

# Electronic Design Automation (EDA)

## Analogsynthese

Analoge Synthese

Digital vs. Analog

Analoge Schnittstellen

Synthesewerkzeuge für den Analogschaltungsentwurf

Digital vs. Analogschaltungsentwurf

Topologiesynthese und Dimensionierung

Topologiesynthese

Schaltungsparameterraum

... Beispiel

Schaltungseigenschaftsraum

... Beispiel

Akzeptanzgebiet

... Beispiel

Analyseabbildung

Dimensionierungsabbildung

Abbildung des Akzeptanzgebietes

... Beispiel

Dimensionierungsproblem

Beispiel Dimensionierung durch Optimierung

Ausbeuteoptimierung

Entwurfszentrierung

Dimensionierungsverfahren

Wissensbasierte Verfahren

Beispiel eines Entwurfsplanes

Beispiel eines Entwurfsplanes II

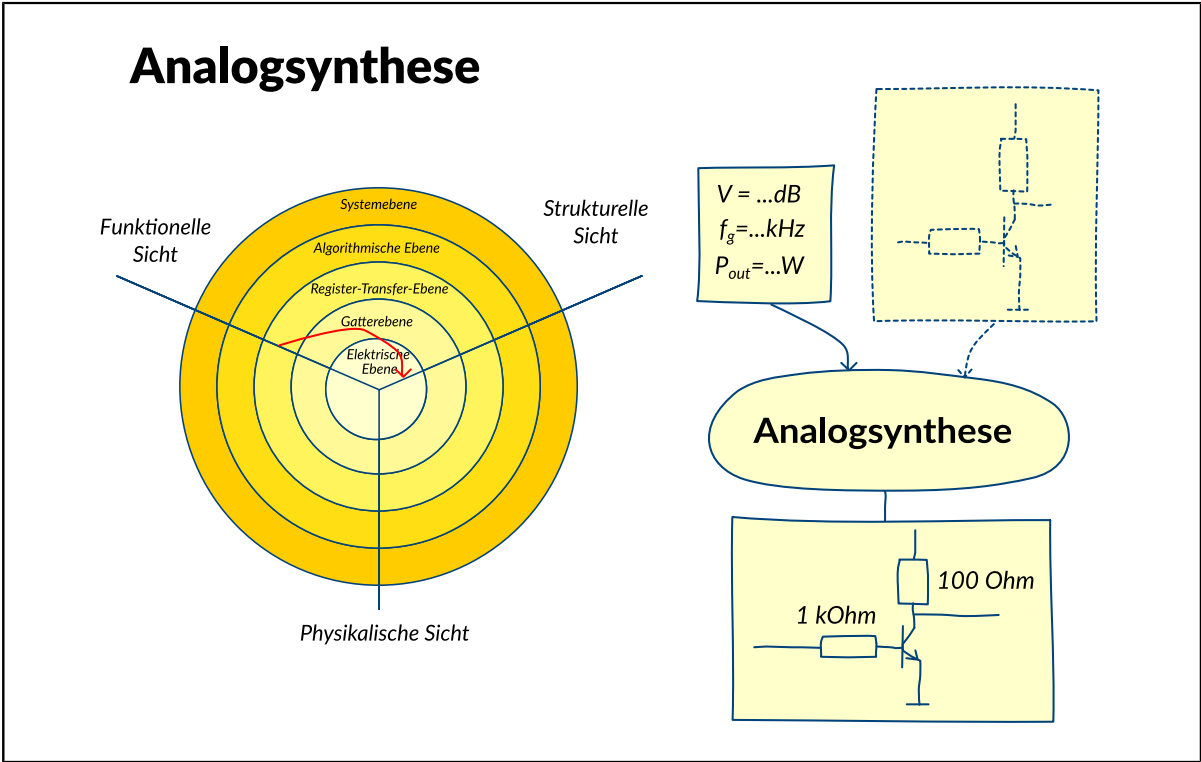
Anwendung des Entwurfsplanes

Optimierungsbasierte Verfahren

Optimierer-Analysewerkzeug-Kopplung

Optimierer und Analysewerkzeuge

# Analogsynthese: Analoge Synthese



## Analogsynthese: Digital vs. Analog

### Digital vs. Analog

- Digitalisierung durchdringt alle Bereiche
- Integration ganzer Systeme auf einem Chip
- Analoge Komponenten als Schnittstelle zur Außenwelt
- Analoge Sichtweise digitaler Zellen auf elektrischer Ebene

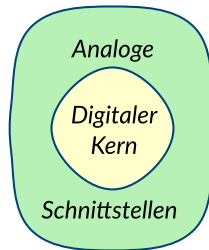
Trotz der voranschreitenden Digitalisierung haben analoge Komponenten große Bedeutung. Dieses trifft vor allem für die heute verbreitete Integration ganzer Systeme auf einem Chip, so genannter Systems-on-Chip (SOC) zu. Analoge Schaltungsteile werden vor allem als Schnittstellen zur Außenwelt benötigt. Auch digitale (Standard-)Zellen werden als analoge Schaltungen betrachtet und ihr Entwurf bzw. ihre Optimierung wird auf elektrischer Ebene durchgeführt.

## Analogsynthese: Analoge Schnittstellen

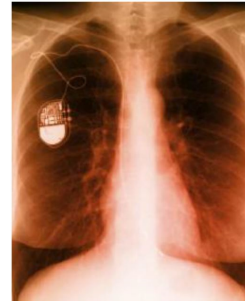
### Analoge Schnittstellen



Kommunikationselektronik  
z.B. RF-Frontend  
eines Smartphones



Automobilelektronik, z.B.  
Beschleunigungssensoren mit  
A/D-Wandlern, DC/DC-Wandler  
zur Versorgung



Medizintechnik, z.B.  
Herzschrittmacher mit  
Messverstärkern zur  
Bestimmung der  
Herzfrequenz

**Außenwelt ist  
und bleibt analog**

Beispiele für analoge Schnittstellen finden sich z. B. in der Kommunikations- und Automobilelektronik sowie in der Medizintechnik: RF-Frontends in Mobiltelefonen, Beschleunigungssensoren mit A/D-Wandlern in Airbag-Auslösesteuerungen oder ESP-Systemen, DC/DC-Wandler zum Anschluss elektronischer Komponenten an Bordspannungsversorgungen, Messverstärker zur EKG-Bestimmung in Herzschrittmachern. Da die Außenwelt grundsätzlich analog ist, wird sich an der Notwendigkeit analoger Blöcke an den Schnittstellen auch in Zukunft nichts ändern.

## Analogsynthese: Synthesewerkzeuge für den Analogschaltungsentwurf

### Analoge Schnittstellen

- Vorherrschend Handarbeit im Analogschaltungsentwurf
- Flaschenhals
- Niedriger Entwicklungsstand im Vergleich zum Digitalschaltungsentwurf

digital

analog

1 FET

ein kleiner CPU Kern

einige Kapazitäten

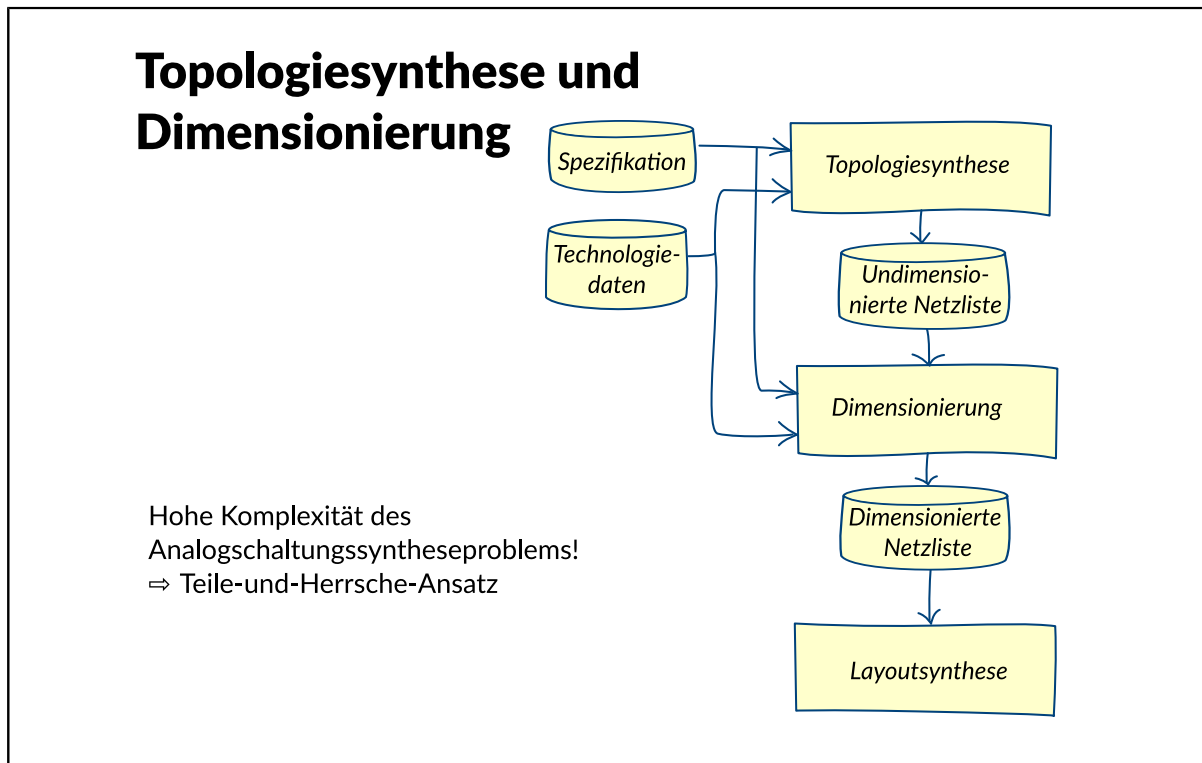
Ursache: Große Unterschiede zwischen Analog- und Digitalschaltungsentwurf

Während zur Erstellung von Digitalschaltungen leistungsfähige Synthesewerkzeuge zur Verfügung stehen, sind die Fähigkeiten von Werkzeugen zum automatischen Entwurf von Analogschaltungen bis heute vergleichsweise bescheiden. In der Praxis wird der Entwurf fast ausschließlich von erfahrenen Schaltungsentwicklern per Hand durchgeführt. Dadurch kommt es bei Systemen mit analogen und digitalen Blöcken vielfach zu einem Flaschenhals beim Analogentwurf: Wie auf dem Bild gezeigt, nimmt der Analogteil meist nur einen geringen Teil der Gesamtchipfläche ein und enthält nur vergleichsweise wenige Bauelemente. Trotzdem benötigt er ein Vielfaches der Entwurfszeit des Digitalteils. Der Bedarf an EDA-Werkzeugen für den automatischen Analogentwurf ist daher hoch. Der Grund für den geringen Erfolg bei der Automatisierung des Analogschaltungsentwurfs durch Synthesewerkzeuge im Vergleich zum Digitalschaltungsentwurf liegt in den grundsätzlichen Unterschieden zwischen Digital- und Analogschaltungsentwurf.

## Analogsynthese: Digital vs. Analogschaltungsentwurf

	Digitalschaltungsentwurf	Analogschaltungsentwurf
Schaltungsgröße in Transistoren	Millionen	Dutzende
Typischer Entwurf eines Transistor	Minimalabmessungen	Optimierung unter Verwendung aller Freiheitsgrade
Vorherrschender Entwurstil	automatisiert	handoptimiert
Wieder- verwendbarkeit	Standardzellen	Wiederverwendbare Topologien, die in der Regel individuell angepasst werden müssen
Hierarchie	Weitgehende Abstraktion	Wenige Abstraktionsmöglichkeiten
Spezifikation	Synthesefähige Sprache	Schaltungs-klasse + Schaltungseigenschaften

## Analogsynthese: Topologiesynthese und Dimensionierung



Bei der analogen Schaltungssynthese sind eine Netzliste und die Schaltungsparameter bei gegebener Spezifikation und Technologiedaten gesucht. Dies stellt ein gemischt-kombinatorisch-nichtlineares Optimierungsproblem (MINLP, mixed-integer-nonlinear programming problem) dar. Zur Reduktion der hohen Komplexität wird es nach dem Teile und Herrsche-Prinzip in zwei Teilprobleme zerlegt: Topologiesynthese (kombinatorisches Optimierungsproblem, IP) und Dimensionierung (nichtlineares Optimierungsproblem, NLP). Dadurch muss auf Optimalität bei der Lösung des Schaltungssyntheseproblems verzichtet werden.

## Analogsynthese: Topologiesynthese

# Topologiesynthese

### Topologieselektion

- Bibliotheksansatz
- Unflexibel

### Topologiegenerierung

- Konstruktiv, "kreativ"
- Genetische Optimierung o. ä.
- Ausschließlich Forschung

**Problem:** Topologiebewertung OHNE Dimensionierung

Die Topologieselektion ist ein Bibliotheksansatz zur Lösung des Topologiesyntheseproblems, der auf der Wiederverwendung (Reuse) von einmal erstellten Topologien, teilweise unter Verwendung von Hierarchie aufbaut. Der Nachteil eines solchen Ansatzes besteht darin, dass die Bibliothek starr ist. Sie ist infolge des rasanten technologischen Wandels sehr schnell veraltet und unbrauchbar. Zusätzlich fällt der hohe Erstellungsaufwand einer umfassenden Bibliothek an.

Ein automatisches Topologiesyntheseverfahren muss in der Lage sein, neuartige Topologien zu generieren, wenn der technologische Fortschritt dies erfordert. Dies kann eine Topologieselektion mit Bibliotheksansatz nicht leisten. Es ist stattdessen ein konstruktiver, d. h. kreativer, Syntheseprozess erforderlich. Algorithmen zur konstruktiven Topologiesynthese sind bisher jedoch ausschließlich Gegenstand der Forschung. Veröffentlichte Ansätze stützen sich häufig auf genetische Optimierungsverfahren.

Sowohl bei der Topologieselektion als auch bei der konstruktiven Topologiegenerierung besteht die Schwierigkeit in der Bewertung der Topologien hinsichtlich der in der Spezifikation geforderten Eigenschaften und der Auswahl der besten. Dabei darf nach dem Teile und Herrsche-Prinzip der Dimensionierungsschritt nicht ausgeführt werden.



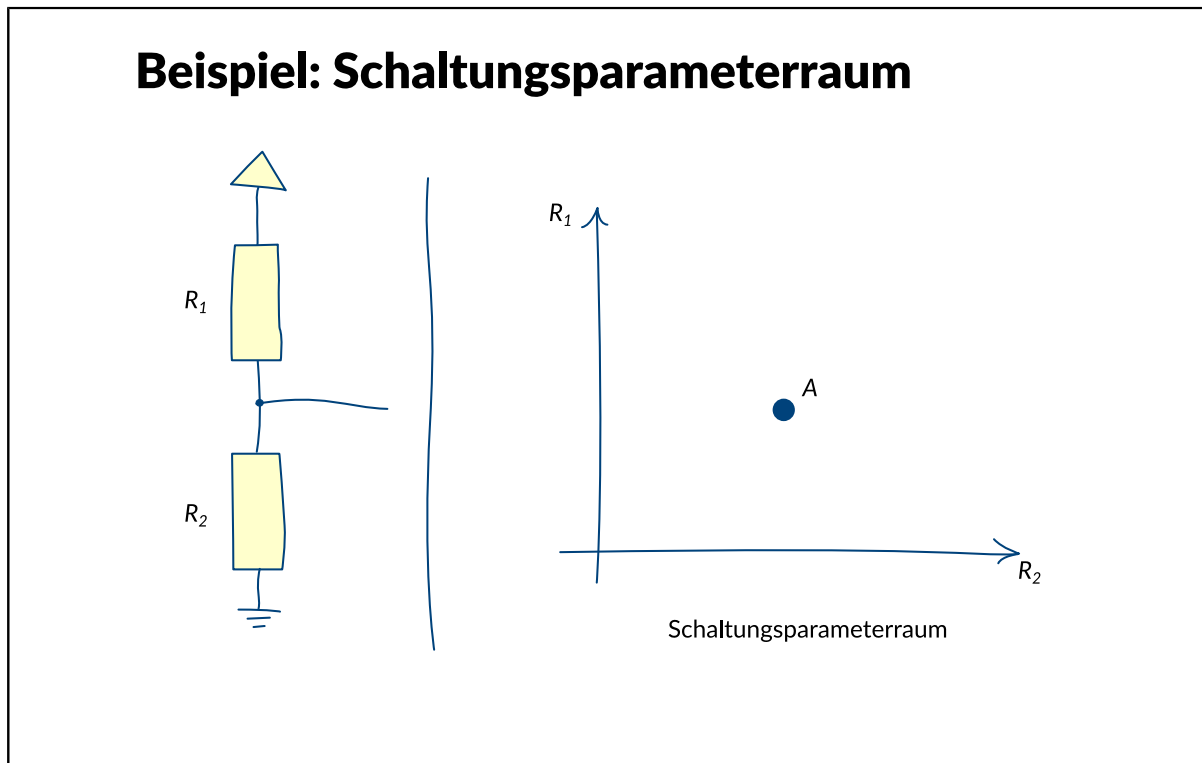
## Analogsynthese: Schaltungsparameterraum

### **Dimensionierung: Schaltungsparameterraum**

- Schaltungsparameterraum wird aufgespannt durch die Parameter der Bauelemente der Topologie, z.B.
  - Kanalweiten und -längen von MOS-Transistoren
  - Widerstände
  - Kapazitäten
- Jede mögliche Dimensionierung ist ein Punkt im Schaltungsparameterraum

Der Schaltungsparameterraum wird durch alle im Entwurf zu bestimmenden Bauelementeparameter gebildet. Dies sind z. B. die Kanalweiten und -längen von MOS-Transistoren und die Werte von Widerständen und Kapazitäten. Damit entspricht jeder möglichen Dimensionierung genau ein Punkt im Schaltungsparameterraum.

## Analogsynthese: ... Beispiel



Das Bild zeigt einen aus zwei Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  bestehenden Spannungsteiler. Für diesen sind  $R_1$  und  $R_2$  die Bauelementeparameter, die bestimmt werden sollen. Hieraus ergibt sich der dargestellte, zweidimensionale Schaltungsparameterraum. Punkt A repräsentiert eine mögliche Dimensionierung, durch die für  $R_1$  und  $R_2$  Zahlenwerte festgelegt sind.

Für komplexere Schaltungen ergeben sich eine höhere Anzahl von Dimensionen für den Schaltungsparameterraum.

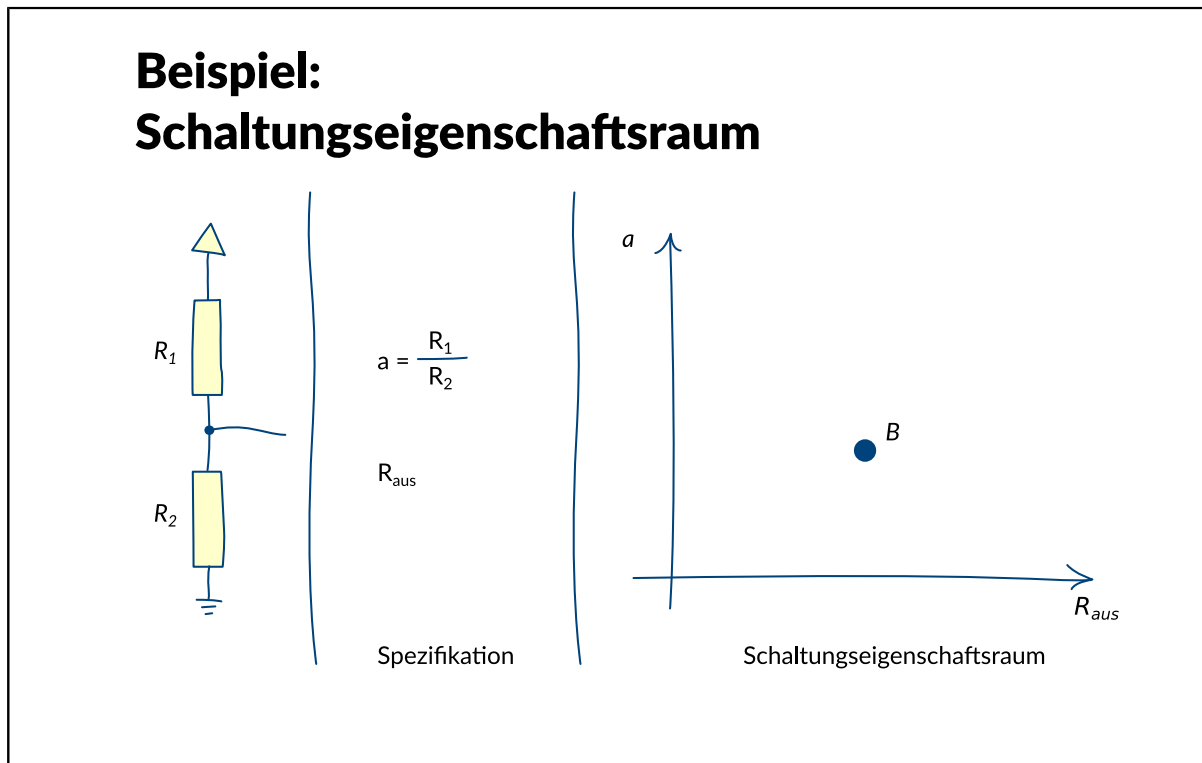
## Analogsynthese: Schaltungseigenschaftsraum

### **Dimensionierung: Schaltungseigenschaftsraum**

- Schaltungseigenschaftsraum wird aufgespannt durch spezifizierte Eigenschaftsgrößen der Schaltung, z.B.
  - Verstärkung
  - Bandbreite
  - Rauschen
  - Stromverbrauch
  - Fläche etc.
  
- Zu jeder möglichen Dimensionierung gehört ein Punkt im Schaltungseigenschaftsraum.

Der Schaltungseigenschaftsraum wird von den in der Spezifikation verwendeten Eigenschaftsgrößen aufgespannt. Typische Eigenschaftsgrößen bei Analogschaltungen sind Verstärkung, Bandbreite, Rauschen, Leistungsverbrauch und Chipflächenbedarf. Für jede mögliche Dimensionierung einer Schaltung ergibt sich genau ein Punkt im Schaltungseigenschaftsraum.

## Analogsynthese: ... Beispiel



Das Bild zeigt erneut den aus zwei Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  bestehenden Spannungsteiler. Die spezifizierten Eigenschaftsgrößen seien das Teilungsverhältnis  $a$  und der Ausgangswiderstand  $R_{aus}$ . Sie bilden den dargestellten Schaltungseigenschaftsraum. Der Punkt  $B$  zeigt die Eigenschaftsgrößen, die sich durch eine bestimmte Dimensionierung ergeben.

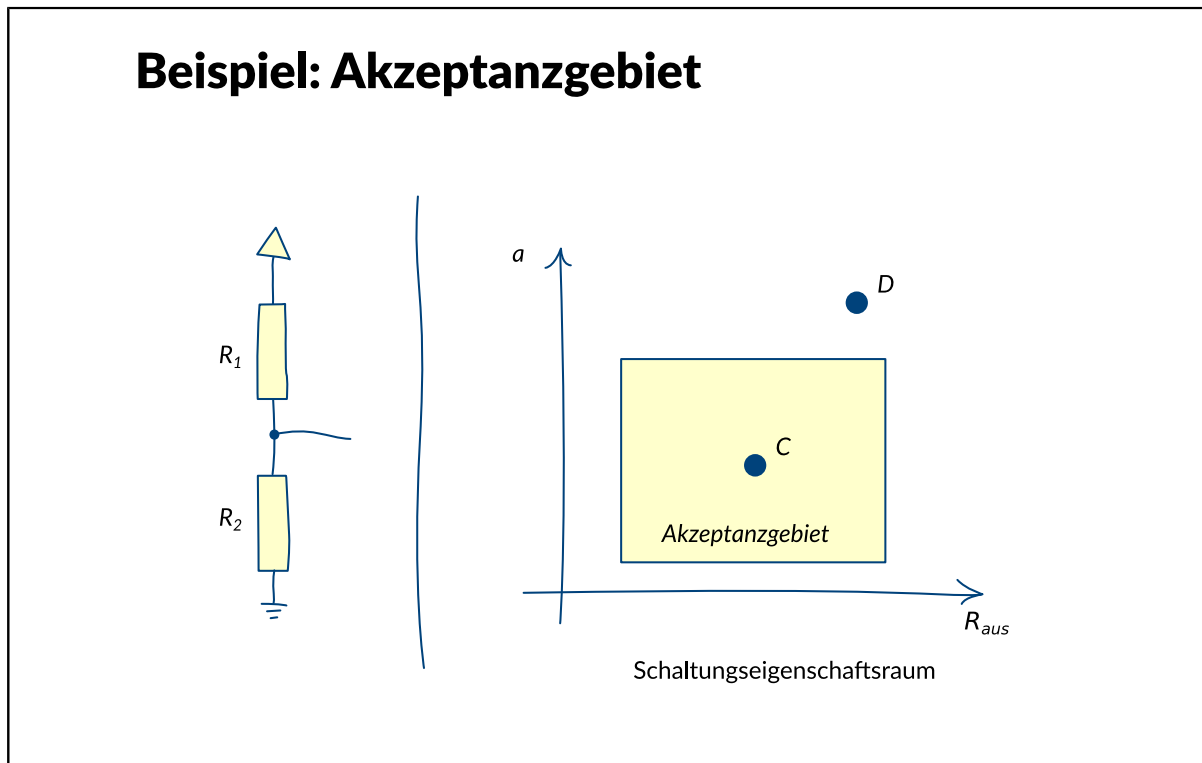
## Analogsynthese: Akzeptanzgebiet

### Akzeptanzgebiet

- Die Spezifikation gibt Grenzen für Eigenschaften vor. Sie beschreiben das erlaubte Gebiet im Schaltungseigenchaftsraum, das sogenannte Akzeptanzgebiet.
- Jede mögliche Dimensionierung entspricht einem Punkt im Schaltungseigenchaftsraum. Liegt der Punkt
  - innerhalb des Akzeptanzgebietes  
=> Spezifikation erfüllt
  - außerhalb des Akzeptanzgebietes  
=> Spezifikation verletzt

Die Spezifikation gibt Unter- und Obergrenzen für die Schaltungseigenchaftsgrößen an. Dadurch wird im Schaltungseigenchaftsraum ein erlaubtes Gebiet für die Werte der Eigenchaftsgrößen definiert, das so genannte Akzeptanzgebiet. Liegt der einer bestimmten Dimensionierung entsprechende Eigenchaftspunkt im Schaltungseigenchaftsraum innerhalb des Akzeptanzgebietes, ist die Spezifikation für diese Dimensionierung erfüllt. Liegt er außerhalb, ist sie verletzt.

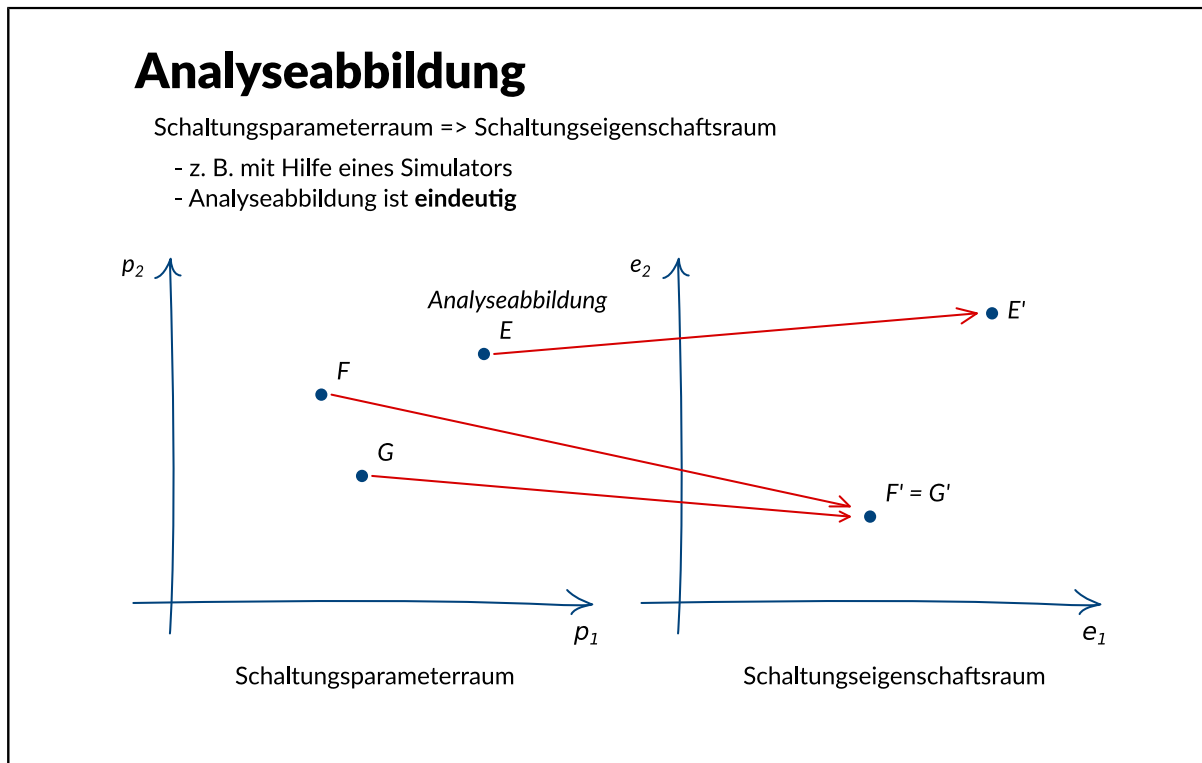
## Analogsynthese: ... Beispiel



Das Bild zeigt erneut den aus zwei Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  bestehenden Spannungsteiler, sowie den Schaltungseigenschaftsraum für die Eigenschaften Teilungsverhältnis  $a$  und Ausgangswiderstand  $R_{aus}$ . Zusätzlich ist das durch die Spezifikation definierte Akzeptanzgebiet dargestellt. Die Dimensionierung, die Punkt C ergibt, erfüllt die Spezifikation, diejenige, die Punkt D ergibt, verletzt sie.

Die dargestellte achsenparallele rechteckige Form ist typisch für Akzeptanzgebiete im Schaltungseigenschaftsraum, da in der Spezifikation feste Ober- und Untergrenzen für Schaltungseigenschaftsgrößen gegeben sind. Falls für eine Größe nur eine Ober- oder eine Untergrenze angegeben ist, ist das Akzeptanzgebiet nach unten bzw. oben offen.

## Analogsynthese: Analyseabbildung

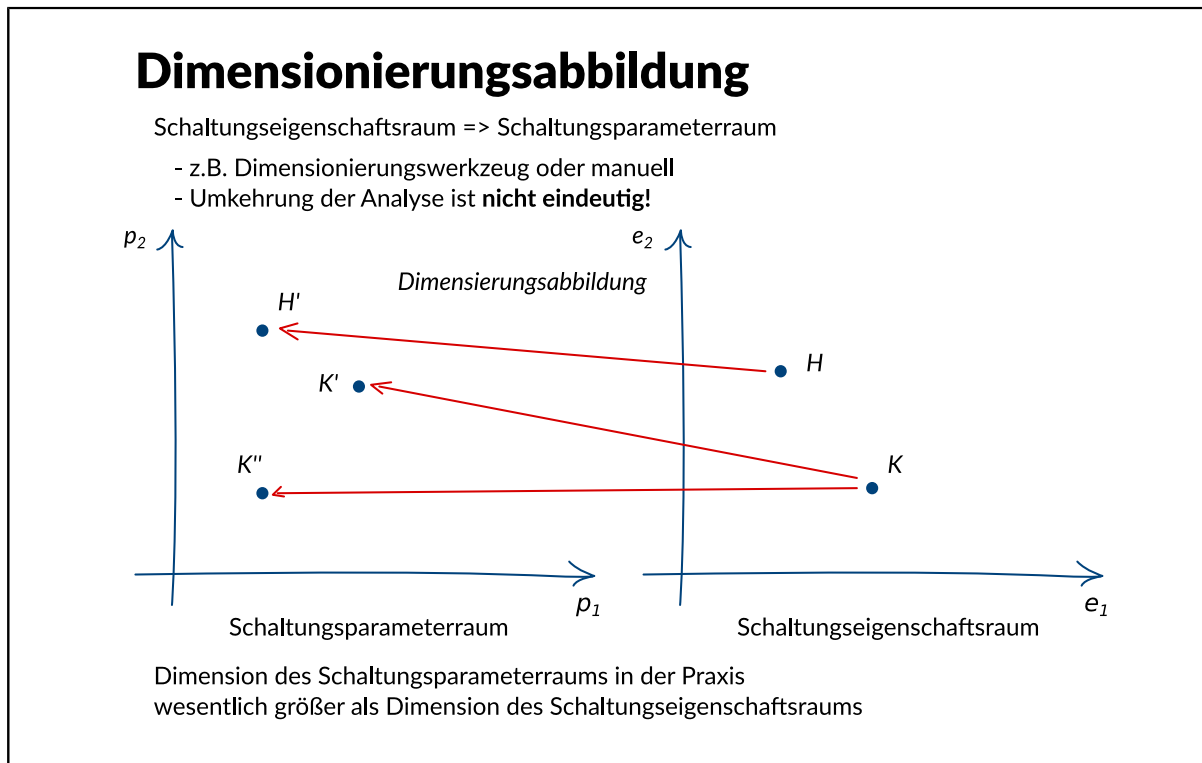


Die Zuordnung der Punkte in Schaltungsparameter- und Schaltungseigenschaftsraum zueinander kann in zwei Richtungen geschehen: Durch Abbildung vom Schaltungsparameter- in den Schaltungseigenschaftsraum oder umgekehrt.

Bei der Analyseabbildung handelt es sich um einen Analysevorgang. Sie ist in der Regel eindeutig. Sie wird in der Praxis meist durch einen Schaltungssimulator durchgeführt.

Das Bild zeigt den Schaltungsparameter- und -eigenschaftsraum für das Spannungsteilerbeispiel sowie exemplarisch die Abbildung von drei Punkten  $E$ ,  $F$  und  $G$  aus dem Schaltungsparameter- in den Schaltungseigenschaftsraum mit Hilfe einer Analyseabbildung. Die Bildpunkte  $F'$  und  $G'$  fallen im Schaltungseigenschaftsraum zusammen, d. h. die Dimensionierungen der Punkte  $F$  und  $G$  weisen die gleichen Eigenschaften auf.

## Analogysynthese: Dimensionierungsabbildung



Im Fall der Dimensionierungsabbildung handelt es sich um einen Synthesevorgang. Sie kann als Umkehrung der Analyseabbildung definiert werden, ist dadurch aber nicht eindeutig definiert, da mehrere Dimensionierungen die gleichen Eigenschaften haben können.

Die Dimension des Schaltungsparameterraums ist bei praktischen Problemen wesentlich größer als die des Schaltungseigenschaftsraums.

Im Bild ist ein Beispiel für eine Dimensionierungsabbildung dargestellt: Die Punkte H und K werden aus dem Schaltungseigenschafts- in den Schaltungsparameterraum abgebildet. Für den Punkt K ergeben sich aufgrund der Mehrdeutigkeit der Dimensionierungsabbildung zwei Bildpunkte K' und K''.



## Analogsynthese: Abbildung des Akzeptanzgebietes

### Abbildung des Akzeptanzgebietes

**Bei Dimensionierung gesucht:**

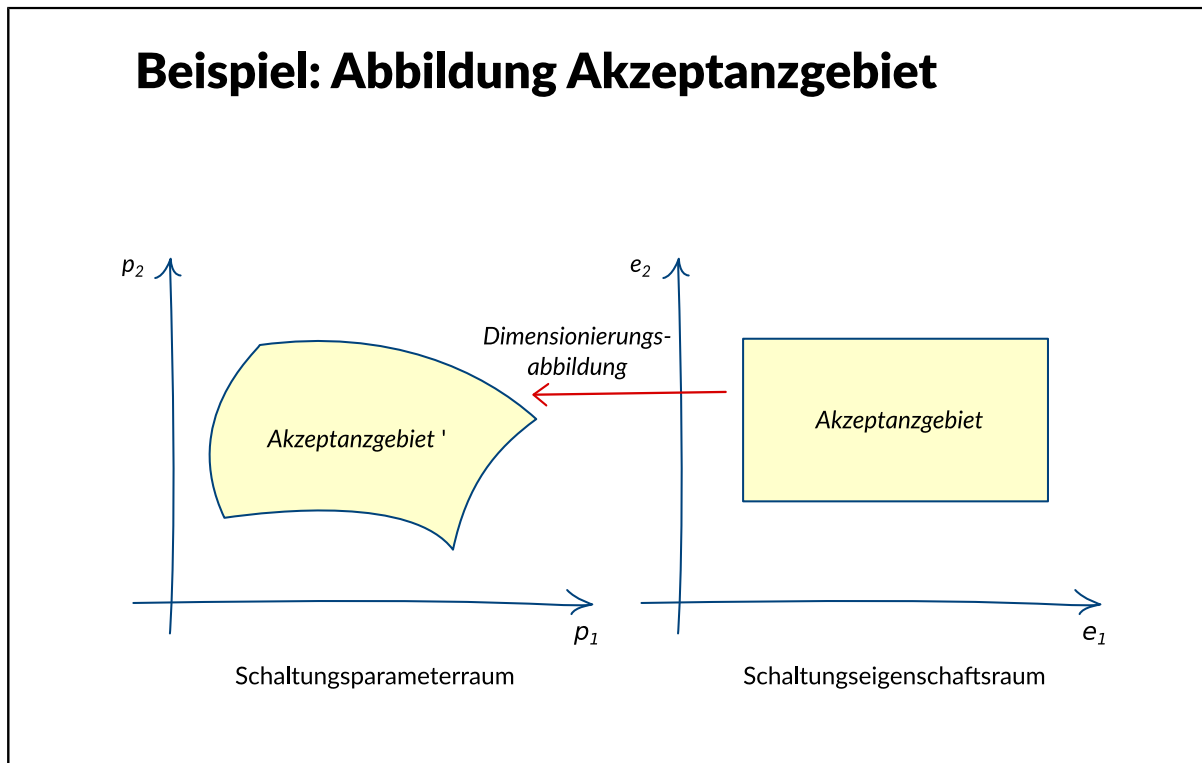
Punkte im Schaltungsparameterraum mit  
Bildpunkten im Schaltungseigenschaftsraum  
innerhalb Akzeptanzgebiet.

**Ansatz:**

Abbildung des gesamten Akzeptanzgebietes  
mit Dimensionierungsabbildung

Aufgabe der Dimensionierung ist es, Punkte im Schaltungsparameterraum zu bestimmen, die die Spezifikation erfüllen. Ihre Bildpunkte im Schaltungseigenschaftsraum müssen daher innerhalb des Akzeptanzgebietes liegen. Zur Bestimmung aller Punkte mit dieser Eigenschaft ist das Akzeptanzgebiet aus dem Schaltungseigenschaftsraum mit Hilfe der Dimensionierungsabbildung in den Schaltungsparameterraum abzubilden.

## Analogsynthese: ... Beispiel



Das Bild zeigt Schaltungsparameter und -eigenschaftsraum für das Spannungsteilerbeispiel. Das im Schaltungseigenschaftsraum gegebene Akzeptanzgebiet wird mit der Dimensionierungsabbildung in den Schaltungsparameterraum abgebildet. Die Form des Bildes "Akzeptanzgebiet'" ist i. A. nicht mehr rechteckig.

## Analogsynthese: Dimensionierungsproblem

### Dimensionierungsproblem

Akzeptanzgebiet im Schaltungsparameterraum enthält mehr als einen Punkt.

Verwendung eines Optimierungszieles zur Auswahl des besten Punktes

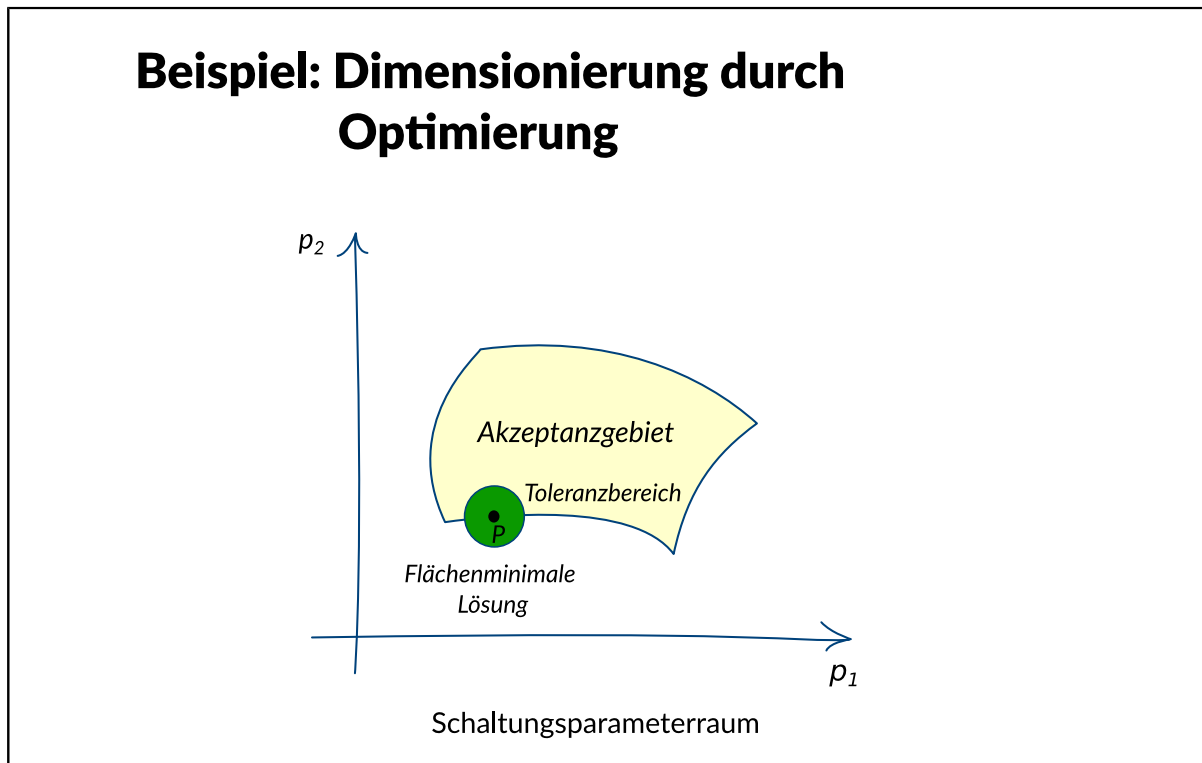
- Minimierung von Chipfläche, Stromverbrauch
- Maximierung von Bandbreite, Verstärkung o.ä.

→ Dimensionierungsproblem ist ein nichtlineares Optimierungsproblem (NLP) mit der Randbedingung:

- Die Lösung muss innerhalb des Akzeptanzgebietes liegen

Das Akzeptanzgebiet und sein Bild im Schaltungsparameterraum enthalten eine unendliche Anzahl von Punkten, die die Spezifikation erfüllen. Für den Entwurf wird jedoch nur genau ein Satz von Schaltungsparametern für die Topologie, also ein Punkt im Schaltungsparameterraum, benötigt. Es muss daher ein Punkt im Akzeptanzgebiet ausgewählt werden. Dieses kann nach verschiedenen Kriterien geschehen, die formal als Optimierungsziele ausgedrückt werden. Beispielsweise kann unter allen Punkten derjenige gewählt werden, der eine minimale Chipfläche oder einen minimalen Stromverbrauch hat. Andere gebräuchliche Ziele sind Maximierung von Bandbreite oder Herstellungsausbeute. Ein solches Optimierungsziel wird zusätzlich in die Spezifikation aufgenommen. Damit ist das Dimensionierungsproblem ein nichtlineares Optimierungsproblem (NLP) mit der Randbedingung, dass die Lösung innerhalb des Akzeptanzgebietes liegen muss.

## Analogsynthese: Beispiel Dimensionierung durch Optimierung



Bei der Abbildung des Akzeptanzgebietes im Schaltungsparameterraum wurde durch Minimierung der Chipfläche der Punkt P bestimmt. Dieser liegt auf dem Rand des Akzeptanzgebietes. Durch Schwankungen der Widerstandswerte infolge von Toleranzen kann es leicht passieren, dass der Punkt das Akzeptanzgebiet verlässt. In diesem Fall ist die Spezifikation verletzt, und eine derartige Schaltung würde beim Test im Anschluss an die Herstellung aussortiert. Dadurch kommt es zu Ausschuss und entsprechend höheren Kosten.

## Analogsynthese: Ausbeuteoptimierung

### Ausbeuteoptimierung

**Prozess unterliegt Toleranzen:**

z.B. Widerstand +/- 20%

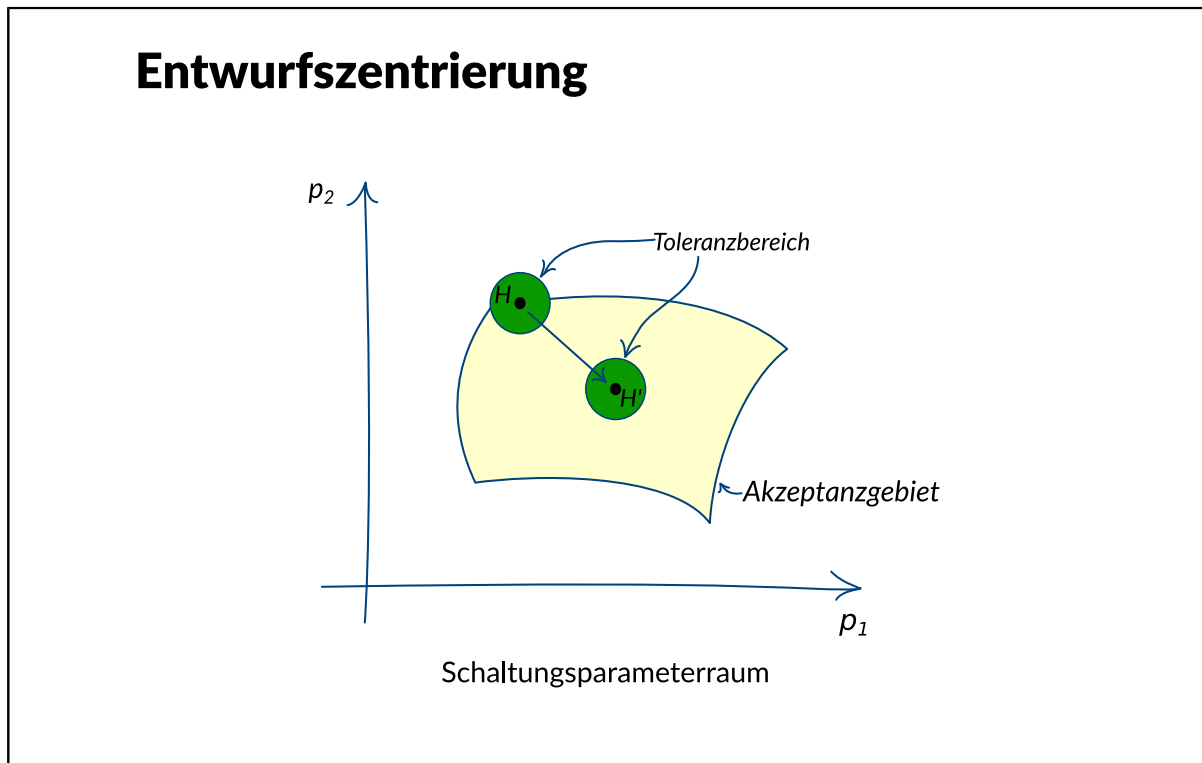
**Eigenschaftsschwankungen können Spezifikation verletzen**

**Ausbeute als Zielfunktion**

- Möglichst viele hergestellte Schaltungen sollen Spezifikation erfüllen
- Ausbeute = (Anzahl fehlerfreier Chips) / (Gesamtzahl hergestellter Chips)
- Produktionsprozess muss analysiert (=simuliert) werden (sehr aufwändig)

Bei der Herstellung integrierter Schaltungen kommt es infolge von Toleranzen zu statistisch verteilten Abweichungen von den vorgegeben Schaltungsparametern. Beispielsweise unterliegen Widerstände in integrierten Schaltungen Toleranzen von ca. 20%. Durch diese Schwankungen kommt es zu Spezifikationsverletzungen bei einem Teil der hergestellten integrierten Schaltungen, d. h. die Ausbeute liegt unter 100%. Sie ist allgemein als Quotient aus der Anzahl der Schaltungen, die die Spezifikation einhalten, zu der Gesamtzahl der Schaltungen definiert. Um eine maximale Ausbeute zu erzielen, muss diese als Zielfunktion der Optimierung gewählt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass so viele hergestellte Schaltungen wie möglich die Spezifikation einhalten. Im Rahmen der Optimierung muss die Ausbeute durch Analyse bestimmt werden, indem die statistischen Vorgänge der Fertigung simuliert werden. Derartige Simulationen sind jedoch sehr aufwändig.

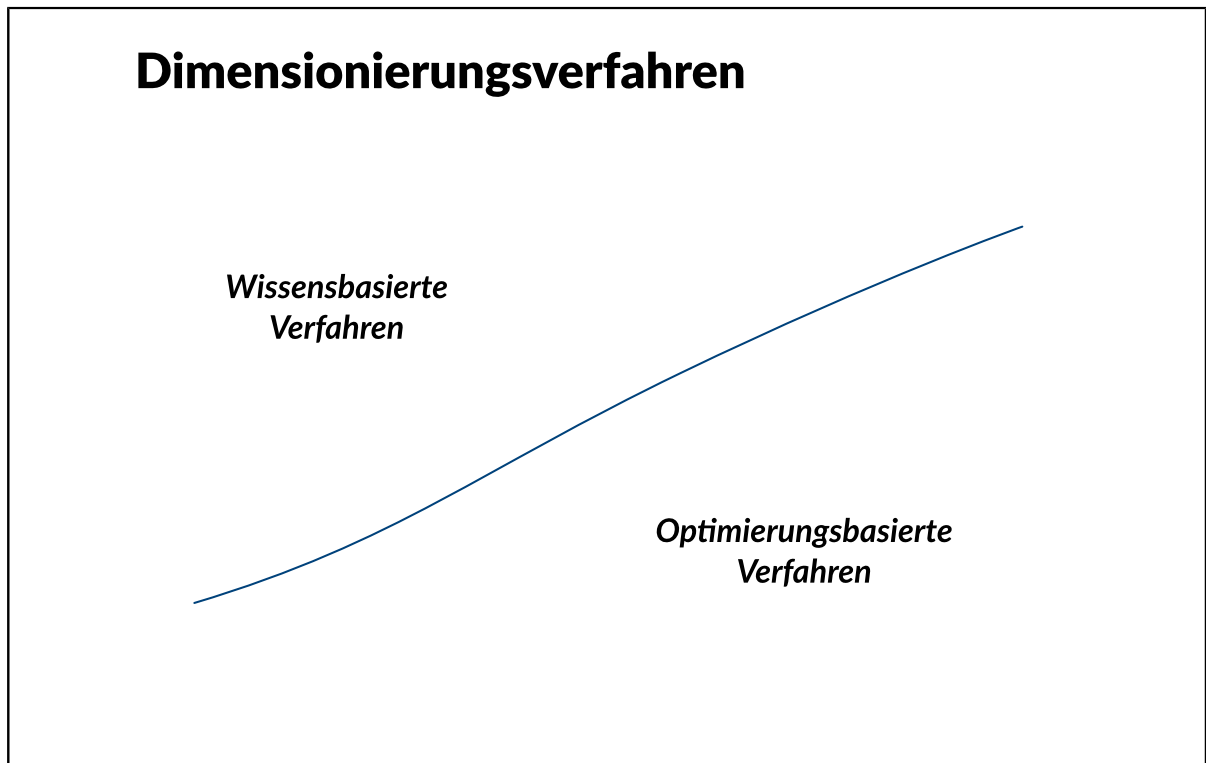
## Analogsynthese: Entwurfzentrierung



Ein Ansatz, die Ausbeute ohne Simulation der statistischen Vorgänge zu erhöhen, besteht in der so genannten Entwurfzentrierung. Dabei wird ein Punkt im Zentrum des Bildes des Akzeptanzgebietes im Schaltungsparameterraum gewählt, der möglichst weit von der Begrenzung des Akzeptanzgebietes entfernt ist. Durch diesen "Sicherheitsabstand" wird erreicht, dass kleine Schwankungen der Schaltungsparameter nicht zum Verlassen des Akzeptanzgebietes führen, so dass die Ausbeute verbessert wird.

Obwohl dieser Ansatz ohne eine aufwändige Ausbeuteanalyse auskommt, verbleibt immer noch die Notwendigkeit, den Rand des Akzeptanzgebietes zu bestimmen oder abzuschätzen. Dieses erfordert immer noch einen hohen Rechenaufwand.

## Analogsynthese: Dimensionierungsverfahren



Praktische Dimensionierungsverfahren lassen sich in zwei Klassen einteilen:

- wissensbasierte und
- optimierungsbasierte Verfahren.

## Analogsynthese: Wissensbasierte Verfahren

### Wissensbasierte Verfahren

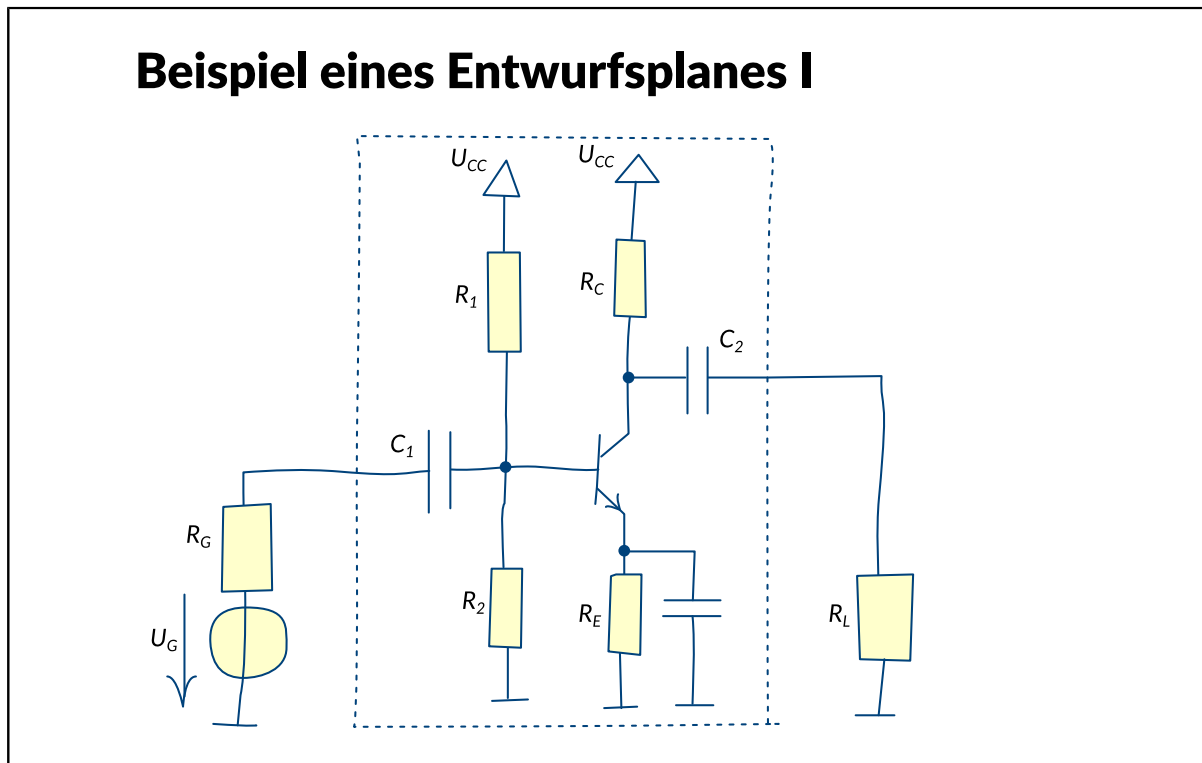
- Kochrezeptartige Entwurfspläne
- Heuristiken, Näherungen
- Bibliotheksansatz
- Ungenauigkeiten, suboptimale Ergebnisse
- Schnell

Bei der Klasse der wissensbasierten Verfahren werden kochrezeptartige Entwurfspläne verwendet. Diese sind dem Handentwurf nachempfunden und basieren auf dem Wissen von Schaltungsentwicklern. Dieses Wissen muss für jede Topologie erfasst und in eine maschinenlesbare Sprache umgewandelt werden. Es finden in der Regel Heuristiken und Näherungen Anwendung. Dieser Ansatz führt zu einem Bibliotheksansatz, wobei die Bibliothek aus Topologien und den zugeordneten Entwurfsplänen besteht. Eine solche Bibliothek ist aufwändig zu erstellen und hat infolge des rasanten technischen Fortschritts nur eine kurze Lebensdauer.

Durch die Verwendung von Näherungen und Heuristiken kommt es bei Verwendung von Entwurfsplänen zu suboptimalen Ergebnissen und Abweichungen vom gewünschten Verhalten, die u. U. bis zur Spezifikationsverletzung reichen können. Vorteilhaft ist der sehr geringe Rechenaufwand. Von Spezialgebieten abgesehen, haben wissensbasierte Ansätze keine praktische Bedeutung mehr.



## Analogsynthese: Beispiel eines Entwurfsplanes

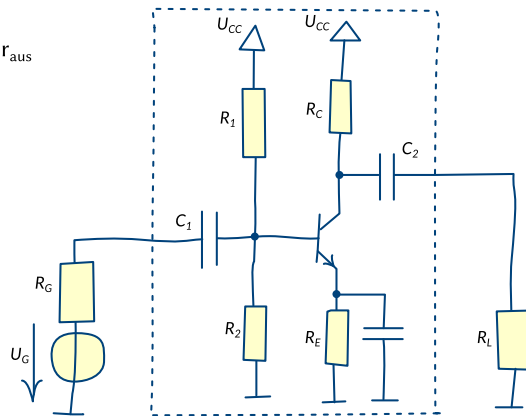


Das Bild zeigt einen einstufigen Verstärker mit Bipolartransistor (Emitterverstärker). Mit Hilfe eines Entwurfsplanes sollen die Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_C$  und  $R_E$  für vorgegebene AC-Verstärkung  $v$  und Ausgangswiderstand  $R_{aus}$  dimensioniert werden.

## Analogsynthese: Beispiel eines Entwurfsplanes II

### Beispiel eines Entwurfsplanes II

- $C_1, C_2, C_3$  sind AC-Kurzschlüsse
- Näherung:  $R_C = r_{aus}$
- Heuristik:  $R_E = R_C / 10$
- Näherungen:  $r_{ein} \gg R_G, r_{aus} \ll R_L$   
mit  $g_m = di_c/du_{BE} = I_C/U_T$  und  $V = g_m \cdot r_{aus}$   
 $\Rightarrow I_C = (V \cdot U_T) / r_{aus}$
- Näherung:  $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$
- Heuristik:  $U_{CC} / (R_1 + R_2) = I_C / 10$
- Näherung:  $I(R_2) = I(R_1)$   
 $\Rightarrow R_2 = 10 (R_E + U_{BE} / I_C),$   
 $R_1 = 10 U_{CC} / I_C - R_2$



Bei der Aufstellung des Entwurfsplans wird angenommen, dass die Kapazitäten  $C_1, C_2$  und  $C_3$  sich im Wechselstrombetrieb wie Kurzschlüsse verhalten. Für kleine  $R_C$  kann der Ausgangswiderstand des Transistors gegenüber  $R_C$  vernachlässigt werden, so dass  $R_C = R_{aus}$ . Zur Stabilisierung des Arbeitspunktes soll die Driftverstärkung nicht größer als 10 sein. Gleichzeitig soll der Spannungsabfall an  $R_E$  nicht größer sein als nötig, um einen maximalen Ausgangsspannungshub zu ermöglichen. Daher wird  $R_E = R_C / 10$  gewählt. Mit den Näherungen  $R_{in} \# R_G, R_{aus} \# R_L$  ist  $V = (I_C / U_T) \cdot R_{aus}$ , so dass  $I_C = (V \cdot U_T) / R_{aus}$  bestimmt werden kann. Damit der Basisspannungsteiler möglichst unabhängig von  $I_B$  ist, wird der Querstrom zu  $10 \cdot I_B$  gewählt. Bei einem angenommenen  $BETA = 100$  ergibt dies  $U_{CC} / (R_1 + R_2) = I_C / 10$ . Dann kann  $I(R_2) = I(R_1)$  angenommen werden. Ferner wird  $U_{BE} = 0.7 \text{ V}$  angenähert. Eine Masche über  $R_2, R_E$  und  $R_E$  ergibt dann:  $R_2 = 10 (R_E + U_{BE} / I_C)$  und aus  $U_{CC} / (R_1 + R_2) = I_C / 10$  folgt:  $R_1 = 10 U_{CC} / I_C - R_2$ .

## Analogsynthese: Anwendung des Entwurfsplanes

### Anwendung des Entwurfsplanes

-  $V = 40 \text{ dB}$

-  $r_{\text{aus}} = 1 \text{ k}\Omega$

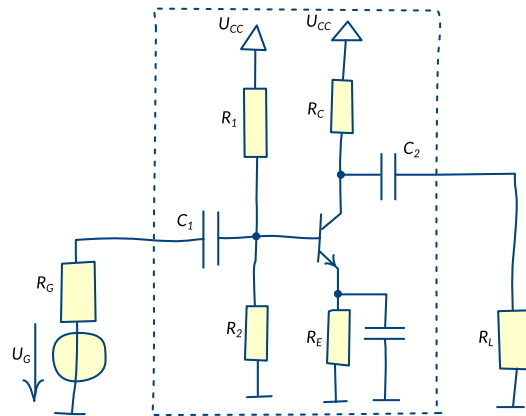
-  $U_{\text{CC}} = 10 \text{ V}$

-  $R_{\text{C}} = 1 \text{ k}\Omega$

-  $R_{\text{E}} = 100 \Omega$

-  $R_2 = 3,8 \text{ k}\Omega$

-  $R_1 = 36,2 \text{ k}\Omega$



- Spice-Simulation mit Q2N2222,  $R_{\text{C}} = 0 \Omega$ ,  $R_{\text{L}} = \text{unendlich}$ :

$V = 38,8 \text{ dB}$ ,  $r_{\text{aus}} = 970 \Omega$

Die Anwendung des Entwurfsplanes auf eine Dimensionierungsaufgabe mit  $V = 40 \text{ dB}$ ,  $R_{\text{aus}} = 1 \text{ k}\Omega$  und  $U_{\text{CC}} = 10 \text{ V}$  ergibt:  $R_{\text{C}} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{\text{E}} = 100 \Omega$ ,  $R_2 = 3,8 \text{ k}\Omega$  und  $R_1 = 36,2 \text{ k}\Omega$ . Zur Kontrolle des Ergebnisses wird eine Eigenschaftsanalyse mit dem Simulator Spice durchgeführt. Dieser liefert bei einem Transistor des Typs 2N2222,  $R_{\text{G}} = 0$  und Leerlauf am Ausgang des Verstärkers  $V = 38,8 \text{ dB}$  und  $R_{\text{aus}} = 970 \Omega$ . Diese Werte zeigen, dass die mit dem Entwurfsplan erzielten Eigenschaften von den vorgegebenen Sollwerten leicht abweichen. Dies ist auf die Näherungen zurückzuführen.

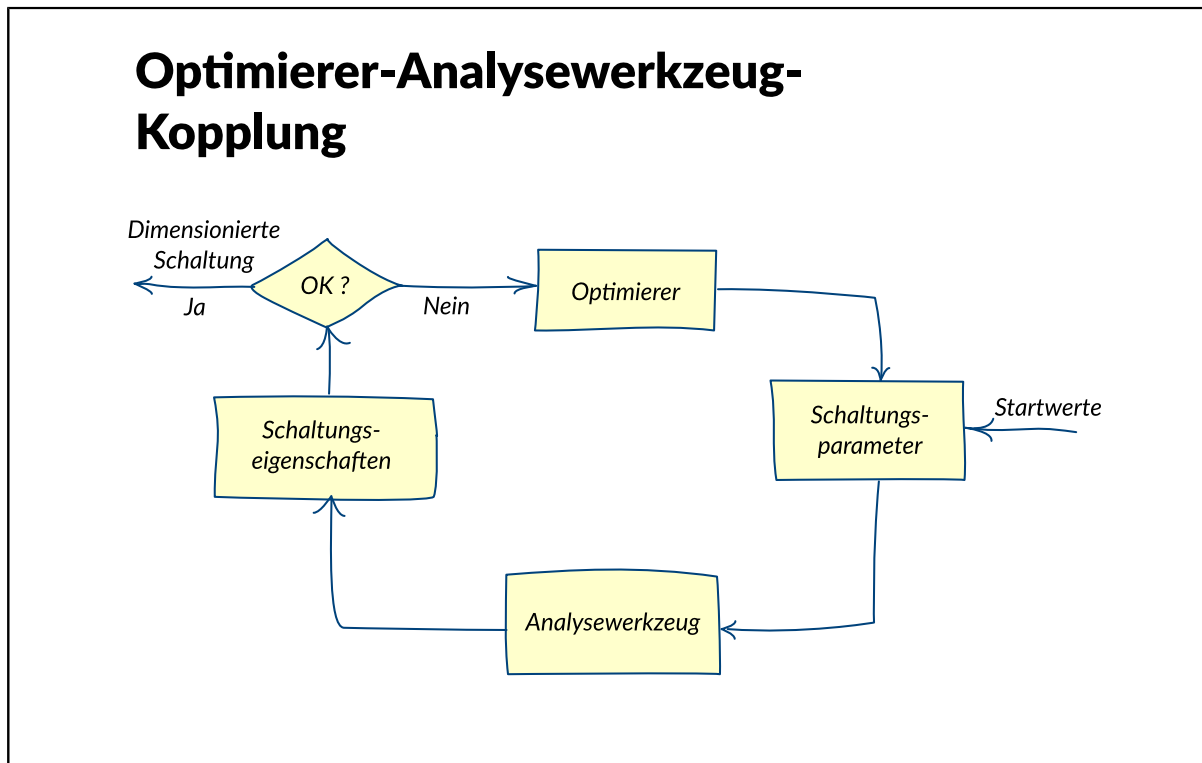
## Analogsynthese: Optimierungsbasierte Verfahren

### Optimierungsbasierte Verfahren

- + Lösung mit beliebiger Genauigkeit  
durch Optimierer-Analysewerkzeug-  
Kopplung
  
- Aufwändig
  
- Konvergenzprobleme

Optimierungsbasierte Verfahren lösen das nichtlineare Optimierungsproblem mit Randbedingungen, das sich aus der Dimensionierungsaufgabe ergibt, mit einem iterativen Optimierungsverfahren. Dabei sind grundsätzlich keine Näherungen notwendig: Durch die Allgemeinheit der Optimierer-Analysewerkzeug-Kopplung hängt die Genauigkeit nur vom Analysewerkzeug ab. Gegenüber wissensbasierten haben optimierungsbasierte Ansätze einen erheblich höheren Rechenaufwand. Das iterative Vorgehen kann zu Konvergenzproblemen führen.

## Analogsynthese: Optimierer-Analysewerkzeug-Kopplung



Wie im Bild gezeigt, wird bei einem optimierungsbasierten Ansatz ein Optimierer mit einem beliebigen Analysewerkzeug gekoppelt: Der Optimierer übergibt dem Analysewerkzeug einen Satz Schaltungsparameter, das Analysewerkzeug bestimmt die dafür gültigen Schaltungseigenschaften und gibt diese an den Optimierer zurück. Auf der Grundlage der Eigenschaften verändert der Optimierer die Schaltungsparameter und übergibt sie erneut dem Analysewerkzeug. Diese Schleife wird so lange durchlaufen, bis die Spezifikation unter Berücksichtigung aller Toleranzgrenzen und -bedingungen erfüllt ist.

## Analogsynthese: Optimierer und Analysewerkzeuge

Verfahren	Optimierer	Analysewerkzeug
Analyseskripte	Mensch	Handabgeleitete Gleichungen (Mensch)
Gleichungsbasiert	Numerisches Verfahren	Handabgeleitete Gleichungen (Mensch)
Symbolische Analyse	Numerisches Verfahren	Automatisch abgeleitete Gleichungen
Simulatorbasiert	Numerisches Verfahren	Simulator

Der optimierungsbasierte Ansatz erlaubt es, verschiedene Komponenten als Optimierer und Analysewerkzeug zu koppeln. Eine chronologische Aufstellung der verschiedenen Verfahren in der Entwicklung des optimierungsbasierten Ansatzes ist in der Tabelle dargestellt. Heutiger Stand ist die Kopplung eines numerischen Optimierungswerkzeuges mit einem Schaltungssimulator. Dieses ermöglicht hohe Genauigkeit und die Ausnutzung aller Analysearten, die der Simulator bietet. Abhängig von dem verwendeten Optimierungsverfahren fällt jedoch eine große Zahl an Simulationen und damit ein hoher Rechenaufwand an.