Elektrische Messtechnik

Vorlesung 8

Prof. Dr. Peter Weber

Wintersemester 24/25

Im Studiengang Elektro- und Informationstechnik (B.Eng.)

Spielregeln in der Präsenz-Vorlesung

- Ihre Fragen und Anmerkungen gehen vor - Unterbrechen Sie mich gerne, wenn ich Ihre Meldung übersehen sollte
- Keine „Side Meetings“ in der Vorlesung - Paralleldiskussionen zu zweit verbreiten zu viel Unruhe
  - ➔ Fragen, Ideen oder Anmerkungen bitte immer in die große Runde – keine Hemmungen
  - ➔ Es gibt keine dummen Fragen - Niemand wird für eine Wortmeldung „augebuht“!
- Pünktlich erscheinen - Später hereintröpfelnde Teilnehmer verbreiten zu viel Unruhe
- Verlassen der Vorlesung bitte nur zur Pause oder zum Ende (logischerweise ausgenommen Toilettengänge)
- Am Ende der Vorlesung den letzten Satz vor dem Aufstehen abwarten.
- Telefone auf „leise“
- Ich wünsche mir immer Ihr Feedback – sofort in der Vorlesung oder gerne auch z.B. per mail

Organisation

Vorlesung:

Donnerstag 08:15 h bis 11:30 h Raum: 8-105

Start 21.10.2024 - Ende 12.02.2025

Labor (Herr Michalik):

Montag 11:45 h bis 15:45 h Raum: 8-205

Terminorganisation bei Herrn Michalik

CampUAS – Vorlesung (P. Weber):

https://campuas.frankfurt-university.de/course/view.php?id=4525

Weber: Elektrische Messtechnik - WS 24/25

Enrollment Key: alessandrovolta

CampUAS – Labor (R. Michalik):

https://campuas.frankfurt-university.de/course/view.php?id=4433

Michalik: Labor Elektrische Messtechnik - WiSe 24

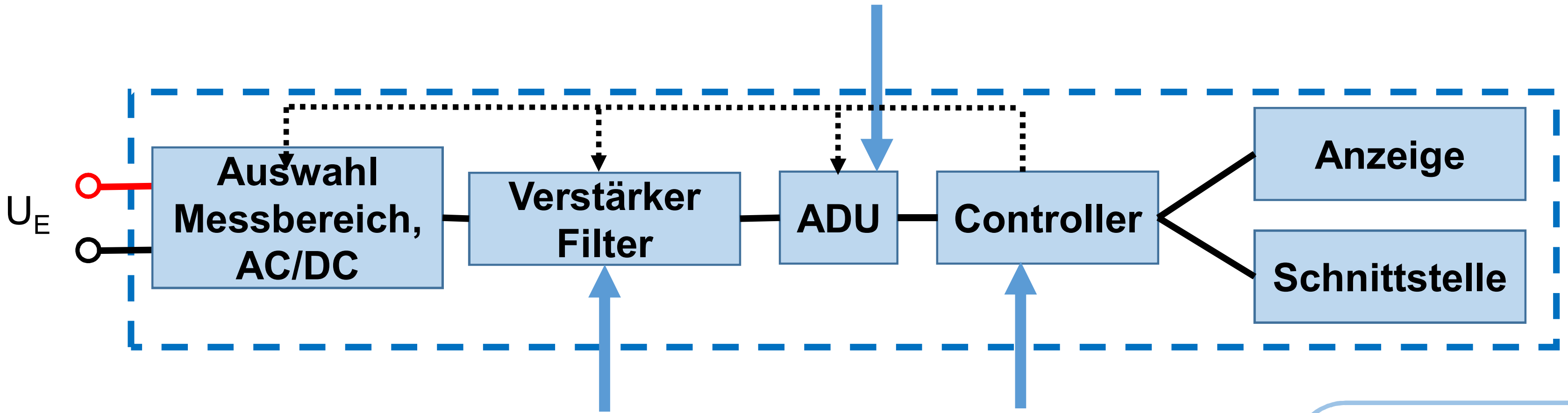
Enrollment Key: MT-LAB-WS24

Bitte unbedingt in beiden Kursen einschreiben (auch bei Herrn Michalik).

Sie verpassen sonst wichtige Infos bzw. werden bei der Laborterminvergabe nicht berücksichtigt

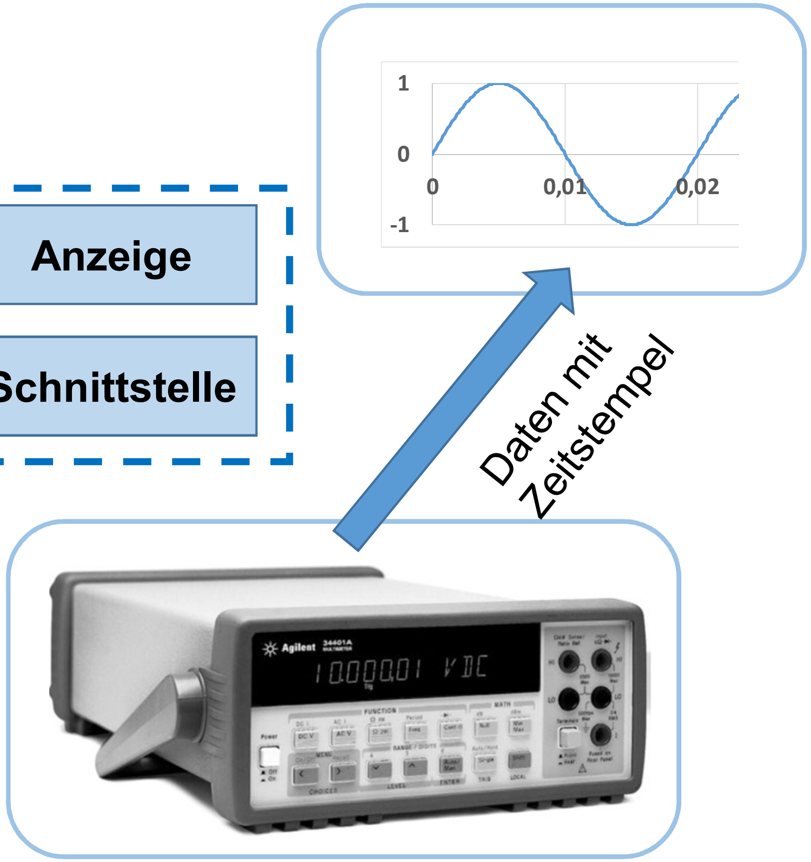
Charakterisierung periodischer Vorgänge

ADU = Analog-Digital-Umsetzer
Typisch 16- bis 24-Bit



- Anpassung an den Spannungs-bereich des Umsetzers
- z.B. Anti-Aliasing Filter

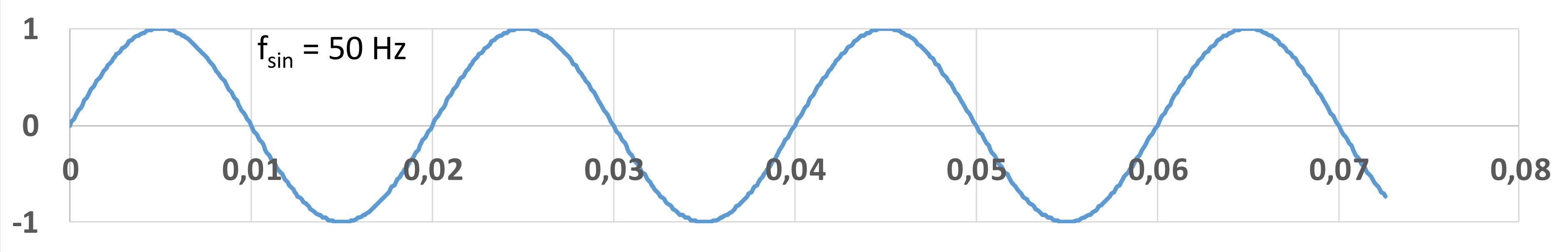
Mikroprozessor



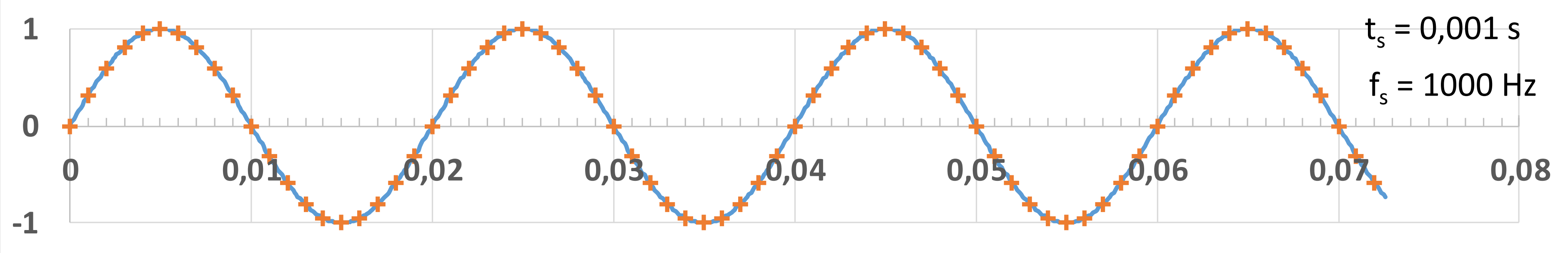
Thomas Mühl, Elektrische Messtechnik, 6. Auflage, Springer Vieweg

Abtasten von periodischen Signalen

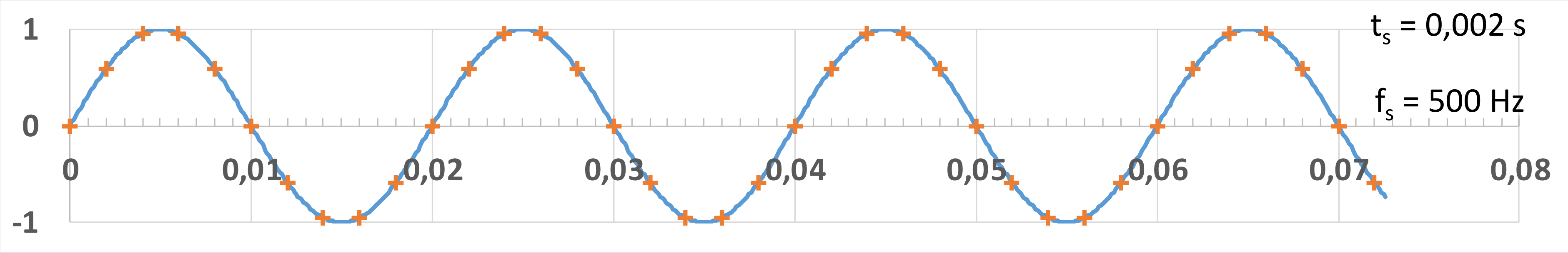
A)



B)

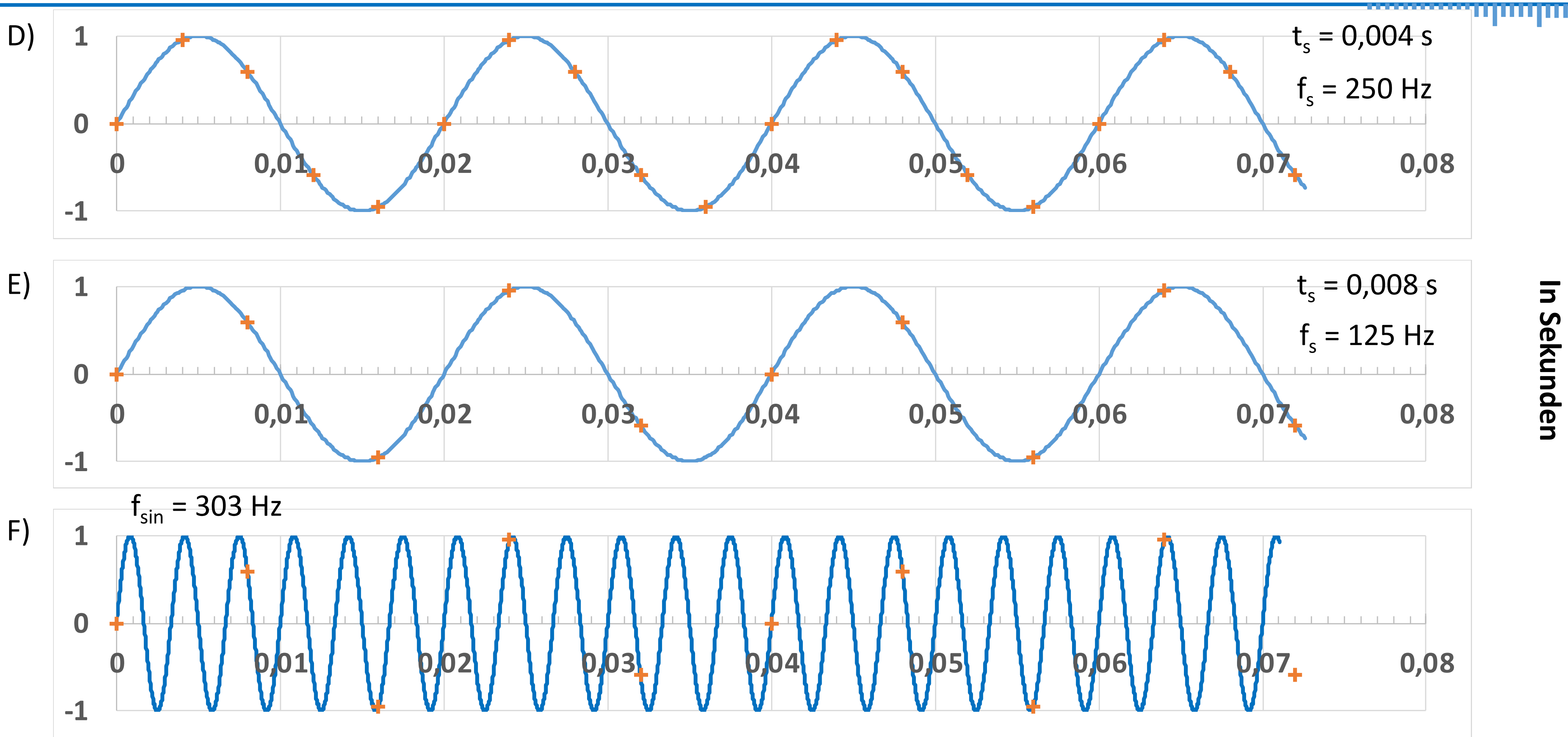


C)



In Sekunden

Abtasten von periodischen Signalen



Abtasten von periodischen Signalen

Aliasing Effekt

Aliasing-Effekte treten auf, wenn das abgetasteten Signal Frequenzanteile größer der zweifachen Abtastrate enthält.

Nyquist-Shannon-Abtasttheorem

Wenn eine periodische Funktion keine Frequenzanteile oberhalb einer Grenzfrequenz f_{max} enthält, dann kann dieses Signal nur mit einer Abtastrate größer als 2 f_{max} eindeutig bestimmt werden.

Wenn Sie also ein Signal mit der Frequenz f abtasten wollen, müssen Sie das mindestens mit einer Abtastrate von 2 f tun.

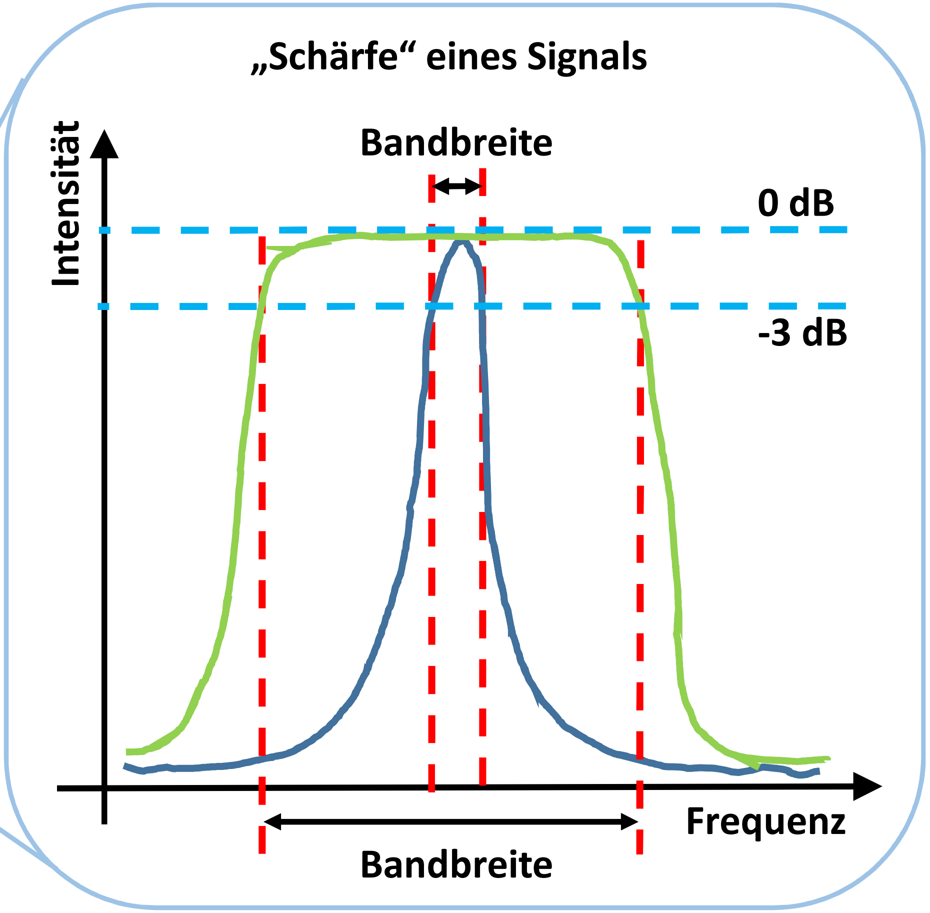
2 f_{max} wird auch als **Nyquist-Frequenz** bezeichnet.

Bandbreite

Bandbreite

Der Begriff wird in verschiedenen Bedeutungen verwendet.

1. **In der analogen Messtechnik gibt die Bandbreite den Bereich an an, innerhalb dessen ein Signal aufgenommen werden kann. Frequenzanteile oberhalb und unterhalb der Bandbreite werden abgeschnitten (Beispiel nächste Seite).**
2. **Maß für die „Schärfe“ eines Signales im Frequenzbereich. Definiert den Abstand der Frequenzen, bei denen die Intensität (Leistung) des Signals um 3 dB abgefallen ist.**
3. **Übertragungsrate (Datenrate) einer digitalen Datenverbindung.**



Bandbreite - Analog

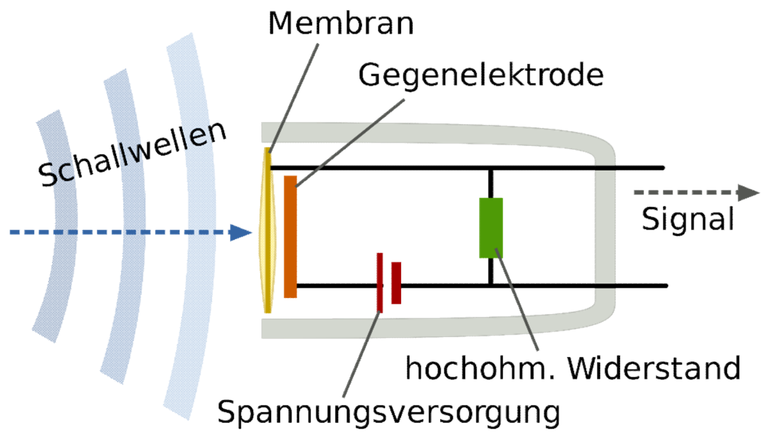
FRANKFURT UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Beispiel Kondensatormikrofon

Ein Mikrofon ist ein Messsystem zur Messung von Schall. Das Schallsignal wird in ein elektrisches Signal umgewandelt (Messwandler).

Messkette beim Kondensatormikrofon

- Anregung der Membran zu mechanischer Schwingung
- Zeitliche Änderung der Kapazität des Kondensators
- Zeitliche Änderung der Spannung über dem Kondensator
- Verstärkung des Spannungssignals



Limits der Bandbreite

Jenseits bestimmter oberer und unterer Grenzfrequenzen folgt die Membran nicht mehr der Schwingung der Luftsäule.

Bandbreite – Digitale Datenrate

Signal Source | AD Umsetzer | Datenleitung | Data Sink

Beispiel AD-Umsetzer + Datenübertragung

Ein analoges Spannungssignal 0 V bis 12 V wird von einem 8-Bit AD-Wandler digitalisiert.

Die Abtastrate des AD Wandlers ist

f_{AD} = 0,048 MSPS [Mega-Samples Per Second] = 48 kHz

Die Übertragungsrate vom AD-Umsetzer zur weiteren Datenverarbeitung ist (wir nutzen eine Buetooth Verbindung)

C = 433,9 kbit / s

Bestimmen Sie die Spannungs-Auflösung des Messsystems.

Ermitteln Sie dann die maximale Rate des Systems, mit der ein Signal abgetastet werden kann.

Geben Sie an, ob AD-Umsetzung oder Datenleitung der limitierende Faktor ist.

Überlagerung periosischer Signale

Wir beschränken uns hier im wesentlichen auf die Betrachtung von Signalen einer festen Frequenz.

In der Signalverarbeitung begegnen ihnen aber immer Signale, die eine Überlagerung von Frequenzen sind.

Daher ein kurzer Ausblick mit einem Beispiel:

Reale Randbedingungen der Signalübertragung:

Eine Antenne stahlt nie eine einzelne Sinus-Frequenz ab, sondern auch ein Bündel von benachbarten Frequenzen.

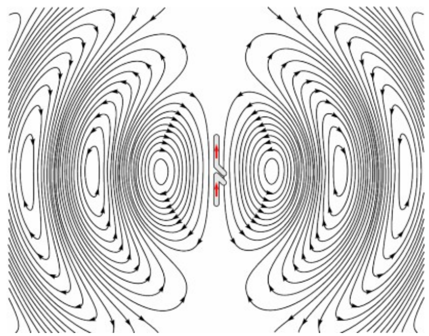
Mit einer reinen Sinusschwingung kann keine Information übertragen werden. Mit einem Wellenpaket aber sehr wohl.

https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1080791

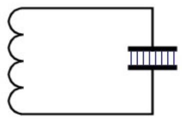
Wellenpaket in Raum und Zeit

Die Antenne als schwingender Dipol

sendet auf einer gewissen Bandbreite:



Von Chetvorno - Eigenes Werk, CC0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=41436811



Von Averse, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3198224

Überlagerung periosischer Signale

Eine Antenne sendet eine Bandbreite von Sinusschwingungen im Frequenzraum.

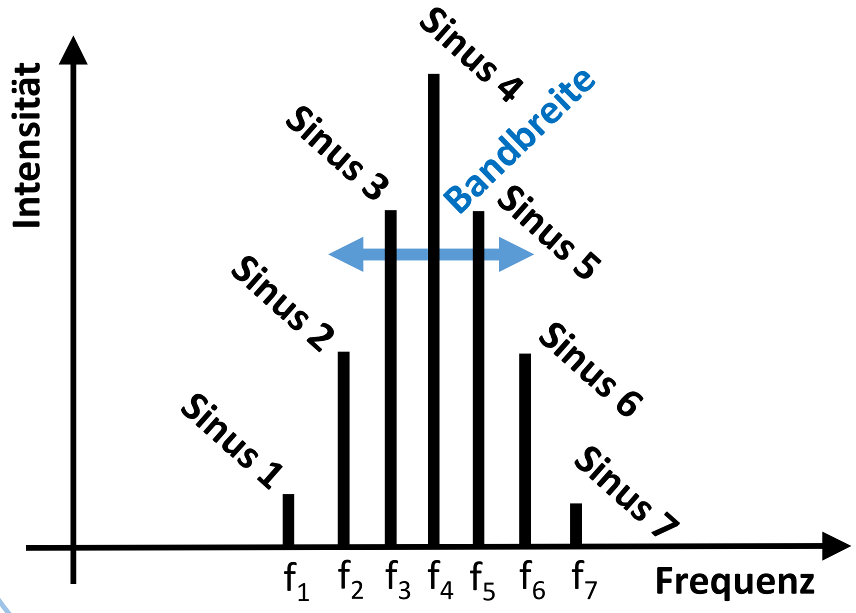
$$E_n(t) = sin(\omega_n \cdot t) = sin(2\pi \cdot f_n \cdot t)$$

Überlagerung mehrerer Sinus benachbarter Frequenzen…

…wie sieht das dann auf der Zeitachse und im Ortsraum aus?

Wellenpaket im Frequenzraum

(im sog. Frequenzspektrum)



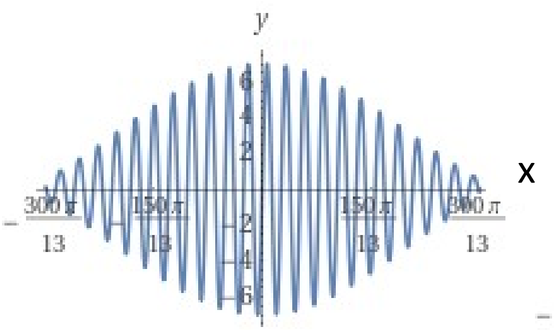
Überlagerung periosischer Signale

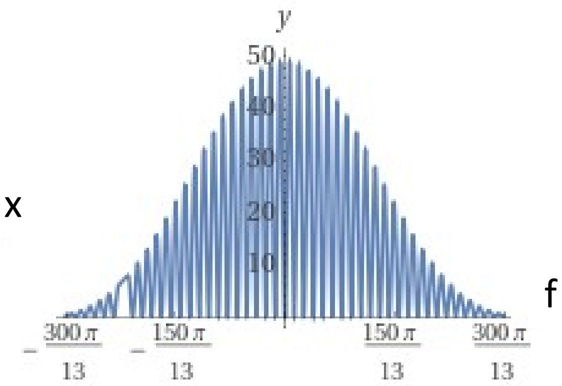
$$g(t) = \sin(0{,}96\,t) + \sin(0{,}97\,t) + \sin(0{,}98\,t) + \sin(0{,}99\,t) + \sin(t) + \sin(1{,}01\,t) + \sin(1{,}02\,t) + \sin(1{,}03\,t) + \sin(1{,}04\,t)$$

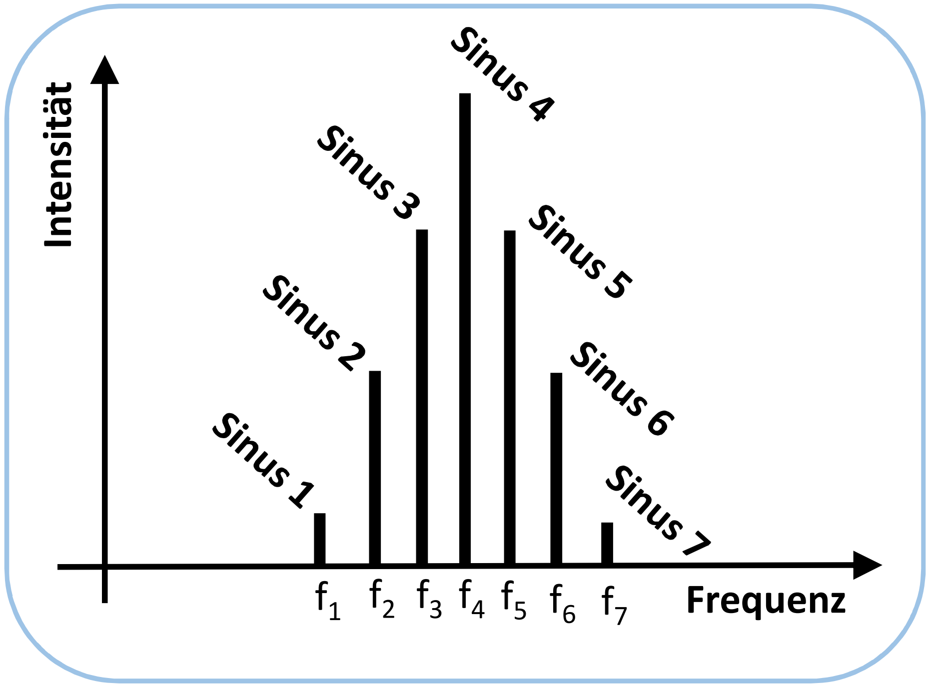
$$h(t) = 0{,}6\cdot\sin(0{,}96\,t) + 0{,}7\cdot\sin(0{,}97\,t) + 0{,}8\cdot\sin(0{,}98\,t) + 0{,}9\cdot\sin(0{,}99\,t) + \sin(t) + 0{,}9\cdot\sin(1{,}01\,t) + 0{,}8\cdot\sin(1{,}02\,t) + 0{,}7\cdot\sin(1{,}03\,t) + 0{,}6\cdot\sin(1{,}04\,t)$$

Überlagerung mehrerer Sinus benachbarter Frequenzen…

…wie sieht das dann auf der Zeitachse und im Ortsraum aus?







Überlagerte Sinus…

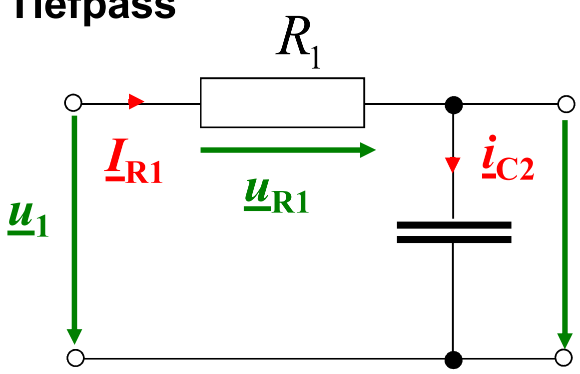
(im Ortsraum)

…und deren Intensität

(im Frequenzraum)

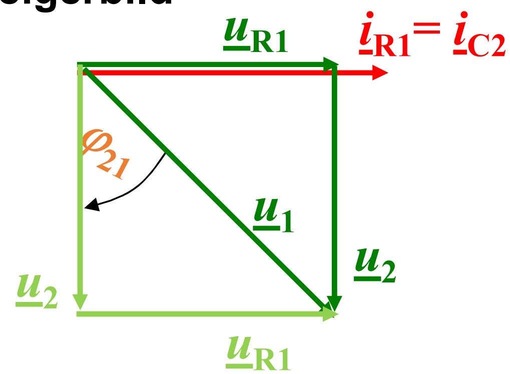
Filter

Tiefpass



$$Z_C = \frac{1}{j\omega C_2} = -j\frac{1}{\omega C_2}$$

Zeigerbild



Tiefpass lässt tiefe Frequenzen passieren und sperrt hohe Frequenzen.

Verstärkung U_2/U_1

$$\frac{|\underline{u}_2|}{|\underline{u}_1|} = \frac{i\left|-j\frac{1}{\omega C_2}\right|}{i\left|R_1 - j\frac{1}{\omega C_2}\right|} = \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{\sqrt{R_1{}^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}}$$

Erweitere mit ωC_2

$$\boxed{\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega C_2 R_1)^2}} = f(\omega)}$$

Phasenwinkel

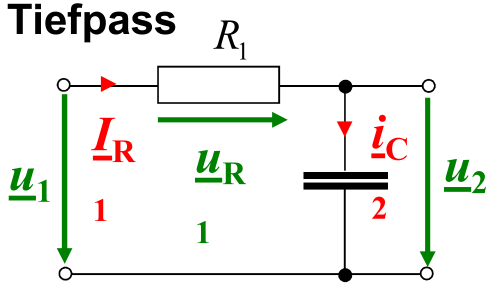
$$\tan(\varphi) = \frac{|\underline{u}_{R1}|}{|\underline{u}_2|} = \frac{R}{\frac{1}{\omega C_2}} = R\omega C_2$$

$$\boxed{\varphi_{21} = \varphi_{U2} - \varphi_{U1} = -\arctan(\omega C_2 R_1) = f(\omega)}$$

Negativer Drehsinn

Filter

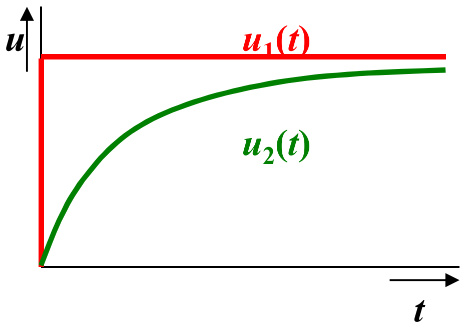
Tiefpass



$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega C_2 R_1)^2}} = f(\omega)$$

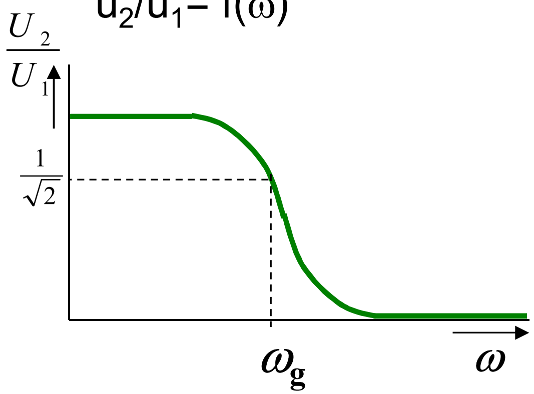
$$\varphi_{21} = -\arctan(\omega C_2 R_1) = f(\omega)$$

Sprungantwort $u(t)$



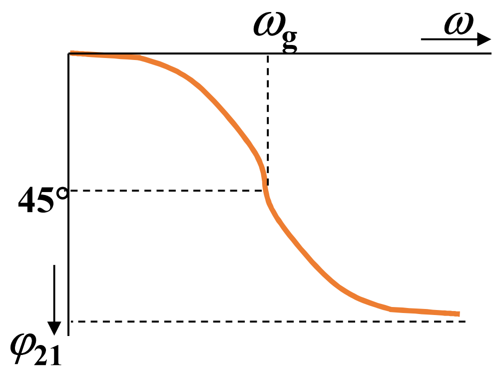
Amplitudengang

$u_2/u_1 = f(\omega)$



Phasengang

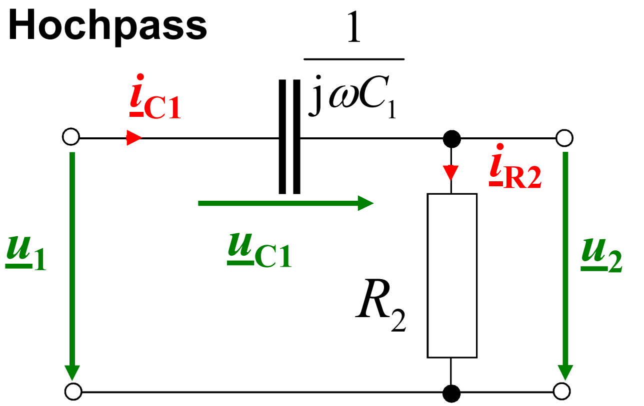
$\varphi_{21} = f(\omega)$



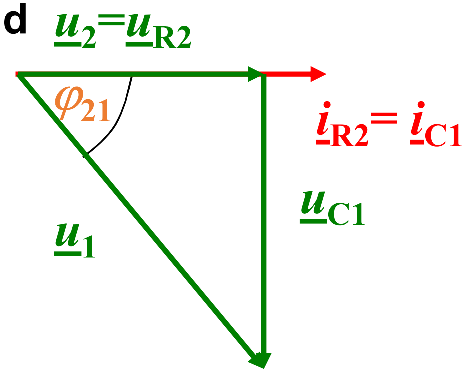
Grenzfrequenz: $\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow 1 = (\omega_g C_2 R_1)^2 \qquad \omega_g = \frac{1}{C_2 R_1}$

Filter

Hochpass



Zeigerbild



Hochpass lässt hohe Frequenzen passieren und sperrt niedrige Frequenzen

Verstärkung U_2/U_1

$$\frac{|\underline{u}_2|}{|\underline{u}_1|} = \frac{i\,|R_2|}{i\left|R_2 - j\dfrac{1}{\omega C_1}\right|} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2{}^2 + \left(\dfrac{1}{\omega C_2}\right)^2}}$$

Erweitere mit $\frac{1}{R_2}$

$$\boxed{\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \dfrac{1}{(\omega C_1 R_2)^2}}} = f(\omega)}$$

Phasenwinkel

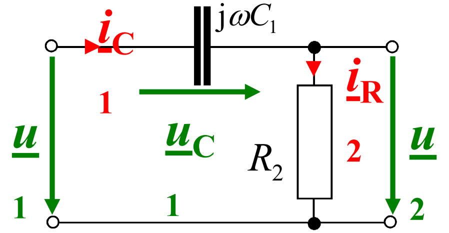
$$\tan(\varphi) = \frac{|\underline{u}_{C1}|}{|\underline{u}_{R2}|} = \frac{\dfrac{1}{\omega C_1}}{R_2} = \frac{1}{R_2 \omega C_1}$$

$$\boxed{\varphi_{21} = \varphi_{U2} - \varphi_{U1} = \arctan\left(\frac{1}{\omega C_1 R_2}\right) = f(\omega)}$$

Positiver Drehsinn

Filter

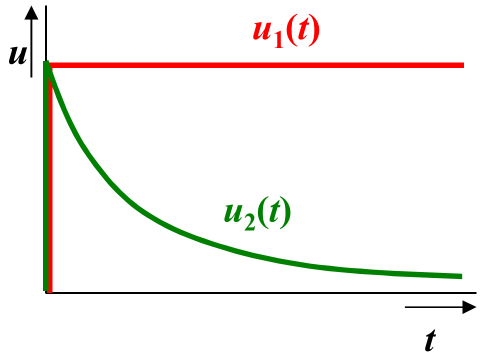
Hochpass



$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{(\omega C_1 R_2)^2}}} = f(\omega)$$

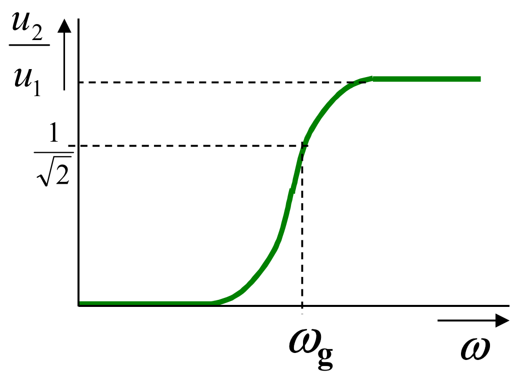
$$\varphi_{21} = \arctan\left(\frac{1}{\omega C_1 R_2}\right) = f(\omega)$$

Sprungantwort $u(t)$



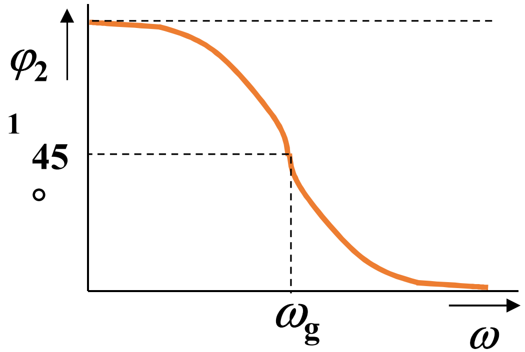
Amplitudengang

$u_2/u_1 = f(\omega)$



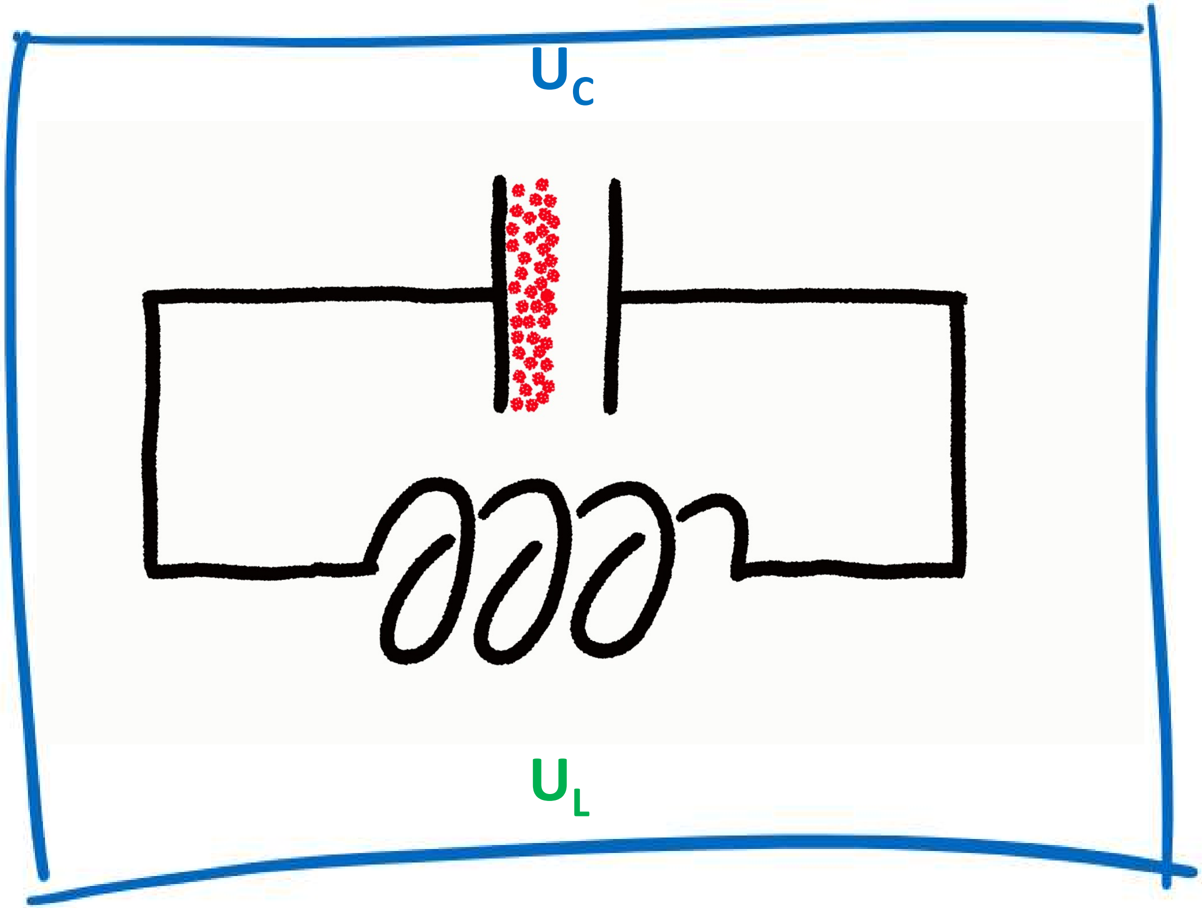
Phasengang

$\varphi_{21} = f(\omega)$



Grenzfrequenz: $\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow 1 = (\omega_g C_1 R_2)^2 \quad \omega_g = \frac{1}{C_1 R_2}$

Schwingkreis



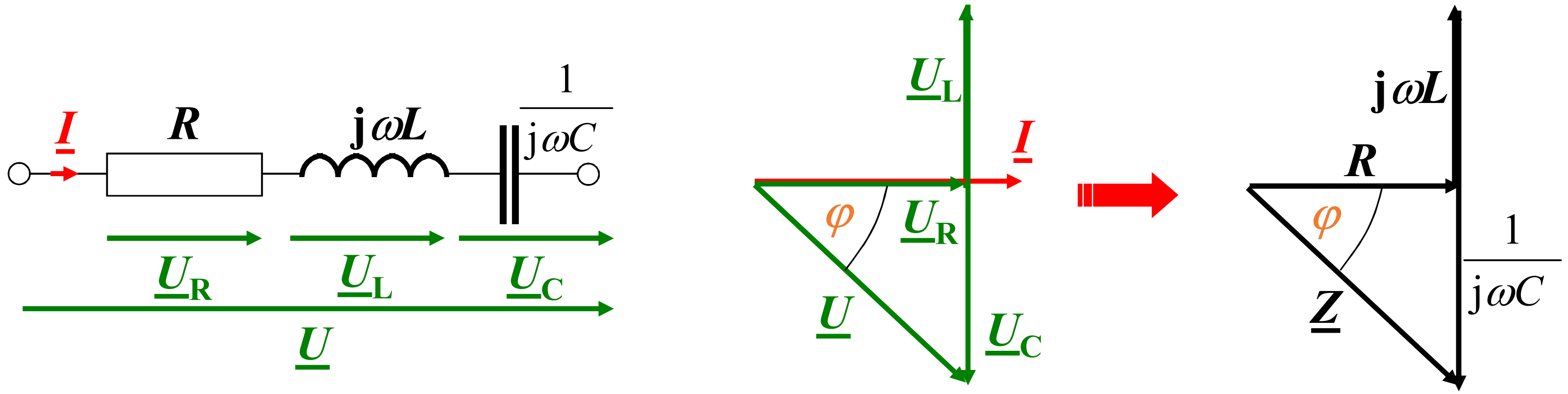
Filter

Schwingkreise

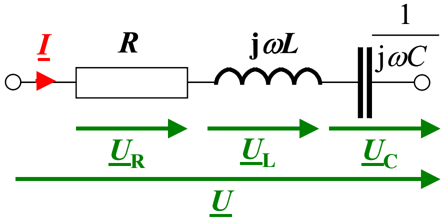
- Resonanzerscheinungen spielen in der Elektrotechnik eine große Rolle
- Schwingkreise sind die Ursache für Resonanzen
- Spannung U und Strom I werden phasengleich
- Sind Kombinationen von Induktivitäten, Kapazitäten und Widerständen

Beispiel Reihenschwingkreis / Bandpass

Schaltung Zeigerbild Impedanz



Filter



Impedanz

$$\underline{Z} = R + \mathrm{j}(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

Betrag

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

Phasenwinkel

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

Bei **Resonanz** heben sich die beiden Reaktanzen auf, d.h. als Impedanz wird nur der Widerstand R wirksam. U und I sind phasengleich.

Es gilt also $(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}) = 0$ im Resonanzfall.

Daraus berechnet sich die Resonanzkreisfrequenz:

$$\boxed{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}}$$

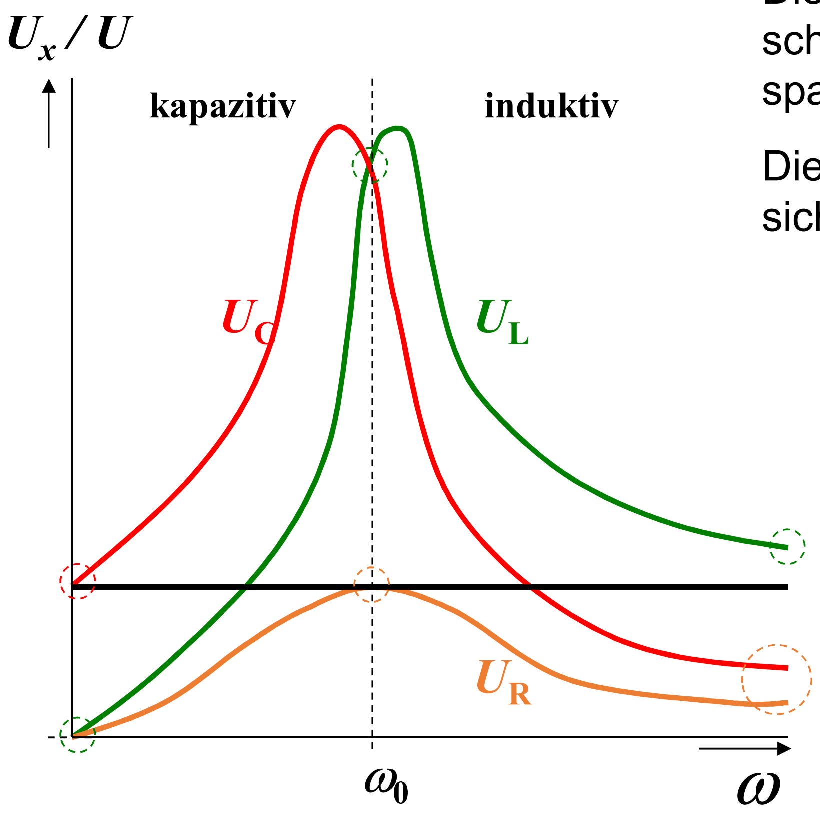
bzw. die Resonanzfrequenz zu

$$\boxed{f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.}$$

Für Impedanz, deren Betrag und Phasenwinkel ergibt sich im Zustand der Resonanz

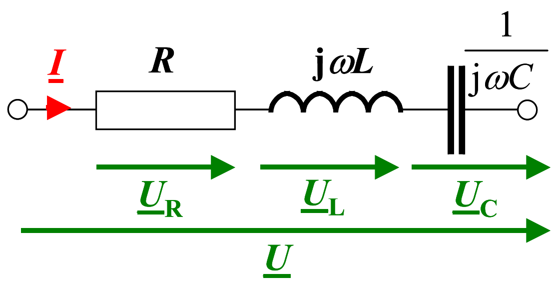
$$\underline{Z} = R + \mathrm{j}(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}) = R \qquad Z = \sqrt{R^2 + (\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C})^2} = R \qquad \varphi = \arctan \frac{\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}}{R} = 0°.$$

Filter



Die Teilspannungen eines Reihenschwingkreises können die Gesamtspannung U wesentlich übersteigen.

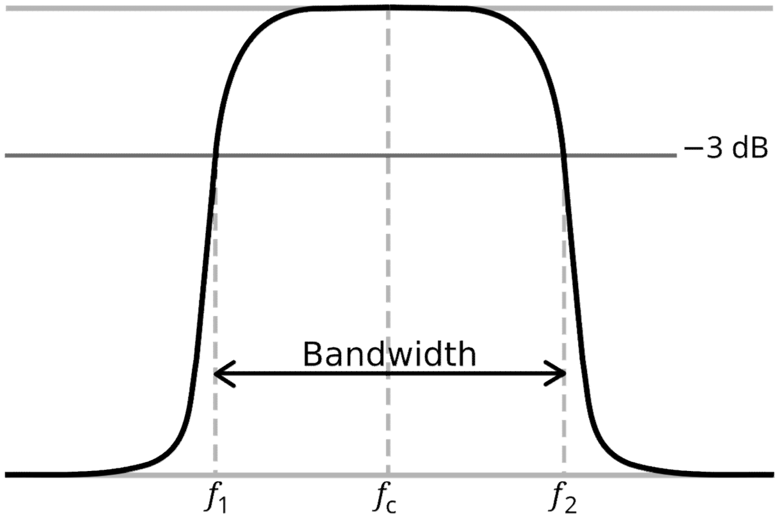
Die Überhöhung im Resonanzpunkt ergibt sich aus der Kreisgüte Q .



Güte des Schwingkreises

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Filter



B: 3dB-Bandbreite

$$Q = \frac{f_0}{B}$$

Überlagerung periosischer Signale

Fazit - Reale Signale…

…sind nicht monochromatisch (also: bestehen nicht aus einer einzigen Sinusschwingung einer Frequenz)

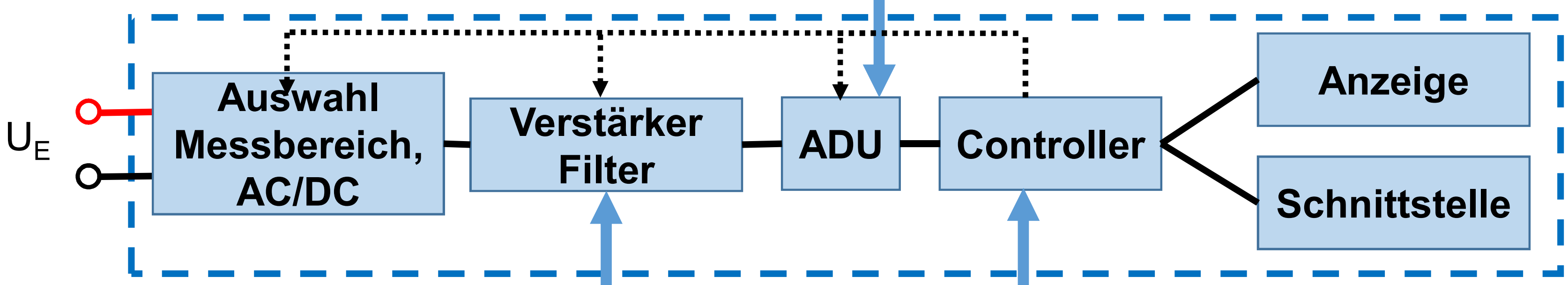
…können beschrieben werden als Überlagerung von sinusförmigen Schwingungen

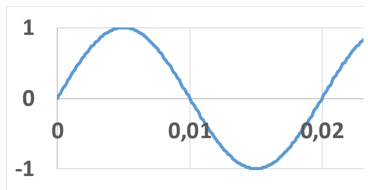
…können sowohl im Frequenzraum, als auch im Ortsraum (bzw. als zeitliche Funktion) beschrieben werden.

…werden im Frequenzraum durch die Bandbreite beschrieben (das ist die „Schärfe“ der Frequenzbreite)

Charakterisierung periodischer Vorgänge

ADU = Analog-Digital-Umsetzer
Typisch 16- bis 24-Bit





Daten mit Zeitstempel

Thomas Mühl, Elektrische Messtechnik, 6. Auflage, Springer Vieweg

- Anpassung an den Spannungs-bereich des Umsetzers
- z.B. Anti-Aliasing Filter

Mikroprozessor

Oszilloskop

lat. oscillare: schwingen

altgr. Skopein: betrachten