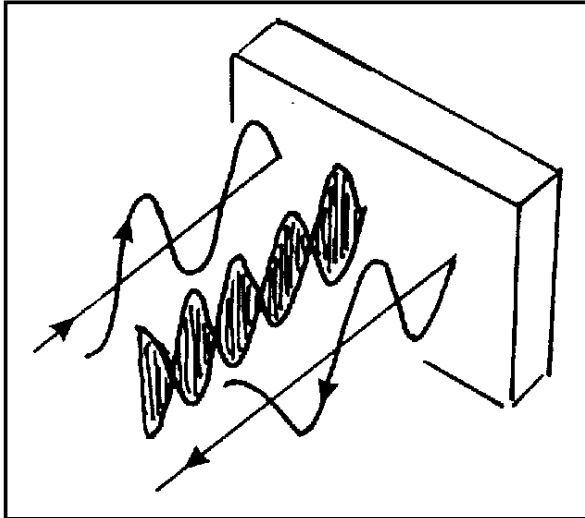


Jürg Jecklin
floatsound@bluewin.ch

Anhang Grundlagen



Inhalt

1. Eigenheiten von Musikaufnahmen
2. die Idee des Logarithmus
3. Pegel und Pegelrechnung
4. Rechnen mit komplexen Zahlen
5. Grössen und Einheiten
6. Schall und Schallausbreitung
7. Elektrotechnik

Ueberblick Scripts

Theorie der Tontechnik

1. Geschichte der Tontechnik	tt01.pdf
2. Gehör	tt02.pdf
3. Mikrofone	tt03.pdf
4. Schallquellen	tt04.pdf
5. Lautsprecher und Kopfhörer	tt05.pdf
6. Akustik und Raumbeschallung	tt06.pdf
7. analoge Audiotechnik	tt07.pdf
8. digitale Audiotechnik	tt08.pdf
9. Signalaufzeichnung	tt09.pdf
10. Technik der Musikaufnahme	tt10.pdf

Anhang

Grundlagen	ttA.pdf
------------	---------

Tontechnik special

Aufnahmen	ttspecial.aufnahmen
Grundlagen	ttspecial.grundlagen
Lautsprecher im Raum	ttspecial.L-imraum
Mhs2	ttspecial.mhs2
Mikrofone	ttspecial.mikrofon
Musikakustik	ttspecial.musikakustik
Surround	ttspecial.surround

Materialien zur Tontechnik

Computer	computer.pdf
Diverses	diverses.pdf
HD-Recording	hdrecording.pdf
Headphon	headphone.pdf
Lautsprecher	lautsprecher.pdf
Manuals	manuals.pdf
Mikrofone	microphone.pdf
Sound absorption	soundabsorption.pdf
Surround	surround.pdf
Technik	technik.pdf
Tube Data	tubedata.pdf

1. Die Merkmale von Musikaufnahmen

Die Faktoren Sound, Image und Space

1.1 Sound

Dieser Faktor betrifft den Klang einer Aufnahme

Den Klangcharakter einer Aufnahme lässt sich nur Beschreiben, zum Beispiel auf der Basis von Polaritätsdiagrammen.

Beispiele:

- schön – hässlich
- voll – dünn
- spektakulär – flau
- etc.

Der Faktor *Sound* wird in erster Linie von den klanglichen Eigenheiten der Mikrofone, der Platzierung der Mikrofone, und den vom Tonmeister vorgenommenen Klangbeeinflussungen bestimmt.

2.2 Image

Der Faktor Image beschreibt die Art und Weise, wie sich der wiedergabeseitige Direktschalleindruck darstellt.

Im Extremfall dominiert der Direktschall, und die Schallquellen werden im Wiedergaberaum abgebildet.

In der Regel werden die Schallquellen aber räumlich hinter der Lautsprecherebene abgebildet.

Beim Faktor Image kann man zwischen der links-rechts-Abbildung und der Tiefenstaffelung (Abbildung hinter der Lautsprecherebene unterscheiden).

1.2.1 Width

Width beschreibt die Breite der Darstellung, die links/rechts-Abbildung, oder unter Umständen (Surround Sound) die „Rund-um-Abbildung eines Klangkörpers“.

1.2.2 Depth (Tiefenstaffelung)

Die Position der hinter der Lautsprecherebene abgebildeten Schallquelle wird mit der Zuordnung zu verschiedenen *Layers* beschrieben.

Layer 0

Die Schallquellen werden raumlos in der Ebene der Wiedergabelautsprecher abgebildet. Der Raum, in dem die Aufnahme gemacht worden ist, wird nicht erkenntlich, die Akustik des Wiedergaberaumes dominiert.

In den Dreissigerjahren des letzten Jahrhunderts hat man diese Art von reinen Abbildungsaufnahmen als „realistische Aufnahmen“ bezeichnen.

- Beispiele: Ansage beim Rundfunk, Sprecher, „Direktschnitt-Schallplatten“ aus der Anfangszeit der Audiotechnik (Caruso)
- Mikrofonierung: Polymikrofonie, nahe bei den Schallquellen platzierte Mikrofone

Layer 1

Schallquellen oder Schallquellengruppen sind in einem, beim direkten Hören als angenehm empfundenen Abstand hinter der Lautsprecherebene abgebildet.

- Beispiele: Kammermusikensemble, Einzelinstrumente und Sänger, Solisten
- Uebliche Mikrofonierung: Der Abstand der Mikrofone vom Klangkörper ist deutlich kleiner als der Hallradius des Aufnahme Raumes.

Layer 2

Schallquellengruppen werden in einem der Gruppengrösse angemessenen Abstand hinter der Lautsprecherebene abgebildet. Bei der Wiedergabe hat man den Eindruck eines üblich-angenehmen Zuhör-Abstandes.

- Beispiele: Grössere Instrumentalensembles (Kammerorchester) oder Streichergruppen von Sinfonieorchestern.
- Uebliche Mikrofonierung: Kombination von Hauptmikrofonanordnung und Stützmikrofonen. Der durch die Mischung sich ergebende Abstandseindruck ist kleiner als der Hallradius des Raumes.

Layer 3

Zweite Ebene eines tiefengestaffelten, grossen Klangkörpers. Die Akustik des Aufnahme Raumes ist deutlich wahrnehmbar.

- Beispiele: Blasinstrumente und eventuell Contrabässe, sowie die Schlagzeuginstrumente eines Sinfonieorchesters, Orgel in einer grossen Kirche.
- Uebliche Mikrofonierung: Kombination von Hauptmikrofonanordnung und Stützmikrofonen. Der Abstandseindruck kann im Extremfall dem Hallradius entsprechen.

Layer 4

Deutlich entfernt platzierte Schallquellen, die im Raum, oder (sogar ausserhalb des Raumes) abgebildet erscheinen.

- Beispiel: Fernorchester

1.3 Space

Der Faktor Space beschreibt die Wiedergabe der akustischen Umgebung, also die Räumlichkeit ohne spezifische Ortung von Einzelschallquellen

1.3.1 Full Space

Der Zuhörer fühlt sich in eine virtuelle akustische Umgebung eingebettet.

- Beispiele: Ambiophonie- und optimale Surround-Aufnahmen, Kunstkopfaufnahmen mit Kopfhörerwiedergabe.

1.3.2 Front Space

Der Räumlichkeitseindruck wird nur von vorn übertragen. Er wird als eingeschränkt, aber natürlich empfunden

- Beispiel: einzige Spacemöglichkeit, die mit einer Stereotechnik realisiert werden kann.

2. Aufnahmetechnik

2.1 Mikrofonierung

2.1.1 Abbildende Mikrofonierung

Idee

Es wird eine Mikrofonanordnung eingesetzt, die (im Bezug auf die wiedergabeseitige Lautsprecheraufstellung) bereits die richtigen Abbildungsinformationen (Laufzeit, Intensitäts- und Frequenzgangunterschiede zwischen den Wiedergabekanälen) liefert.

Mikrofonierung

- Intensitäts-Mikrofonanordnungen (XY, MS)
- Kopfbezogene Mikrofonanordnungen (ORTF, etc)
- Anordnungen mit Trennkörper (Jecklin-Scheibe etc.)

Eigenheiten

- *Image* und *Space* werden primär von der Mikrofonanordnung bestimmt. Die Gestaltungsmöglichkeiten am Mischpult und bei der Post Production sind eingeschränkt.
- Der Faktor *Sound* wird von den klanglichen Eigenheiten der Mikrofone bestimmt.
- Bei einer abbildenden Mikrofonanordnung ist je nach Mikrofonanordnung die Richtcharakteristik der Mikrofone (Niere, Acht, Superniere, etc.) vorgegeben. Ein Voller „Schalldruckempfänger-Sound“ kann nur mit Trennkörper-Anordnungen realisiert werden.

2.1.2 Trennende Mikrofonierung

Idee

Bei der Aufnahme werden nur die klanglichen Eigenheiten der Schallquellen aufgenommen, nicht aber ihre Platzierung.

Mikrofonierung

- Polymikrofonie mit den Schallquellen zugeordneten Mikrofonen. Bei der Aufnahme muss auf eine deutliche akustische Trennung zwischen den Mikrofonen geachtet werden. Optimal möglich ist das nur im Freien, in akustisch stark absorbierenden Räumen oder bei Playback-Aufnahmen.

Eigenheiten

- *Image* und *Space* müssen am Mischpult oder bei der Postproduction hergestellt werden.
- Da die Mikrofone weitgehend im Bezug auf ihre klanglichen Eigenheiten ausgewählt werden können, ist der Faktor *Sound* bei der trennenden Mikrofonierung problemlos in den Griff zu bekommen.

2.1.3 vermischende Mikrofonierung

Idee

Die Mikrofone werden so aufgestellt, dass einerseits einzelne Schallquellen, oder Raumbereiche mit mehreren Schallquellen bevorzugt aufgenommen werden, und andererseits eine "Vermischung" der Signale stattfindet, die einen einheitlichen Gesamteindruck zur Folge hat.

Mikrofonierung

- A/B-Technik und A/M/B-Technik, Polymikrofonie in halligen Räumen.

Eigenheiten

- Prinzipiell geeignet für die Realisierung des Faktors *Image*, die Abbildung entspricht aber nicht der Wirklichkeit (Gefahr eines „Loches in der Mitte“)
- Der Faktor *Space* lässt sich nicht optimal realisieren. Der Raumeindruck ist oft unnatürlich (A/B-Technik) oder zerrissen (Polymikrofonie)
- Da die Mikrofontypen relativ frei gewählt werden können, ist der Faktor Sound meist problemlos in den Griff zu bekommen.

2.1.4 Kombinationen

In der Praxis wird oft nicht eine der beschriebenen Mikrofonierungen konsequent praktiziert, sondern eine Kombination verschiedener Möglichkeiten (Kombination einer Hauptmikrofon-Anordnung mit Stützmikrofonen, getrennte Aufnahme von *Image* und *Space*, etc.)

3. Die Idee des Logarithmus

Text: Ernest Ansermet, aus "Die Grundlagen der Musik im menschlichen Bewusstsein"

Logarithmus heißt "Gesetz der Zahlen". Dieses Gesetz gründet sich auf der Beziehung, die sich zwischen einer so genannten geometrischen und einer so genannten arithmetischen Zahlenfolge herstellen lässt.

Eine geometrische Folge sieht z.B. wie folgt aus:

10 100 1000 10000 ····

eine arithmetische so:

0 1 2 3 4 ····

oder

0 n 2n 3n 4n ····

Die erste Folge entsteht dadurch, daß sich jedes Glied aus dem vorhergehenden durch die Multiplikation mit 10 entwickelt. 10 ist für diese Folge der Quotient oder die Basis der Logarithmen.

In der Mathematik bezeichnet man

$$100 = (10 \cdot 10)$$

als zweite Potent von 10, als zehn hoch zwei, was man so schreibt:

$$10^2 \quad (2 \text{ ist der Exponent der Potenz})$$

$$1000 \quad (10 \cdot 10 \cdot 10) \text{ ist gleich } 10^3 \text{ usw.}$$

Jedes Glied der arithmetischen Folge ist also der Logarithmus des entsprechenden Gliedes der geometrischen Folge; es zeigt sich sogleich, worin das »Zahngesetz« besteht, welches die Beziehungen zwischen den beiden Folgen offenbart:

Dem Produkt zweier oder mehrerer Glieder der geometrischen Folge entspricht die Summe ihrer Logarithmen. Der Logarithmus des Produkts ist die Summe der Logarithmen der einzelnen Glieder.

Zum Beispiel:

$$\text{Zahl: } 10 \cdot 1000 \quad (= 10^1 \cdot 10^3) = 10'000 \quad (=10^4)$$

$$\text{log: } 1 + 3 = 4$$

Der Logarithmus eines Quotienten ist gleich der Differenz der Logarithmen der beiden Glieder der Division. Das logarithmische Verhältnis stellt also nicht nur eine Beziehung zwischen einem Glied der ersten und einem Glied der zweiten Folge her, sondern zwischen einer ganzen Gruppe von Gliedern der ersten Folge und einer ganzen Gruppe von Gliedern der zweiten Folge (diese Eigenschaft der logarithmischen Beziehung spielt beim musikalischen Hören eine wesentliche Rolle). Der Logarithmus ist stets gegeben durch den Exponenten der als "Potenz" betrachteten korrespondierenden Zahl.

Ein "Produkt der Potenzen" ist eine neue Potenz, deren Exponent die Summe der Exponenten der Glieder des Produkts ist

$$10^{2+3} = 10^5$$

$$100 = 10^2, 1000 = 10^3.$$

10 wird als Quadratwurzel von 100 bezeichnet und als Kubikwurzel von 1000, oder

$$\sqrt{100} = 100^{1/2}$$

und

$$\sqrt[3]{1000} = 1000^{1/3}$$

weil man $1/2$ mit 2 und $1/3$ mit 3 multiplizieren muss, um wieder auf 100 (2. Potenz) und 1000 (3. Potenz) zu kommen.

Man kann natürlich die geometrischen Folgen auch nach links hin durch Glieder fortsetzen, die sich mittels Division durch 10 auseinander entwickeln:

Zahl:	1	1/10	1/100	1/1000	etc.
oder	10^{-0}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	etc.
log:	0	-1	-2	-3	etc

Ein ähnliches Logarithmensystem ergibt sich, wenn man als Basis der geometrischen Folge eine andere, beliebige ganze oder Bruchzahl nimmt, z.B. 2:

$$1 \quad 2 \quad 2^2 \quad 2^3 \quad \dots$$

Man kann die Basis und sogar den Logarithmus der Basis (hier 1) mit einem Buchstaben bezeichnen (algebraische Notation), der eine beliebige Zahl vorstellt:

$$1 \quad n \quad n^2 \quad n^3 \quad \dots$$

$$0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad \dots$$

oder

$$0 \quad n \quad 2n \quad 3n \quad \dots$$

Dem Mathematiker John Napier schreibt man die Entdeckung eines Systems zu, das als Ausgang aller numerischen Systeme gilt.

Dessen Basis ist e:

$$e = 1 + 1/1 + 1/(1 \cdot 2) + 1/(1 \cdot 2 \cdot 3) + 1/(1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4) \quad \text{etc.}$$

e ist annähernd 2,718281828459045 ...

Dieses System gilt als die natürliche Basis aller numerischen Systeme, weil seine Basis die Weise anzeigt, in der die Zahlen durch eine Bruchteilung ad infinitum entwickelt werden können. Es handelt sich um die transzendente Basis aller Systeme, die als Grundzahl eine ganze Zahl haben.

Da es zahlreiche Logarithmensysteme gibt, muss man grundsätzlich angeben, aus welchem System ein Logarithmus genommen worden ist.

$\log_{10} 27$ bedeutet Logarithmus von 27 aus einem System mit der Basis 10.

$\log_e 27$ bedeutet Logarithmus von 27 aus dem Napierschen System (Basis e).

Man kann von einem System ins andere überwechseln, wenn man nur den Wechsel des Moduls angibt.

Die Algebra bezeichnet die Größen bekanntlich mit Buchstaben, um die Beziehungen zwischen ihnen verallgemeinern zu können. Buchstaben können jede beliebige Zahl vorstellen. Aus Konvention schreibt man nicht $(a \cdot b)$ sondern einfach (ab)

(ab) bezeichnet ein Produkt, (a/b) einen Quotienten, ein Verhältnis zwischen zwei Größen. Die logarithmische Beziehung ist nicht bloß ein Berechnungsmittel für die Mathematiker; sie kommt auch in Natur- und Bewusstseinsphänomenen vor. Sie bestimmt z. B. die Beziehung zwischen der Zahl als Quantität und der Zahl als Grösse.

Die Zahl n als Quantität bedeutet $(1 \cdot n)$

als Grösse ist sie bloß n oder $(0 + n)$.

Diese Ausdrücke genügen, um eine mögliche logarithmische Struktur zu beginnen, denn bei der Beziehung zwischen Quantität und Grösse bleibt die logarithmische Struktur hier stehen.

Diese Gegebenheit ist der Ausgangspunkt von zwei ähnlichen Zahlenfolgen ($2n, 3n$ etc.), von denen die eine Quantitäten, die andere Grössen bezeichnet.

Man kann deshalb von der Vorstellung ausgehen, daß man in einem Phänomen bloß zu entdecken braucht, was Basis und Quotient einer logarithmischen Struktur werden könnte, um eine logarithmische Beziehung aufzudecken. Die logarithmische Struktur gewinnt aber nur dann Gestalt, wenn das Phänomen eine geometrische und eine arithmetische Folge in ihrer Wechselbeziehung zueinander kontinuierlich entstehen lässt. Sie ist der Sonderfall einer sich in den Phänomenen ständig ergebenden Beziehung zwischen einer relationellen dynamischen Struktur und einer statischen Struktur, durch die sie sich äußert.

Das Gesetz der geometrischen Folge besteht darin, daß es sich bei jedem Glied um ein Produkt aus dem vorhergehenden Glied, multipliziert mit dem Quotienten der Folge handelt. Betrachten man aber die Reihe als Ganzes, so entsteht sie durch ein Gesetz, das sich aus der Beziehung zwischen zwei Nachbargliedern ergibt. Daher sind in einer Folge vom Quotienten n (siehe oben) die Beziehungen zwischen zwei Nachbargliedern nur Metamorphosen der Beziehung $n/1$, die zu Anfang der Folge gesetzt wird:

$$(n^2/n) = (n^3/n^2) = (n^4/n^3) = (n/1)$$

Der eigentliche Quotient der Folge ist also nicht n , sondern $(n/1)$.

Diese Relation kann die Bezüglichkeit entstehen lassen, die ihrerseits ein Phänomen (die ganze Folge) zum Entstehen bringt. Dieses Hervorbringungsvermögen der wirkenden Relationalität, das auf einem die erzeugende Beziehung bestimmenden Gesetz beruht, nennen wir Dynamik.

4. Pegel und Pegelrechnung

4.1 Decibel (dB)

Das Decibel (dB) ist keine Einheit, sondern eine dimensionslose, logarithmische Zahl, die das Verhältnis zwischen zwei *Leistungswerten* angibt.

Es gilt:

$$\text{Leistungsverhältnis in dB} = 10 \cdot \log (\text{Leistung A} / \text{Leistung B})$$

Beispiel für Verhältnis 10 / 1 :

$$\log 10 = 1, \quad 10 \cdot 1 = 10 \text{ dB}$$

Beispiel für Verhältnis 2 / 1 :

$$\log 2 = 0.3, \quad 10 \cdot 0.3 = 3 \text{ dB}$$

Auch Spannungsverhältnisse lassen sich in dB angeben, wobei folgende Formel gilt:

$$\text{Leistung} = \text{Spannung im Quadrat} \cdot \text{Widerstand}$$

Das Quadrat eines Zahlenwerts entspricht einer Verdoppelung des Logarithmus.

$$\text{Spannungsverhältnis in dB} = 20 \cdot \log (\text{Spannung A} / \text{Spannung B})$$

Der Faktor 10 vor dem Leistungspegel ergibt sich aus der Einheit Dezi-Bel, da 1B = 10dB.

Der Faktor 20 vor dem Spannungspegel ergibt sich aus der quadratischen Abhängigkeit der Leistung von der Spannung (und natürlich auch des Schalldrucks von der Intensität).

4.2 Referenzpegel

Referenzpegel, elektrisch

$$0 \text{ dBm} = 1 \text{ mWatt an } 600 \text{ Ohm (Leistung), entspricht } 0.775 \text{ Volt}$$

$$0 \text{ dBu} = 0.775 \text{ Volt}$$

$$0 \text{ dBj} = 1 \text{ mVolt}$$

$$0 \text{ dBV} = 1 \text{ Volt}$$

Bezugswert für den Schalldruck

$$0 \text{ dB} = 20 \cdot \sqrt{\text{Pa}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N} / \text{m}^2$$

Bezugswert für die Schallintensität

$$0 \text{ dB} = 10^{-12} \text{ W} / \text{m}^2 = 10^{-16} \text{ W} / \text{cm}^2$$

4.3 Schallpegel L

Angegeben wird das Verhältnis von Schalldrücken oder -Intensitäten zu den jeweiligen Bezugswerten.

$$L = 10 \cdot \log (I / I_0) \text{ dB}$$

$$L = 20 \cdot \log (p / p_0) \text{ dB}$$

Bei p , p_0 , I und i_0 handelt es sich in der Regel um Effektivwerte.

Tabelle - Pegelrechnung

Pegel (dB)	$U/U_0, p/p_0$	$P/P_0, I/I_0$
60	10^3	10^6
40	10^2	10^4
20	10	10^2
10	$\sqrt{10} = 3.16$	10
6	2	4
3	$\sqrt{2} = 1.41$	2
1	1.12	1.26
0	1	1
-1	$1 / 1.12 = 0.891$	$1/1.26 = 0.794$
-3	$1 / \sqrt{2} = 0.707$	$1 / 2 = 0.5$
-6	$1 / 2 = 0.5$	$1 / 4 = 0.25$
-10	$1 / \sqrt{10} = 0.316$	$1 / 10 = 0.1$
-20	$1 / 10 = 0.1$	$1 / 100 = 0.01$
-60	10^{-3}	10^{-6}

Beispiel:

Wird bei einem Leistungsverstärker mit angeschlossenem Lautsprecher die Eingangsspannung verdoppelt, dann ändert sich folgendes:

- die Ausgangsspannung ist doppelt so gross
- der Spannungspegel hat um 6dB zugenommen
- die Ausgangsleistung ist viermal so gross
- der Leistungspegel hat um 6dB zugenommen
- der Schalldruck ist doppelt so gross
- der Schalldruckpegel hat um 6dB zugenommen
- die Schallintensität ist viermal so gross
- der Schallintensitätspegel hat um 6dB zugenommen

5. Rechnen mit komplexen Zahlen

5.1 komplexe Zahlen

Eine komplexe Zahl ist ein geordnetes Paar reeller Zahlen, die arithmetisch in der Form

$$a + bi$$

dargestellt werden kann.

In dieser Formel ist a der Realanteil, und bi der so genannte Imaginäranteil der komplexen Zahl.

i ist folgendermassen definiert:

$$i \cdot i = i^2 = -1 \text{ und damit ist } i = \sqrt{-1}$$

Komplexe Zahlen werden in der komplexen Zahlenebene dargestellt.

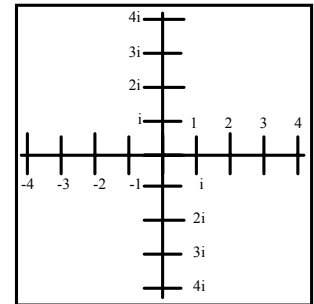


Bild 28 komplexe Zahlenebene

Rechnen mit komplexen Zahlen

Es gelten folgende Regeln:

$$(a_1 + b_1i) + (a_2 + b_2i) = (a_1 + a_2) + (b_1 + b_2)i$$

$$(a_1 + b_1i) \cdot (a_2 + b_2i) = (a_1a_2 - b_1b_2) + (a_1b_2 + b_1a_2)i$$

$$a_1 + b_1i = a_1a_2 - b_1b_2 = b_1a_2 - a_1b_2i$$

$$a_2 + b_2i \quad a_2^2 - b_2^2 \quad a_2^2 - b_2^2$$

5.2 Darstellung einer Sinusschwingung

Im Zusammenhang mit der Akustik und der Tontechnik spielen periodische Vorgänge eine wichtige Rolle. Zum Beispiel die einfachste periodische Schwingung, die Sinusschwingung.

$$x(t) = x \cdot \sin \omega \cdot t$$

mit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, t : Zeit, f : Frequenz, $x(t)$: zeitabhängige Grösse

Folgende 3 graphische Darstellungen einer Sinusschwingung sind üblich:

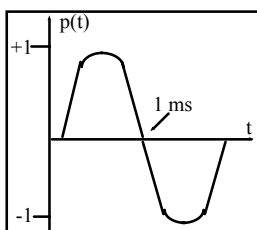


Bild 29 Zeitfunktion

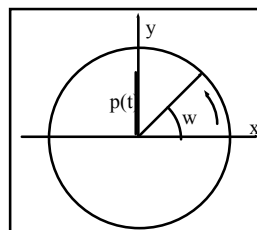


Bild 30 Zeigerdarstellung

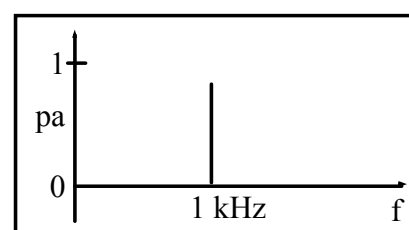


Bild 31 Spektrum

Zeigerdarstellung der Sinusschwingung

Angenommen wird ein umlaufender Zeiger mit der Länge p , der sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω um den Koordinatennullpunkt dreht. Dem Winkel ωt entspricht das Argument der Winkelfunktion ($\omega t = \omega t$).

Die Projektion des Zeigers auf die x-Achse entspricht dem Momentanwert $p(t)$.

Das Zeigerdiagramm entspricht der Darstellung einer komplexen Zahlenebene. Die x-Achse entspricht der reellen Achse, die y-Achse der imaginären Achse.

Komplexe Zahlen bieten Vorteile bei der Berechnung und Darstellung von Schwingungen einer einzigen Frequenz. Dies insbesondere dank der Eulerschen Formel.

Eulersche Formel

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$$

Reell

$$p(t) = p \cdot \sin((\omega \cdot t) + \omega_0)$$

komplex

$$\begin{aligned} p(t) &= p \cdot ((\cos((\omega \cdot t) + \omega_0)) + j \sin((\omega \cdot t) + \omega_0)) \\ &= p \cdot e^{j(\omega t + \omega_0)} = p \cdot e \end{aligned}$$

Schallfeldimpedanz Z_s

$$Z_s = p / \mathbf{v} = F / v \cdot S$$

Scalaire Grösse

komplexe Darstellung: \underline{Z}_s

Einheit: Ns / m^3

Schallkennimpedanz Z_0

Schallfeldimpedanz für ebene Welle

in Luft: $Z_0 = 414 \text{ Ns} / \text{m}^3$

Mechanische Impedanz Z_{mech}

$$Z = F / v$$

komplexe Darstellung: $Z_{\text{mech}} = \underline{Z}$

Einheit: Ns / m

Akustische Impedanz Z_a

$$Z_a = p / q = F / vS^2$$

komplexe Darstellung: \underline{Z}_a

Einheit: $1 \text{ Ns} / \text{m}^5$ (= 1 akustisches Ohm)

Generell

\underline{X} : komplexe Grösse

$|\underline{X}|$: Betrag der komplexen Grösse

$\text{Re} \underline{X}$: Realteil der komplexen Grösse

$\text{Im} \underline{X}$: Imaginärteil der komplexen Grösse

7. Schall und Schallausbreitung

7.1 Definitionen

Akustik

Lehre von der Entstehung, Ausbreitung, Uebertragung, Wiedergabe, Aufnahme, Messung und Wirkung von Schall.

Schall

mechanische Schwingungen und Wellen eines elastischen Mediums

Schallarten

- Luftschall (und Schall in anderen Gasen)
- Körperschall (Schall in Festkörpern)
- Flüssigkeits-Schall (zum Beispiel Wasserschall)

Physikalische Akustik

Teilbereich der Akustik, der sich mit den allgemeinen Grundlagen der Akustik sowie deren Verbindung zu angrenzenden Wissenschaften befasst.

Technische Akustik

Teilgebiet der Akustik, das sich sowohl mit den technischen Mitteln der Erzeugung von Schall, der Abstrahlung, Übertragung und Messung von Schall befasst als auch die Gebiete der Lärmbekämpfung und des technischen Schallschutzes zum Inhalt hat.

Physiologische Akustik

Teilgebiet, das sich mit der Physiologie und der Anatomie des menschlichen Hör- und Stimmorgans befasst

Psychologische Akustik

Teilgebiet, das sich mit allen Wirkungen von Schallvorgängen im psychischen Bereich befasst, das heisst, mit Wirkungen von Schall auf menschliches Verhalten und Erleben

Medizinische Akustik

Sammelbegriff für ein Teilgebiet, das sich zum einen mit der wissenschaftlichen Auswertung von im menschlichen Körper auftretenden Schallvorgängen befasst (Herzschall und Lungenschall), als auch Schallsignale zu diagnostischen (Audiometrie und Ultraschalldiagnose) und therapeutischen (Ultraschalltherapie) Zwecken heranzieht

Musikalische Akustik

Teilgebiet, das alle mit der Musik im Zusammenhang stehenden Fragen umfasst

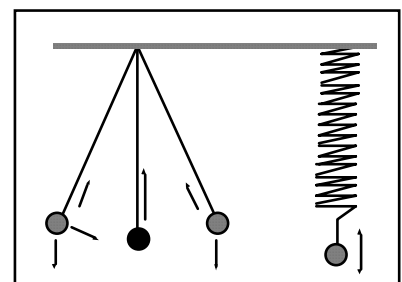
7.2 Schwingungen und Wellen

7.2.1 Schwingung

Definition

Zeitlich abwechselnde Zu- und Abnahme einer oder mehrerer Grössen in einem physikalischen System, die dann auftritt, wenn bei Störung eines Gleichgewichtszustandes Rückstellkräfte wirksam werden, die diesen Gleichgewichtszustand wiederherzustellen suchen.

Beispiele für schwingende Systeme: Pendel, Feder mit Gewicht.



Schwingungszahl (Frequenz)

Anzahl Schwingungen pro Sekunde
 Formelzeichen f
 Einheit 1/s, Hertz (Hz)

Schwingungsdauer (Periodendauer)

kürzester Zeitabschnitt, nach welchem sich eine Schwingung wiederholt
 Formelzeichen T , Einheit s
 $T = 1/f$
 es handelt sich um den Reziprokwert der Frequenz.

Freie Schwingung (auch Eigenschwingung)

Schwingung mit der Eigenfrequenz (Resonanzfrequenz) eines schwingfähigen Systems.

Eigenfrequenz, Resonanzfrequenz

Frequenz, mit der ein System (Pendel, Saite) Schwingungen ausführt, wenn es durch eine einmalige Erregung aus dem Ruhezustand in Schwingung versetzt und dann sich selbst überlassen wird.
 Formelzeichen f_0

Pendel: $f_0 = 1/2 \cdot \pi \cdot \sqrt{g / l}$

g Schwerkbeschleunigung, l Länge des Pendels

Federpendel $f_0 = 1/2 \cdot \pi \cdot \sqrt{D / m}$

D Richtgrösse, Federkonstante,
 m schwingende Masse

erzwungene Schwingung

Schwingung, deren Frequenz durch äussere Einwirkung auf ein Schwingsystem bestimmt wird.
 Beispiel: Lautsprecher

harmonische Schwingung (Sinusschwingung)

einfachste Form einer Schwingungsbewegung
 Man kann die Bewegung eines pendelartig schwingenden Massenpunktes (Pendel, Feder mit Gewicht) auf einem senkrecht zu seiner Bewegungsrichtung vorbeilaufenden Papier aufzeichnen, und erhält dann eine sogenannte Sinuskurve.

periodische Schwingung

Schwingung, die sich periodisch wiederholt (zum Beispiel Sinusschwingung)

gedämpfte Schwingung

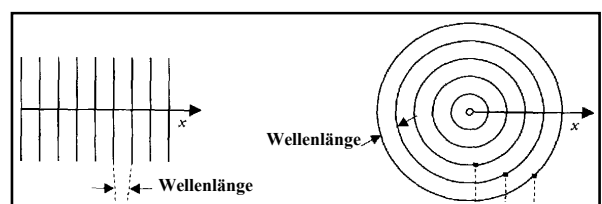
Freie Schwingung in einem verlustbehafteten System nach Abschalten der Energiezufuhr.
 Einfacher: abklingende Schwingung

6.2.2 Wellen**Definition**

lässt sich eine räumlich und zeitliche Zustandsänderung eines Kontinuums als einsinnige örtliche Verlagerung eines bestimmten Zustandes mit der Zeit erkennen oder beschreiben, so heisst diese Zustandsänderung eine Welle
 Beispiel für Welle: Wasserwelle

ebene Welle (Bild 2)

Form einer Welle, die durch ebene Wellenfronten gekennzeichnet ist.
 Ebene Wellen entstehen, wenn die Abmessungen der Schallquelle wesentlich grösser sind als die Wellenlänge.



Kugelwelle (Bild 2)

Eine sich gleichmässig nach allen Raumrichtungen in Form konzentrischer Wellenfronten ausbreitende Schallwelle.

Kugelwellen entstehen, wenn die Abmessungen der Schallquelle wesentlich kleiner ist als die Wellenlänge

fortschreitende Welle

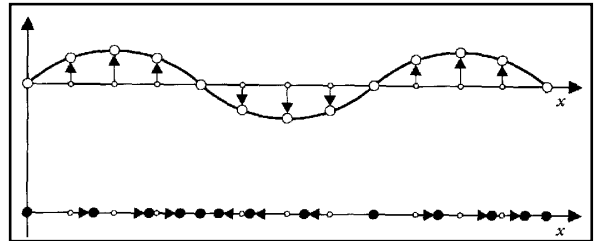
Welle mit einsinniger Ausbreitungsrichtung.

Transversalwelle

Welle, bei der die Schwingungsrichtung der oszillierenden Mediumteilchen senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung der Welle steht.

Beispiel für Transversalwelle: Oberflächenwellen, Wasserwellen

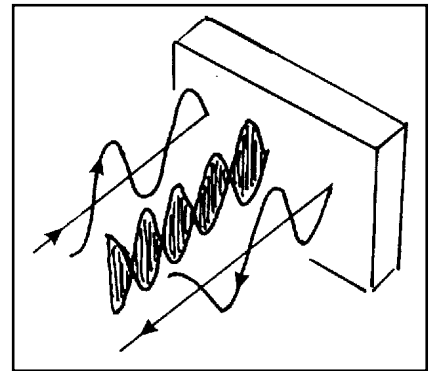
Bild 2 ebene Welle (links) und Kugelwelle

**Longitudinalwelle (Längswelle)**

Welle, bei der die Schwingungsrichtung der oszillierenden Mediumteilchen mit der Ausbreitungsrichtung der Welle übereinstimmt.

stehende Welle

eine (häufig durch Reflexion entstehende) Interferenz zweier fortschreitender Wellen gleicher Wellenlänge mit entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung und gleicher Schwingungsrichtung der Mediumteilchen.

**Wellenfront**

Fläche, auf der sich die Einsatzphase einer plötzlich beginnenden Welle nach einer bestimmten Zeit befindet.

Wellenlänge λ

Abstand zweier aufeinander folgender und im gleichen Bewegungszustand schwingender Teilchen eines Übertragungsmediums.

Die Länge, die der räumlichen Periode einer Welle entspricht.

Ausbreitungsgeschwindigkeit c

Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in einem Übertragungsmedium.

In der Luft beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit 343 m/s.

Wellengleichung

Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit sind mit folgender Gleichung verknüpft:

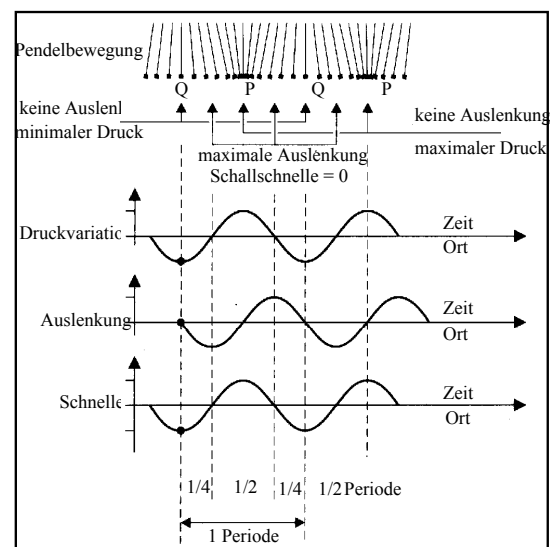
Wellengleichung $\lambda = c / f$

Auslenkung, Druck und Schnelle

Im Bild 5 zeigt am Beispiel einer Pendelbewegung die Zusammenhänge zwischen den Auslenkungen des Pendels im Verlauf der Schwingung, der Auslenkung, des Drucks und der Schnelle der Pendelbewegung.

Das Bild macht folgendes deutlich:

- Druck und Schnelle sind beim Durchgang durch die Ruhelage (keine Auslenkung) am grössten
- zwischen der Auslenkung einerseits, und dem Druck und der Schnelle andererseits gibt es eine Phasenverschiebung von 90° (oder einem Viertel einer Periode der Schwingung).



7.3 Schallabstrahlung und Schallausbreitung

Schallabstrahlung

Die Uebertragung eines Schwingungsvorganges auf die nähere und fernere Umgebung.

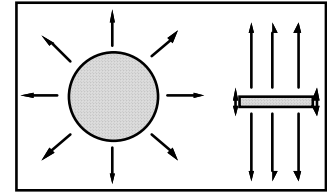
Schallquelle (Schallsender)

Vorrichtung zur Erzeugung und Abstrahlung von Schall

Ideale Schallquelle:

atmende Kugel und Kolbenstrahler

Praktische Schallquellen (zum Beispiel Musikinstrumente) ha-
meist eine frequenzabhängige Richtcharakteristik.



ben

Bild 6 Schallsender

Schallausbreitung

Definition

Ausbreitung des Schalls in einem Uebertragungsmedium (Gas, Flüssigkeit, Festkörper)

unbeeinflusste Schallausbreitung

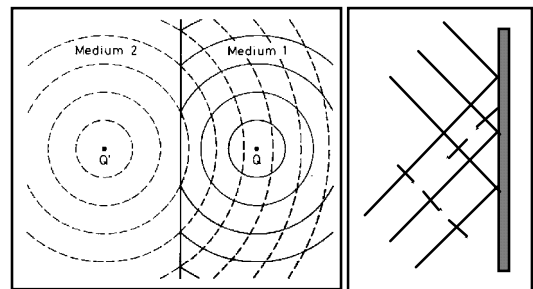
Bei kugelförmiger Ausbreitung nimmt die Leistung mit dem Quadrat der Entfernung ab.

In einem Zylinderwellenfeld nimmt die Leistung linear mit der Entfernung ab.

Schallreflexion, Rückwurf von Schall

Schallwellen werden an den Grenzflächen von
bertragungsmedien mit unterschiedlicher
Schallimpedanz (einfacher: unterschiedlicher
Dichte) reflektiert.

Beispiele: Luft und Wasser, Luft und Wand.



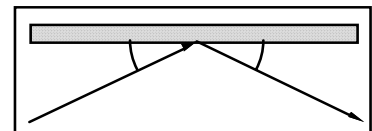
Ue-

Bild 7 Schallreflexion

geringer Abstand (gespiegelte Schallquelle) / grosser Abstand

Reflexionsgesetz

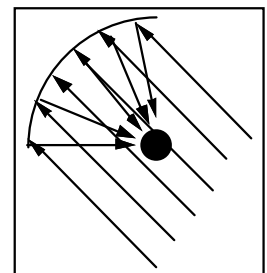
Auftreffender Winkel = abgehender Winkel (an ebener
Grenzfläche)



Schallfocussierung

Schallkonzentrierung und Brennpunktbildung durch Reflexion an
konkav gewölbter Fläche

Bild 9 Schall-Focussierung



Schallabsorption

Umwandlung von Schall- in Wärmeenergie beim Auftreffen auf
Grenzflächen oder Entweichen durch Oeffnungen ins Freie oder in
Nachbarräume

Schallbeugung (Diffraktion)

die nichtgeradlinige Ausbreitung von Schall

Ursachen:

Beugung an den Kanten von Hindernissen

Beugung durch allmähliche Dichte-Uebergänge in Uebertra-
gungsmedien (akustische Fata Morgana)

Beugung durch Luftbewegungen (Wind).

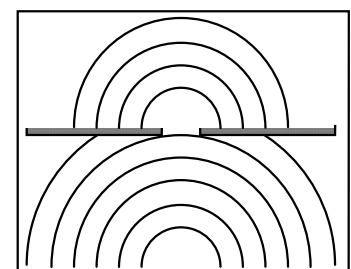
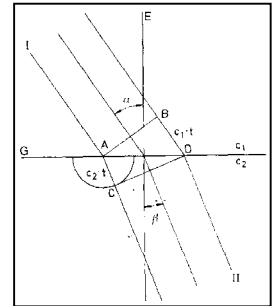


Bild 10 Sonderfall einer Oeffnung

Schallbrechung (Refraktion)

Trifft eine Schallwelle schräg auf eine Grenzfläche auf, wird ein Teil Schallenergie reflektiert, der Rest dringt in das aufzunehmende Medium ein und breitet sich dort weiter aus. Dabei erfährt der Schall an der Grenzfläche eine Richtungsänderung

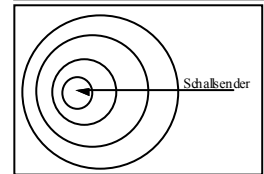


der

Bild 11 Schallbrechung

Dopplereffekt

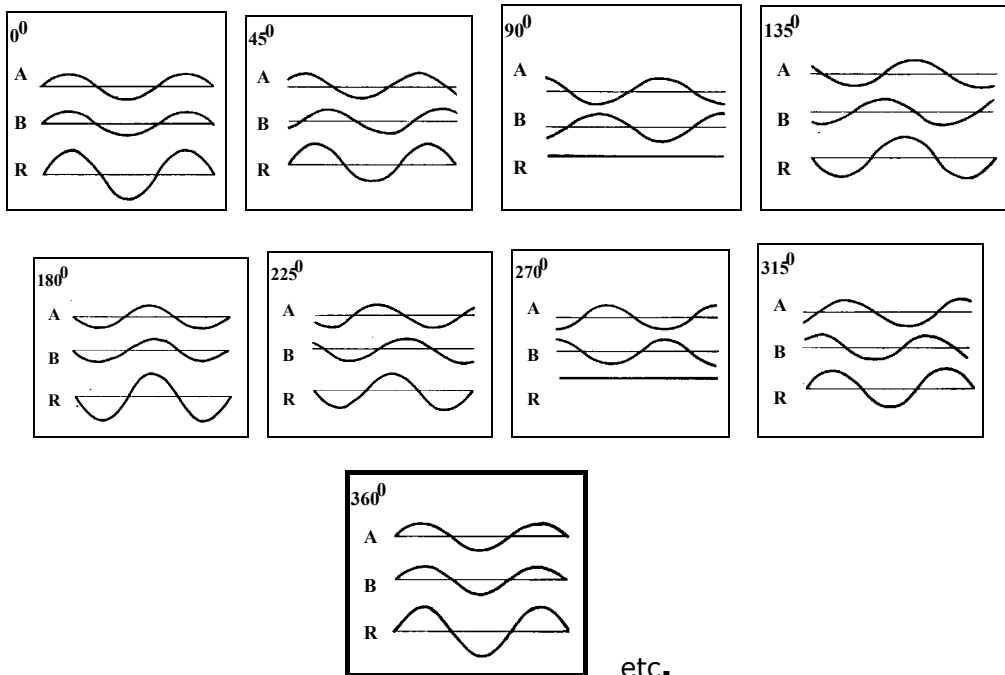
Änderung der Frequenz, wenn sich die Schallquelle und der Empfänger relativ zueinander bewegen.



Interferenz (Ueberlagerung von Wellen)

Erscheinung, die dann auftritt, wenn zwei oder mehrere Wellen an derselben Stelle aufeinander treffen.

Je nach Phasenlage können sich die zwei Wellen verstärken oder abschwächen. Im Extremfall, bei gleichem Pegel und einer Phasenverschiebung von je $n90^\circ$ oder 270° kommt es zur totalen Auslöschung



etc.

7.4 Schallfeld und Schallfeldgrösse

7.4.1 Definitionen

Schallfeld (auch "akustisches Feld")

Luftgefülltes Raumgebiet, in dem sich die Schallwellen ausbreiten.

freies Schallfeld

die Schallausbreitung geschieht kugelförmig

Schallfeldgesetz

$$p \sim 1 / r \quad v \sim 1 / r \quad I \sim 1 / r^2 \quad (\text{mit } I = p v)$$

ebenes Schallfeld

die Ausbreitung der Schallwellen erfolgt in senkrecht zur Fortpflanzung stehenden Wellenfronten

Schallfeldgesetz

$$p \sim 1 / \sqrt{r} \quad v \sim 1 / \sqrt{r} \quad I \sim 1 / r \quad (\text{mit } I = p v)$$

statistisches Schallfeld (diffuses Schallfeld)

Schallfeld in Räumen, bei dem der Schalleinfall an jedem Punkt aus allen Raumrichtungen gleich stark ist.

7.4.2 Schallfeldgrössen

Schallschnelle

Wechselgeschwindigkeit, mit der die Teilchen des Uebertragungsmediums um ihre Ruhelage hin- und herschwingen

Schalldruck

Wechseldruck, der dem statischen Luftdruck überlagert ist.

Schallausschlag

maximale Amplitude (Auslenkung) der schwingenden Teilchen des Uebertragungsmediums

Schallgeschwindigkeit c

Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenausbreitung

Die Schallgeschwindigkeit ist eine Materialkonstante

Tabelle

Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Materialien

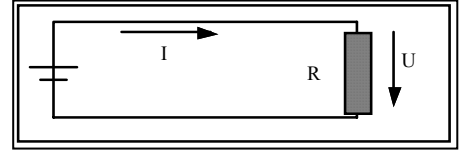
Material	c,	m/s
Luft	10°	325.6
	0°	331.8
	10°	337.8
	20°	343.8
	800°	658
Helium	0°	971
Wasser	10°	1481
Eisen		5850
Aluminium		6400

8. Elektrotechnik

8.1 Grundgesetze

Ohmsches Gesetz

U	Spannung	(U) = V
I	Stromstärke	(I) = A
R	Widerstand	(R) = Ω
I = U/R		1 A = 1 V/ Ω



Widerstand und Leitwert

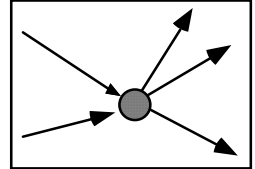
R	Widerstand (Widerstandswert)
G	Leitwert
(G) = 1/ Ω = S G = 1/R	

Stromdichte

J	Stromdichte
I	Stromstärke
A	Leiterquerschnitt
(J) = A/mm ² J=I/A	

erste Kirchhoffsche Regel (Knotenregel)

I ₁ , I ₂	zufließende Ströme
I ₃ , I ₄ , I ₅	abfließende Ströme
$\sum I_{zu}$	Summe der zufließenden Ströme
$\sum I_{ab}$	Summe der abfließenden Ströme



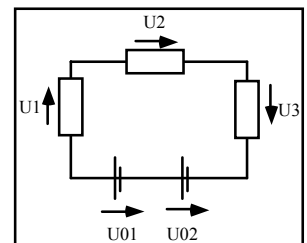
$$\sum I_{zu} = \sum I_{ab} \quad I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

zweite Kirchhoffsche Regel (Maschenregel)

U ₀₁ , U ₀₂	Erzeugerspannungen (U _{erz})
U ₁ , U ₂ , U ₃	Verbraucherspannungen (U _{verbr})
$\sum U_{erz} = \sum U_{verbr}$	

$$\sum U_{erz} = \sum U_{verbr}$$

$$U_{01} + U_{02} = U_1 + U_2 + U_3$$



8.2 Schaltung von Widerständen

Reihenschaltung von Widerständen

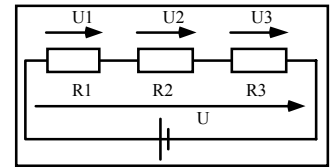
R Ersatzwiderstand (Gesamtwiderstand)
 R1, R2, R3 Einzelwiderstände
 U Gesamtspannung
 U1, U2, U3 Teilspannungen, Verbraucherspannungen
 I Stromstärke

wichtig: Durch in Reihe geschaltete Widerstände fließt der gleiche Strom

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

$$U_1/U_2 = R_1/R_2 \quad U_1/U = R_1/R$$



Parallelschaltung von Widerständen

I Gesamtstrom
 I1, I2 Teilströme
 G Ersatzleitwert

G1, G2 Teil-Leitwerte

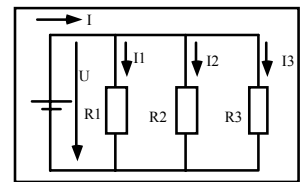
wichtig: An parallel geschalteten Verbrauchern liegt die gleiche Spannung an

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$$

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots$$

$$I_1/I_2 = R_1/R_2 \quad I_1/I_3 = R_1/R_3$$



Spannungsteiler

Unbelasteter Spannungsteiler

$$U_2 = (R_2/(R_1 + R_2)) \cdot U$$

$$R_1 = R_2((U/U_2) - 1)$$

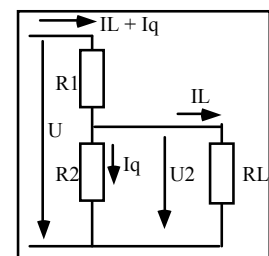
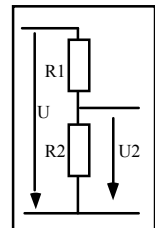
Belasteter Spannungsteiler

RL Lastwiderstand
 U2 Teilspannung ohne Belastung
 UL Teilspannung mit Belastung
 IL Laststrom
 Iq Querstrom
 q Querstromverhältnis

$$U_2 = U / (((R_1(RL + R_2))/(RL \cdot R_2)) + 1)$$

$$R_2 = RL(U/U_2) \cdot ((UL - U_2)/(U - U_2))$$

$$q = I_q/IL$$



8.3 Wechselstrom

Grundgrößen des Wechselstroms

f	Frequenz
T	Periodendauer
w	Kreisfrequenz
φ	Winkel, Drehwinkel
t	Zeit
λ	Wellenlänge
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit
u	Augenblickswert der Spannung
\hat{u}	Amplitude (Scheitelwert)
U, U _{eff}	Effektivwert
i	Augenblickswert des Stroms
\hat{i}	Amplitude (Scheitelwert)
I, I _{eff}	Effektivwert
p	Polpaarzahl
n	Drehzahl

$$[f] = 1/s = \text{Hz}, \quad [w] = 1/s$$

$$f = 1/T \quad \lambda = c/f$$

$$\omega = 2\pi f \quad \varphi = \omega t$$

$$u = \hat{u} \cdot \sin \quad i = \hat{i} \cdot \sin$$

$$u = \hat{u} \cdot \sin(\omega t) \quad i = \hat{i} \cdot \sin(\omega t)$$

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} \quad \hat{i} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff}}$$

$$360^\circ \sim T \quad 360^\circ \sim 2\pi$$

$$f = p \cdot n$$

