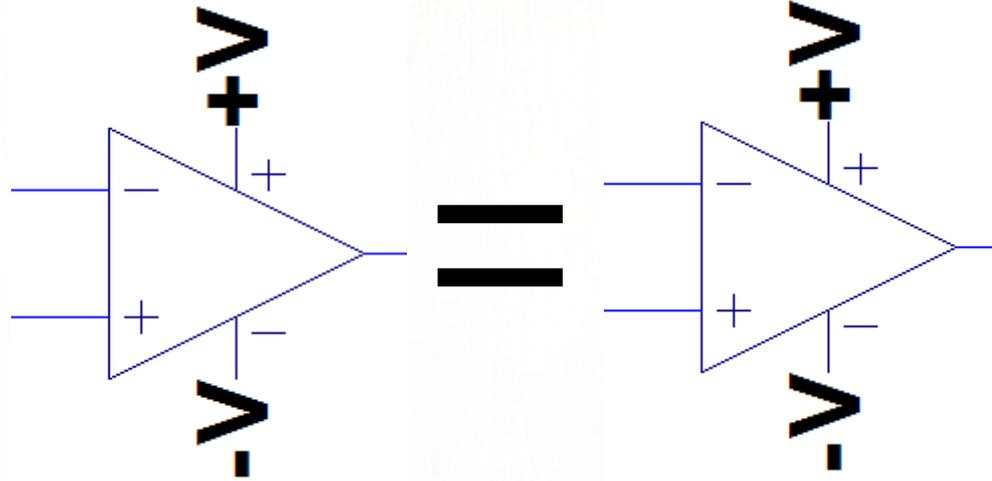


# Reale Operationsverstärker

Fast alle Parameter sind abhängig von anderen



„Operationsverstärker  
kann man auch als  
Komparatoren verwenden“



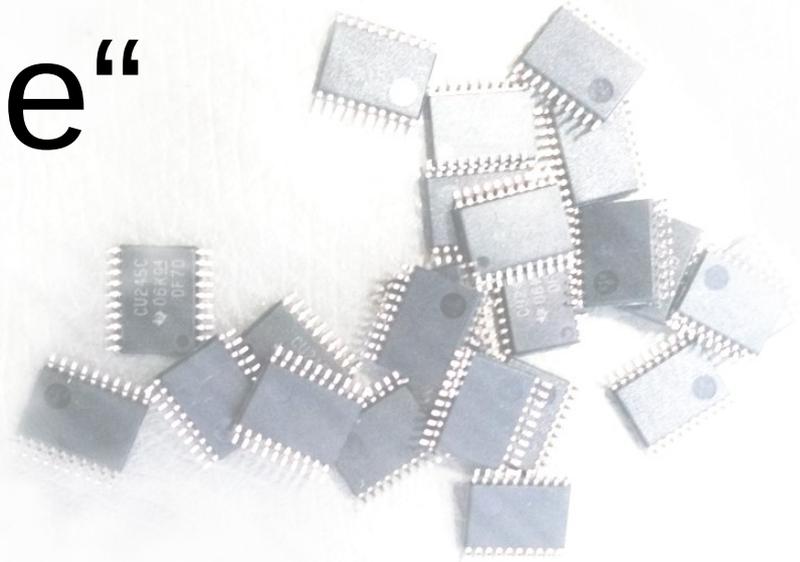
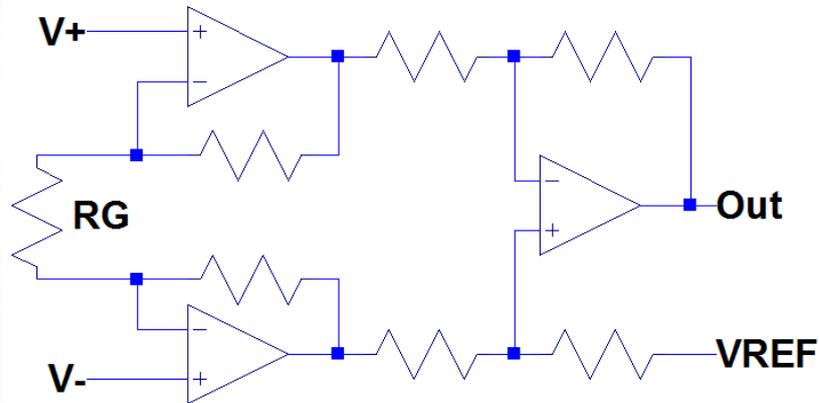
~~„Operationsverstärker kann man auch als  
Komparatoren verwenden“~~

**Nein**

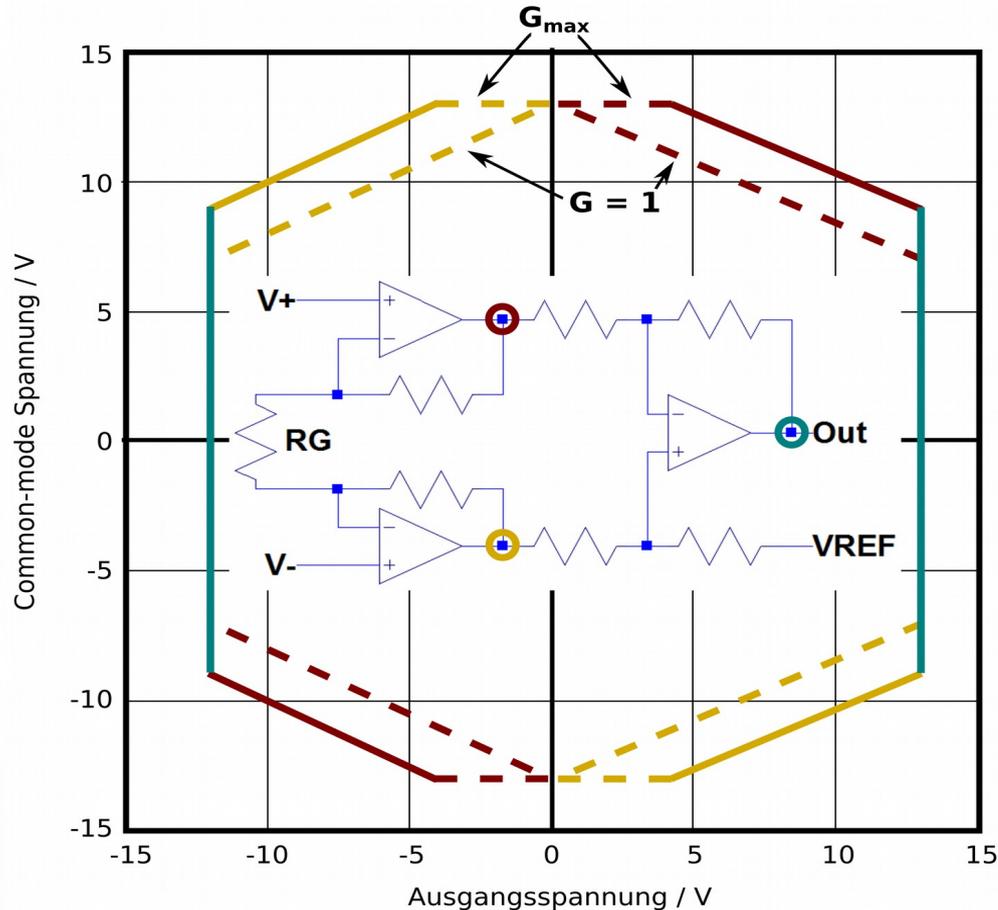
Völlig andere Ausgangsstufe  
(linear vs. schnell schaltend / open collector)



# „Instrumentenverstärker verstärken die Spannungsdifferenz der Eingänge“



# „Instrumentenverstärker verstärken die Spannungsdifferenz der Eingänge“



Ja, aber „Diamond Plot“ beachten!

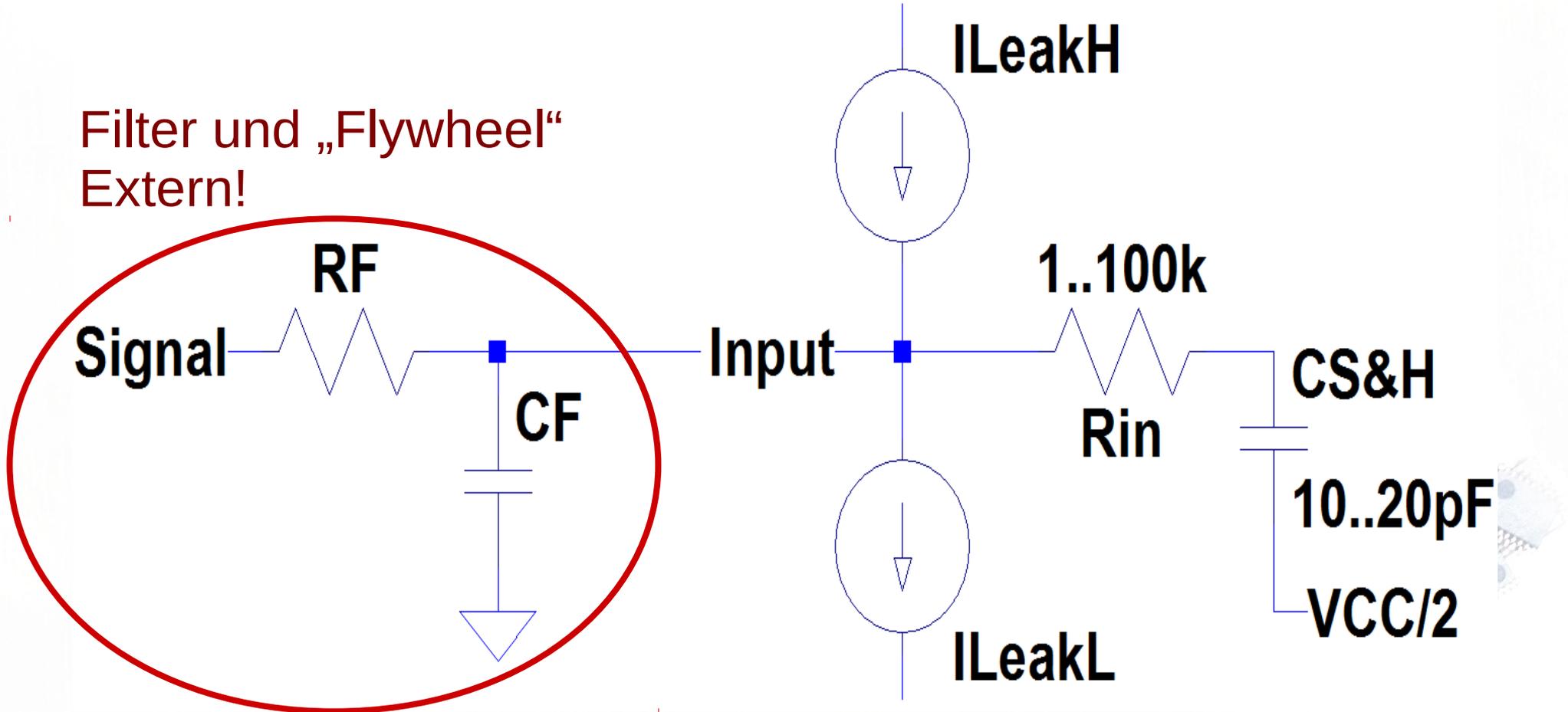


„Ein (SAR)ADC hat  
hochohmige Eingänge“



# „Ein (SAR)ADC hat hochohmige Eingänge“

Filter und „Flywheel“  
Extern!

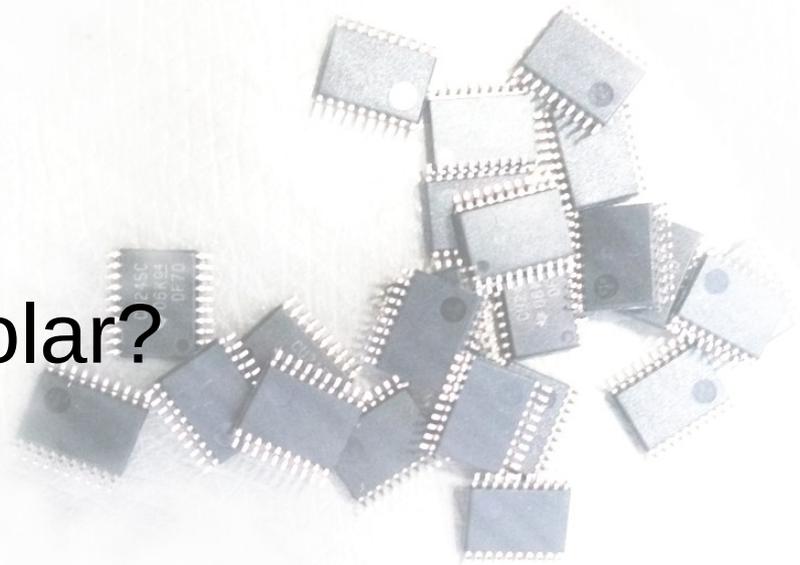


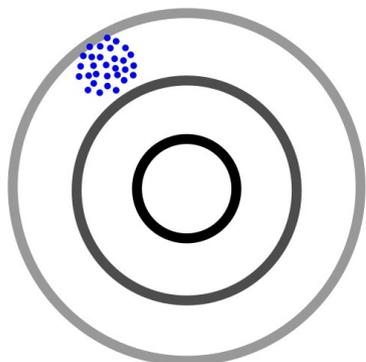
„Ich habe einen  
superpräzisen, teuren  
14/16/18/24/... Bit ADC“



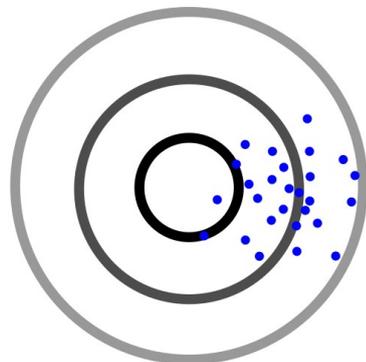
~~„Ich habe einen superpräzisen, teuren  
14/16/18/24/... Bit ADC“~~

- INL? DNL?
- Gain Error?
- Offset?
- SNR?
- Unipolar/Bipolar?
- Input range?

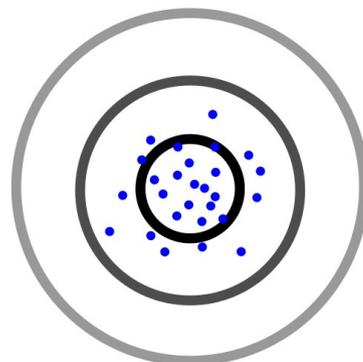




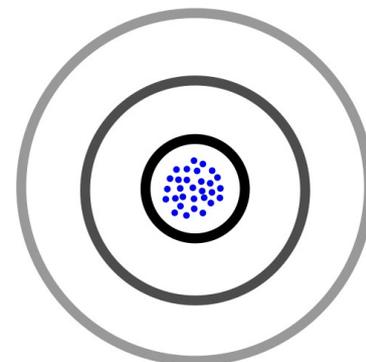
**präzise\*, aber  
nicht genau**



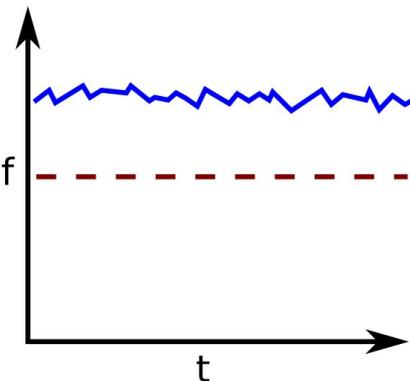
**nicht präzise,  
nicht genau**



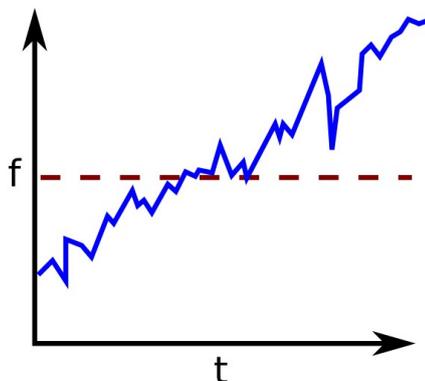
**genau, aber  
nicht präzise**



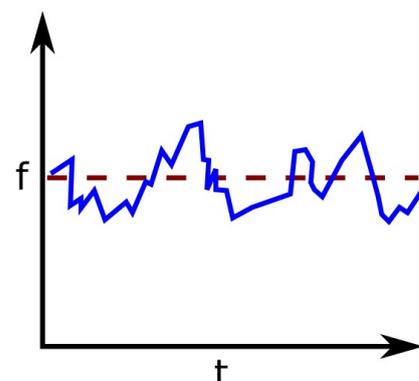
**genau und  
präzise**



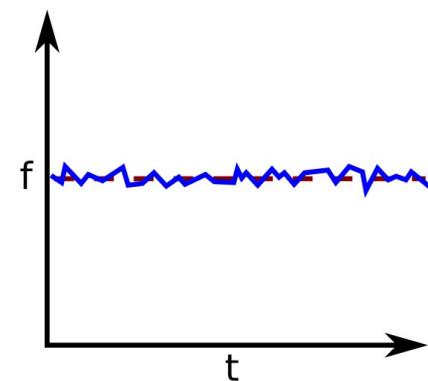
**stabil, aber  
nicht genau**



**nicht stabil,  
nicht genau**



**genau, aber  
nicht stabil**



**genau und  
stabil**

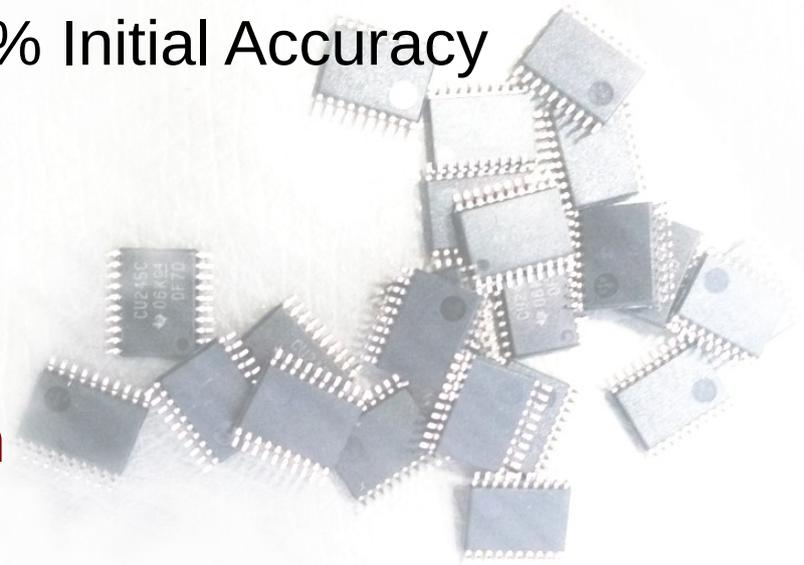
**\* Präzision = Wiederholgenauigkeit**

# Referenzspannungen

- LTZ1000: 0.05ppm/°C Drift (beheizt...), 4% (!) Initial Accuracy
  - LT1019: 10ppm/°C Drift, 0.05% Initial Accuracy
  - LM20xx (mit VREF/2): 8ppm/°C Drift, 0.05% Initial Accuracy
  - LM40xx (Shunt): 10ppm/°C Drift, 0.05% Initial Accuracy
- + Alterung (bei allen)**

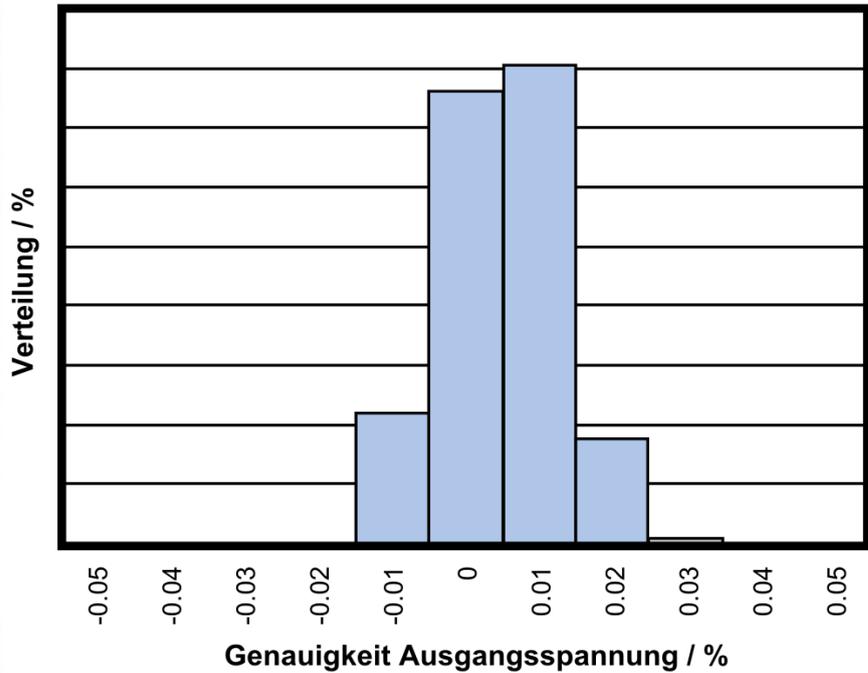
**16Bit: 1LSB = 0.0015% = 15ppm**

**24Bit: 1LSB = 0.000006% = 0.06ppm**

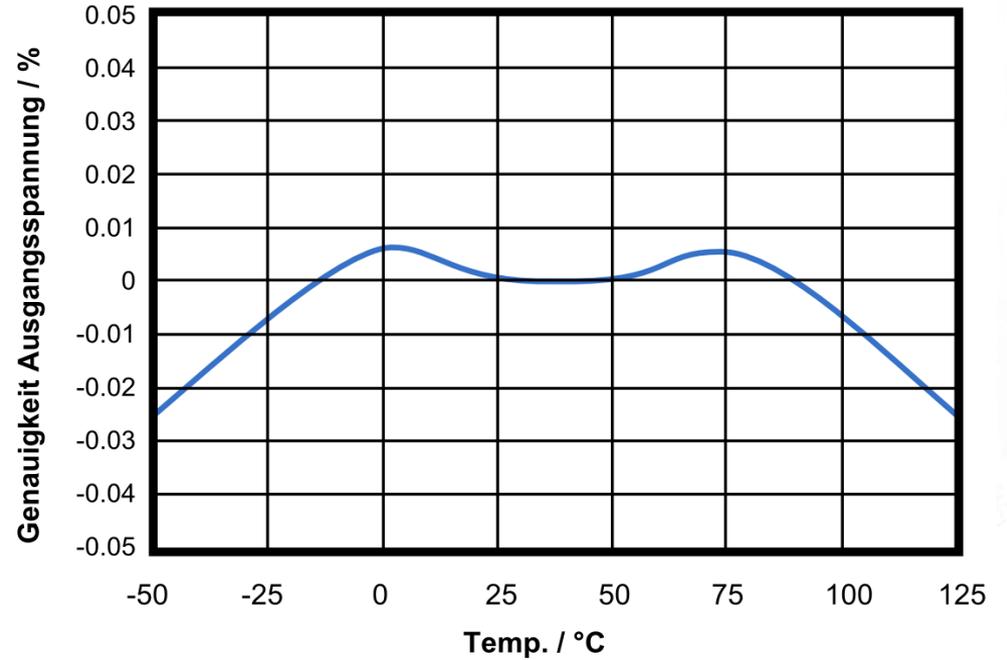


# Referenzspannungen

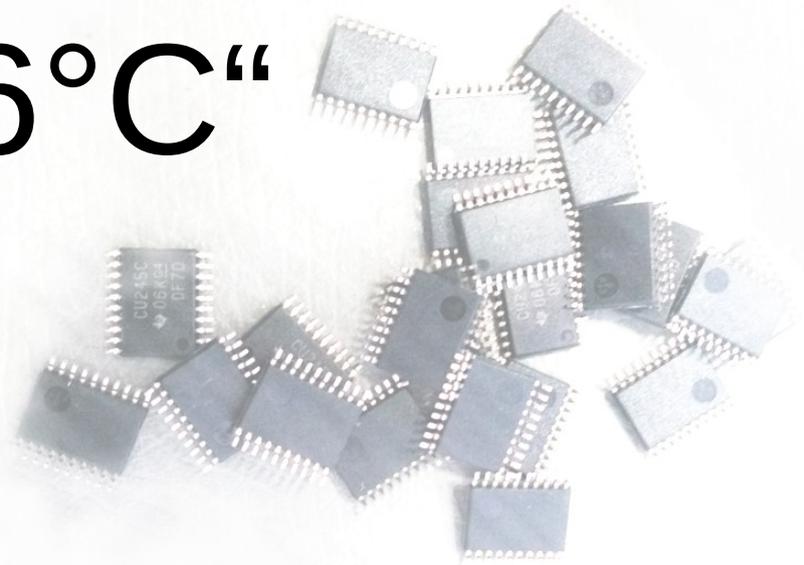
Ursprüngliche Genauigkeit  
Ausgangsspannung



Genauigkeit Ausgangsspannung  
über Temperaturbereich



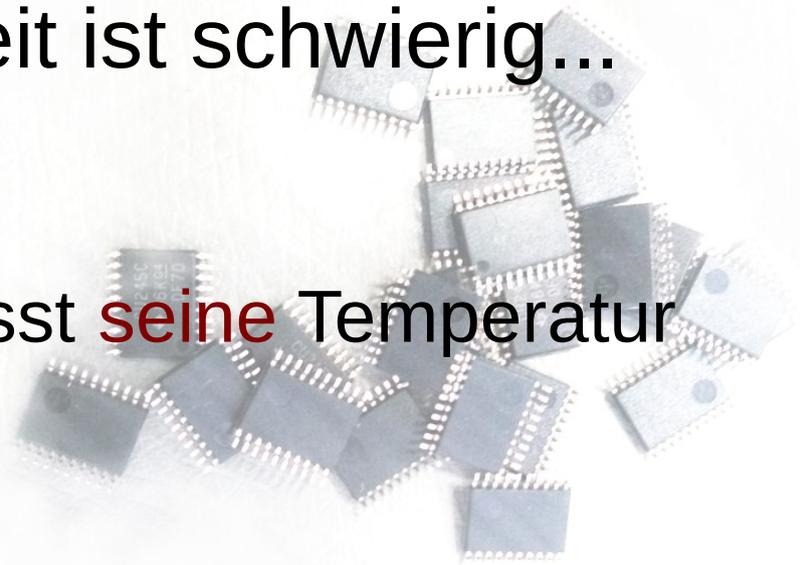
„Temperatur:  
45.140136°C“



~~„Temperatur: 45.140136°C“~~

Besser als 0.5°C Genauigkeit ist schwierig...

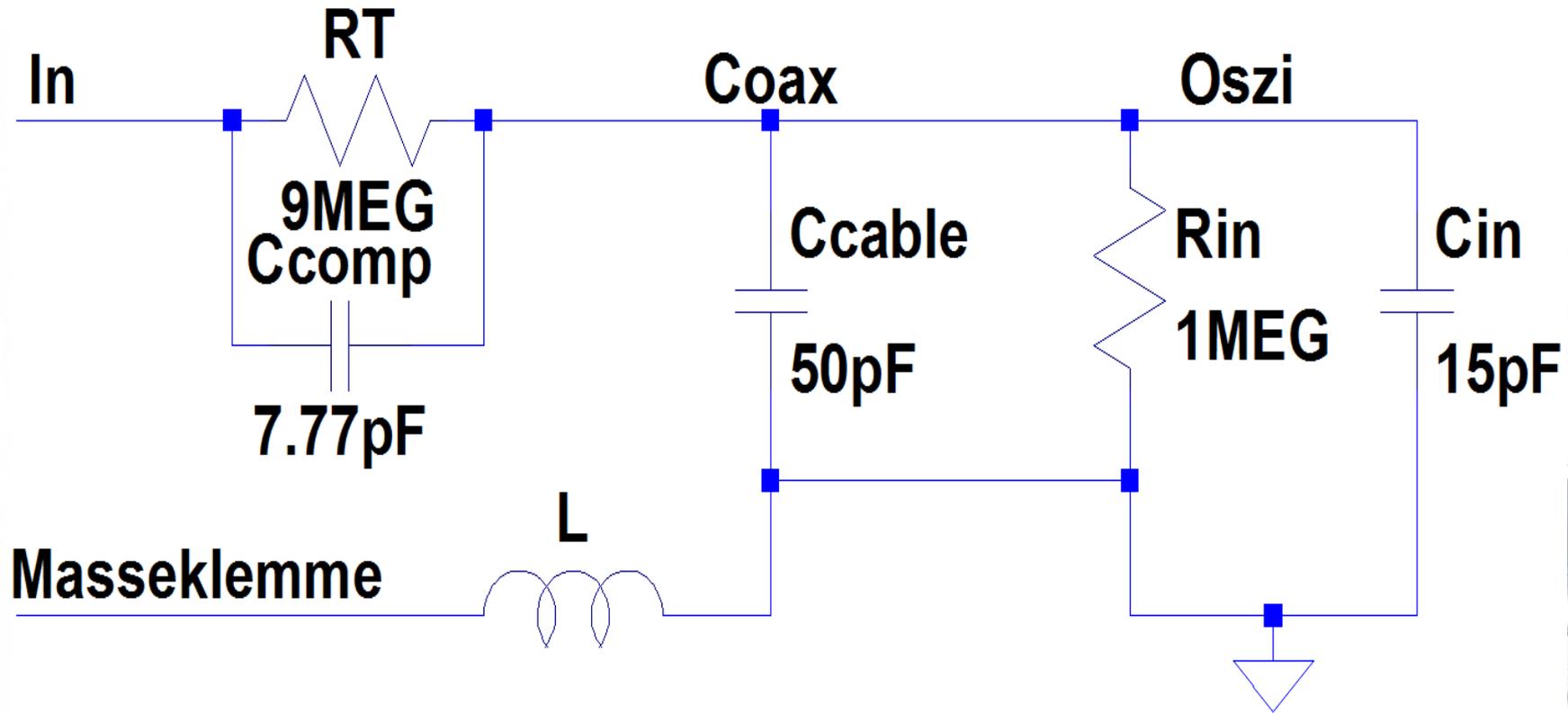
Bonus: Der Temperatursensor misst **seine** Temperatur



„Ein Oszilloskoptastkopf  
ist hochohmig“

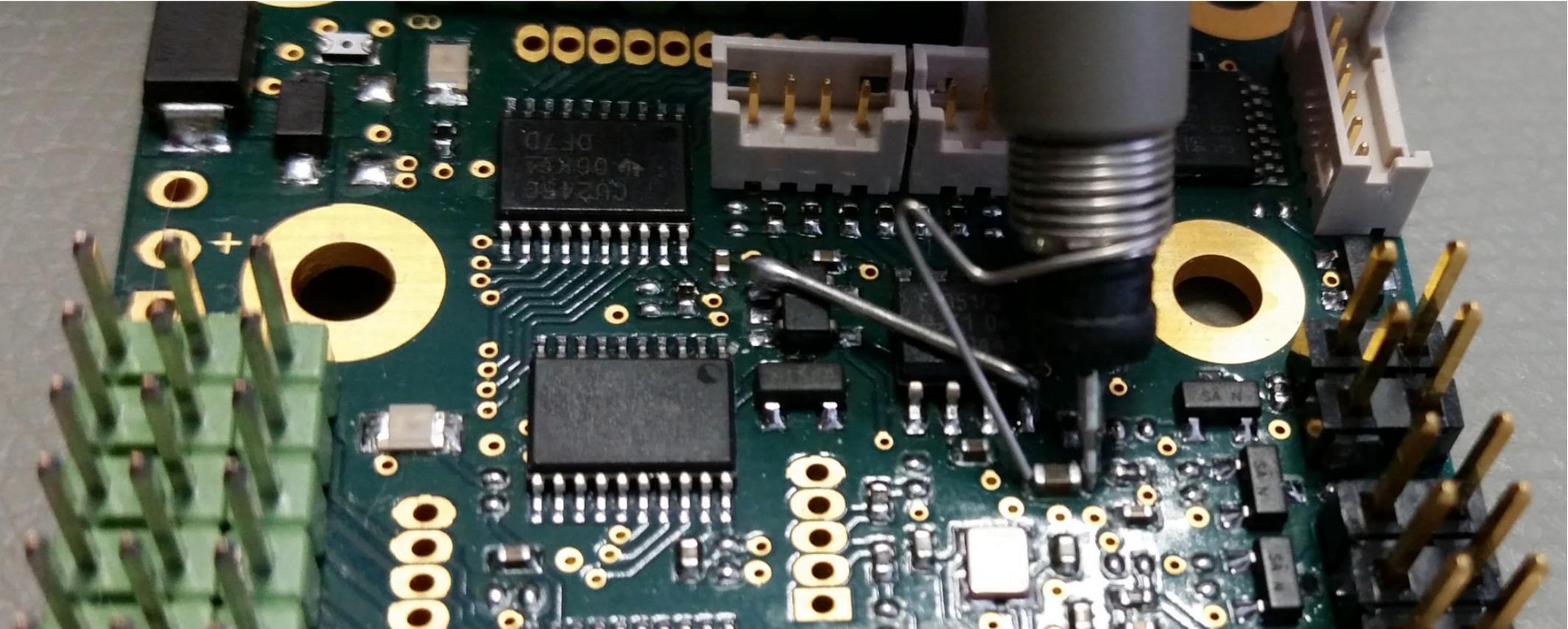


„Ein Oszilloskoptastkopf ist hochohmig“



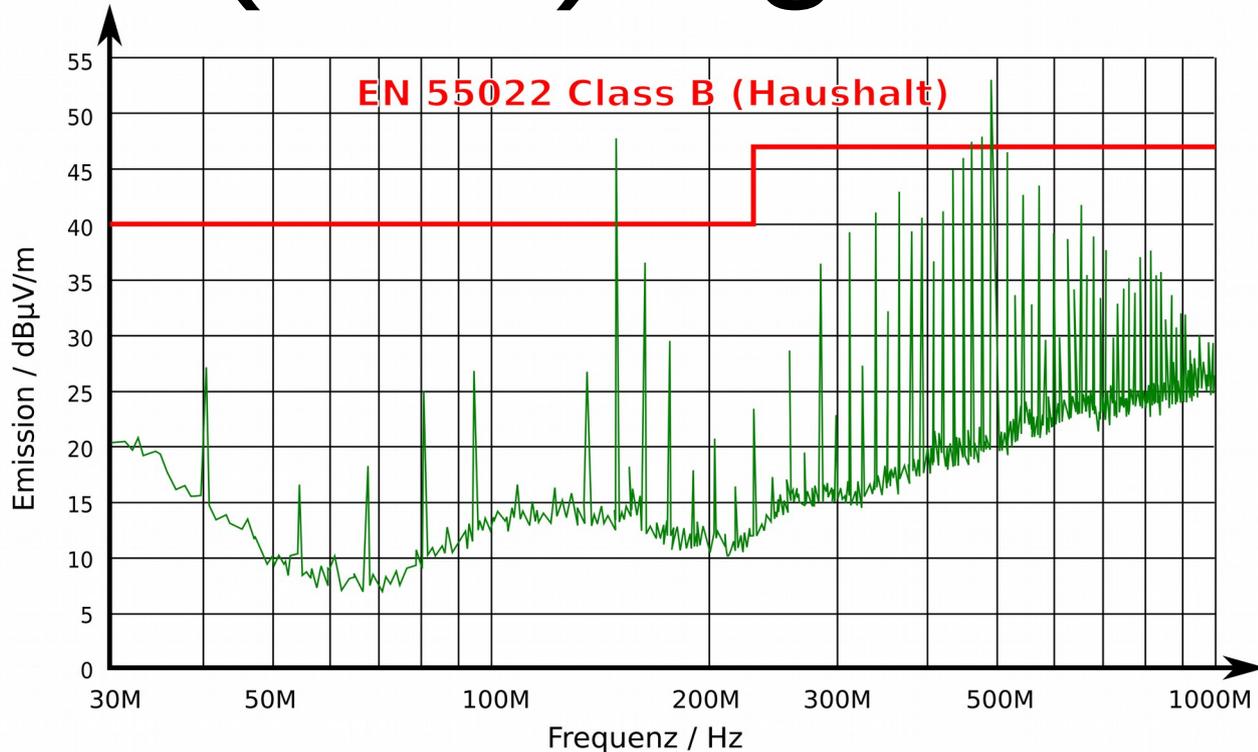
Top Tipp: Regelmäßig abgleichen, Einfluss checken

# Oszilloskoptastkopf II



Die Masseschleife fängt sich gerne Störungen ein, also...

# „Ich habe nur ein xx MHz (Takt)Signal“



~~„Ich habe nur ein xx MHz (Takt)signal“~~

$$Bw (MHz) = \frac{0.35}{t_{rise} (ns)}$$

$$z.B.: \frac{0.35}{5 ns} = 70 MHz$$

Typischer (CMOS) Mikrocontroller...



„Ein 9V  
Netzteil  
liefert 9V am  
Ausgang“



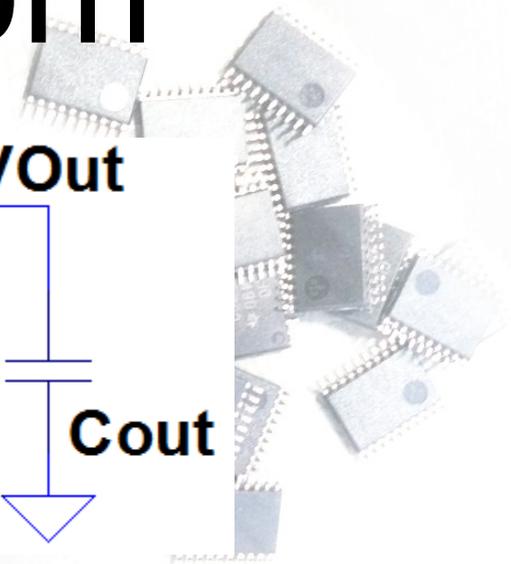
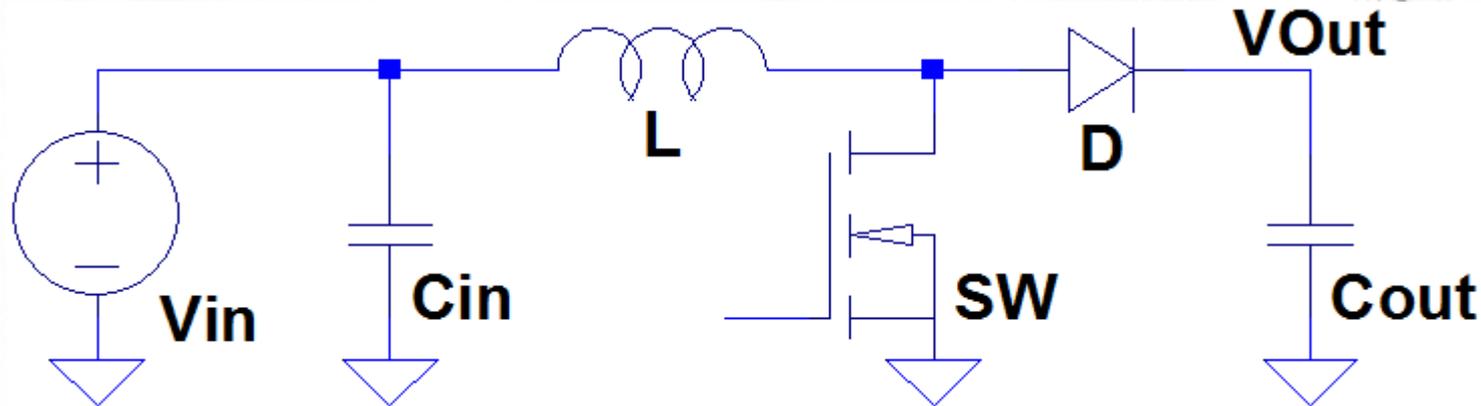
~~„Ein 9V Netzteil liefert 9V am Ausgang“~~

Bei Ungeregelten: Höhere Leerlaufspannung!

**z.B. 11.8V**

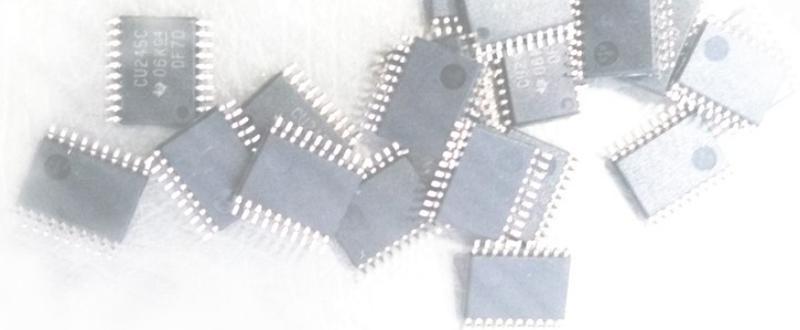


# „Ein 1A Boostconverter schafft 1A Ausgangsstrom“

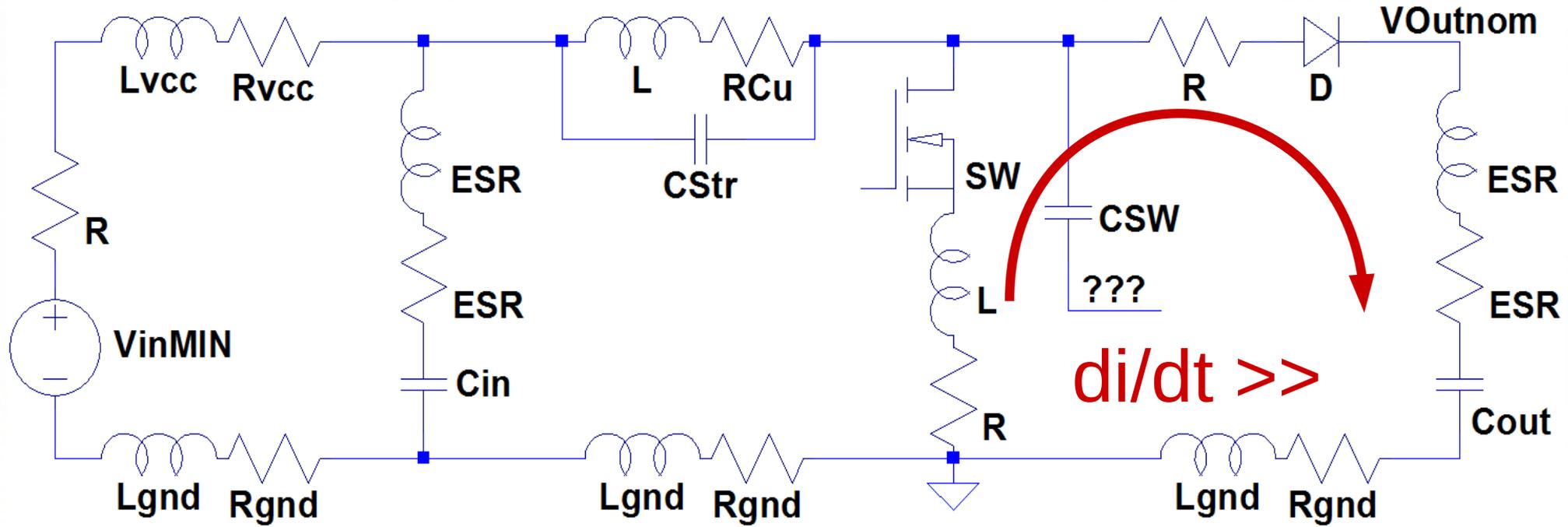


~~„Ein 1A Boostconverter schafft 1A  
Ausgangsstrom“~~

$$I_{MAXOUT} = \left( I_{SWITCH} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \times \left( 1 - \frac{V_{inMin} \times \eta}{V_{Out}} \right)$$

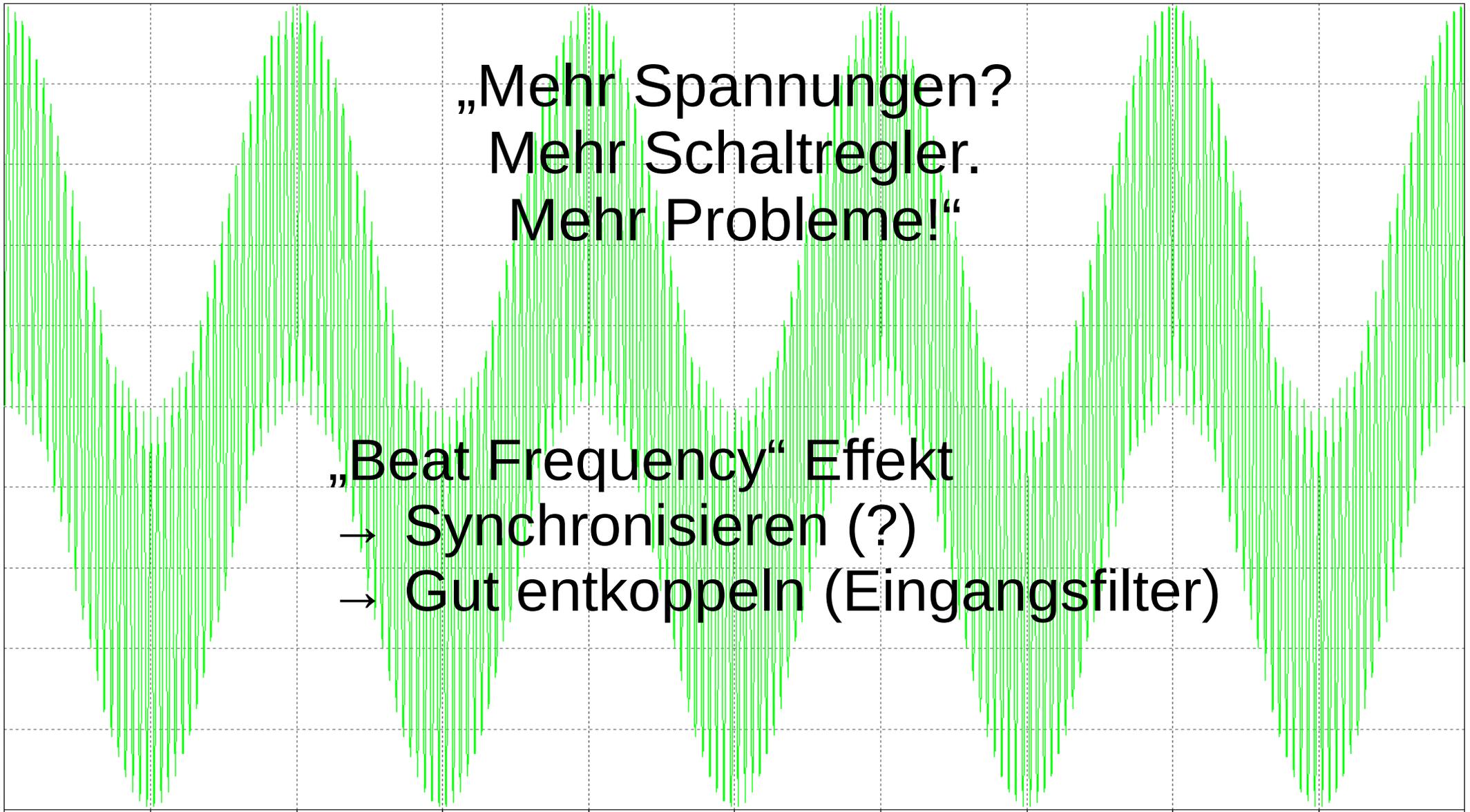


# „Realistischer“ Boostconverter



„Mehr Spannungen?  
Mehr Schaltregler!“

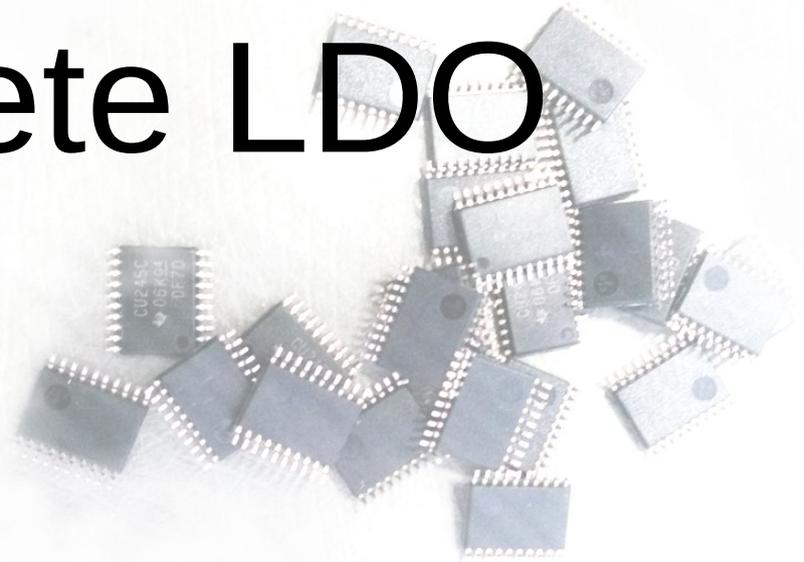




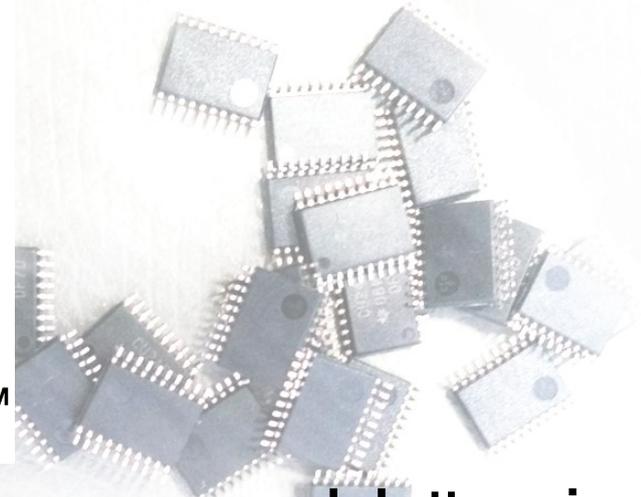
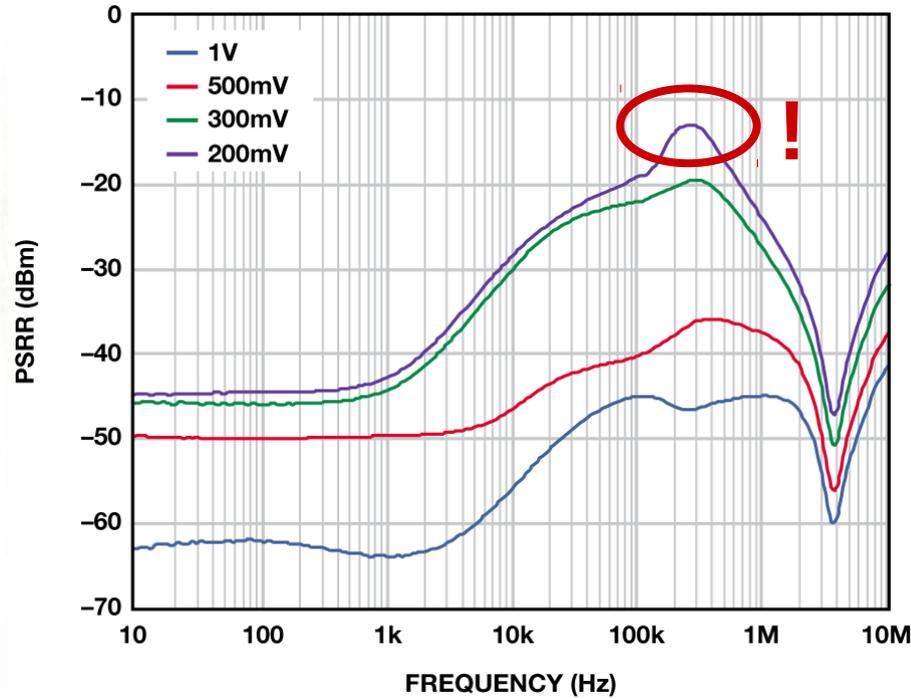
„Mehr Spannungen?  
Mehr Schaltregler.  
Mehr Probleme!“

„Beat Frequency“ Effekt  
→ Synchronisieren (?)  
→ Gut entkoppeln (Eingangsfiler)

„Den ganzen „Dreck“ auf  
der Versorgung filtert der  
nachgeschaltete LDO  
weg“

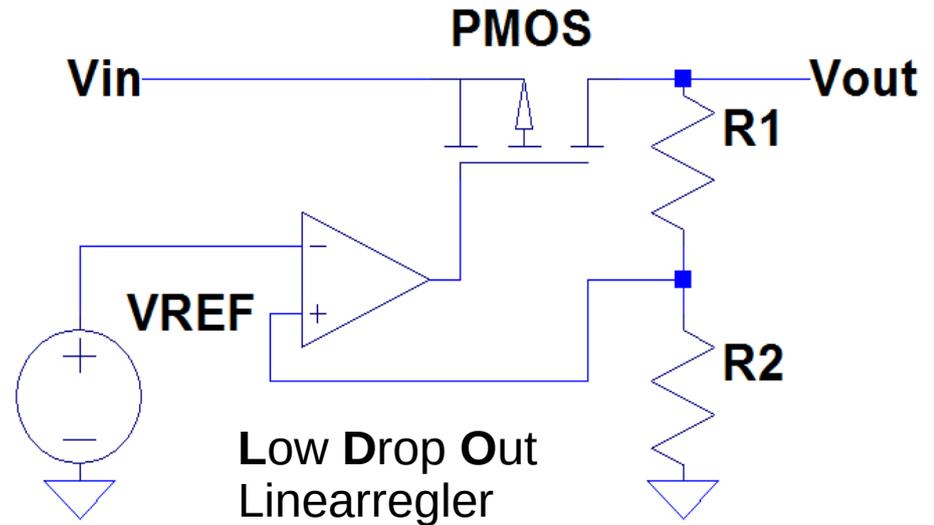
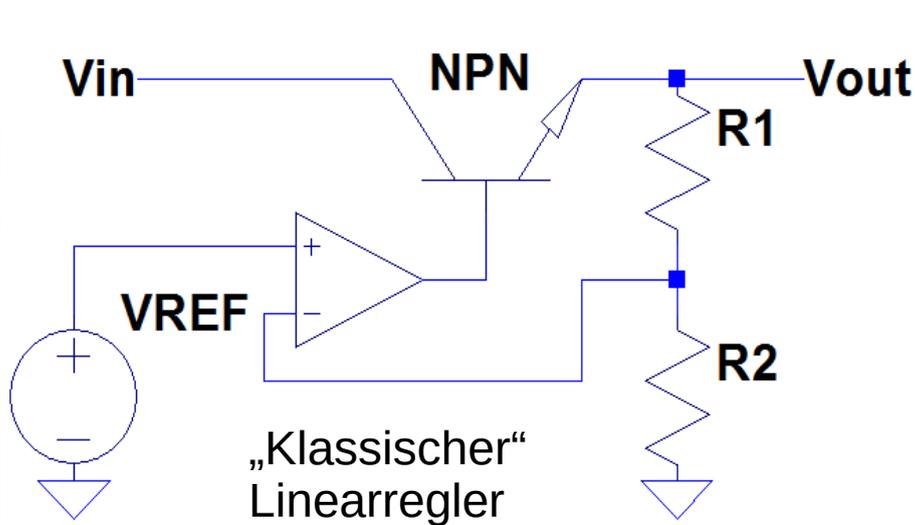


~~„Den ganzen „Dreck“ auf der Versorgung filtert  
der nachgeschaltete LDO weg“~~

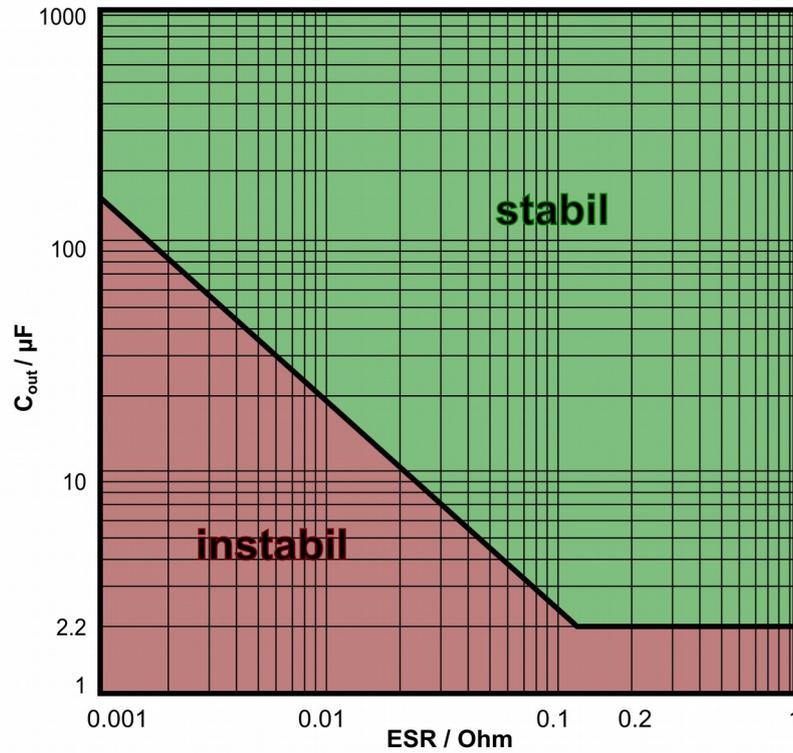


PSRR ist Frequenz- und (Drop)Spannungsabhängig

# „LDOs sind auch nur einfache Linearregler“

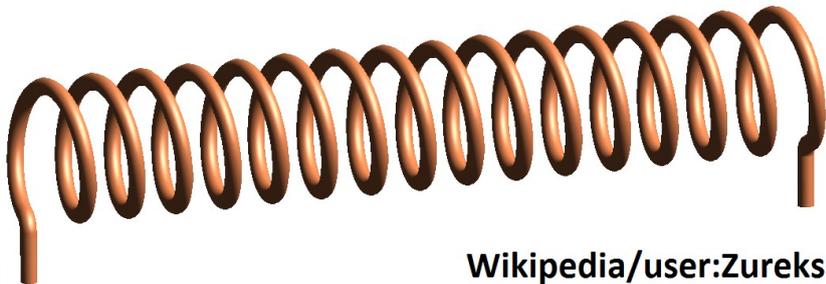


~~„LDOs sind auch nur einfache Linearregler“~~

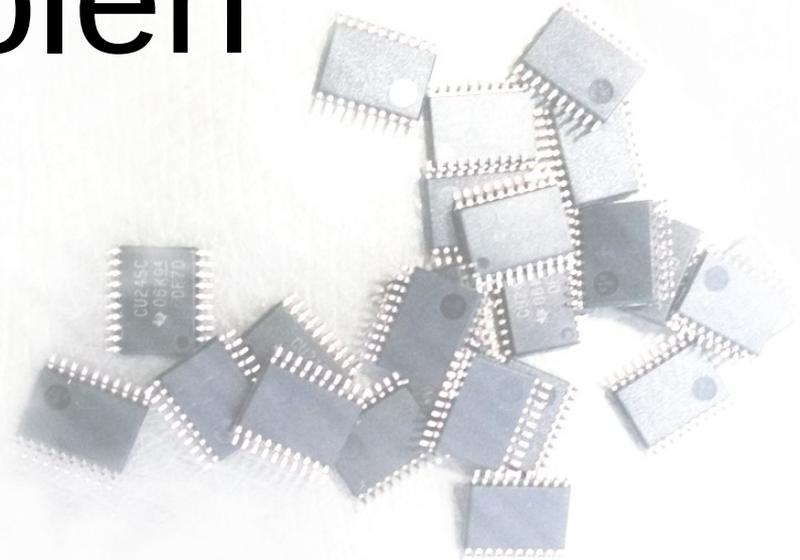


LDOs sind noch dazu deutlich empfindlicher

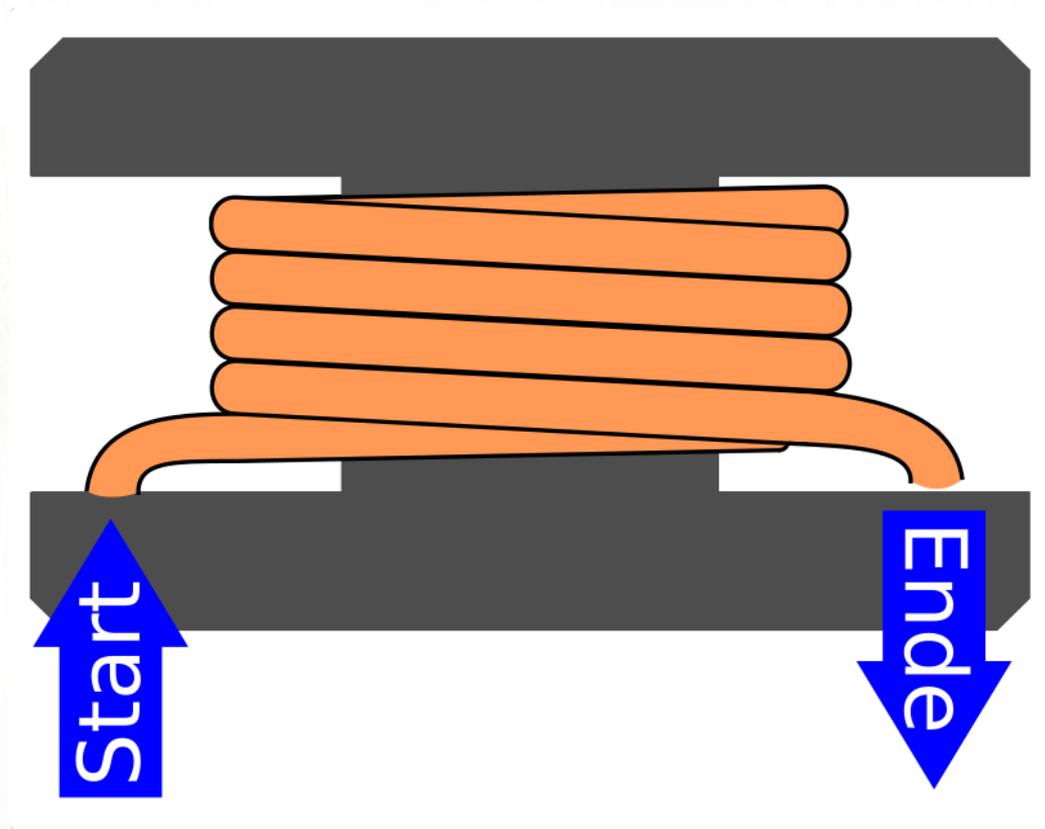
„Induktivitäten kann man  
nicht verpolen“



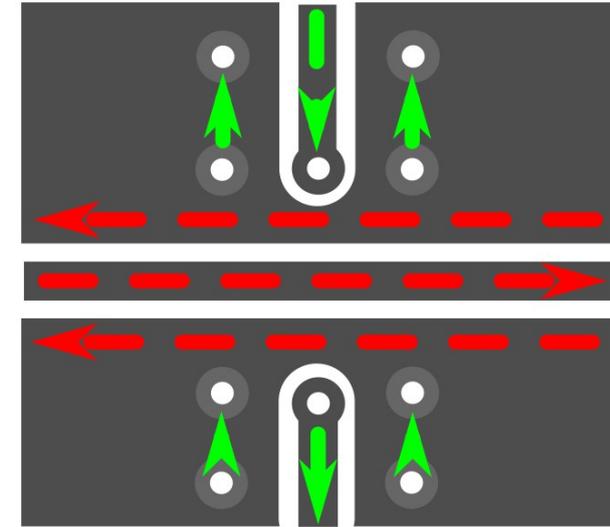
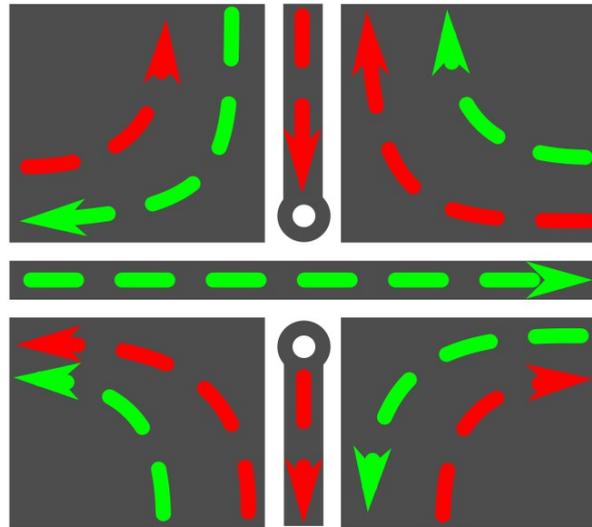
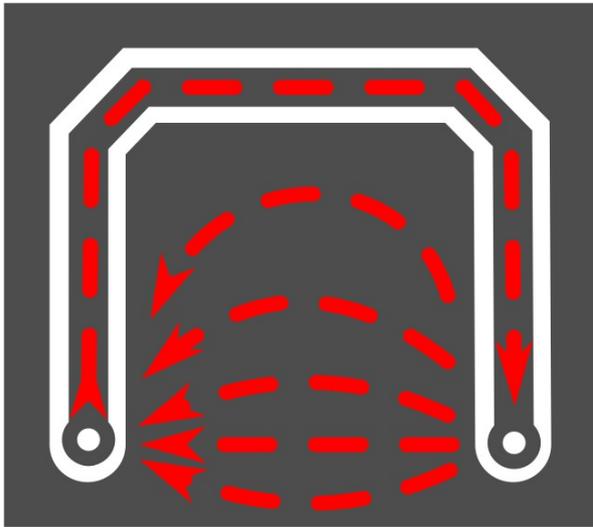
[Wikipedia/user:Zureks](https://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:user:Zureks)



....aber falsch anschließen!



# Einschub: Stromrückpfad:



Rückstrom nimmt den Weg der geringsten **Impedanz**



„Alles mit Masseflächen  
fluten, dann passt das  
schon“

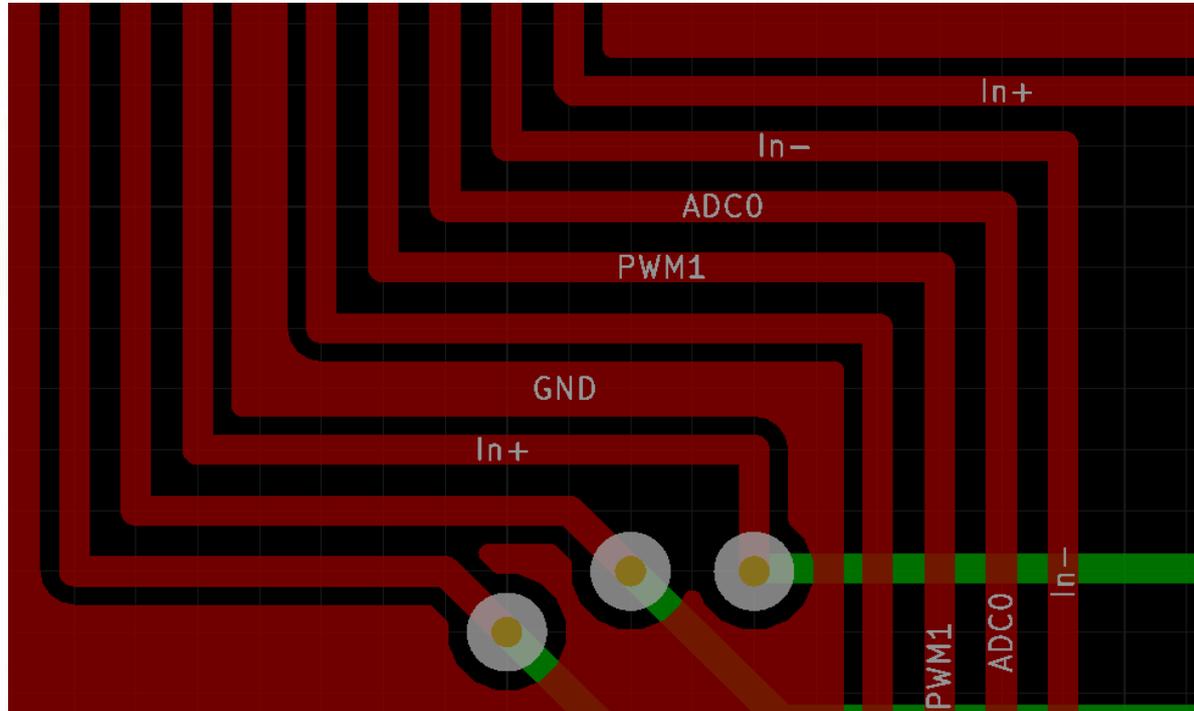


~~„Alles mit Masseflächen fluten,  
dann passt das schon“~~



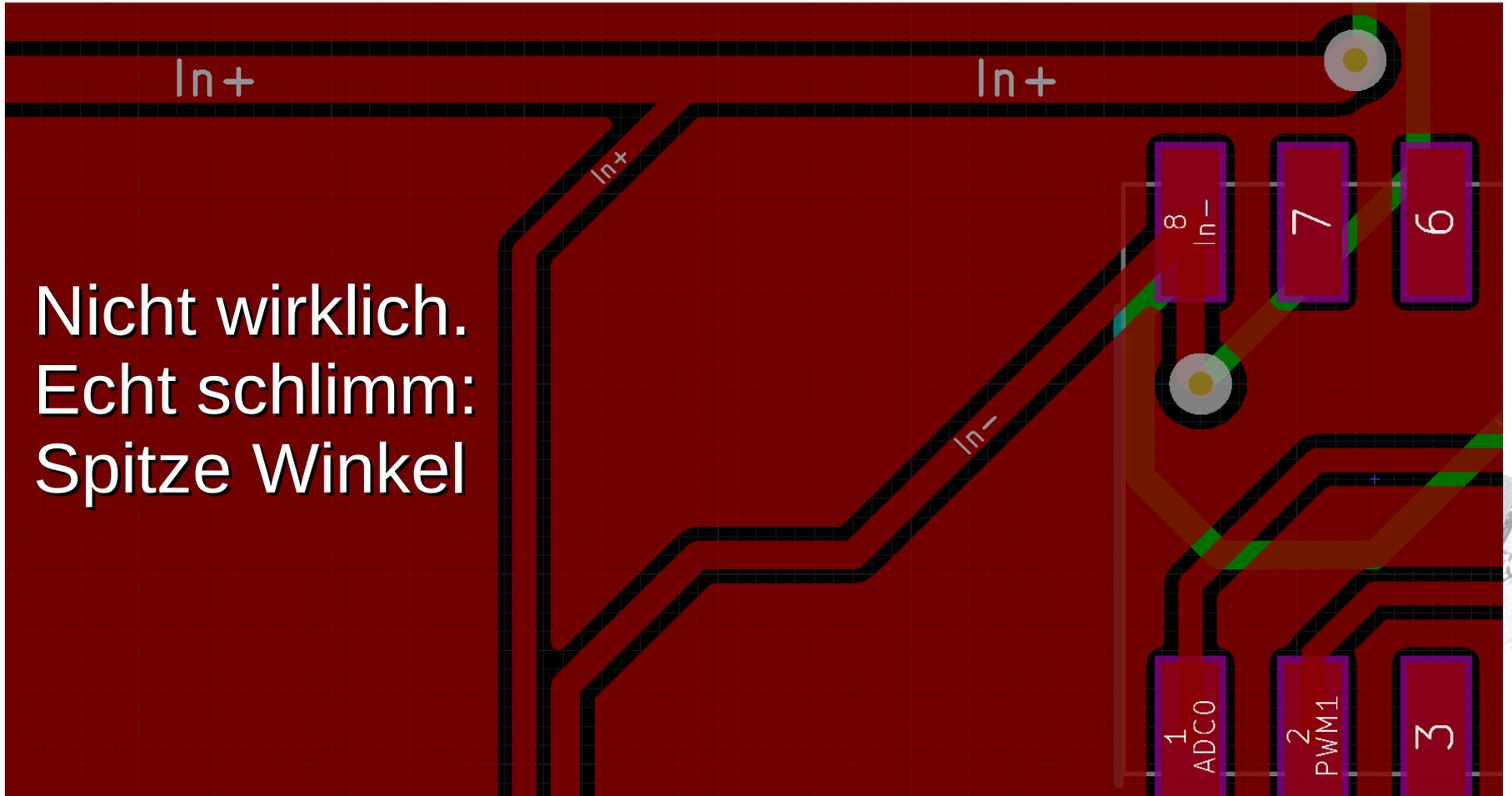
Bitte nachbearbeiten und Halbinseln ( $L/B > 10$ ) vermeiden!

„90° Winkel in Leitungen sind ganz schlimm“

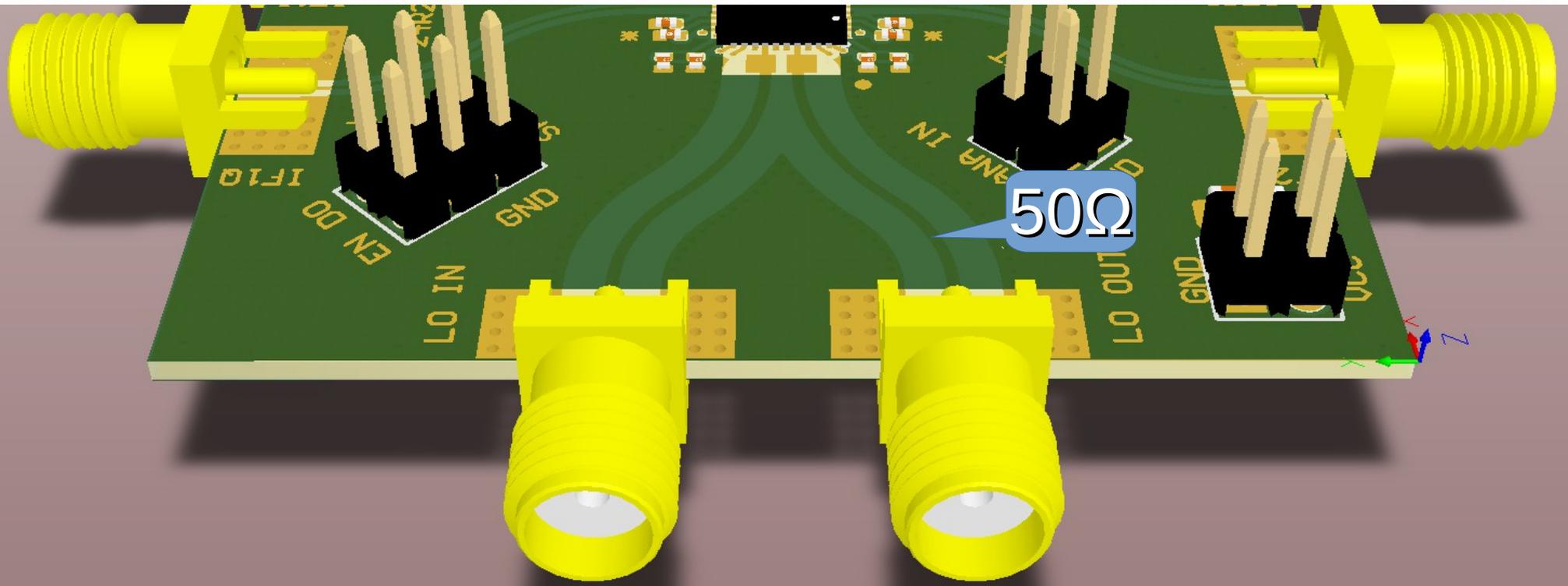


~~„90° Winkel in Leitungen sind ganz schlimm“~~

Nicht wirklich.  
Echt schlimm:  
Spitze Winkel



„Die  $50\Omega$  Mikrostripleitung  
ist  $0.476541\text{mm}$  breit“



~~„Die 50Ω Mikrostripleitung ist 0.476541mm breit“~~

Große Toleranzen bei der Fertigung:  
→ Leiterplattenhersteller fragen!  
Lagenaufbau festlegen (lassen)



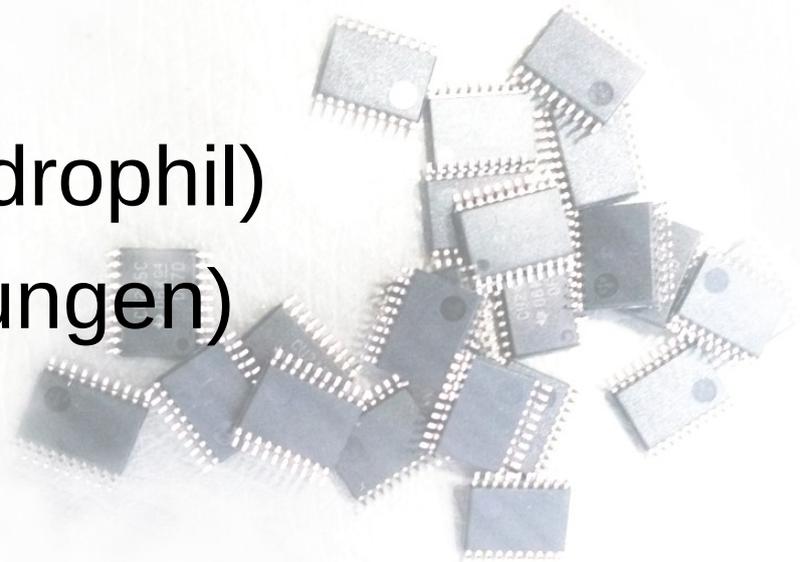
„Hohe Komponenten /  
Kabel gut ankleben“



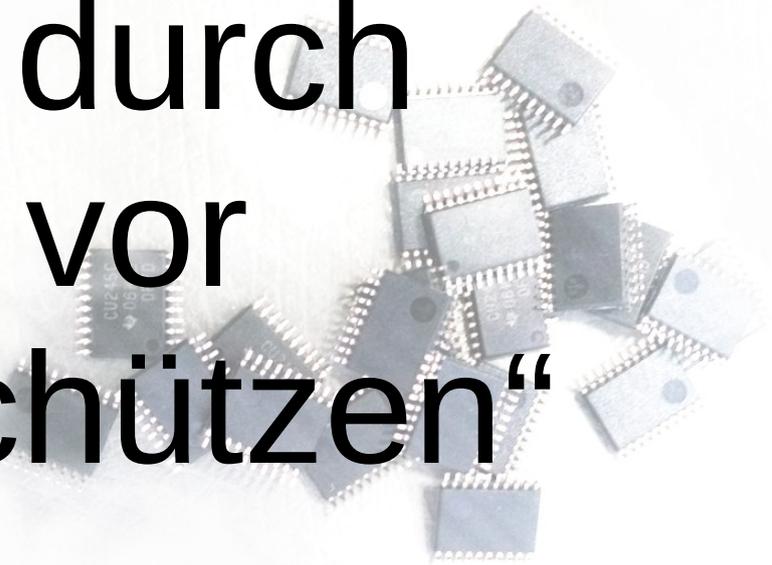
# „Hohe Komponenten / Kabel gut ankleben“

Ja, aber **nicht** mit

- Sanitärsilikon (Essigsäure)
- Heißkleber (nicht haltbar, hydrophil)
- Cyanacrylat (hart, Ausdünstungen)



„Meine Schaltung ist so  
einzigartig und genial.  
Ich muss sie durch  
Vergießen vor  
Nachbauern schützen“



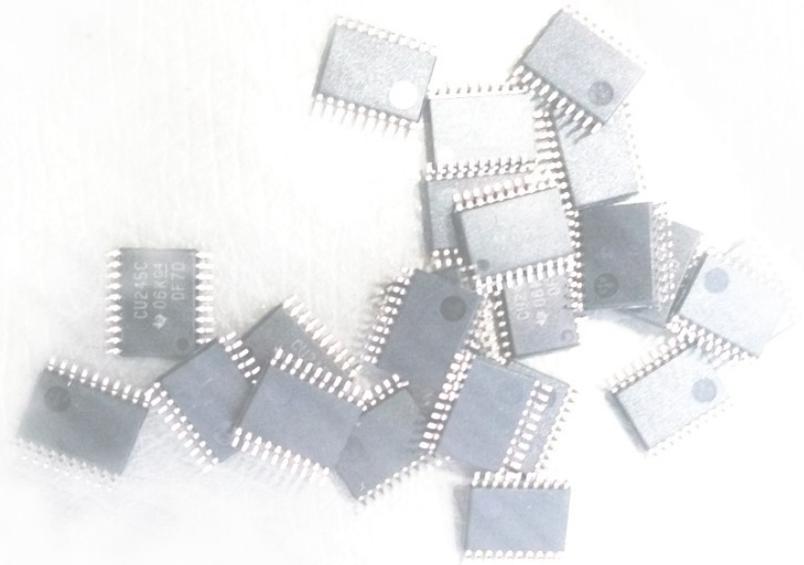
~~„Meine Schaltung ist so einzigartig und genial.  
Ich muss sie durch Vergießen vor Nachbauern  
schützen“~~

Vergussmasse kann entfernt werden.

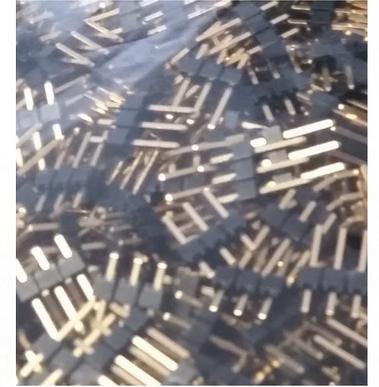
...und die Schaltung ist auch nicht so toll!



„Die Platine ist fertig!“

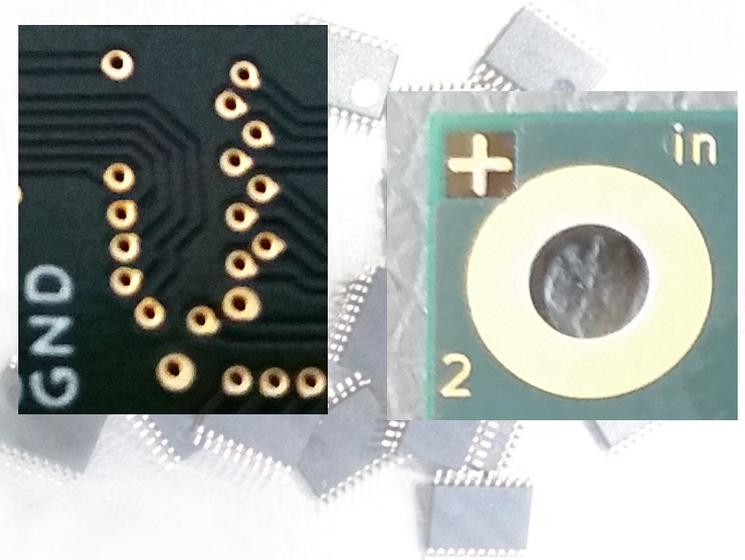


# „Die Platine ist fertig!“

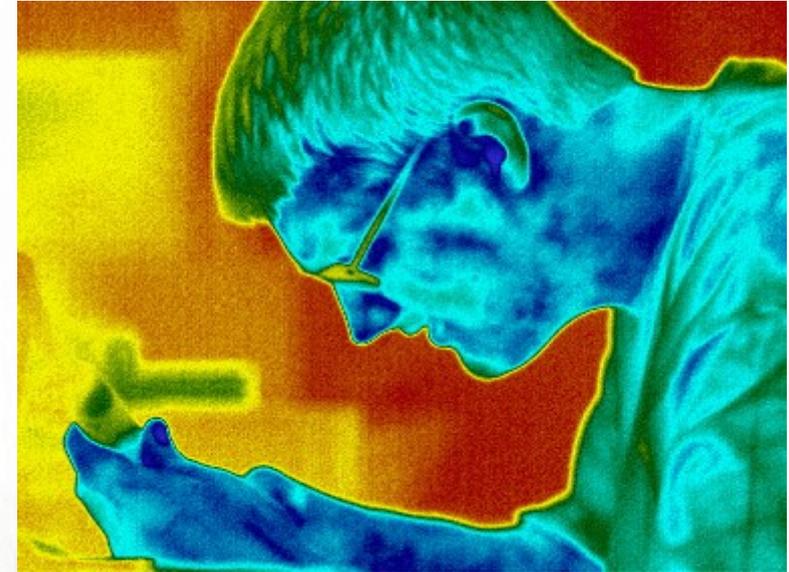
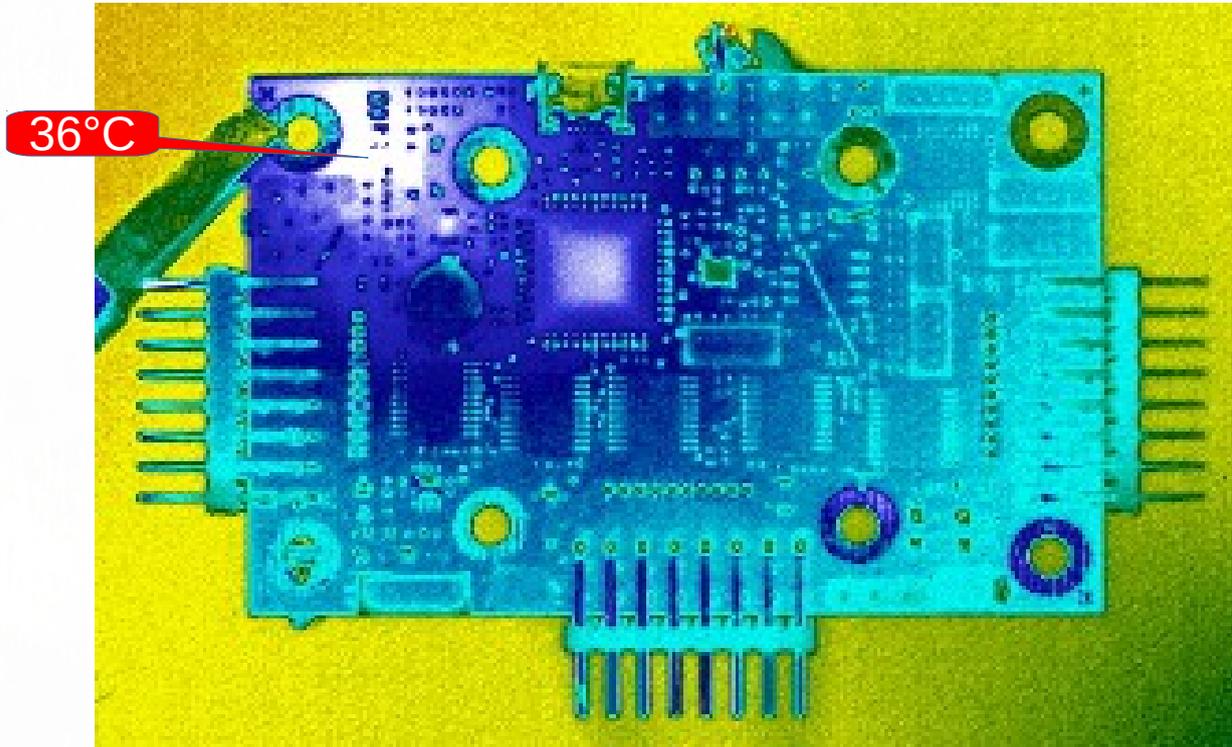


## Check (möglichst unabhängig...)

- Komponenten alle rechtzeitig erhältlich?
- Fiducials (Passmarken)
- Vias freigestellt und nicht in (zu nahe an) den Pads?
- Befestigungslöcher?
- Abstand zum Bordrand?
- Platz für Beschriftungen / Seriennummer?
- Alles gut lötfähig?
- Footprints + Pinouts OK?
- Gerberfiles kontrolliert?
- ...

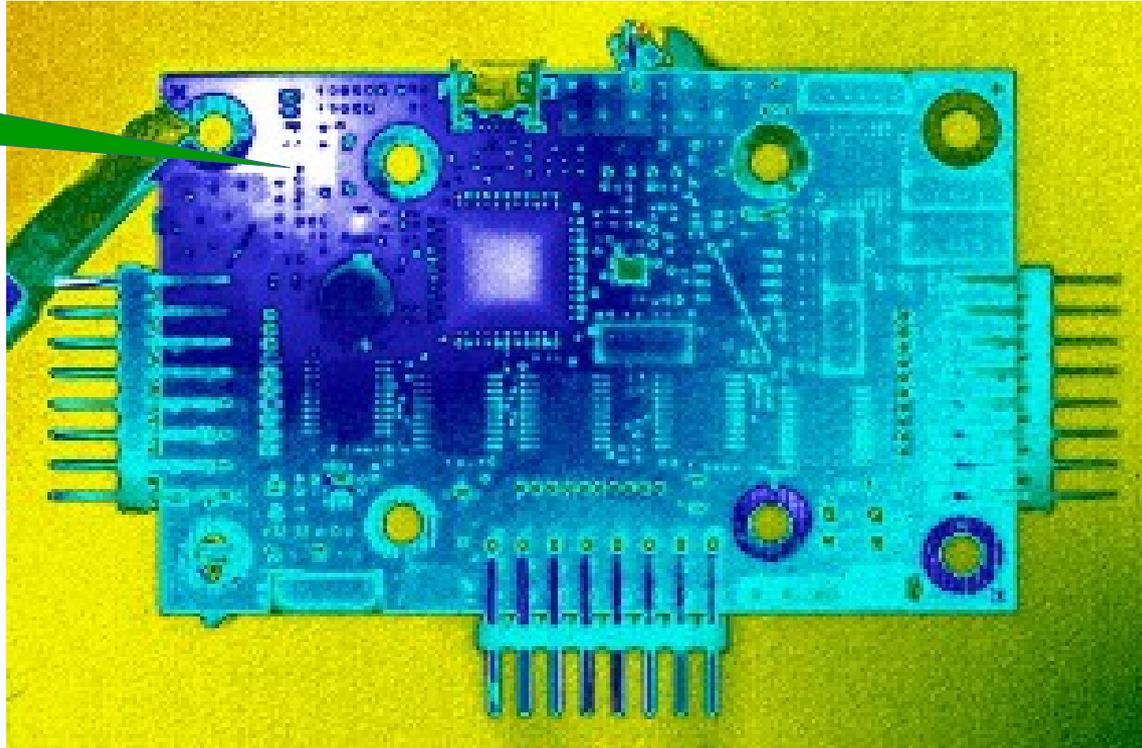


# „Thermokameras helfen“



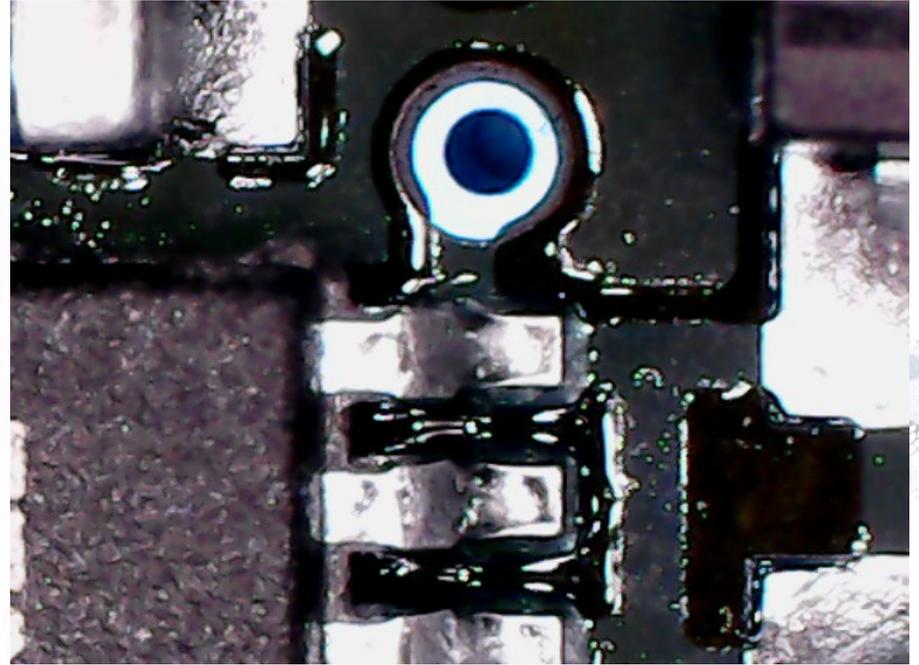
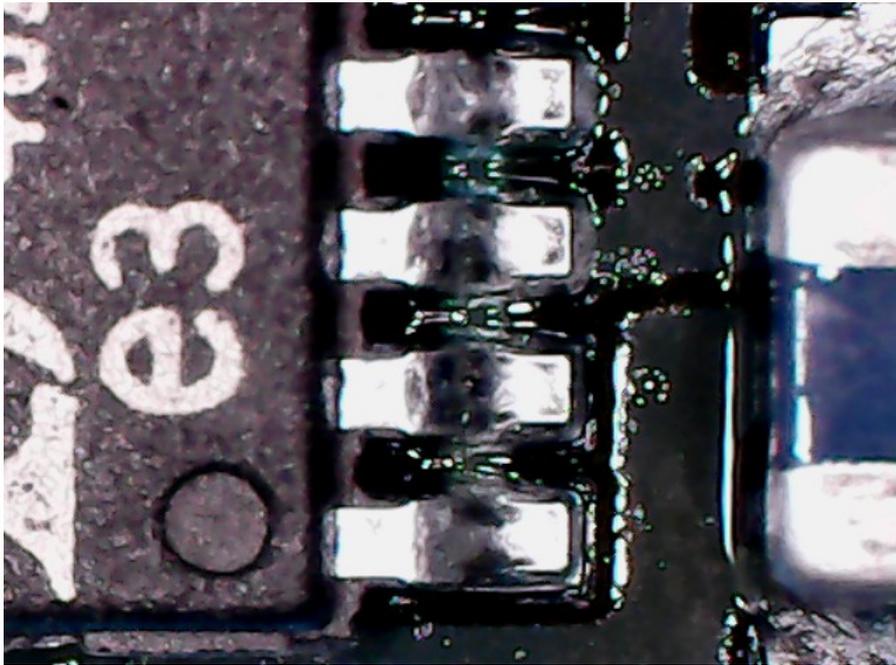
# Aufpassen auf den Emissionsgrad!

Richtig wäre:  
~ 25°C



PCB war nicht versorgt und hatte Raumtemperatur...

„*No Clean* Flussmittel muss  
nicht entfernt werden“



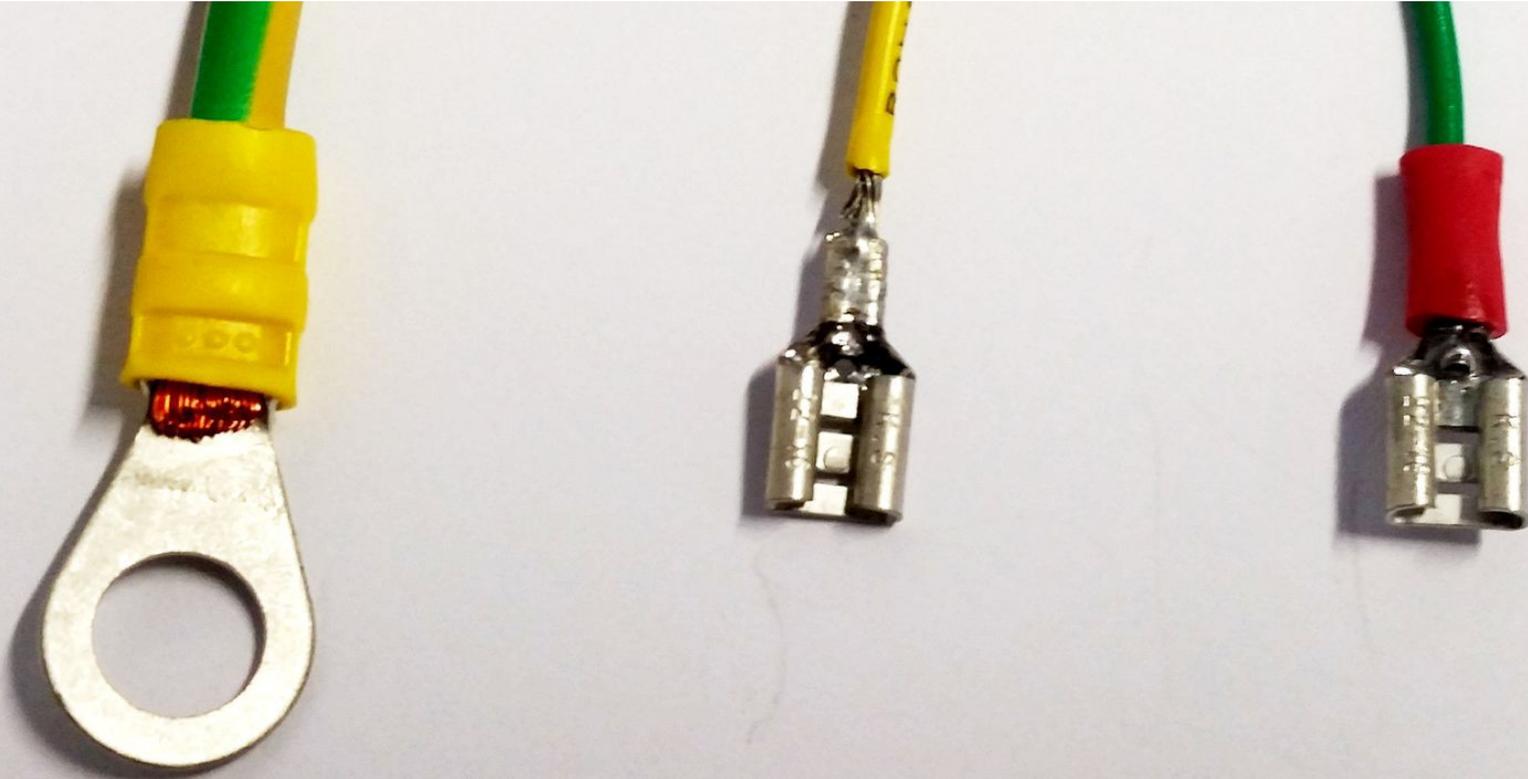
# ~~„No Clean Flussmittel muss nicht entfernt werden“~~

No Clean = keine chemisch aggressiven oder leitfähigen Rückstände.

Kann (wird) aber trotzdem Probleme verursachen.  
Flussmittel ist Säure (Oxid → Wasser + Salze)



„Crimpverbindungen nachlöten,  
damit es sicher hält“



~~„Crimpverbindungen nachlöten, damit es sicher hält“~~

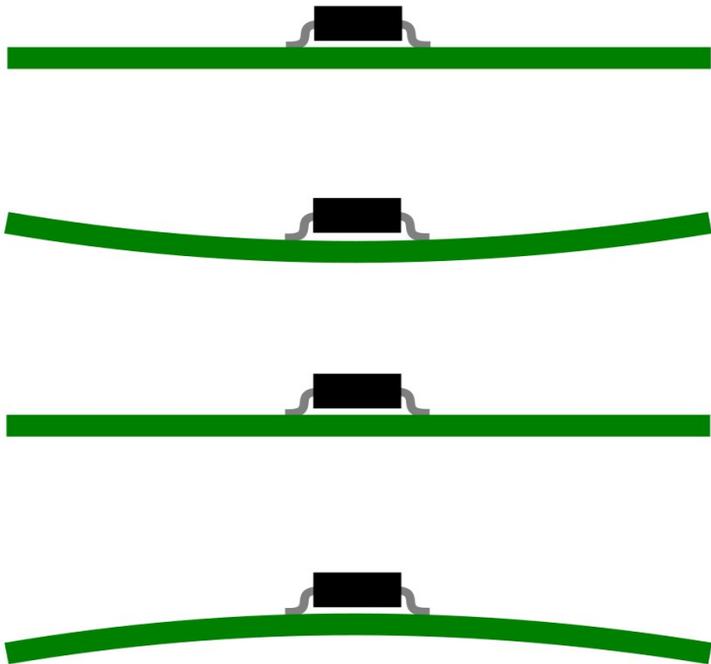


Besser eine gute Crimpzange kaufen  
Carl Kammerling (CK), Knipex, Weidmüller, ...

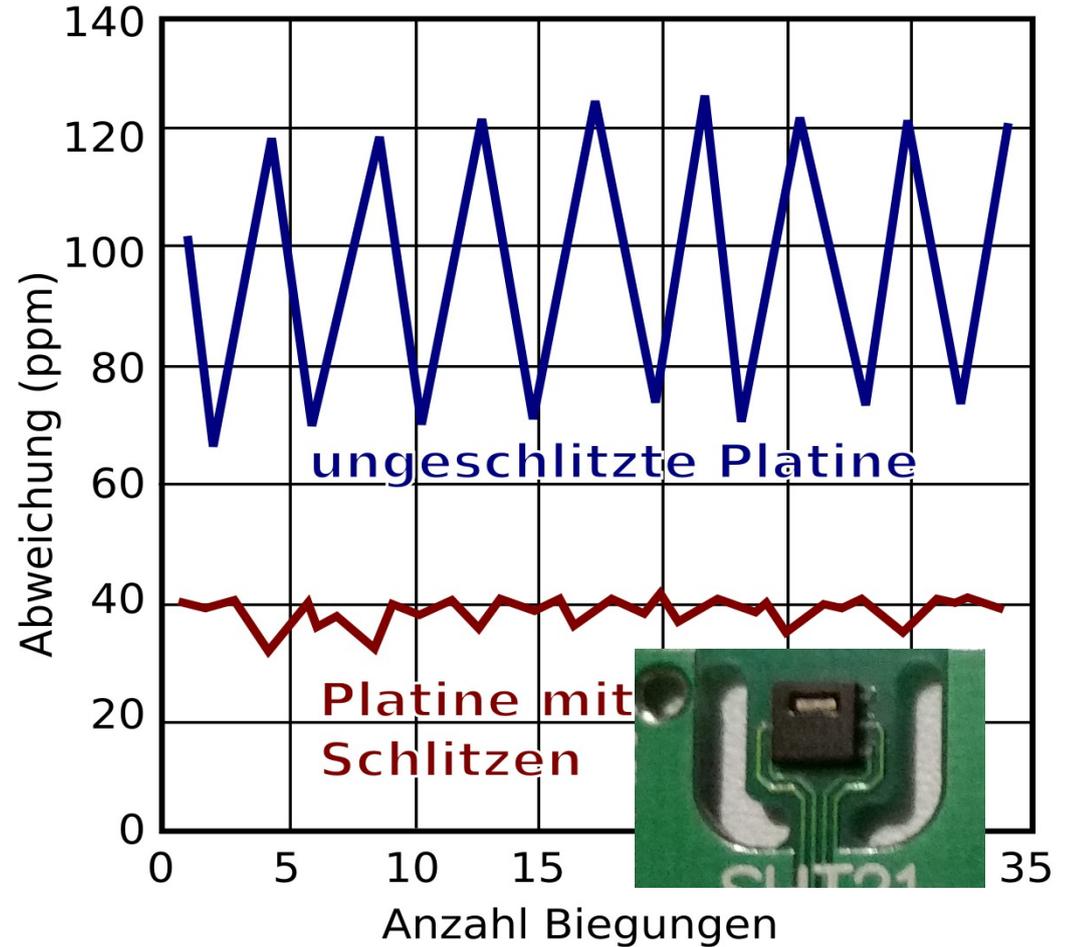
**„Die Mechanik beeinflusst  
die Elektronik nicht“**



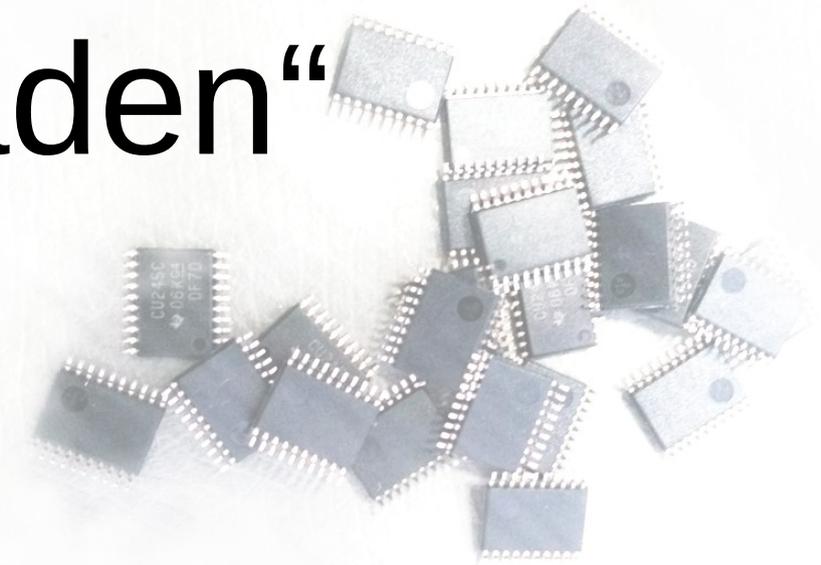
# „Die Mechanik beeinflusst die Elektronik nicht“



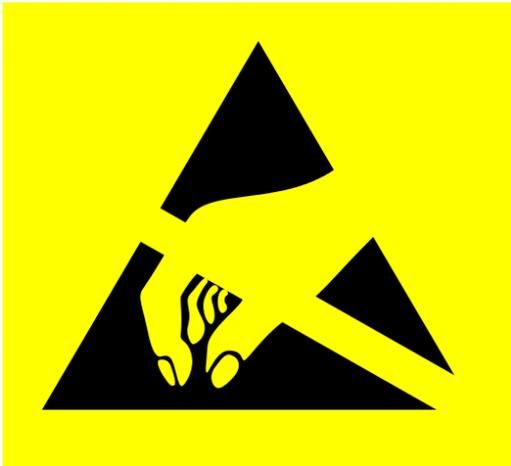
Biegung



„Ich hatte noch nie einen  
ESD-Schaden“

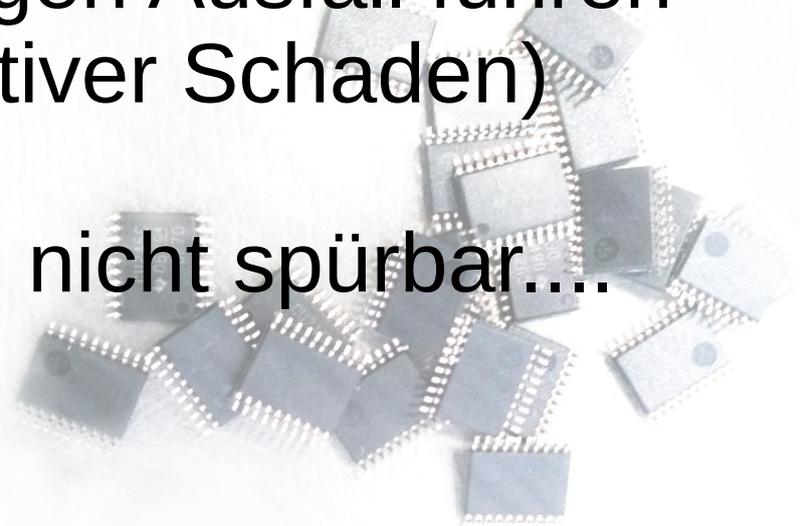


~~„Ich hatte noch nie einen ESD-Schaden“~~



ESD Entladungen müssen nicht  
zum sofortigen Ausfall führen  
(kumulativer Schaden)

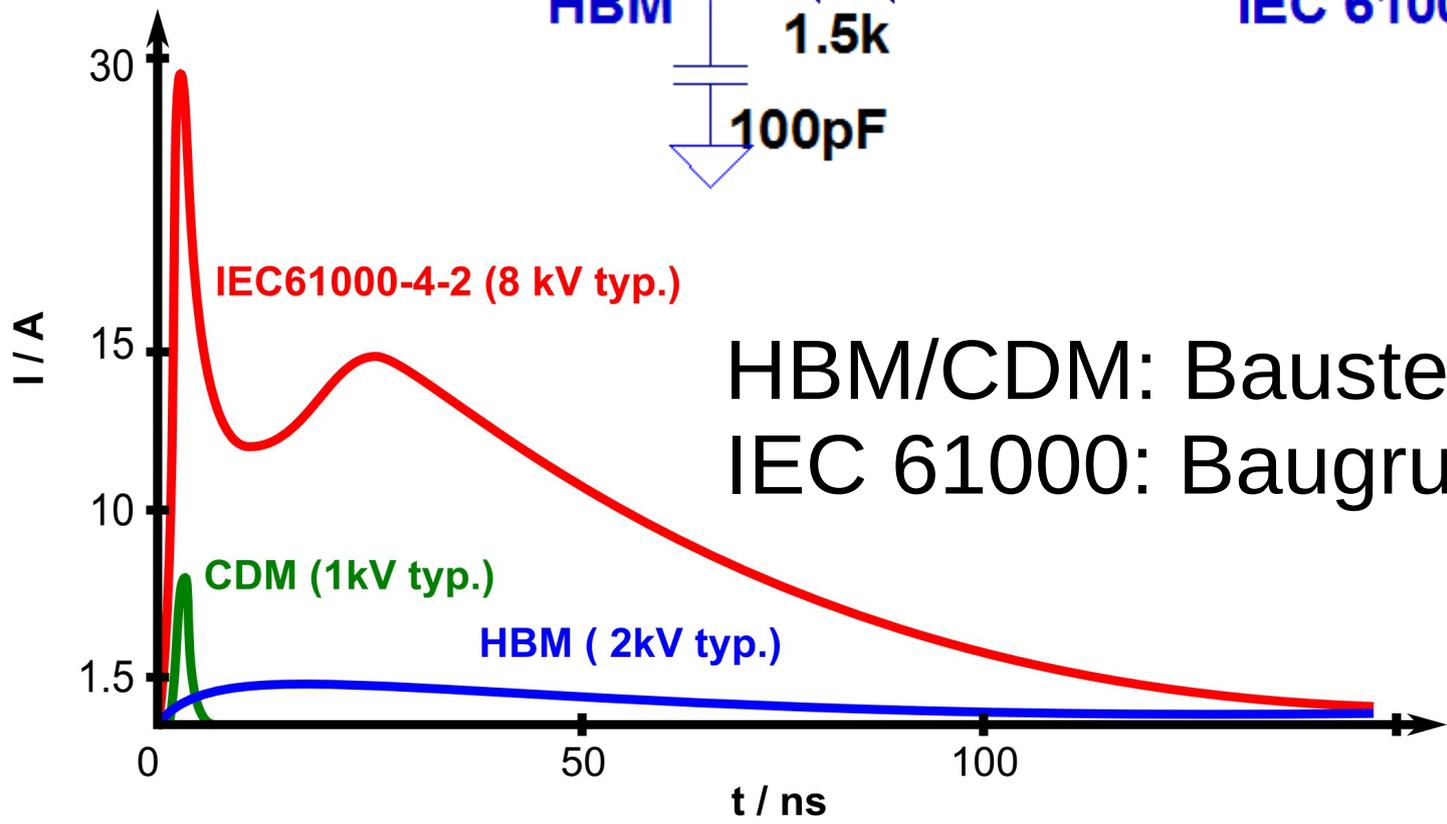
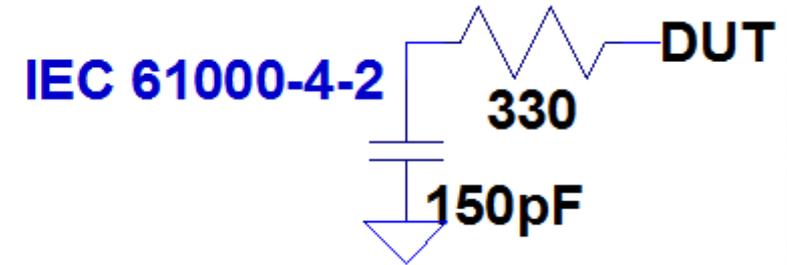
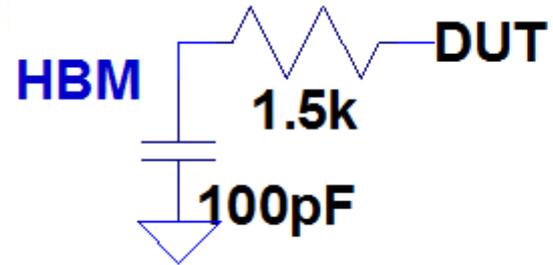
<2kV sind nicht spürbar....



„Aber mein IC hat doch  
8kV ESD Rating...“



„Aber mein IC hat doch 8kV ESD Rating...“



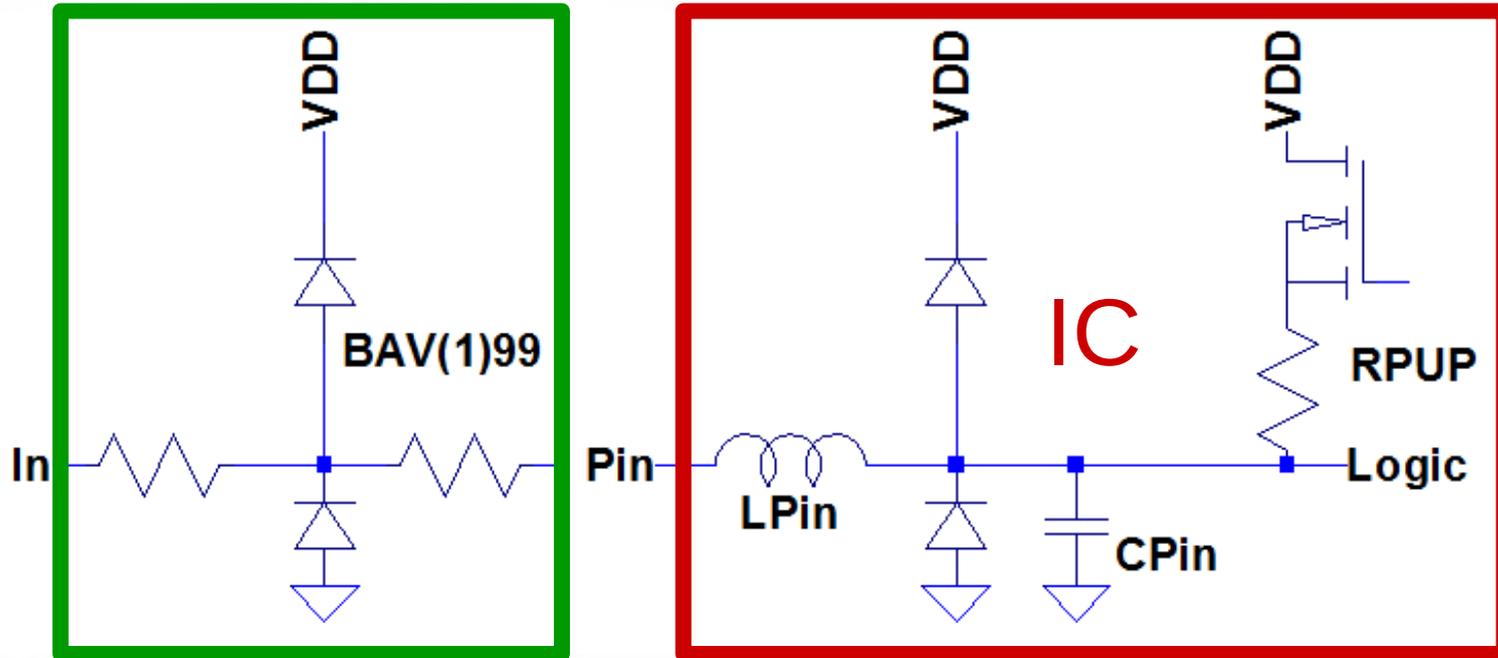
HBM/CDM: Baustein (unversorgt!)  
IEC 61000: Baugruppe (im Betrieb)



„Überspannungsschutz:  
Erledigen die integrierten  
Schutzdioden in den  
(CMOS) ICs“



# „Überspannungsschutz: Erledigen die integrierten Schutzdioden in den (CMOS) ICs“



Leider nicht immer spezifiziert....

# Typische Schutzschaltungskomponenten

- Widerstände: Aufpassen auf (Puls)Belastbarkeit
- Kondensatoren: Spannungsfestigkeit, ESL
- Induktivitäten: Frequenzbereich
- Ferrite: Pulsbelastbarkeit, unwirksam wenn in Sättigung
- Dioden: Belastbarkeit, Geschwindigkeit, Leckstrom
- TVS, (Z-Dioden): Toleranzen, Belastbarkeit
- GDT (Gasentladungsröhre): Begrenzte Zyklen
- Varistor (MOV): Alterungs- und Temperaturprobleme, hohe Kapazität
- Stoßspannungsunterdrücker (Halbleiterbasiert): Max. Spannung + Belastung



# Hardwareentwicklung = Kompromisse

**Baugruppe**

The diagram illustrates the central concept of 'Baugruppe' (hardware assembly) surrounded by 18 key constraints in hardware development. The constraints are arranged in a circular pattern around the central term. The constraints include: Entwicklungszeit, Baugröße/-form, Zuverlässigkeit, Design for Manufacturing, Lebensdauer, Umgebung, Unübliche Anforderungen, Richtlinien, Zertifizierungen, Security, Safety, Low Power, Design for Test, Kosten, and SW vs. HW.

Entwicklungszeit

Baugröße/-form

Zuverlässigkeit

Design for  
Manufacturing

Lebensdauer

Umgebung

Unübliche  
Anforderungen

Richtlinien

Zertifizierungen

Security

Safety

Low Power

Design for Test

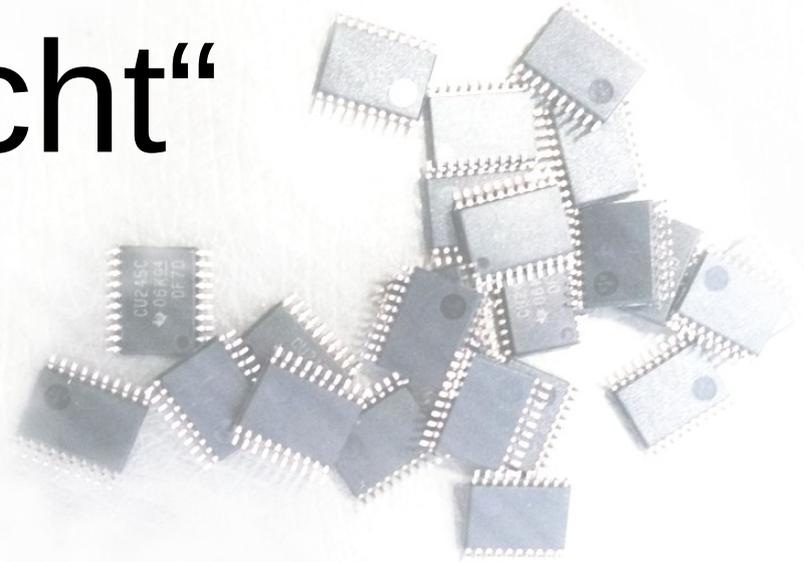
Kosten

SW vs. HW

# Hardwareentwicklung = Probleme lösen



„Haben wir immer schon  
so gemacht“



~~„haben wir schon immer so gemacht“~~

...aber inzwischen gibt es neue Bauteile  
(Mikrocontroller...), verschärfte (EMV) Richtlinien,  
erhöhte Ansprüche, Preisdruck, Konkurrenz,  
Fortschritt, Umweltschutz, RoHS, etc.!



„Right on the first try“



# ~~„Right on the first try“~~

- Verhindert innovative Lösungen
- führt zu überdimensionierten Schaltungen
- funktioniert nicht



„Produkte sind nur  
nachgebaute Demoboards  
/ Appnotes“



# ~~„Produkte sind nur nachgebaute Demoboards / Appnotes“~~

- Unvollständig
- Überflüssige Bauteile / Konfigurationen
- Firmenpolitik (nur eigene Komponenten....)
- Nicht erprobt
- Nicht zertifiziert
- My God — it's full of errors!



# Special thanks to...

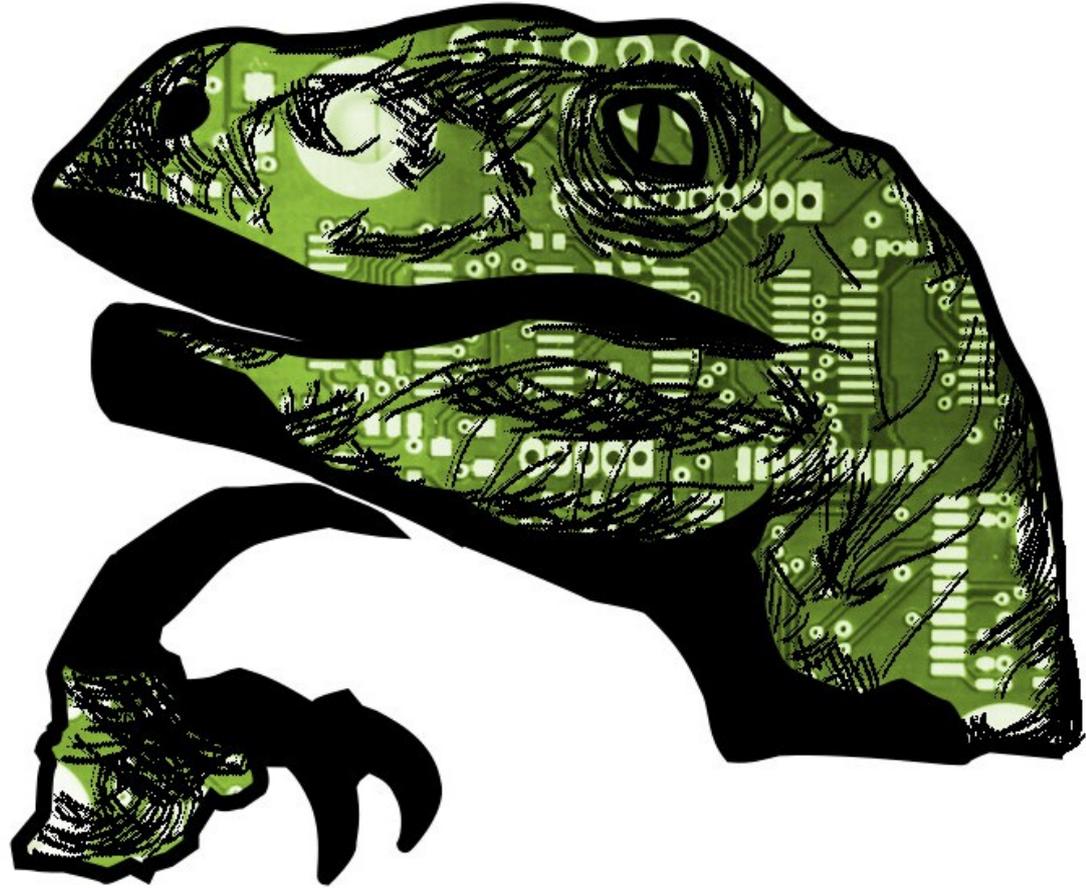
- Einige meiner (ehemaligen) Arbeitskollegen für die Inspiration
- KiCad (freuen sich immer über ein paar €...)
- Meiner besten PCB Designerin für die Grafiken

**P.S. (Embedded) C Programmierer für  
interessante Projekte gesucht!**



# *The end*

salzburger@engineering-arts.net



# Bonusmaterial

- Schaltung vereinfachen
- Schaltung sauber halten
- Stabilität der Verstärker + der gesamten Messkette prüfen
- Datenblatt genau durchlesen, vor allem die Diagramme
- Schaltung mit Min/Max Werten auslegen
- Immer das Ersatzschaltbild der Komponenten betrachten
- Frequenz- Zeit- und Temperaturabhängigkeit beachten
- Mechanische Einflüsse nicht vergessen
- Späte Designänderungen führen zu hohen Kosten + erhöhen das Risiko massiv
- **NIEMALS auf ein Schaltplan UND Layout Review mit qualifizierten und nicht direkt an der Entwicklung beteiligten Personen verzichten!**



# Literatur (Tote Bäume oder digital)

- The Data Conversion Handbook, edited by Walt Kester  
[http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-06/data\\_conversion\\_handbook.html](http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-06/data_conversion_handbook.html)
- Alles von Jim Williams „*They told me I couldn't leave the last page blank*“  
<http://www.linear.com/doclist/?au=Jim+Williams>
- Werke von Bob Pease „*My favorite programming language is solder*“  
<http://www.ti.com/ww/en/bobpease/>
- Analog Engineer's Pocket Reference, edited by Art Kay and Tim Green  
<http://www.ti.com/lscds/ti/amplifiers-linear/precision-amplifier-pocket-reference-e-book.page?DCMP=pocketref&HQS=hpa-pa-opamp-pocketref-univ-bti-ebook-en>
- Keathley Low Level Measurements Handbook (mit etwas Eigenwerbung)
- The Art of Electronics, Horowitz + Hill (Klassiker)
- High Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic, Johnson + Graham (Formeln zunächst ignorieren!)
- Making Embedded Systems: Elecia White (eher SW)

