ON4CRD

Band 05

Filter berechnen



Radio Club Durnal ON4CRD

https://on4crd.be

Impressum

Band 05 · Filter berechnen

Website-Herausgeber : Radio Club Durnal ON4CRD

Publikationsmanager : Vorstand des Radio Club Durnal ON4CRD

https://on4crd.be

Impressum

Geistiges Eigentum

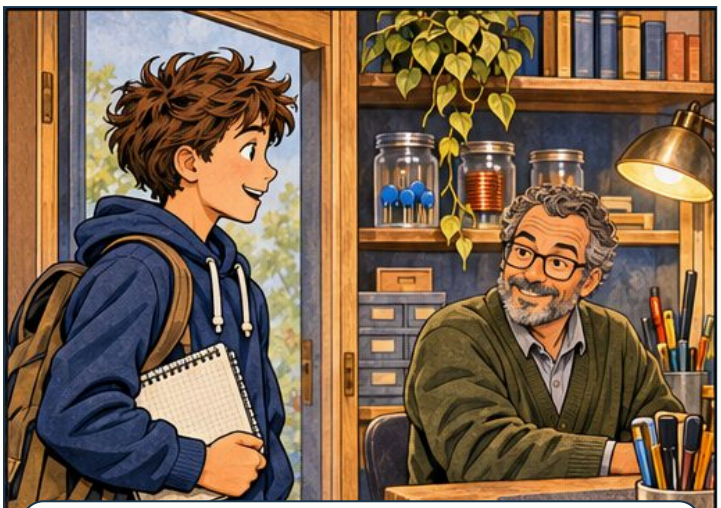
Auf der Website veröffentlichte Texte, Bilder, Dokumente, Logos und Materialien bleiben Eigentum ihrer jeweiligen Autoren oder des Vereins. Bei jeder Vervielfältigung oder Wiederverwendung müssen die Quelle, die geltenden Rechte und etwaige Genehmigungen des Autors respektiert werden.

Haftung

Der Club bemüht sich um die Veröffentlichung nützlicher und überprüfter Informationen, übernimmt jedoch keine Gewähr für die Abwesenheit von Fehlern, Auslassungen oder Unterbrechungen. Technische oder regulatorische Informationen müssen anhand offizieller Quellen überprüft werden, wenn sie eine Entscheidung stützen.

Illustrationen mit Unterstützung künstlicher Intelligenz erstellt.

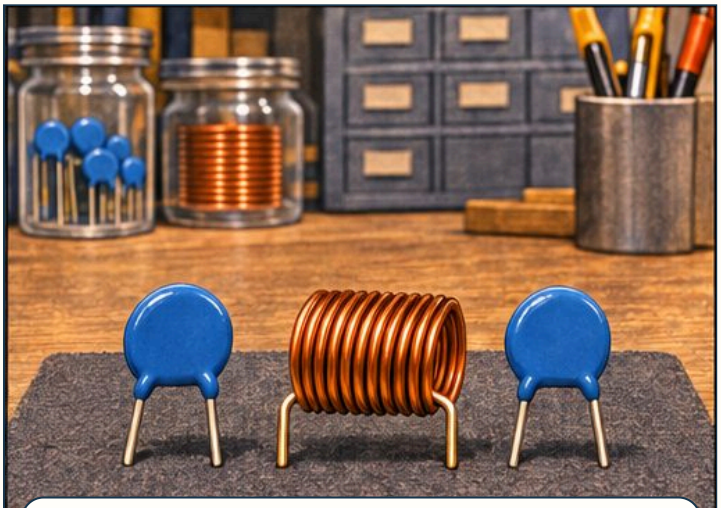
Ein neuer Auftrag



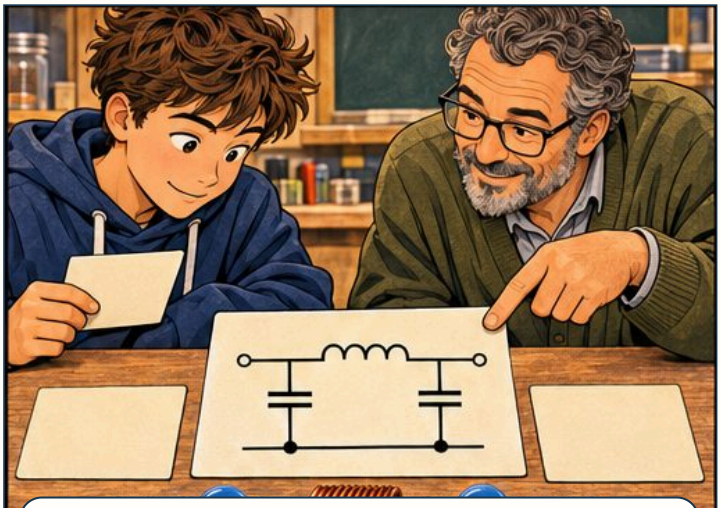
Nach dem Elektrikworkshop findet Lucas im Club sein Heft wieder.



Henri plant eine Vorführung zur Signalqualität.



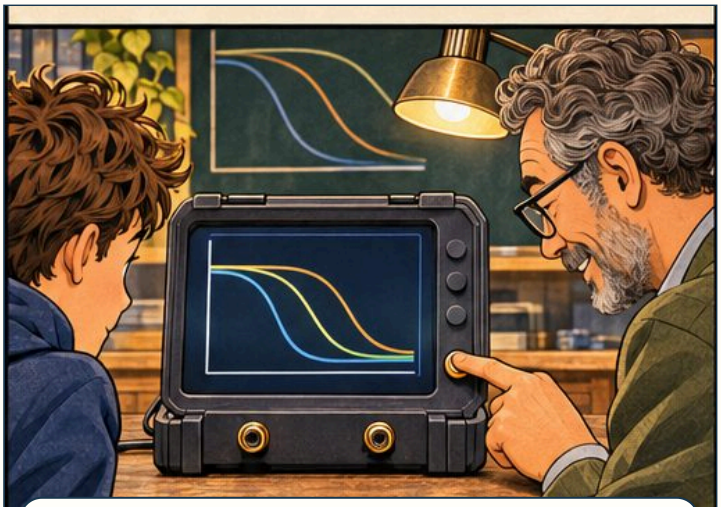
Zwei Kondensatoren und eine Spule liegen bereit.



Die Aufgabe: einen Tiefpass verstehen, berechnen und messen.

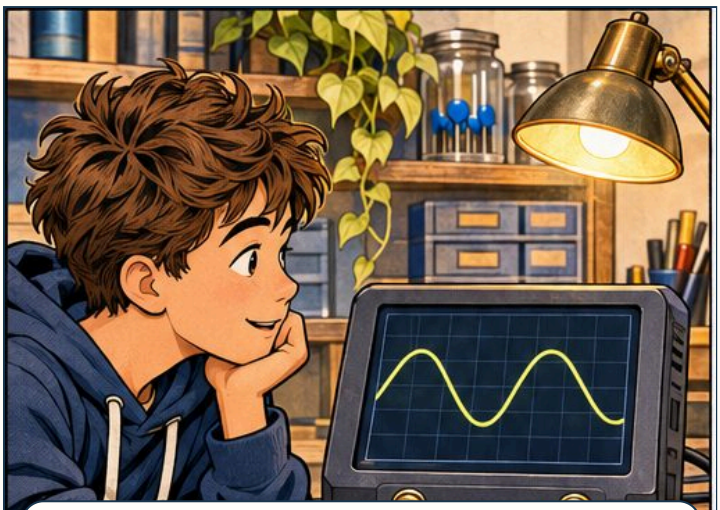


Der Junge fragt sich, wie drei Bauteile alles verändern können.

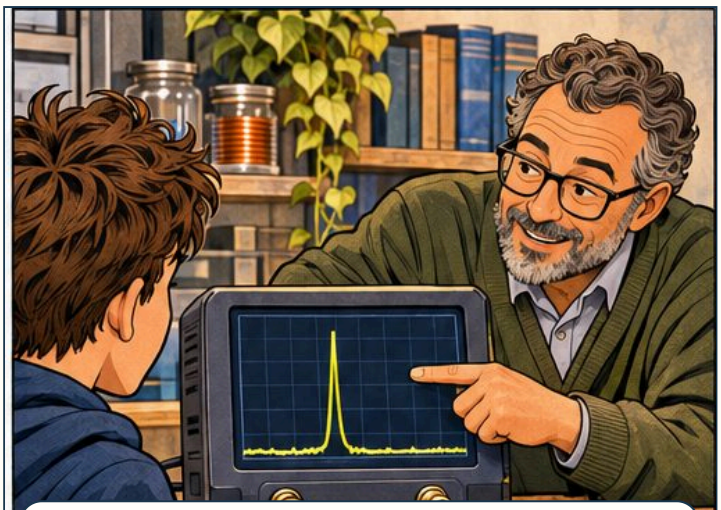


Zuerst untersuchen sie den Inhalt eines Signals.

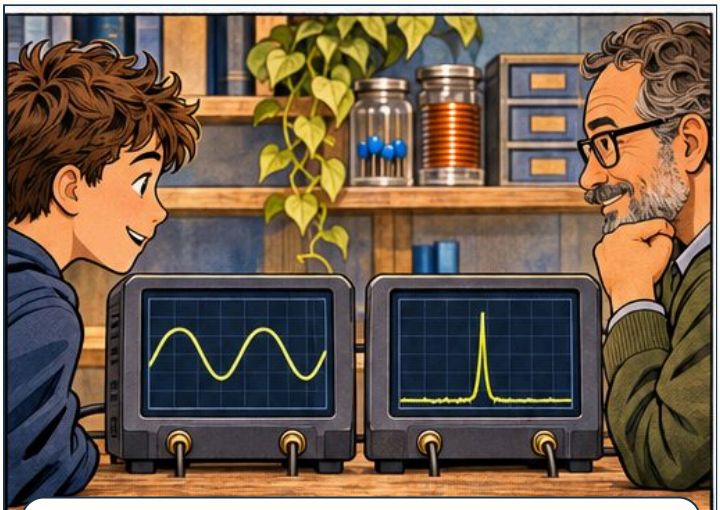
Das Signal und sein Bild



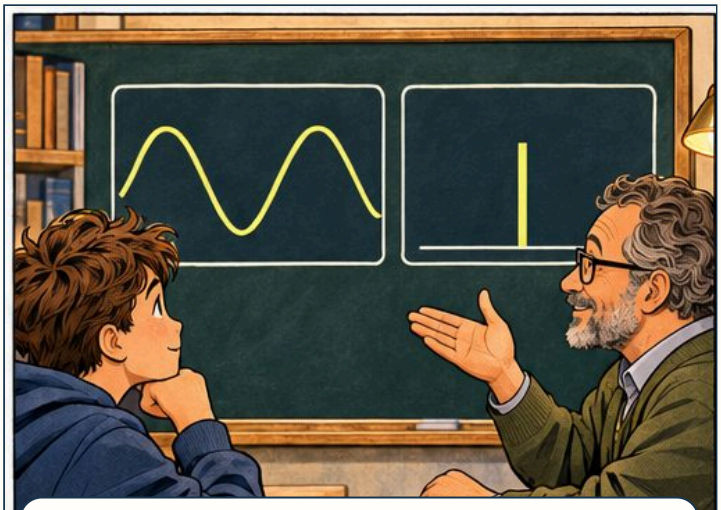
Eine Zeitkurve zeigt, wie sich ein Signal verändert.



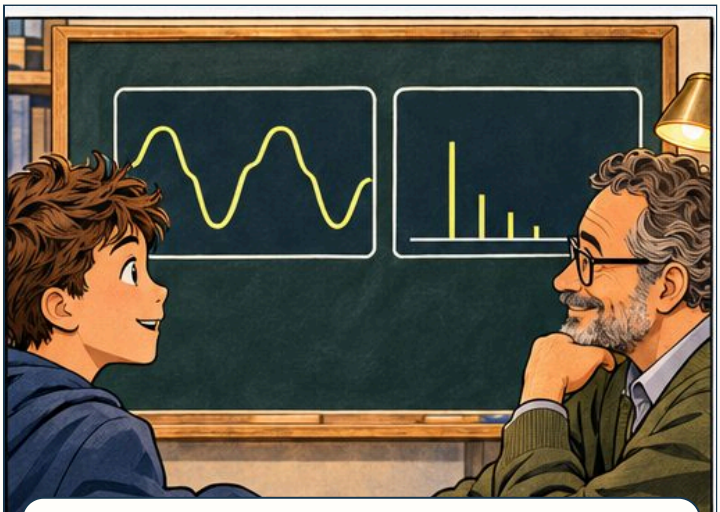
Ein Spektrum ordnet seine Bestandteile nach Frequenz.



Beide Ansichten beschreiben dasselbe Signal unterschiedlich.



Eine ideale Sinusschwingung hat nur eine Frequenz.

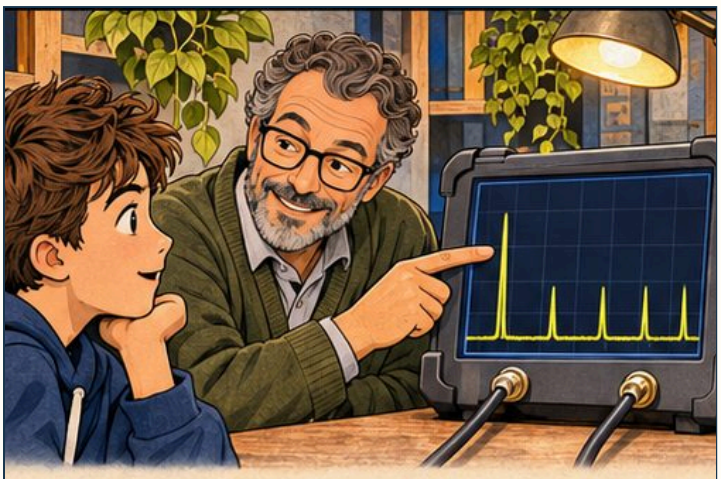


Eine verzerrte Kurve kann mehrere Bestandteile enthalten.



Der Junge entdeckt ein bisher unverständliches Bild.

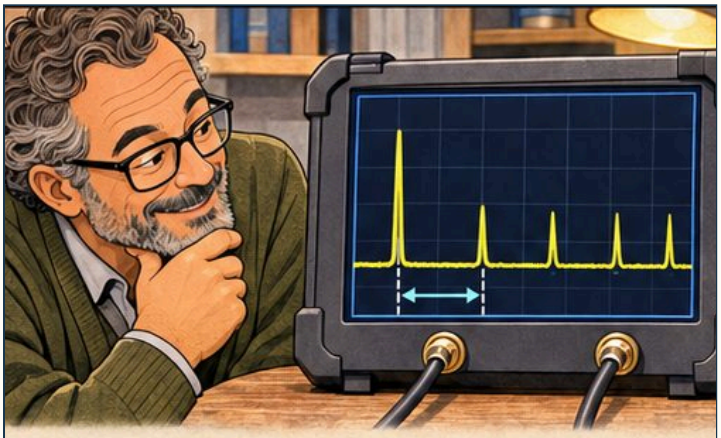
Oberwellen werden sichtbar



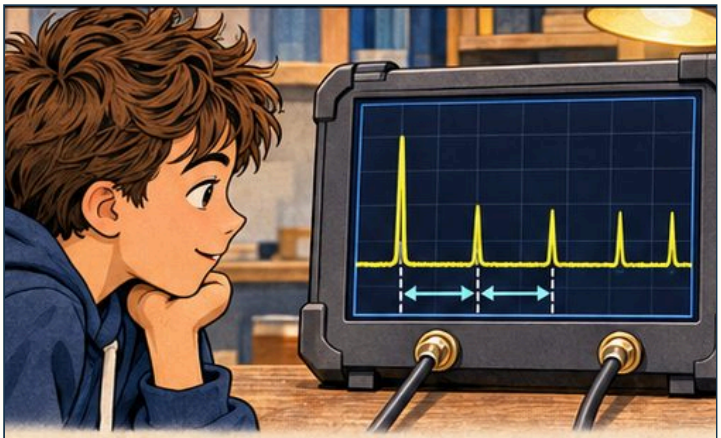
Die Grundfrequenz liefert den ersten Bezug eines periodischen Signals.



Seine Oberwellen sind ganzzahlige Vielfache dieser Frequenz.



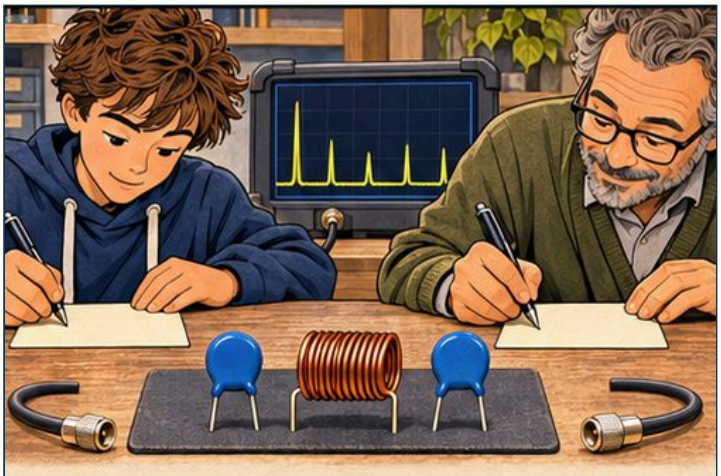
Die zweite Harmonische liegt bei der doppelten Grundfrequenz.



Die dritte liegt bei der dreifachen Frequenz.

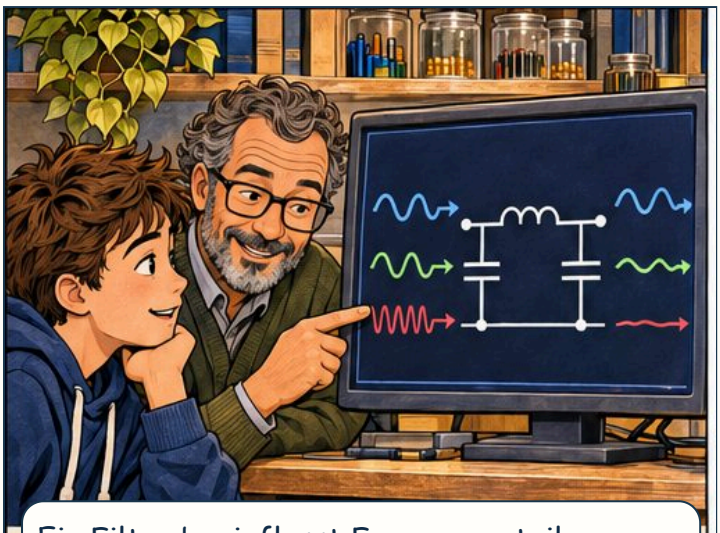


Nicht jeder unerwünschte Anteil ist jedoch eine Oberwelle.

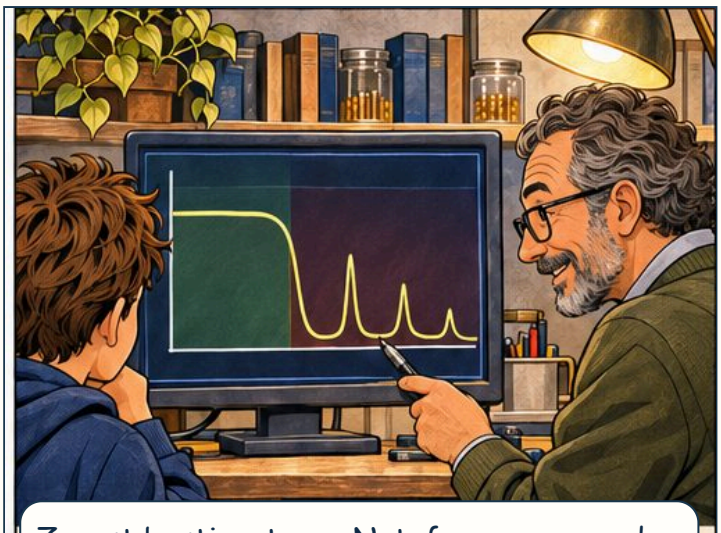


Der Filter muss eine genau festgelegte Aufgabe erfüllen.

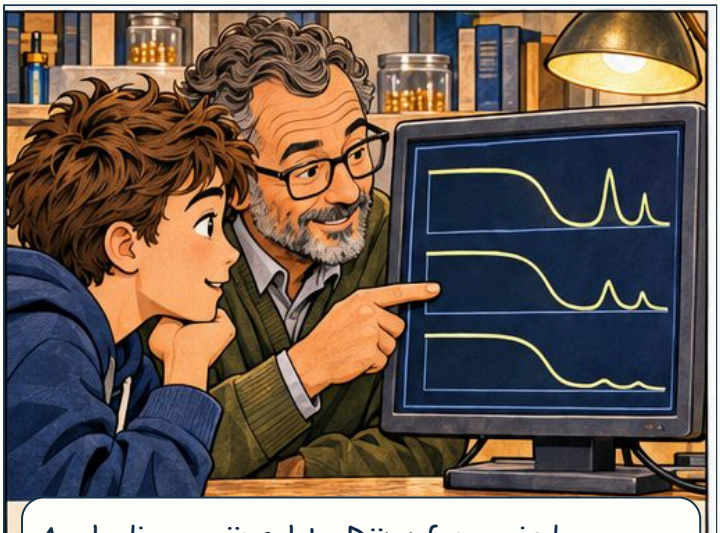
Was soll bleiben?



Ein Filter beeinflusst Frequenzanteile unterschiedlich.



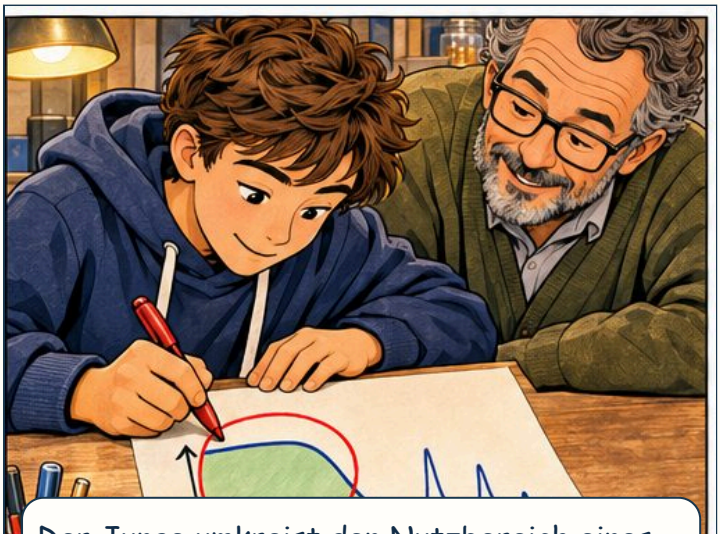
Zuerst bestimmt man Nutzfrequenzen und störende Frequenzen.



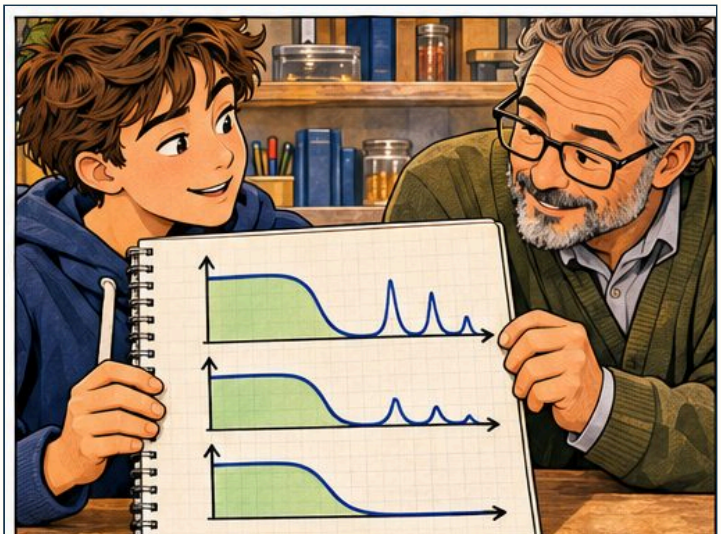
Auch die gewünschte Dämpfung wird festgelegt.



Ohne diese Ziele wäre eine Bauteilberechnung wenig sinnvoll.

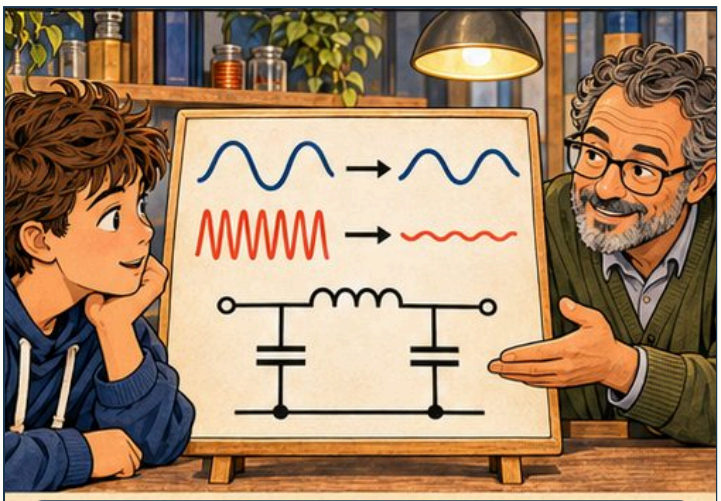


Der Junge umkreist den Nutzbereich eines Beispielspektrums.



Sein Heft wird zum Pflichtenheft.

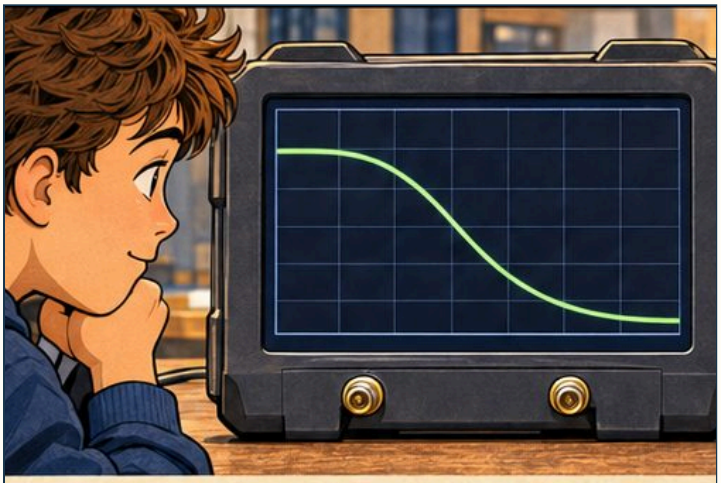
Die Wahl des Tiefpasses



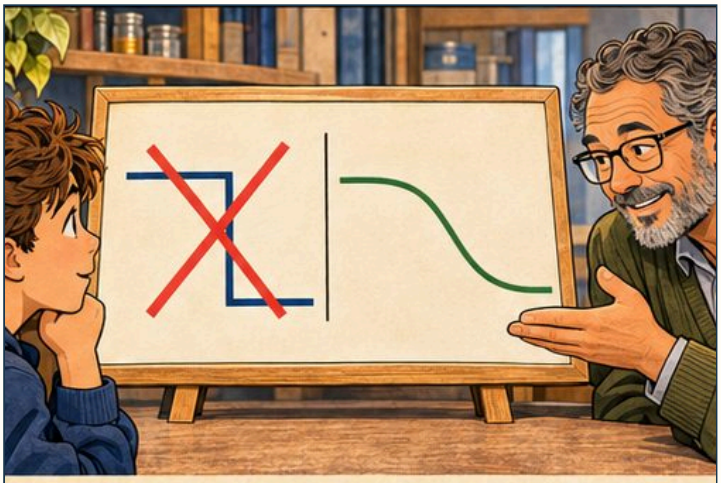
Ein Tiefpass überträgt tiefe Frequenzen besser als hohe.



Sein Durchlassbereich liegt auf der niederfrequenten Seite.



Darüber nimmt die Dämpfung allmählich zu.



Der reale Übergang ist niemals eine perfekte senkrechte Wand.



Dieser Typ passt zur heutigen Vorführung.



Der Junge zeichnet eine Flanke statt einer Schranke.

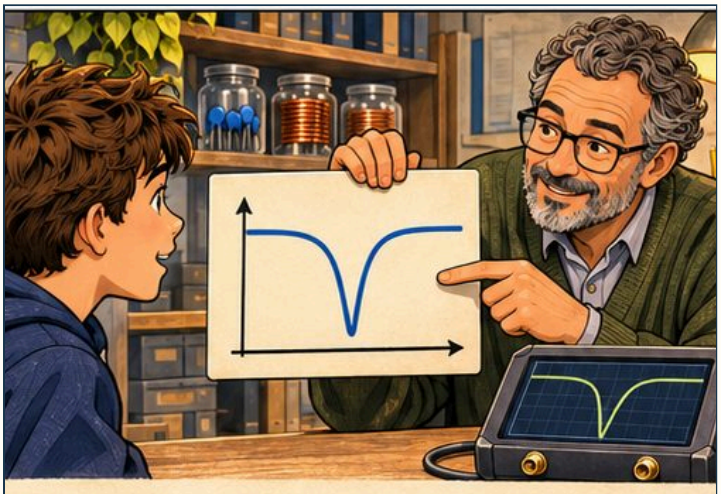
Weitere mögliche Wege



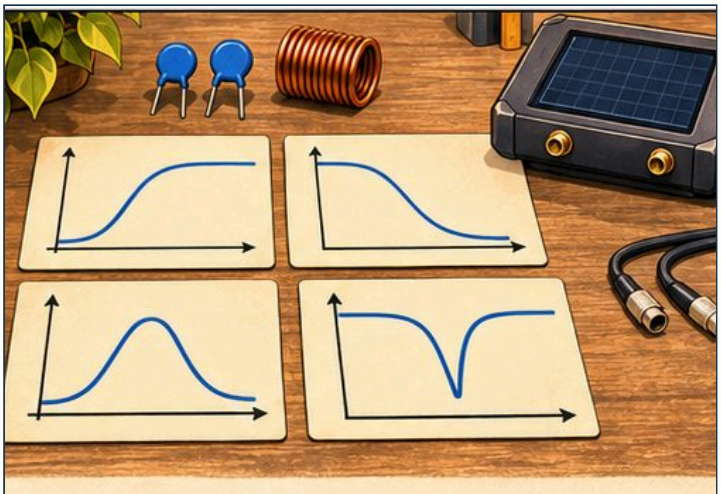
Ein Hochpass dämpft tiefe Frequenzen und lässt hohe durch.



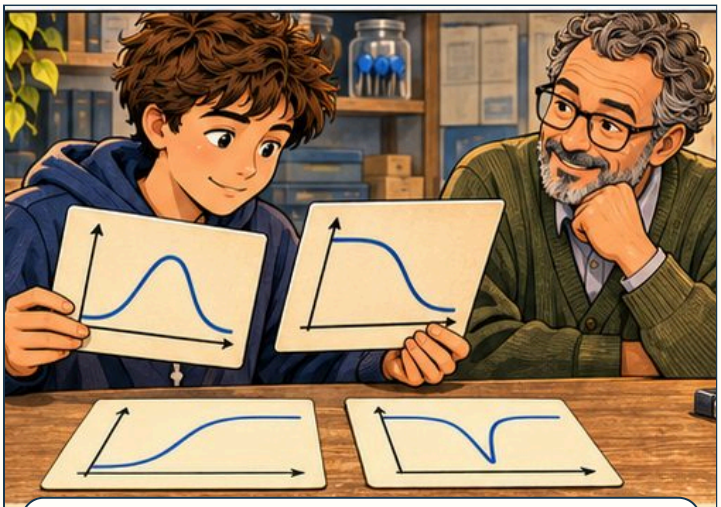
Ein Bandpass bevorzugt einen Bereich zwischen zwei Grenzen.



Eine Bandsperre dämpft dagegen einen ausgewählten Bereich.



Diese Familien erfüllen unterschiedliche Aufgaben.

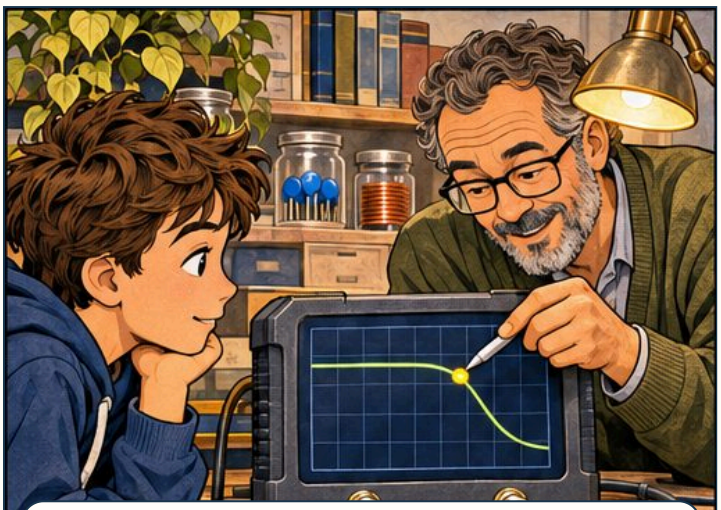


Ihr Name beschreibt ein Verhalten, keine allgemeine Qualität.



Drei Karten hebt der Junge für einen späteren Workshop auf.

Eine Grenze, die durchlässt



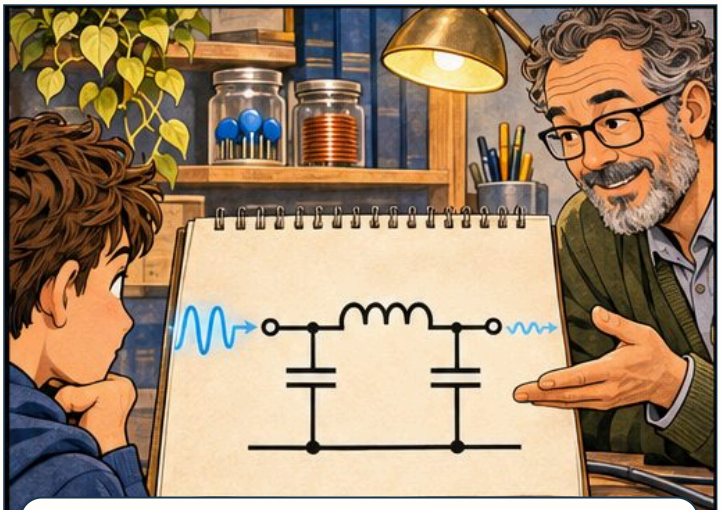
Die Grenzfrequenz kennzeichnet hier einen Bezugspegel.



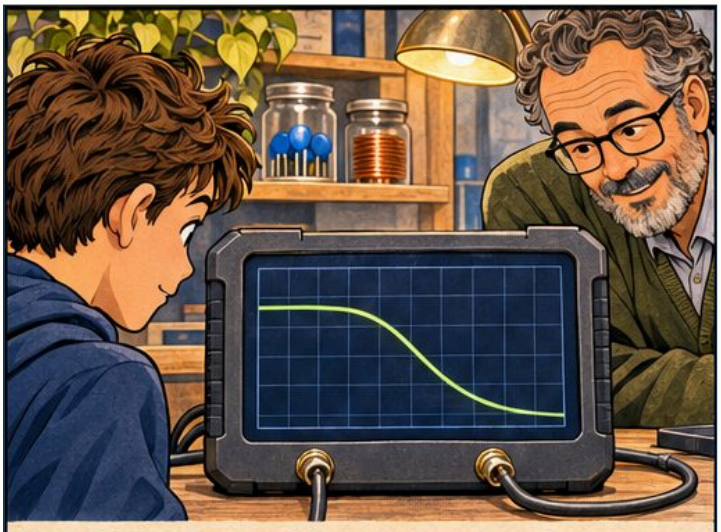
Sie bedeutet kein plötzliches Verschwinden des Signals.



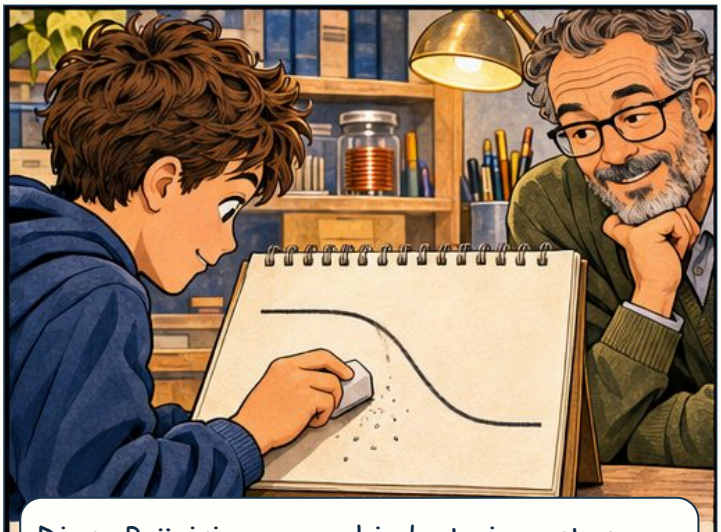
Beim idealen Butterworth entspricht sie ungefähr −3 dB.



Der Filter überträgt dort also weiterhin Energie.



Darüber nimmt die Dämpfung weiter zu.

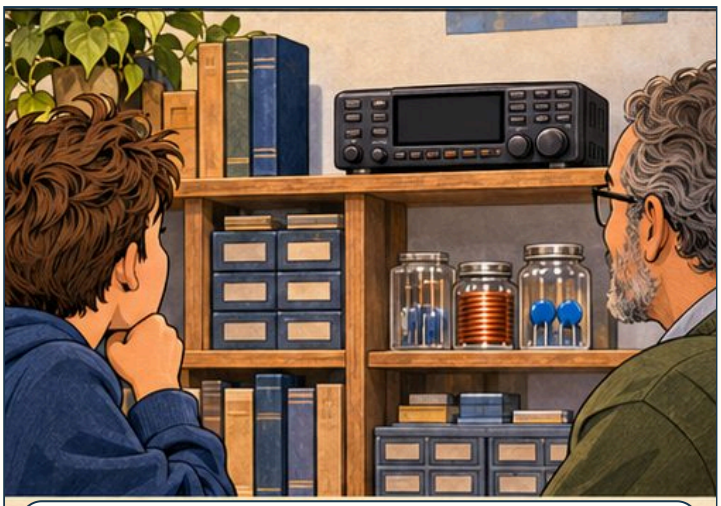


Diese Präzisierung verhindert ein erstes Missverständnis.

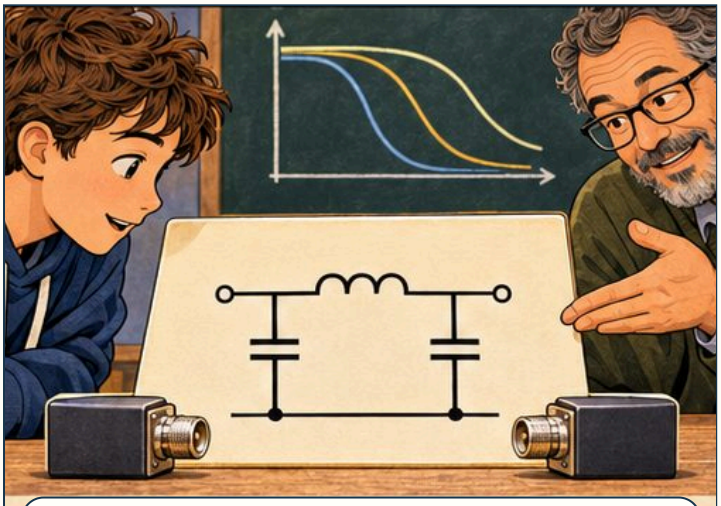
Ein Laborbeispiel



Sie wählen eine theoretische Grenzfrequenz von 10 MHz.



Dieser Lernwert legt keine Sendefrequenz fest.



Bezugsquelle und Last sollen jeweils 50 Ω haben.



Sie untersuchen die Schaltung am Messplatz mit einem Kleinsignal.



Weder Antenne noch Sender werden angeschlossen.

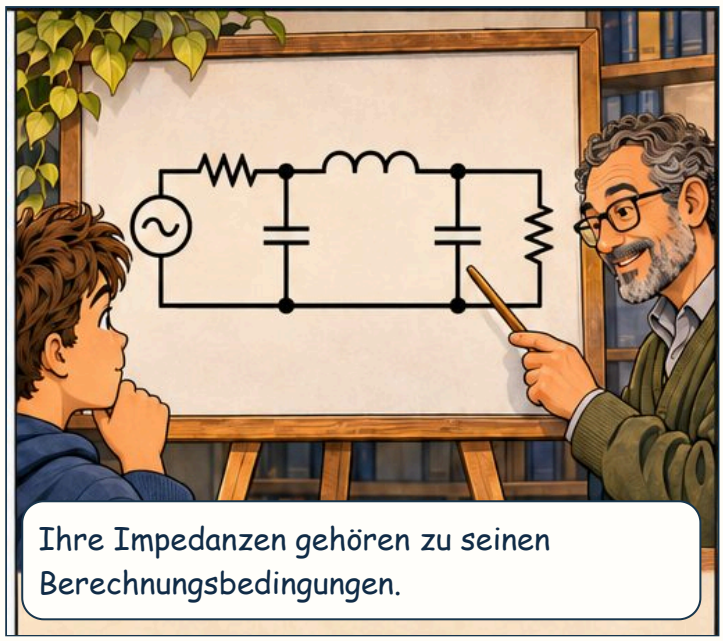


Das Ziel ist ein messbarer Verlauf, kein Funkkontakt.

Warum 50 Ohm angeben?



Ein Filter arbeitet zwischen Quelle und Last.



Ihre Impedanzen gehören zu seinen Berechnungsbedingungen.



Hier sind beide ideal rein ohmsch und betragen 50 Ω.



Andere Bedingungen verändern den Frequenzgang.

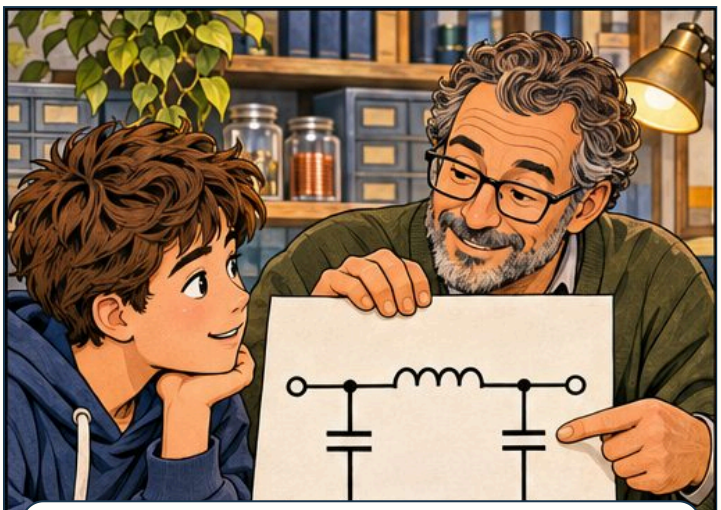


Drei Werte einfach abzuschreiben genügt also nicht.



Der Junge ergänzt beide Abschlüsse im Schaltbild.

Modell und Schaltung



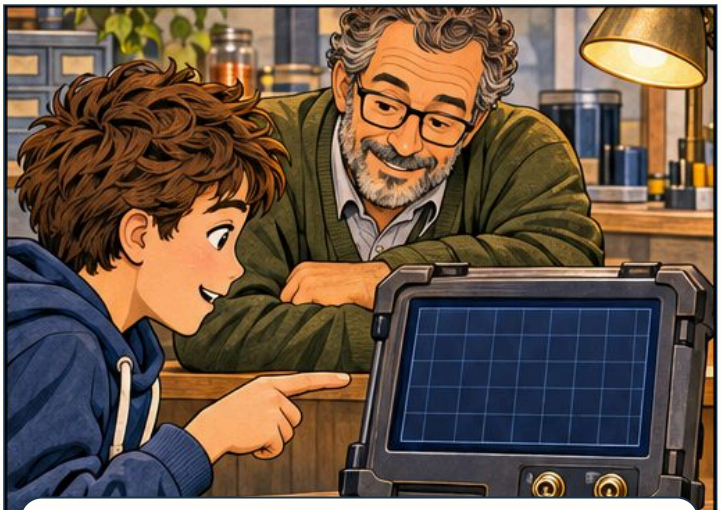
Die Berechnung beginnt mit idealen, verlustfreien Bauteilen.



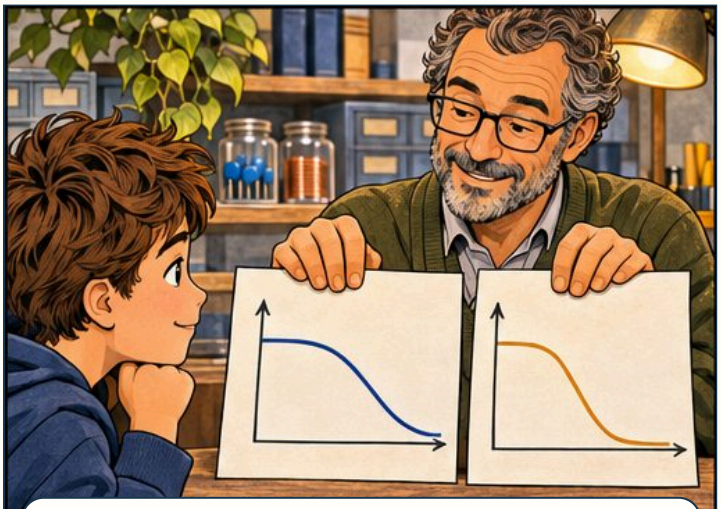
Die reale Schaltung hat Widerstände und parasitäre Effekte.



Das Modell liefert einen ersten vorhergesagten Verlauf.



Messungen helfen anschließend, Unterschiede zu untersuchen.

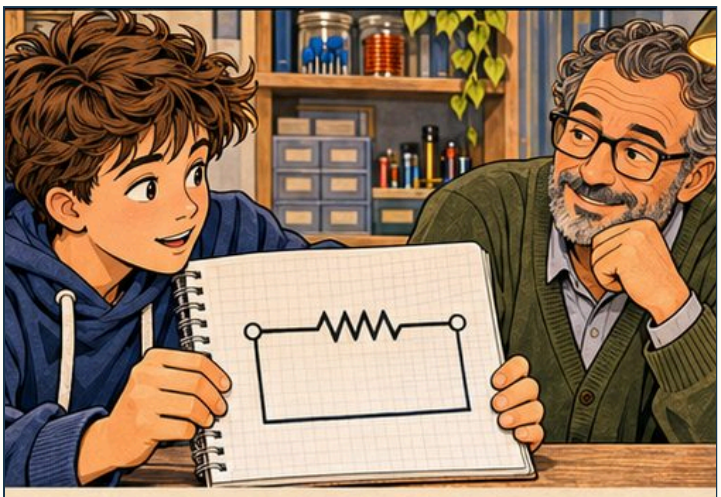


Wer Vorhersage und Ergebnis verwechselt, versteht diese Abweichungen nicht.

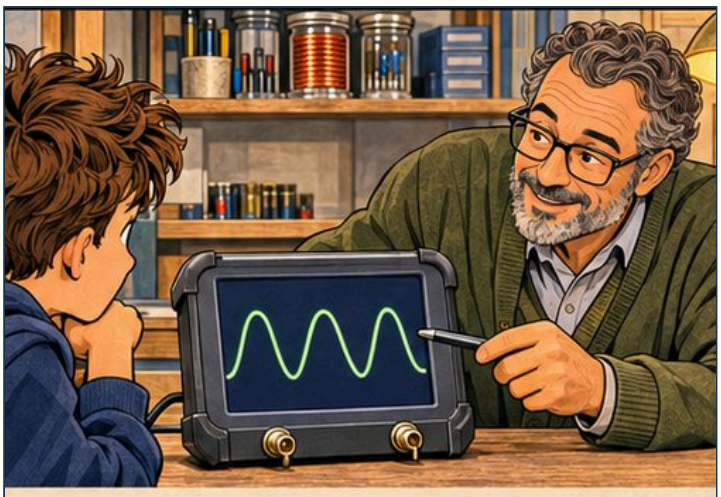


Das Heft bietet dafür getrennte Bereiche.

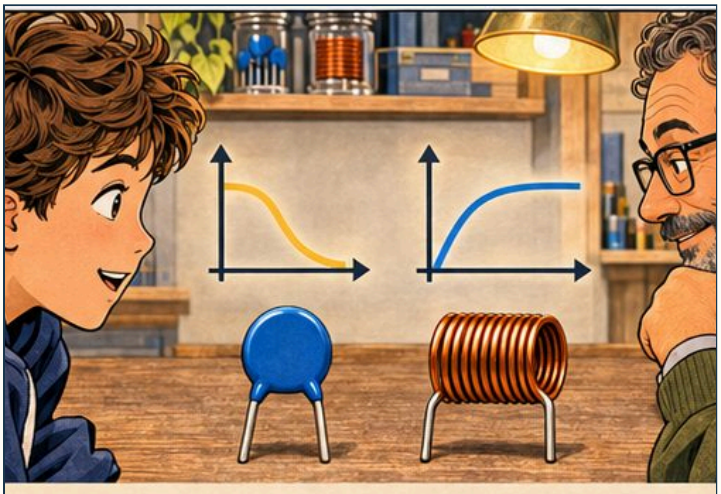
Ein Widerstand genügt nicht mehr



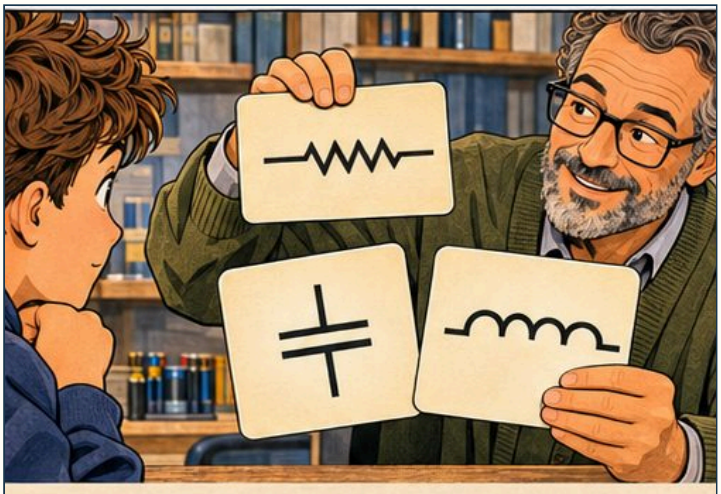
Der vorige Band verband Gleichspannung, Strom und Widerstand.



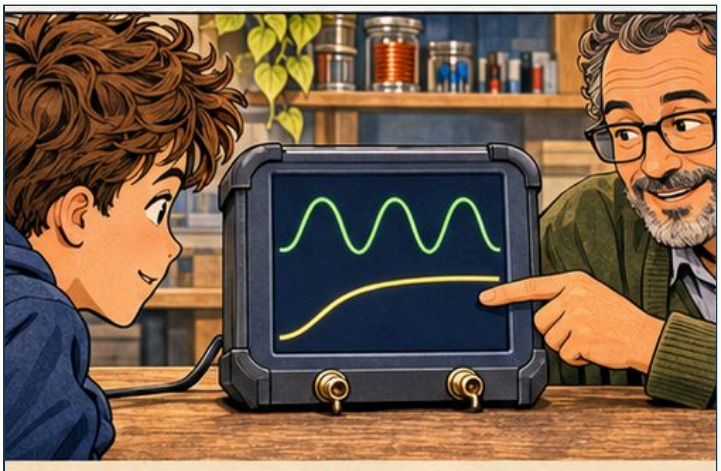
Hier ändert sich das Signal schnell; seine Frequenz zählt.



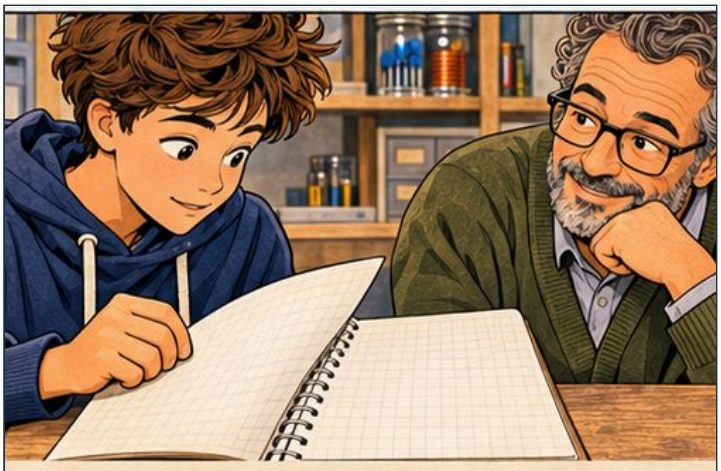
Kondensatoren und Spulen bieten einen frequenzabhängigen Widerstand.



Diese Reaktanz unterscheidet sich vom rein ohmschen Widerstand.



Die Impedanz beschreibt das elektrische Wechselstromverhalten umfassender.

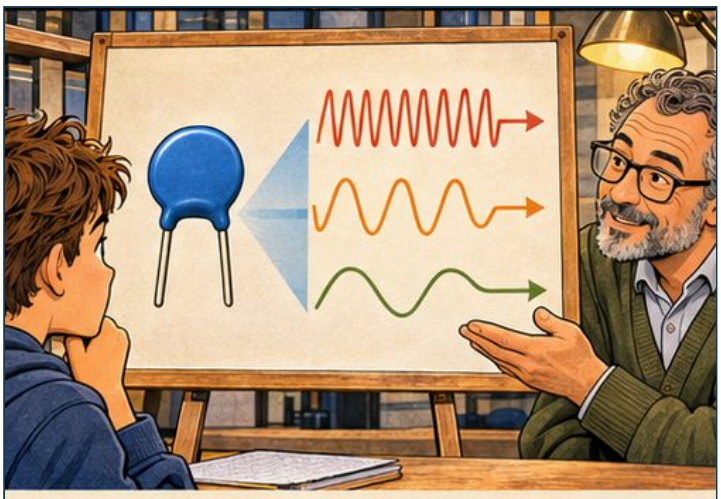


Der Junge versteht, warum ein neues Modell nötig ist.

Die Rolle des Kondensators



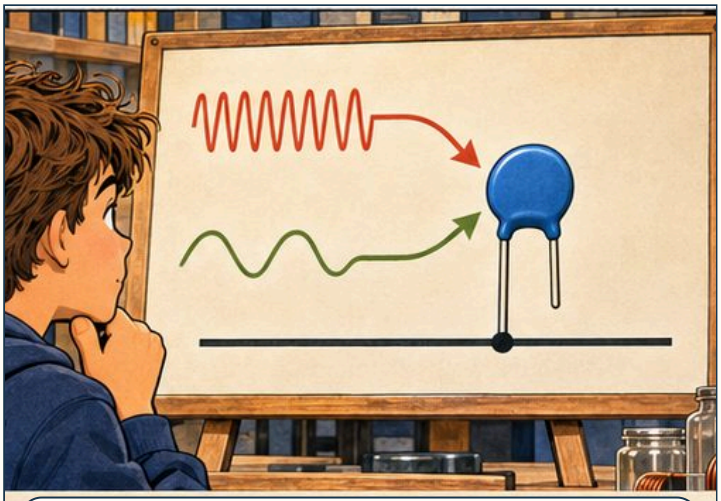
Die Kapazität heißt C und wird in Farad, F, angegeben.



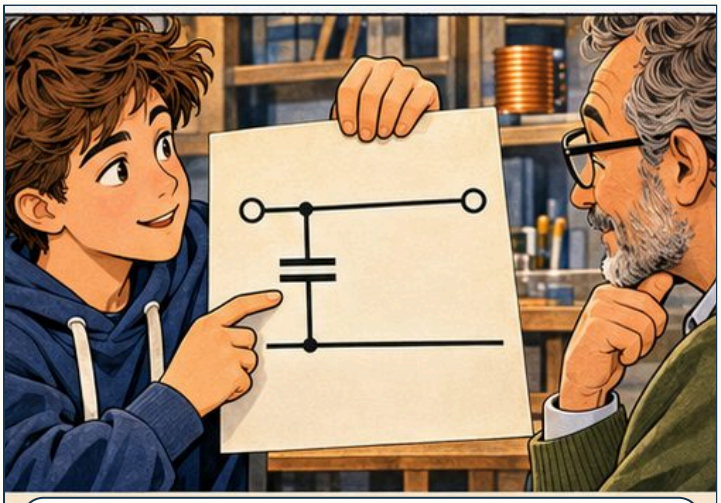
Beim idealen Kondensator sinkt die Reaktanz mit steigender Frequenz.



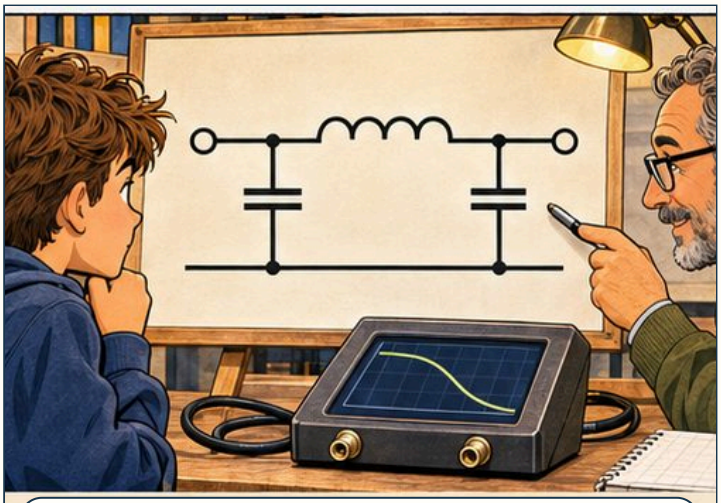
Ihr Betrag ist $X_C = 1/(2\pi f C)$.



Bei gleicher Kapazität treffen hohe Frequenzen auf weniger Reaktanz.



Im Filter werden die Kondensatoren mit Masse verbunden.

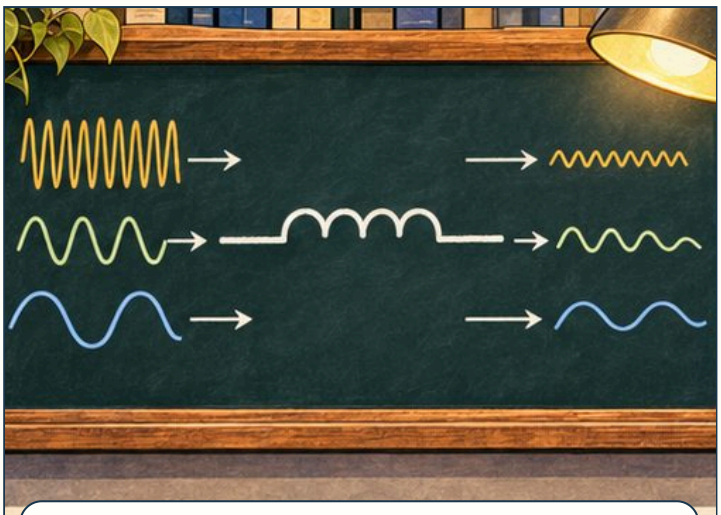


Ihre Wirkung hängt auch vom übrigen Stromkreis ab.

Die Rolle der Spule



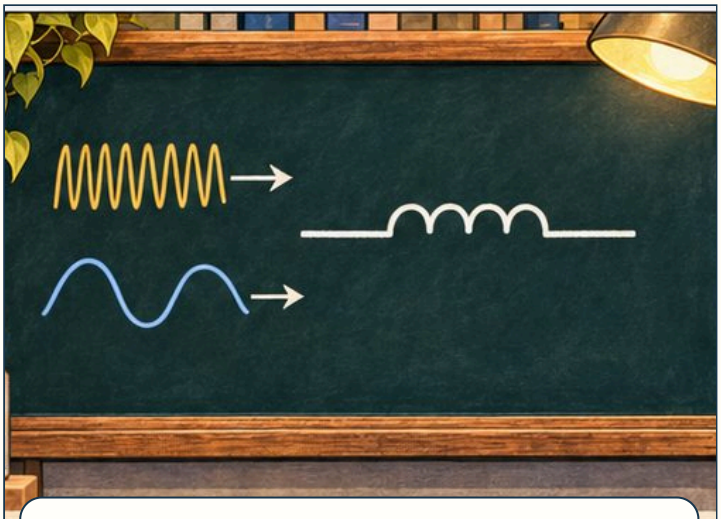
Die Induktivität heißt L und wird in Henry, H, angegeben.



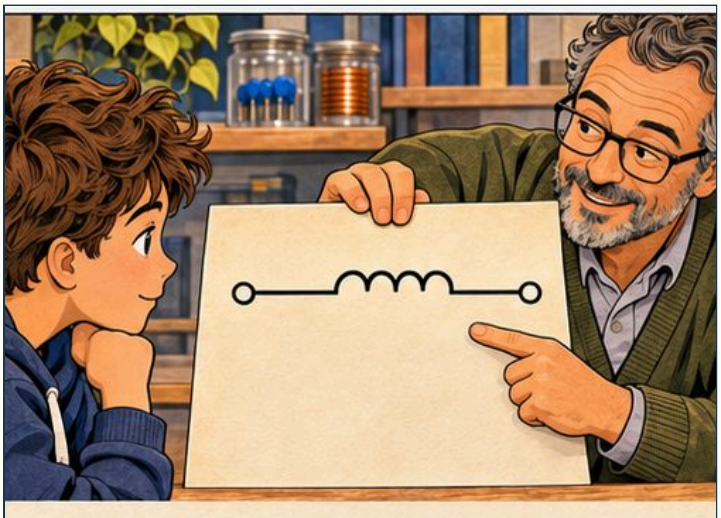
Bei einer idealen Spule steigt die Reaktanz mit der Frequenz.



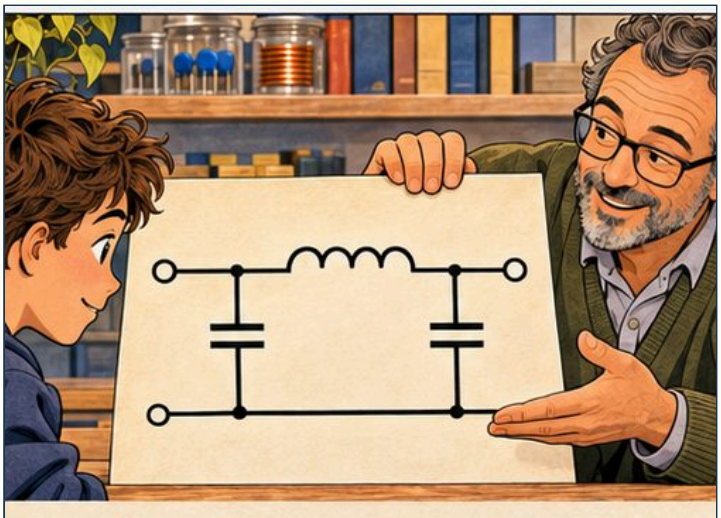
Ihr Betrag ist XL = 2πfL.



Bei gleicher Induktivität treffen hohe Frequenzen auf mehr Reaktanz.

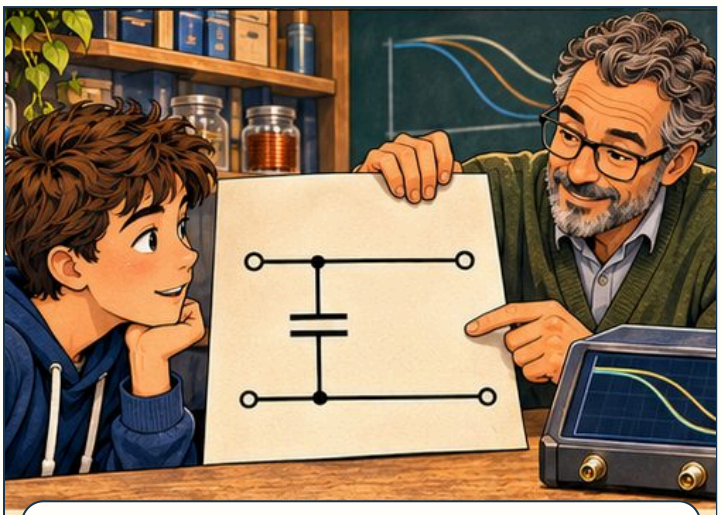


Im Filter liegt die Spule im Signalweg.

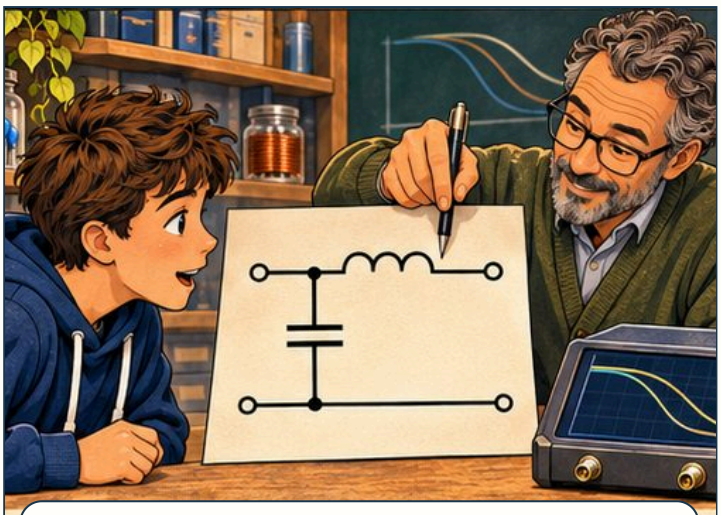


Beide Bauteilarten wirken gemeinsam.

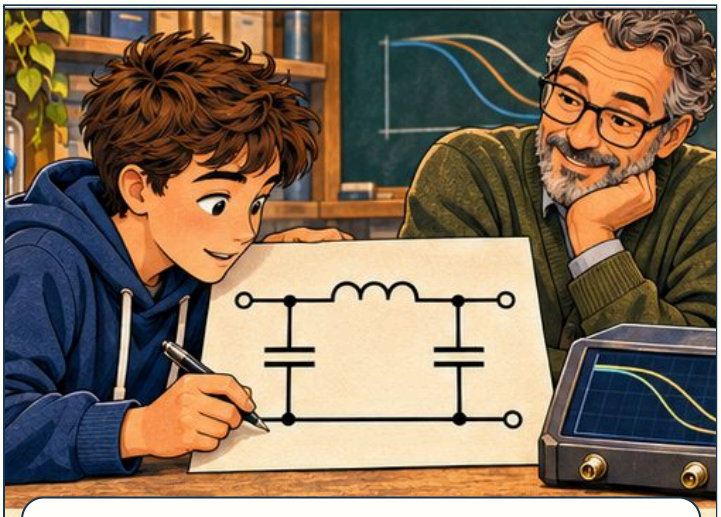
Das Schaltbild wird zum π



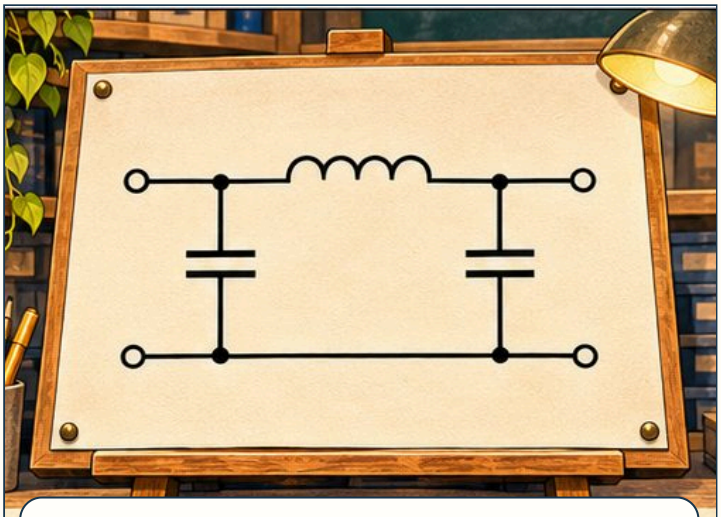
Am Eingang liegt ein erster Kondensator gegen Masse.



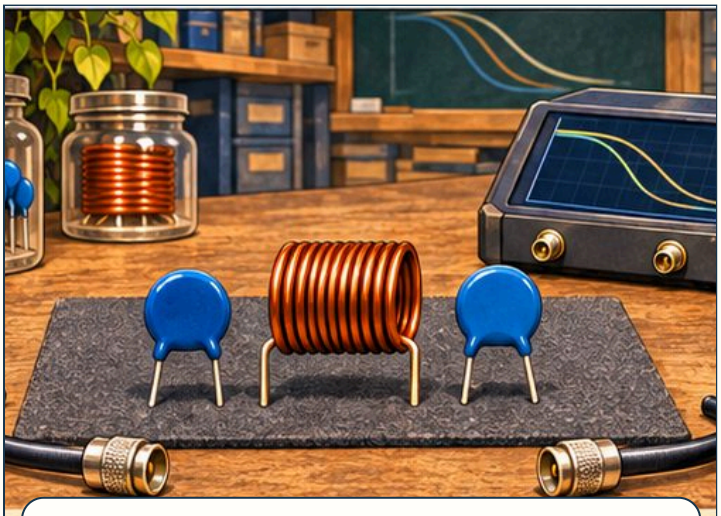
Eine Spule verbindet Eingang und Ausgang in Reihe.



Ein zweiter Kondensator verbindet den Ausgang mit derselben Masse.



Beiderseits der Spule führen zwei Zweige nach unten.



Die Anordnung erinnert an den griechischen Buchstaben π.

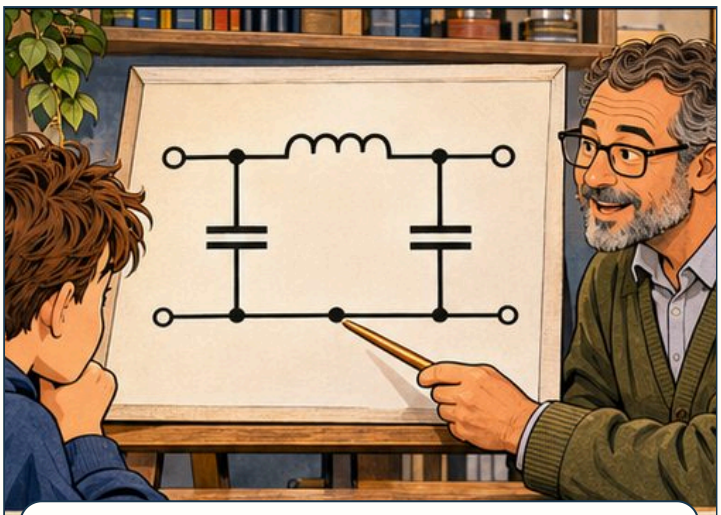


Der Junge verfolgt jede Verbindung mit dem Bleistift.

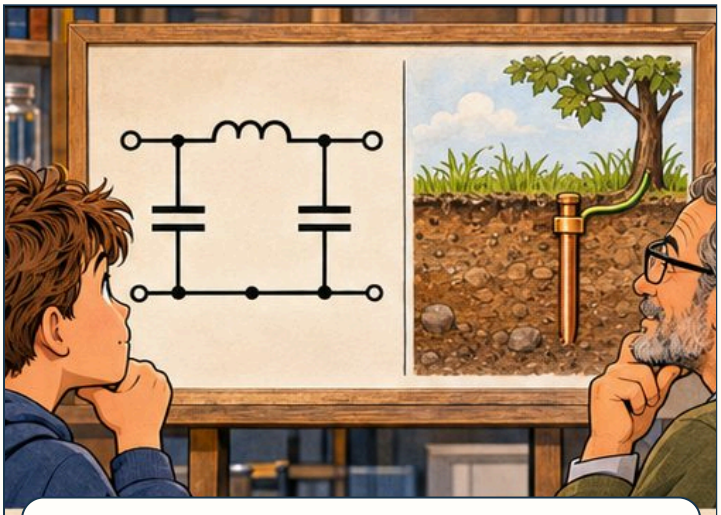
Die Masse im Schaltbild



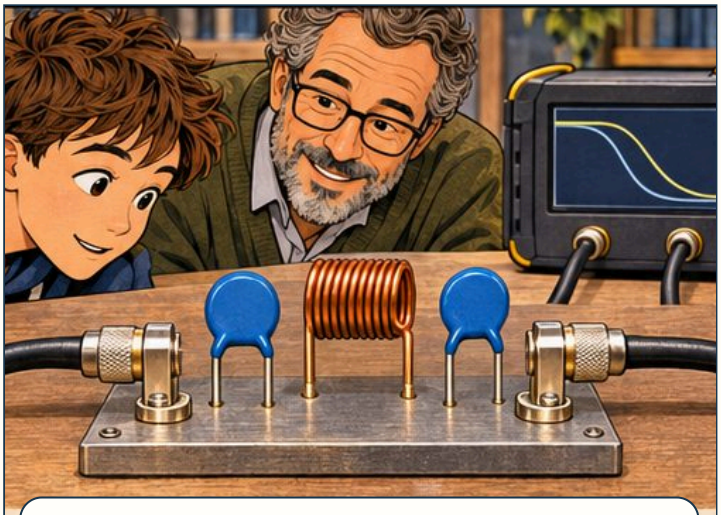
Beide Kondensatoren teilen ein gemeinsames elektrisches Bezugspotenzial.



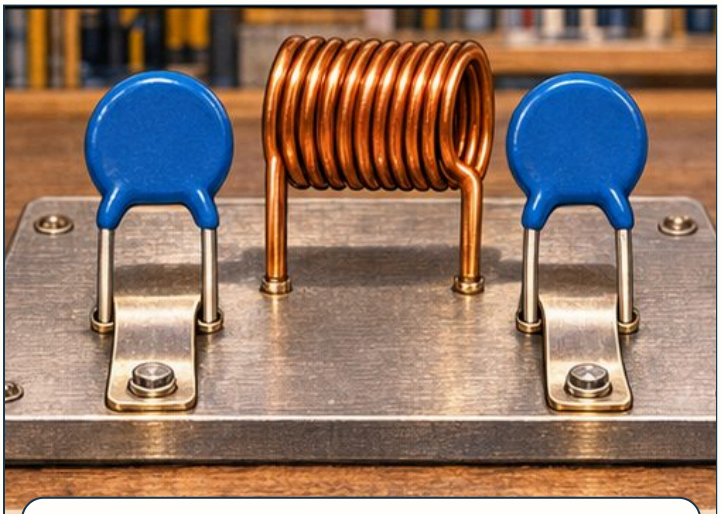
Das Massesymbol bezeichnet hier diesen Schaltungsbezug.



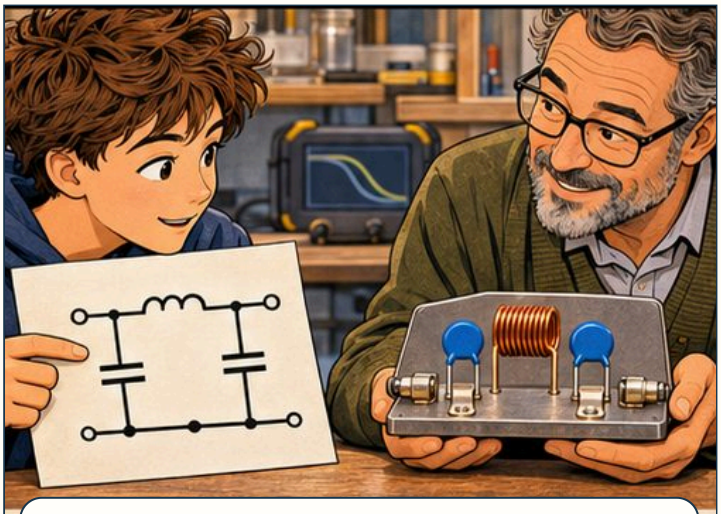
Es bedeutet nicht automatisch eine Verbindung zur Erde.



Die Koaxialabschirmungen werden planmäßig mit dieser Masse verbunden.



Kurze Verbindungen begrenzen bestimmte parasitäre Effekte.

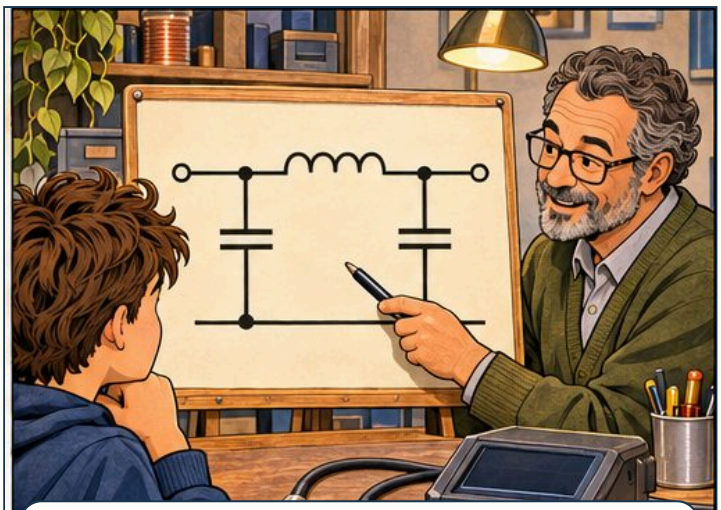


Der Junge unterscheidet Symbol und praktische Umsetzung.

Drei Elemente, eine Ordnung



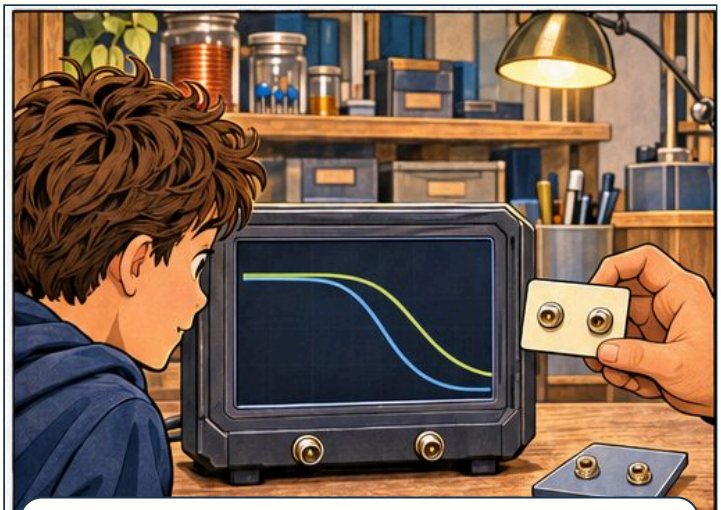
Dieses ideale Netzwerk enthält drei reaktive Elemente: C, L und C.



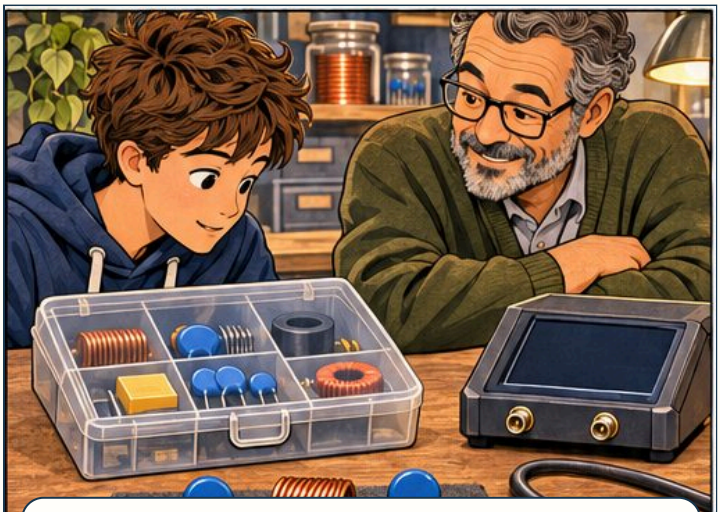
Hier bilden sie einen Tiefpass dritter Ordnung.



Die Ordnung kennzeichnet unter anderem die spätere asymptotische Flanke.



Eine ungeeignete Impedanz würde den Verlauf dennoch verändern.



Zufällige Zusatzbauteile ergeben nicht den gewünschten Filter.

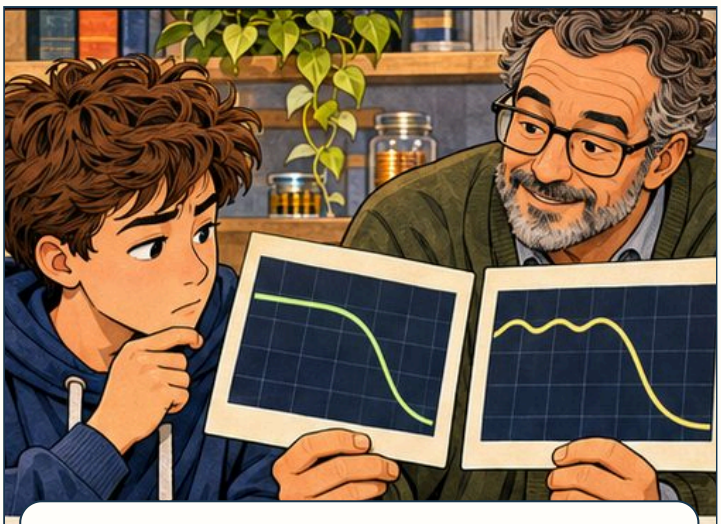


Schaltungstopologie und Berechnung müssen zusammenpassen.

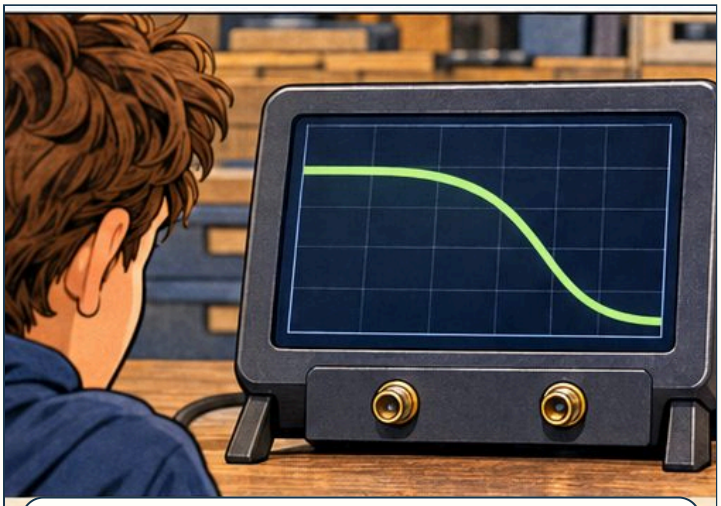
Warum Butterworth?



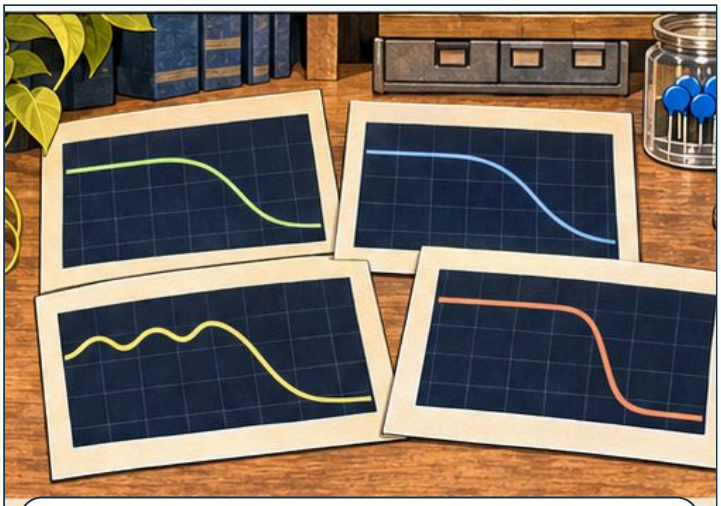
Der Butterworth-Frequenzgang ist im Durchlassbereich maximal flach.



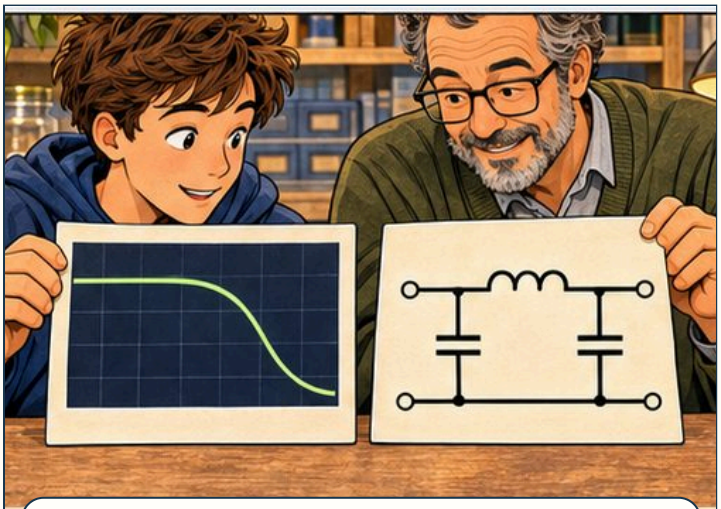
Das ideale Modell zeigt dort keine Welligkeit.



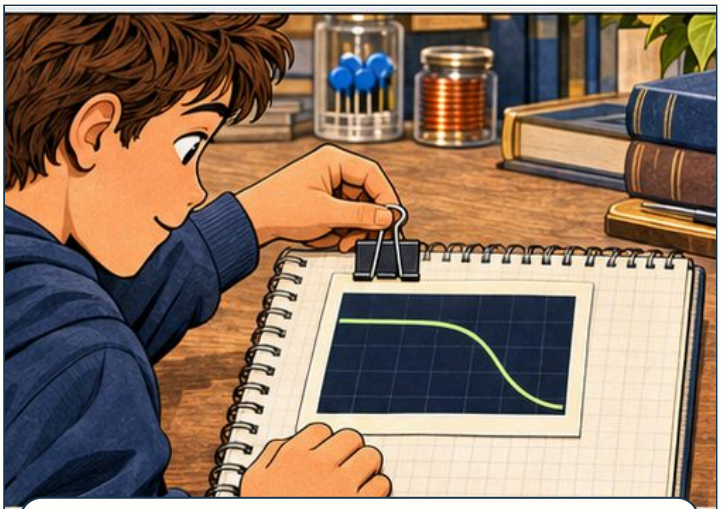
Der Übergang bleibt allmählich und charakteristisch gekrümmt.



Andere Filtertypen gehen andere Kompromisse ein.



Für einen verständlichen ersten Entwurf wählen sie diese Familie.



Der Name sagt damit mehr als nur „Tiefpass“.

Ein Prototyp als Anfang



Ein normierter Prototyp liefert die Entwurfskoeffizienten.



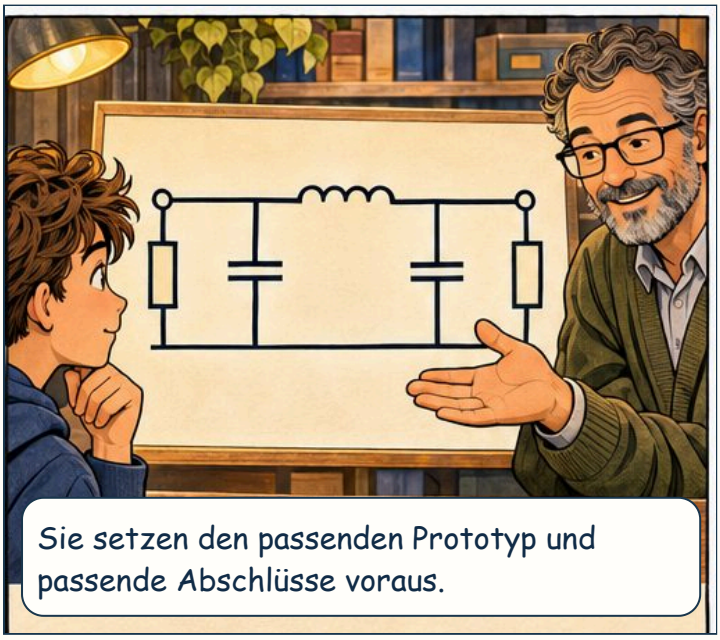
Für diesen Butterworth dritter Ordnung lauten sie 1, 2 und 1.



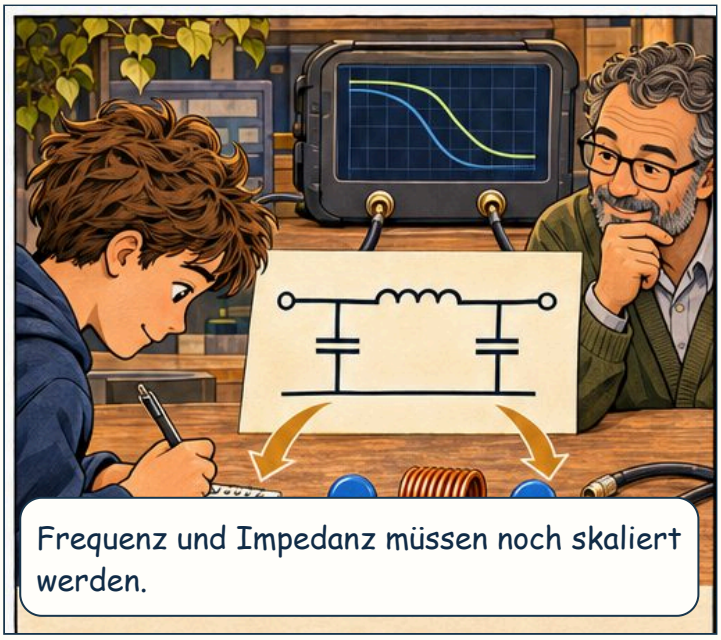
Sie stehen der Reihe nach für Kondensator, Spule, Kondensator.



Die Koeffizienten sind noch keine käuflichen Bauteilwerte.



Sie setzen den passenden Prototyp und passende Abschlüsse voraus.

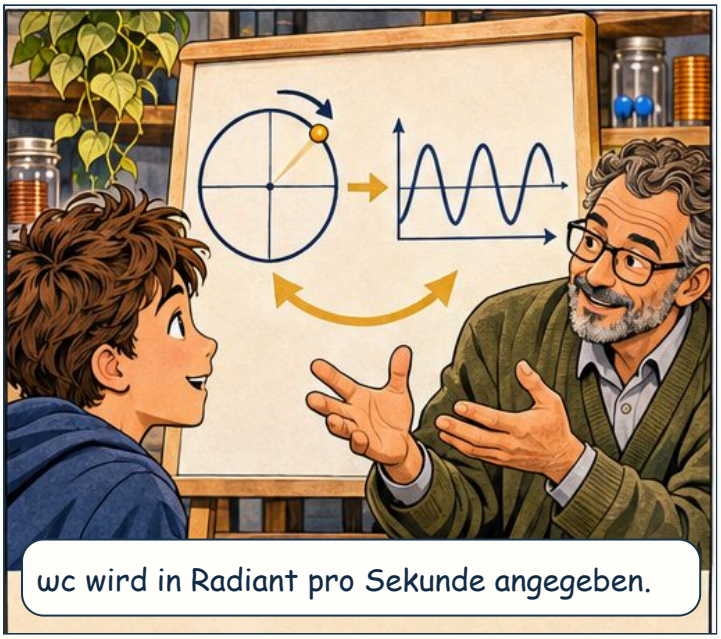


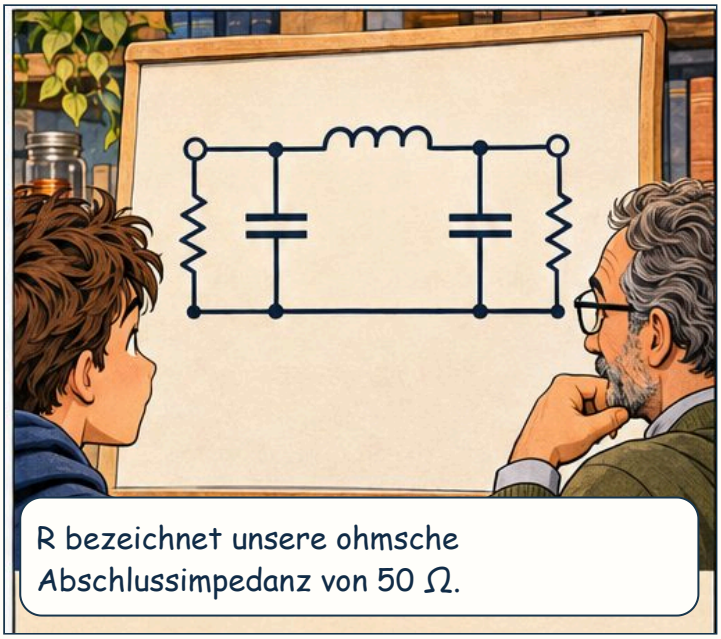
Frequenz und Impedanz müssen noch skaliert werden.

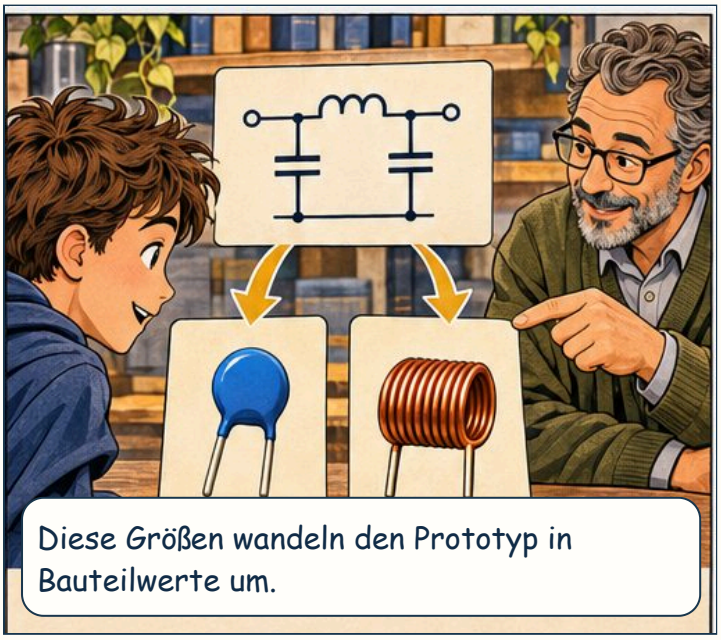
Den Maßstab ändern

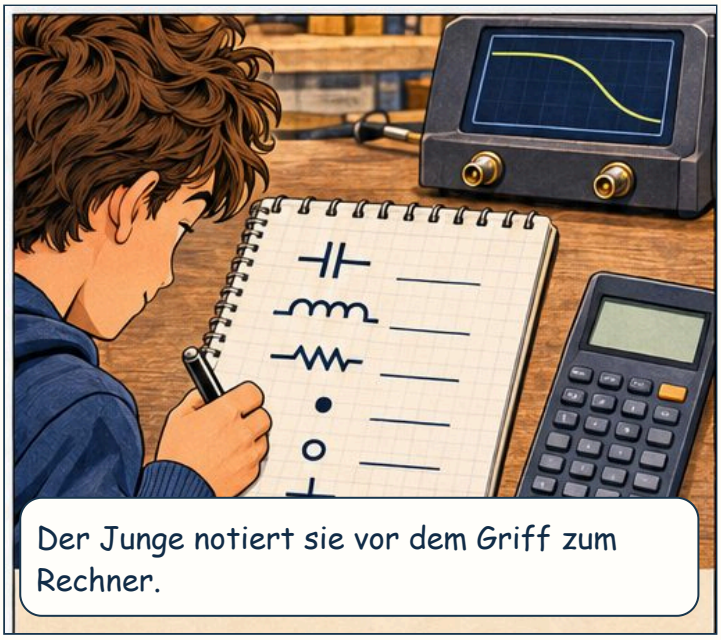








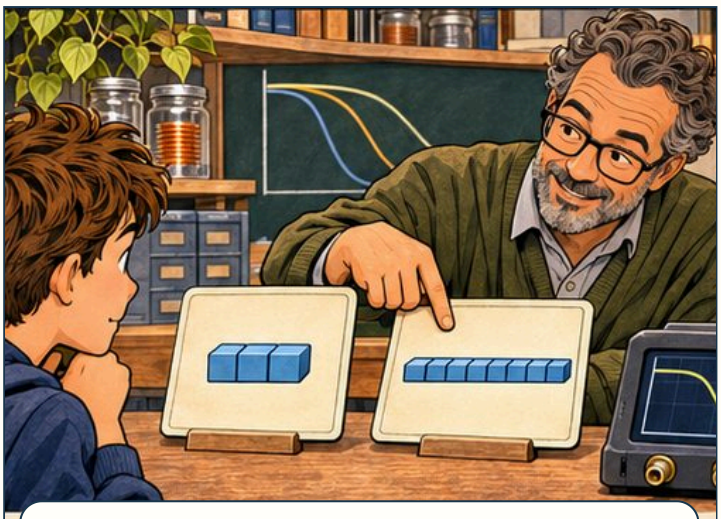




Einheiten vor Zahlen



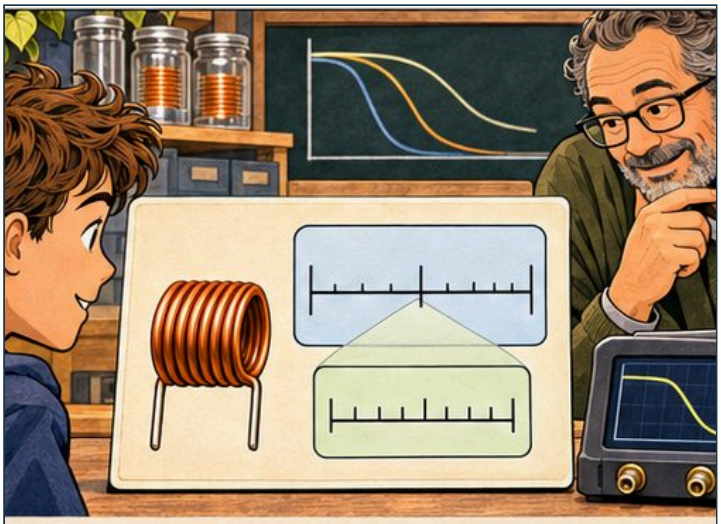
Ein Megahertz entspricht einer Million Hertz.



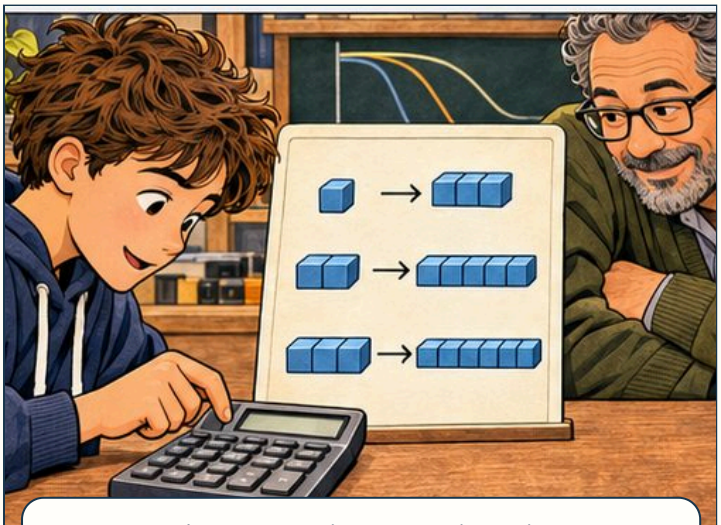
10 MHz Grenzfrequenz entsprechen also 10 000 000 Hz.



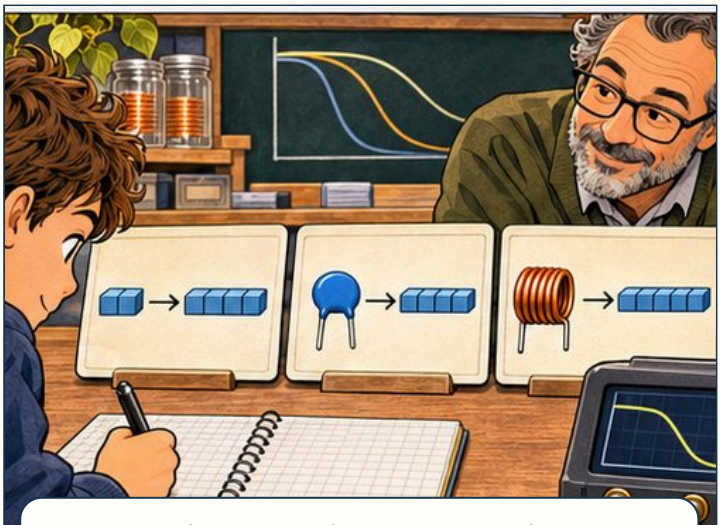
Ein Pikofarad entspricht 10^{-12} F.



Ein Mikrohenry entspricht 10^{-6} H.



Die Formeln verwenden zunächst die Grundeinheiten.



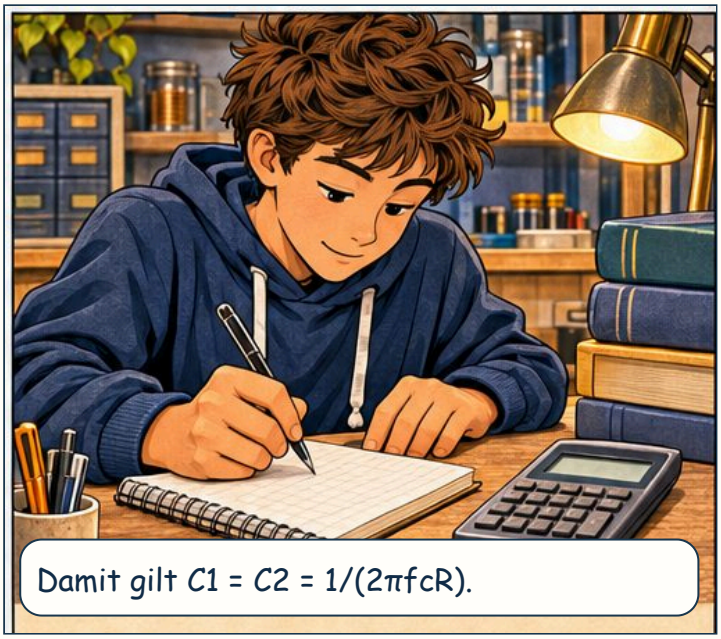
Die Umrechnungen bleiben neben den Rechnungen sichtbar.

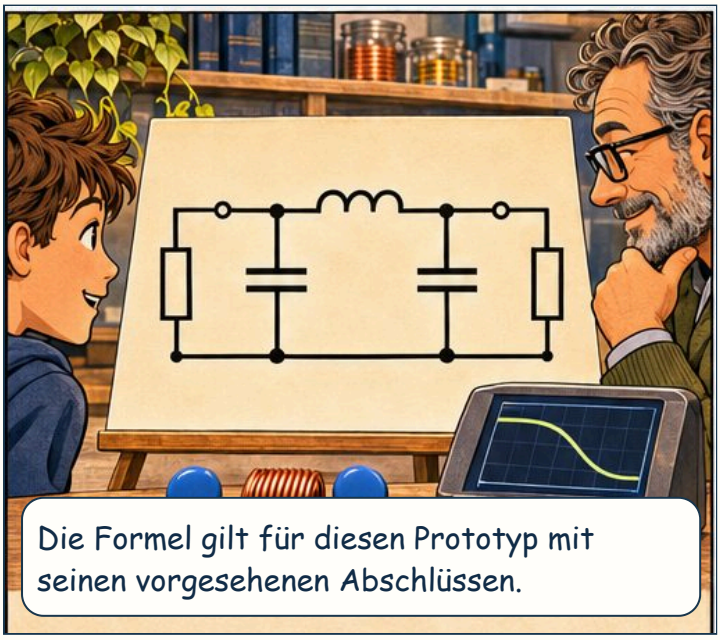
Die Kondensatorformeln













Die Kapazitäten berechnen



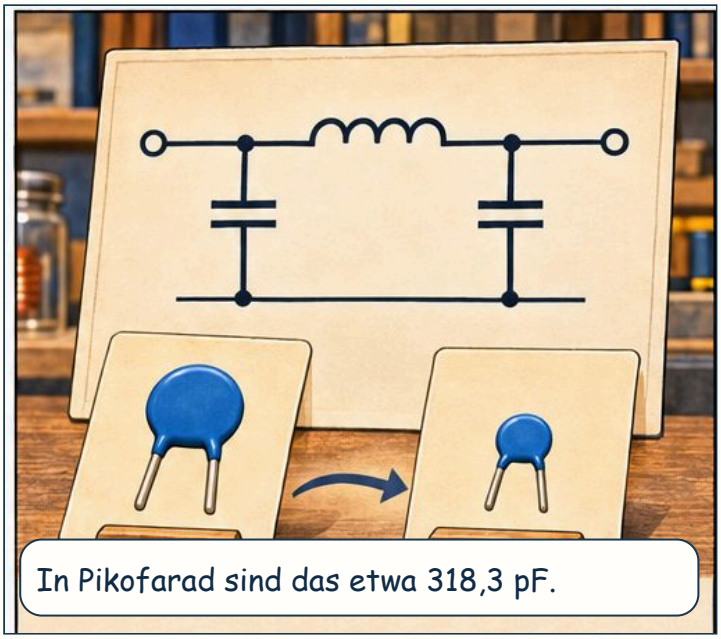
Sie setzen fc = 10 000 000 Hz und R = 50 Ω ein.



Der Nenner beträgt ungefähr 3,142 × 10^{9}.



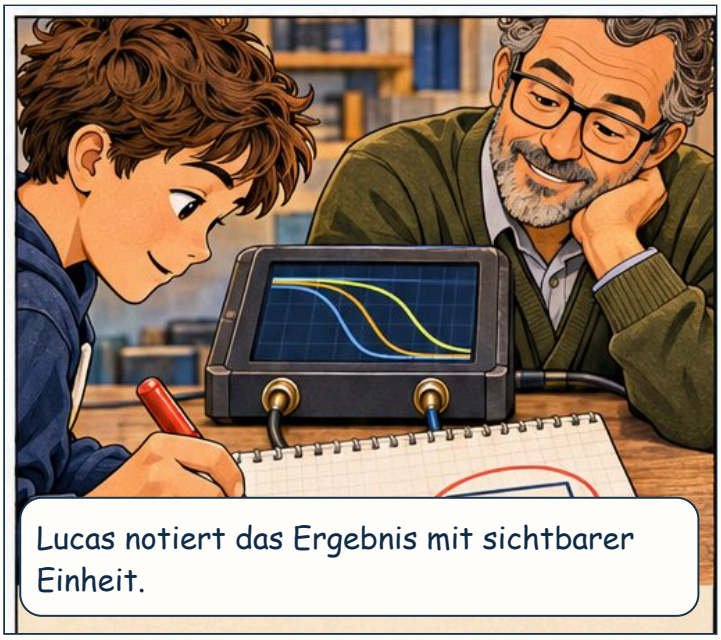
Jede ideale Kapazität beträgt ungefähr 3,183 × 10^{-10} F.



In Pikofarad sind das etwa 318,3 pF.

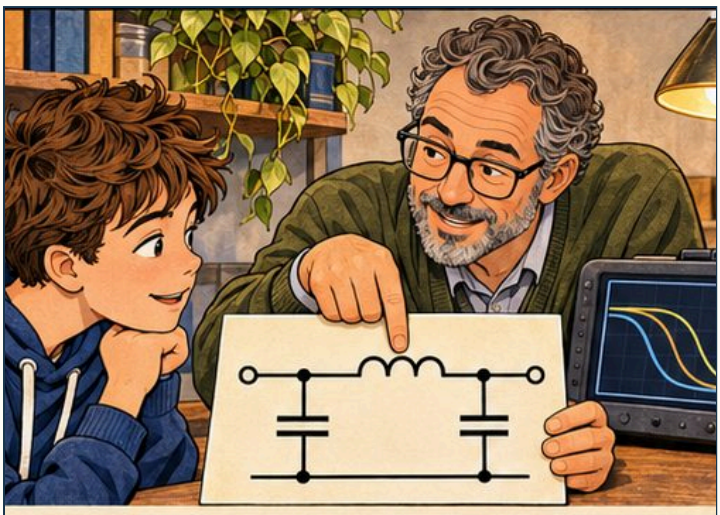


Beide Kondensatoren erhalten denselben theoretischen Wert.



Lucas notiert das Ergebnis mit sichtbarer Einheit.

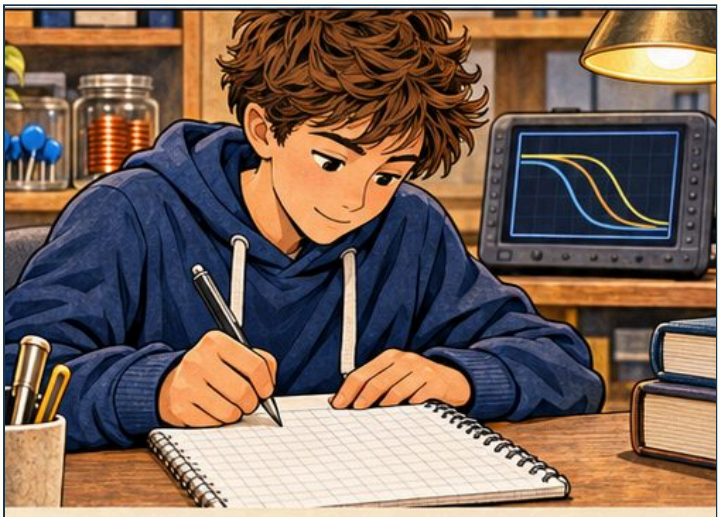
Die Spulenformel



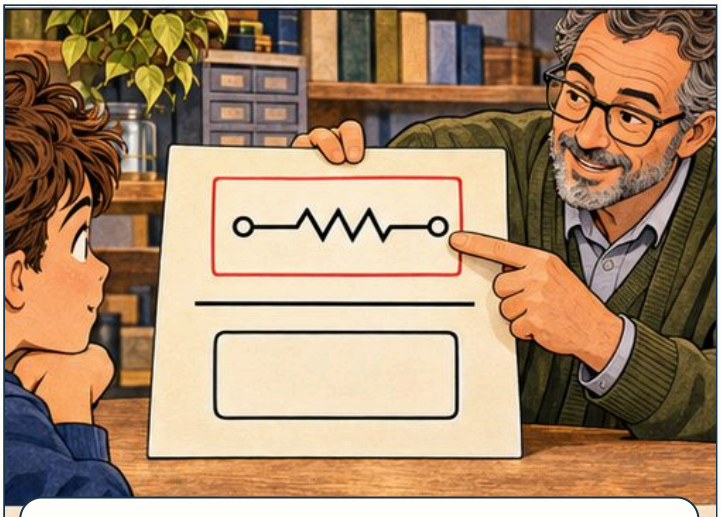
Für die Reihenspule gilt L = g2R/ωc.



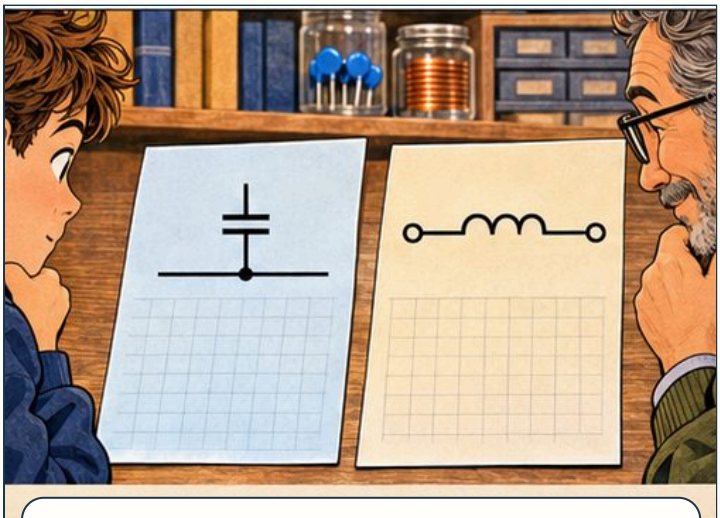
Der mittlere Koeffizient beträgt hier g2 = 2.



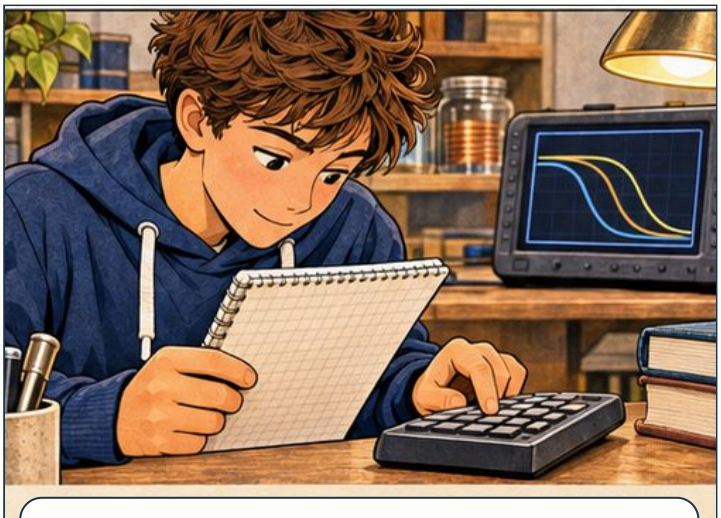
Daraus folgt L = 2R/(2πfc).



Der Abschlusswiderstand steht diesmal im Zähler.



Der Junge vergleicht dies mit der Kondensatorformel.

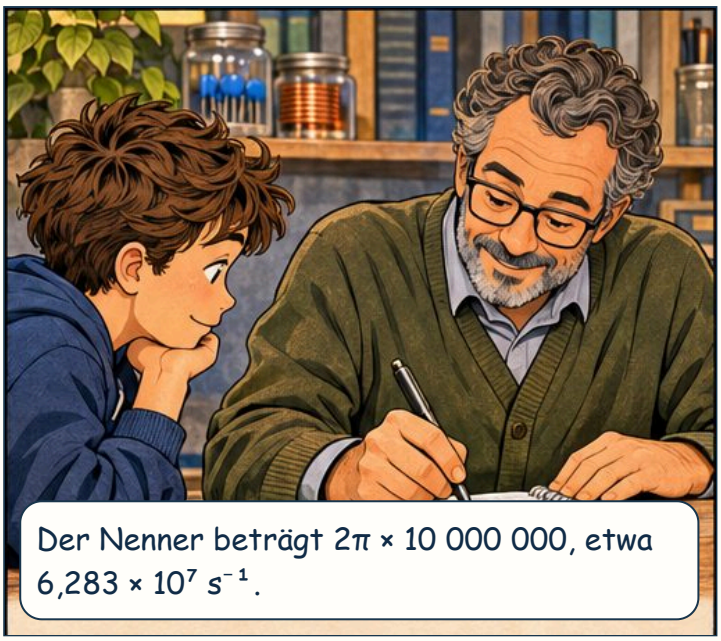


Ähnliches Aussehen ersetzt sorgfältiges Lesen nicht.

Die Induktivität berechnen



Der Zähler beträgt 2 × 50, also 100 Ω.



Der Nenner beträgt 2π × 10 000 000, etwa $6{,}283 \times 10^{7}\ s^{-1}$.



Die Rechnung ergibt ungefähr $1{,}592 \times 10^{-6}$ H.



Die ideale Spule hat also ungefähr 1,59 µH Induktivität.



Alle drei Ergebnisse kommen in dasselbe Schaltbild.



Der erste vollständige Entwurf steht nun fest.

Der Millionenfehler



Der Junge tippt die Rechnung nochmals schnell ein.



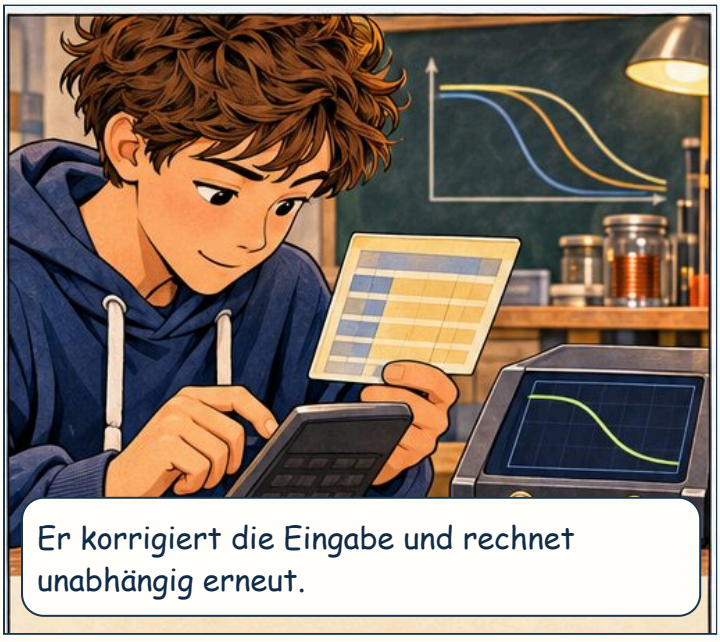
Er gibt 10 statt 10 000 000 ein.



Sein Ergebnis wird eine Million Mal zu groß.



Der Vergleich mit erwarteten Bauteilen zeigt den Fehler sofort.



Er korrigiert die Eingabe und rechnet unabhängig erneut.

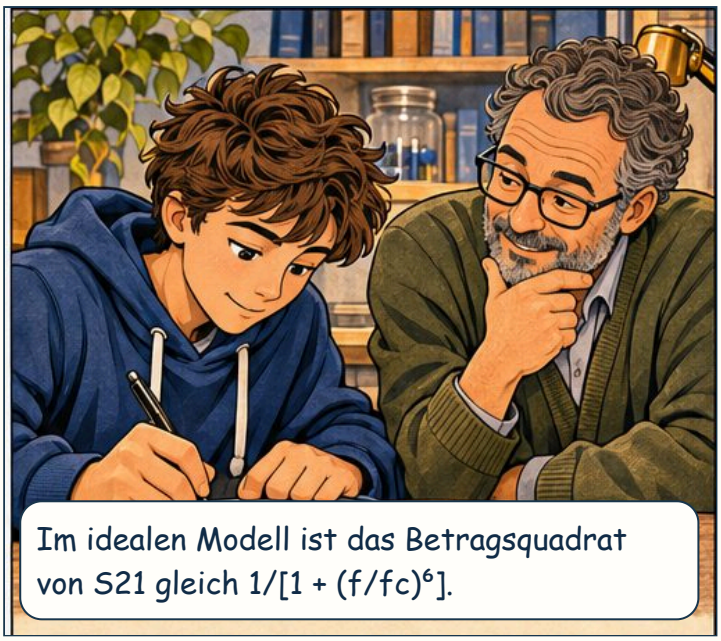


Die Größenordnung zu prüfen wird zur hilfreichen Gewohnheit.

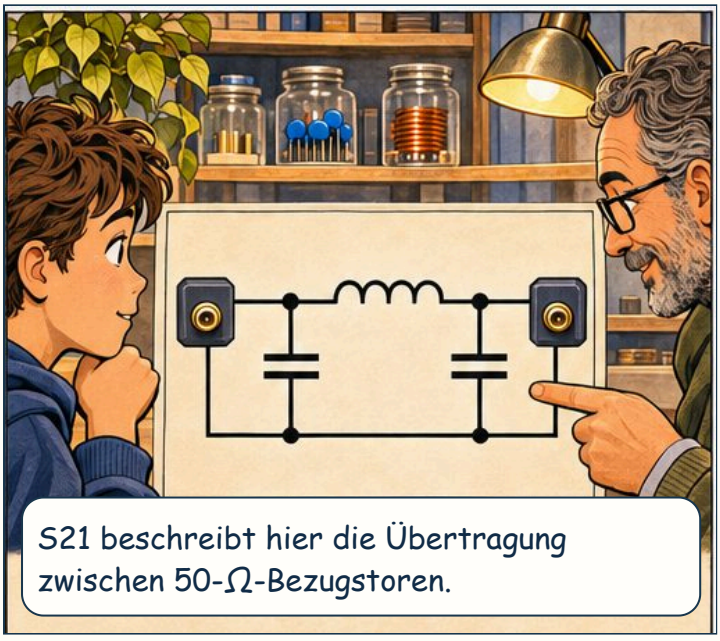
Eine ganze Kurve vorhersagen



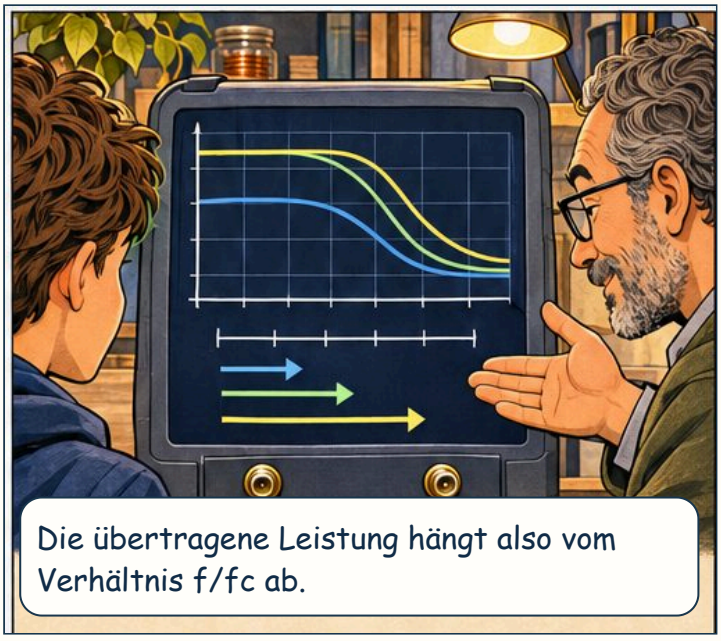
Drei Werte beschreiben noch nicht den gesamten Frequenzgang.



Im idealen Modell ist das Betragsquadrat von S21 gleich $1/[1 + (f/fc)^6]$.



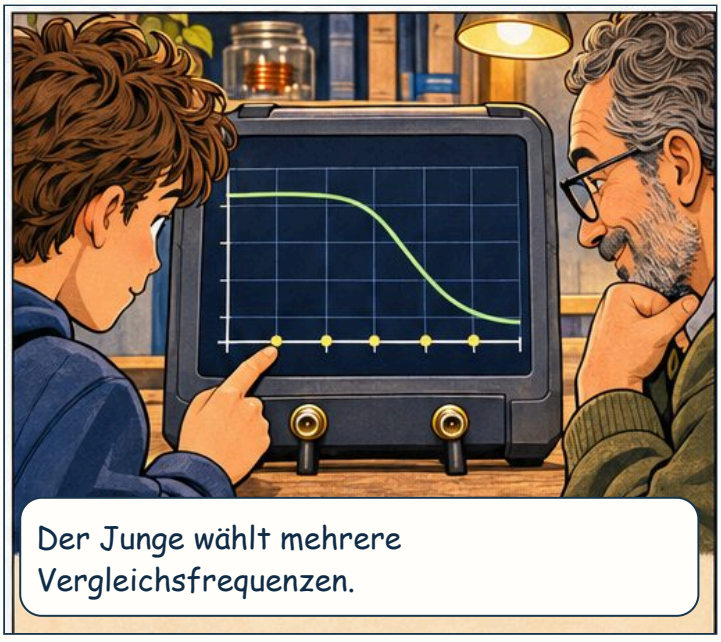
S21 beschreibt hier die Übertragung zwischen 50-Ω-Bezugstoren.



Die übertragene Leistung hängt also vom Verhältnis f/fc ab.



Die theoretische Kurve dient vor der Messung als Bezug.



Der Junge wählt mehrere Vergleichsfrequenzen.

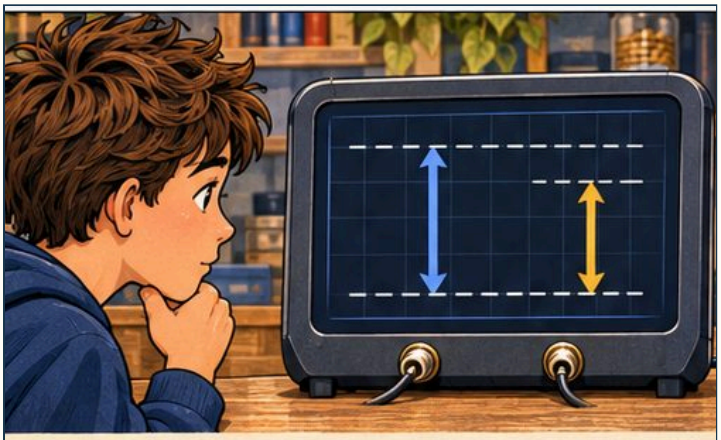
Was bedeuten minus drei Dezibel?



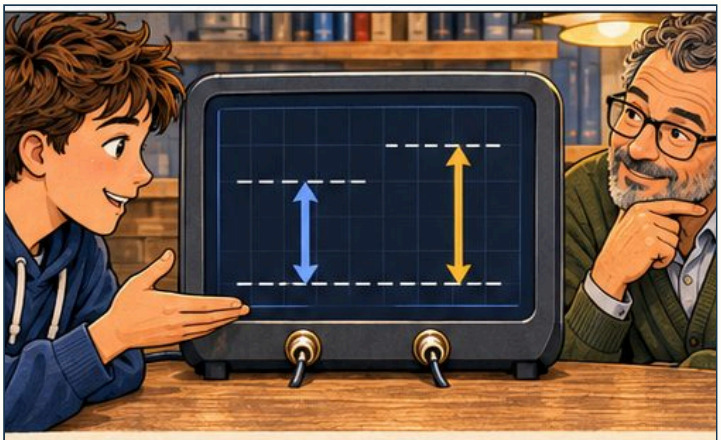
Bei f = fc beträgt das ideale Leistungsverhältnis 1/2.



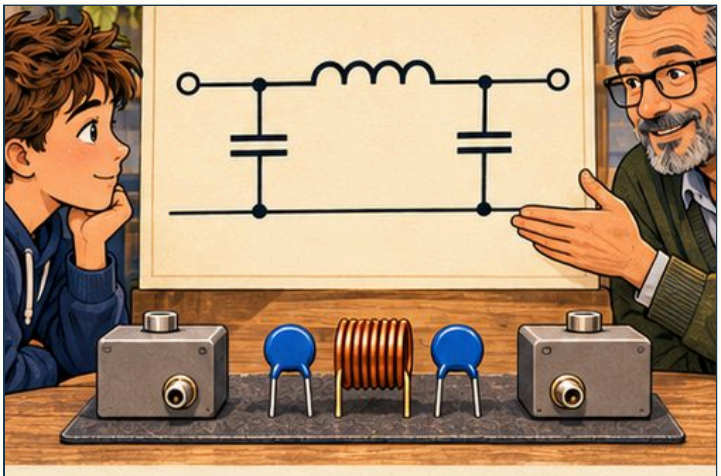
In Dezibel ergibt 10 log10(1/2) ungefähr −3,01 dB.



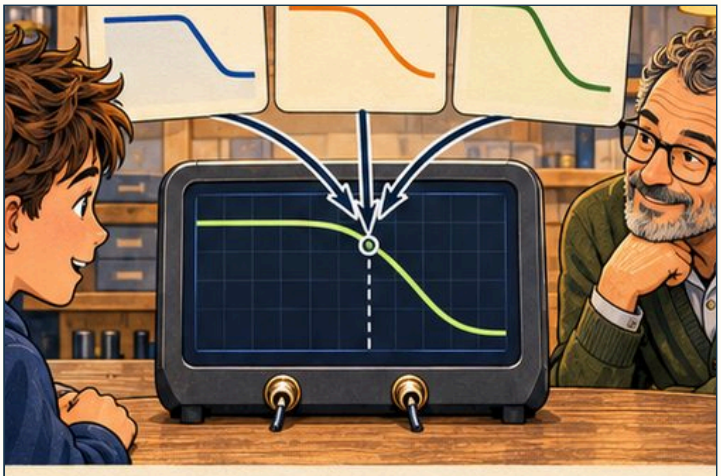
Der Betrag von S21 ist dann ungefähr 0,707.



Diese Amplitude beträgt also nicht die Hälfte.



Die Rechnung verwendet passende 50-Ω-Bezüge.

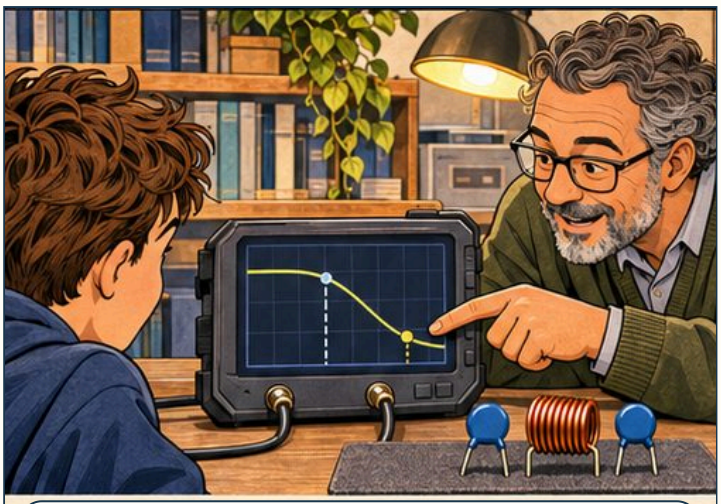


Der Junge verbindet drei Darstellungen desselben Kurvenpunkts.

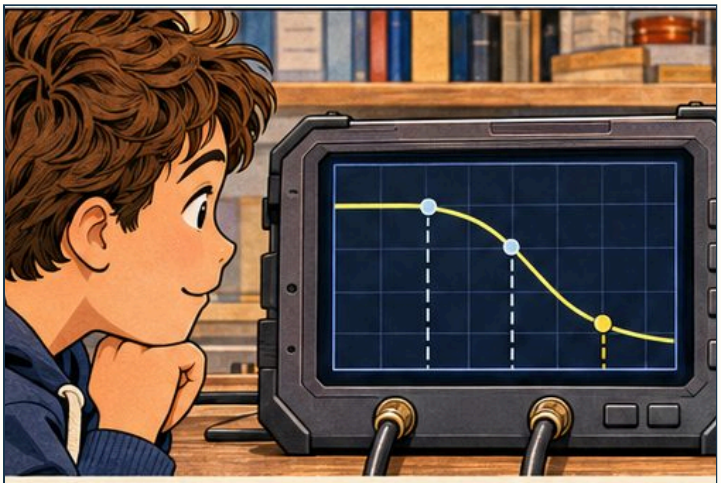
Oberhalb der Grenzfrequenz



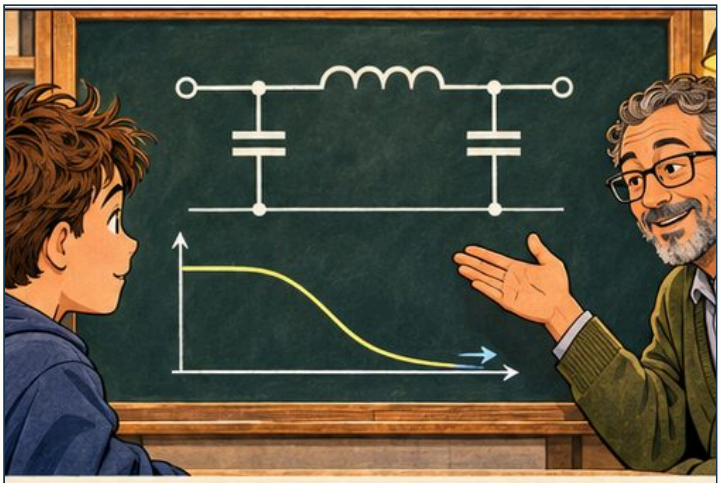
Bei 20 MHz ist f/fc gleich 2.



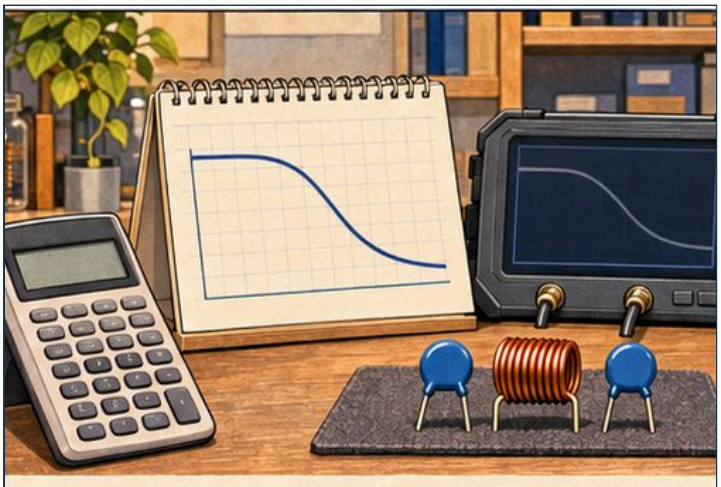
Die ideale Übertragung beträgt etwa –18,13 dB.



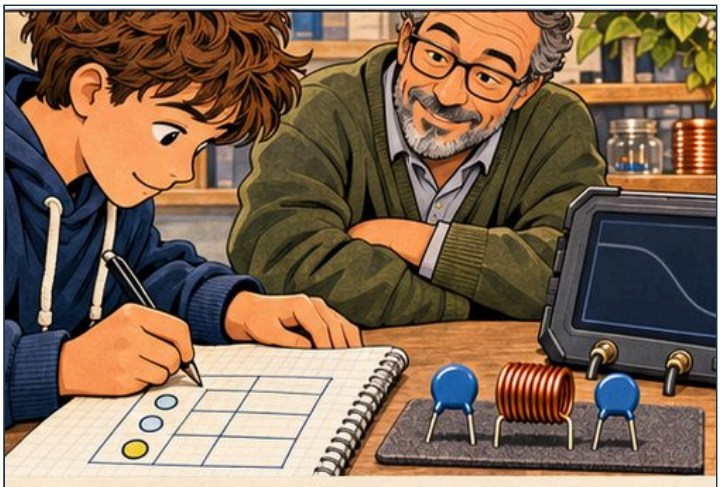
Bei 30 MHz ist f/fc gleich 3: ungefähr –28,63 dB.



Die Dämpfung nimmt zu, bleibt aber endlich.

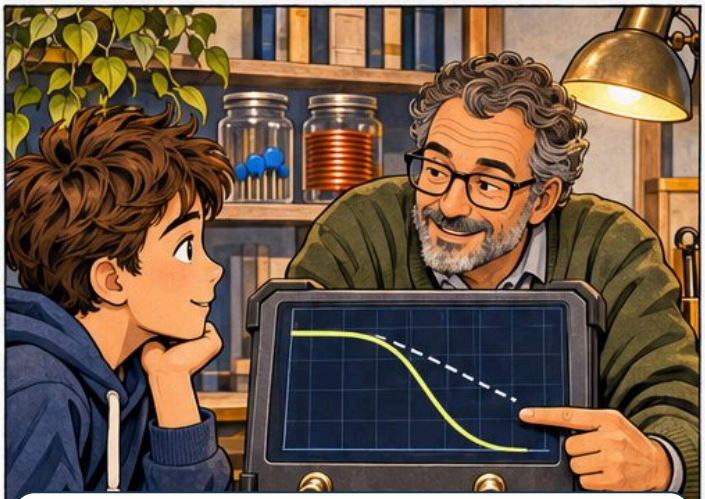


Diese Zahlen wurden berechnet, nicht an ihrer Schaltung gemessen.

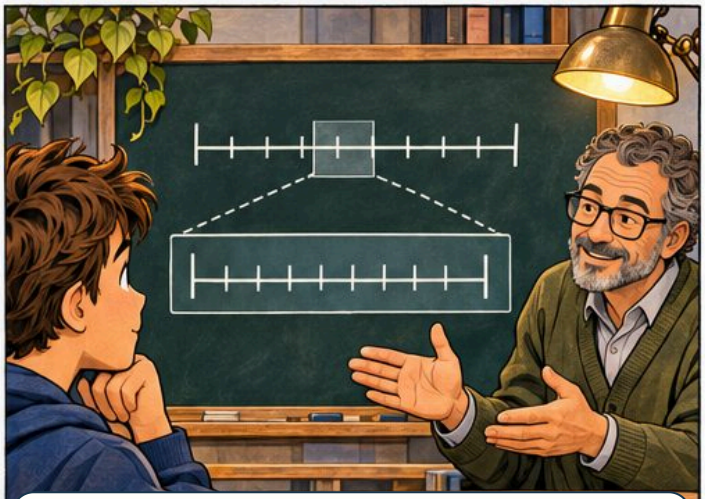


Der Junge trägt sie unter Vorhersagen ein.

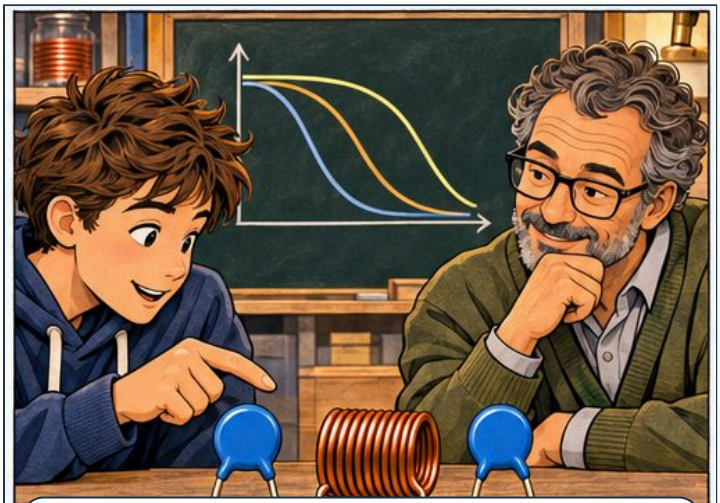
Eine Flanke ist kein Versprechen



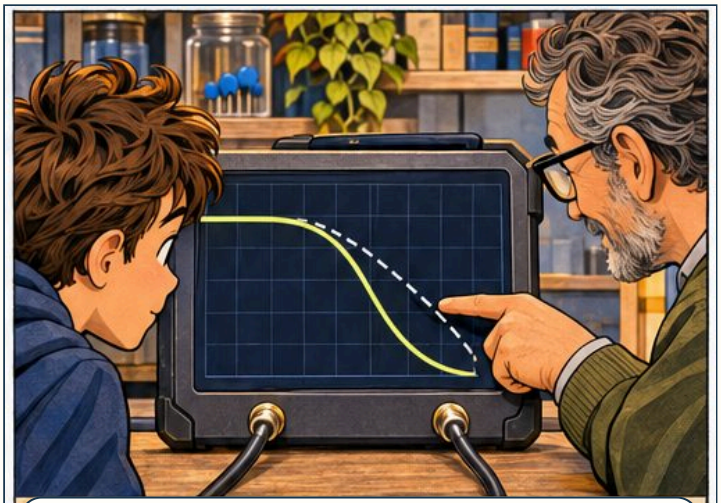
Weit oberhalb der Grenze nähert sich die ideale Dämpfung 60 dB pro Dekade.



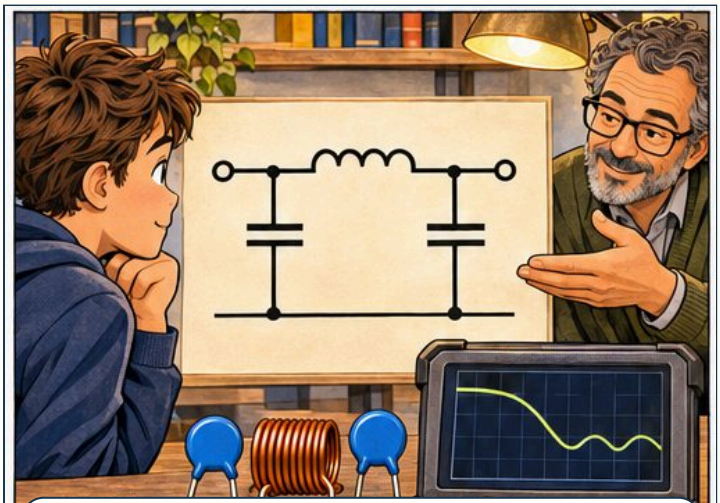
Eine Dekade bedeutet die Verzehnfachung der Frequenz.



Diese asymptotische Flanke gehört zum Modell dritter Ordnung.



Nahe der Grenzfrequenz ist die Kurve keine Gerade.

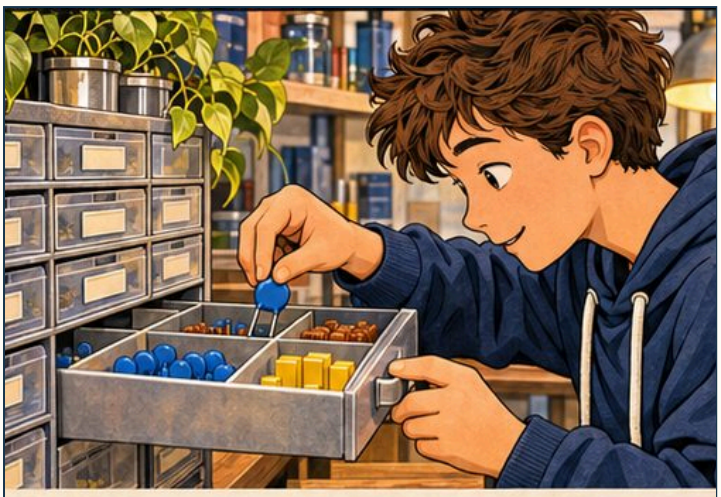


Reale Bauteile begrenzen diesen Verlauf zusätzlich.

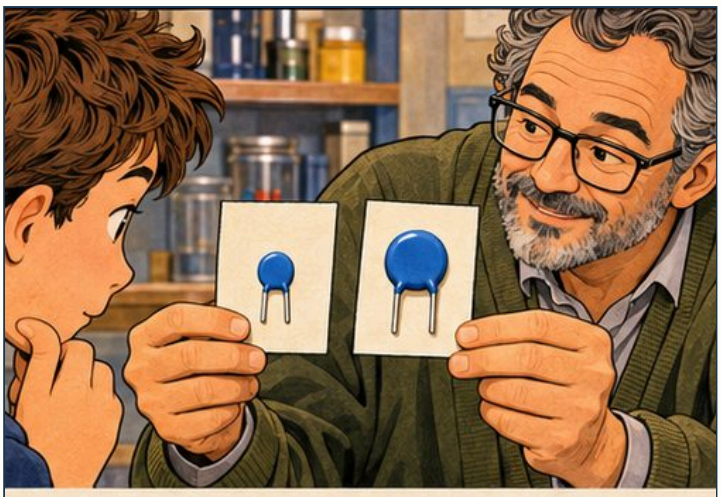


Der Junge überträgt keine Regel außerhalb ihrer Bedingungen.

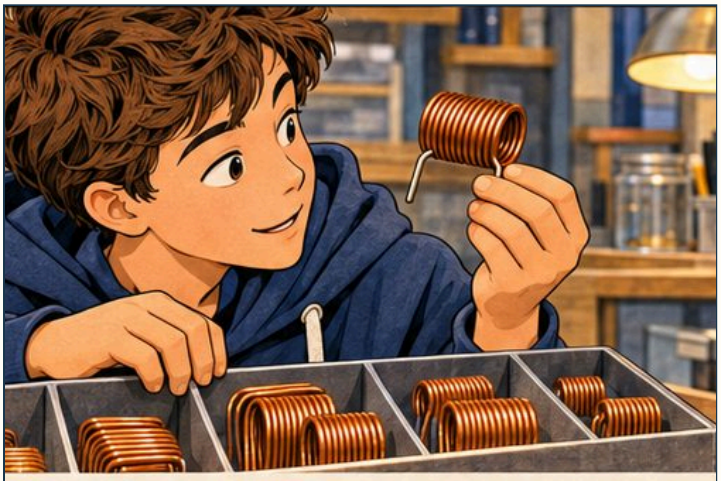
Verfügbare Bauteilwerte



In der Schublade liegen nicht unbedingt 318,3-pF-Kondensatoren.



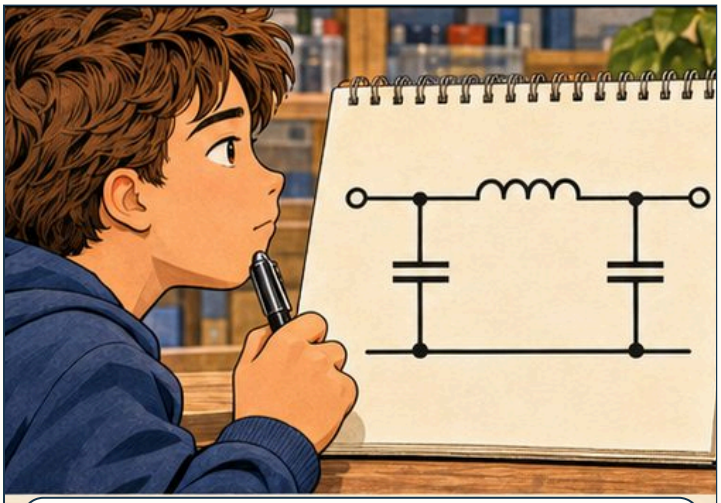
Der gängige Wert 330 pF ist nicht identisch.



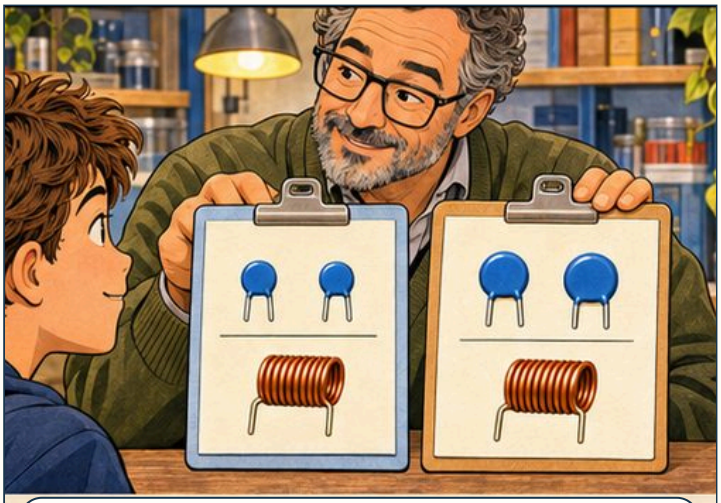
Eine 1,6-µH-Spule liegt nahe am berechneten Wert.



Mit diesen Werten muss der Verlauf neu berechnet oder simuliert werden.

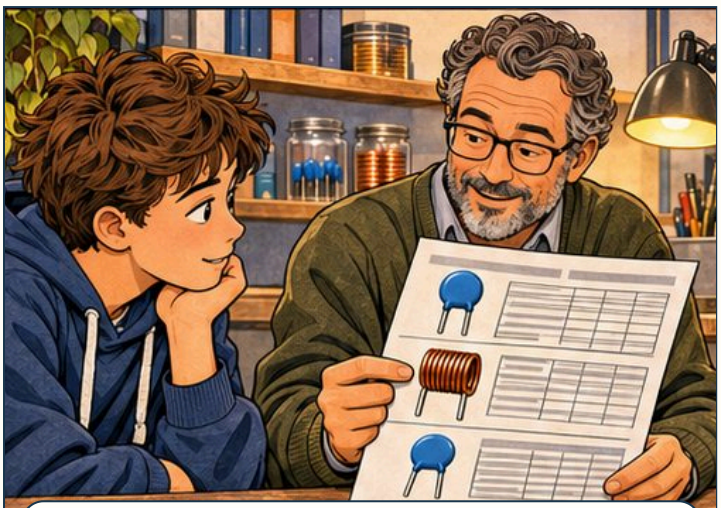


Die Schaltung heißt deshalb nicht automatisch „genau 10 MHz“.



Der Junge trennt ideale und gewählte Werte.

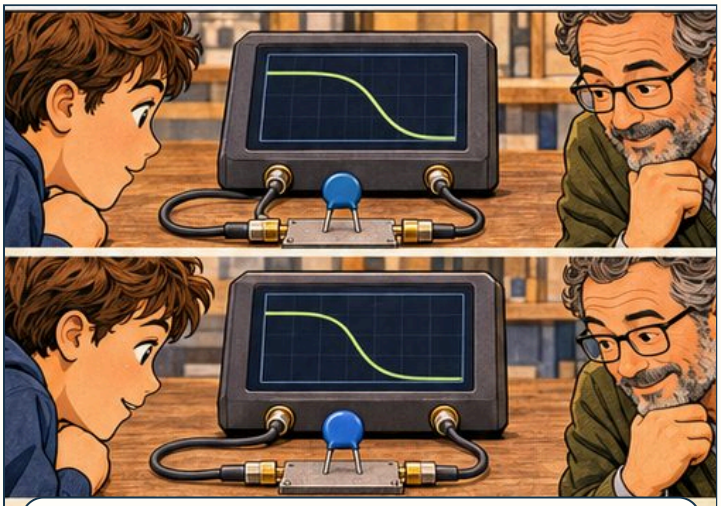
Jedes Bauteil hat Toleranzen



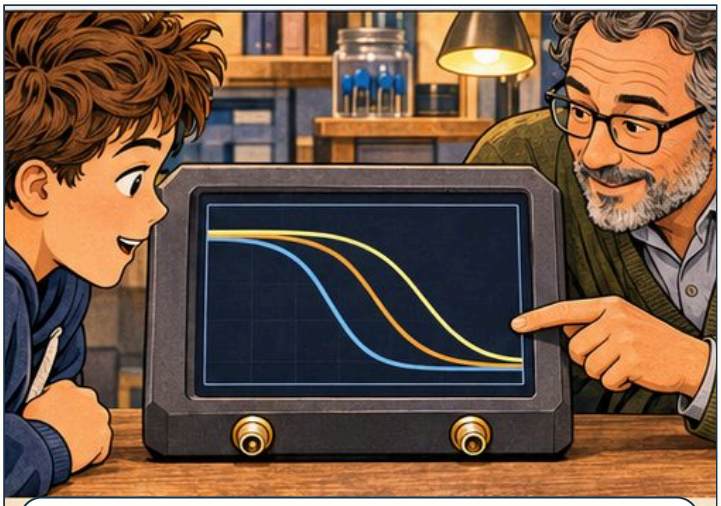
Ein Nennwert ist kein garantierter exakter Wert.



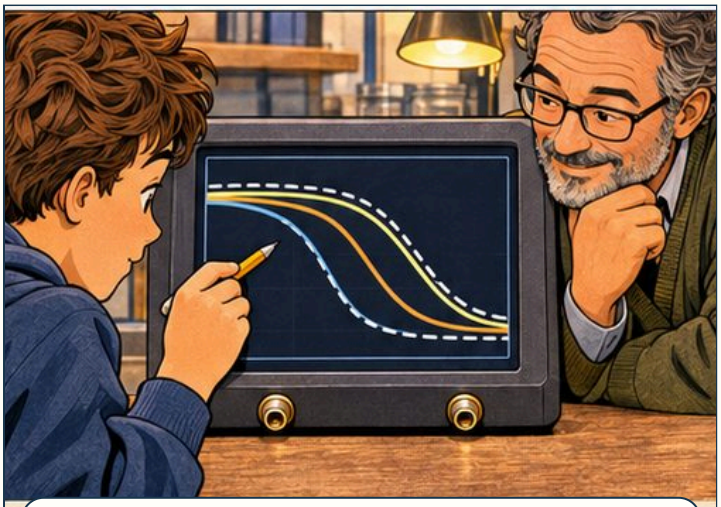
Die Toleranzen von Kondensatoren und Spule zählen.



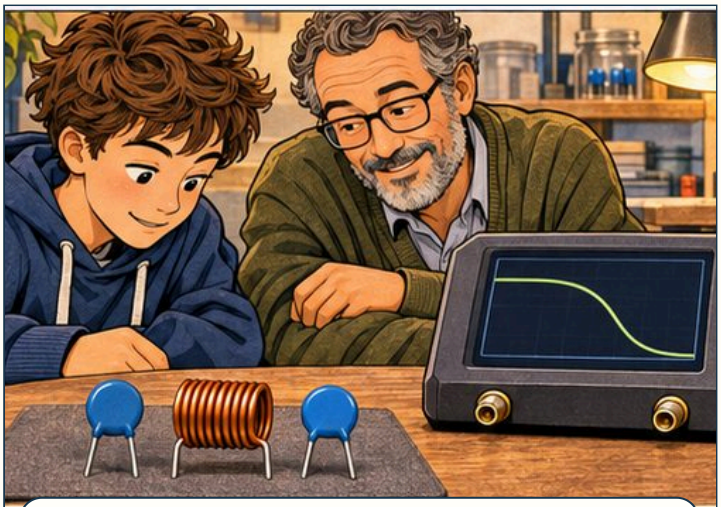
Gleich beschriftete Bauteile können geringfügig voneinander abweichen.



Eine Simulation kann mehrere Wertekombinationen untersuchen.



Sie hilft, einen Bereich möglicher Verläufe vorherzusehen.



Die Messung untersucht die tatsächlich verwendeten Teile.

Verborgene Bauteile



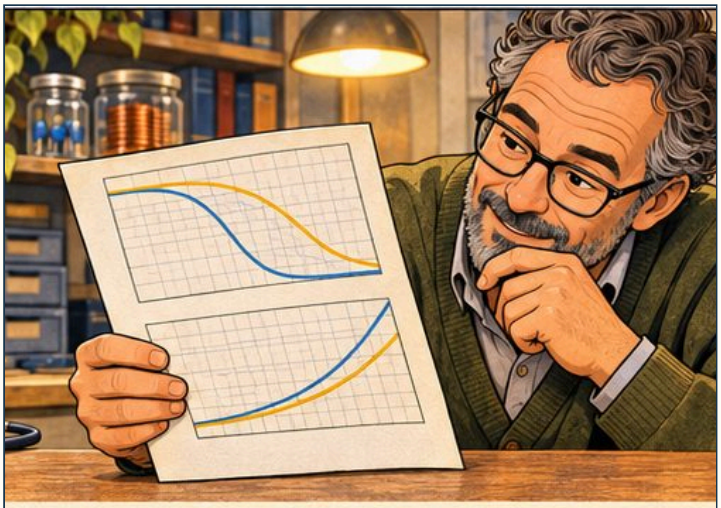
Eine reale Spule besitzt auch Widerstand und parasitäre Kapazität.



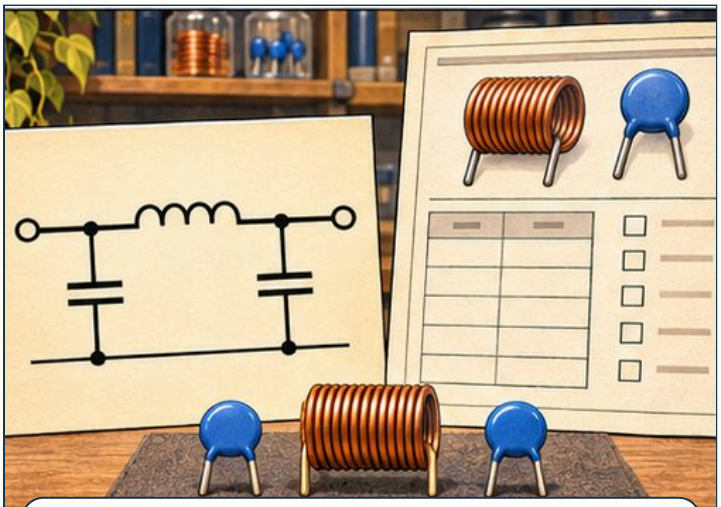
Ein Kondensator besitzt unter anderem Verluste und parasitäre Induktivität.



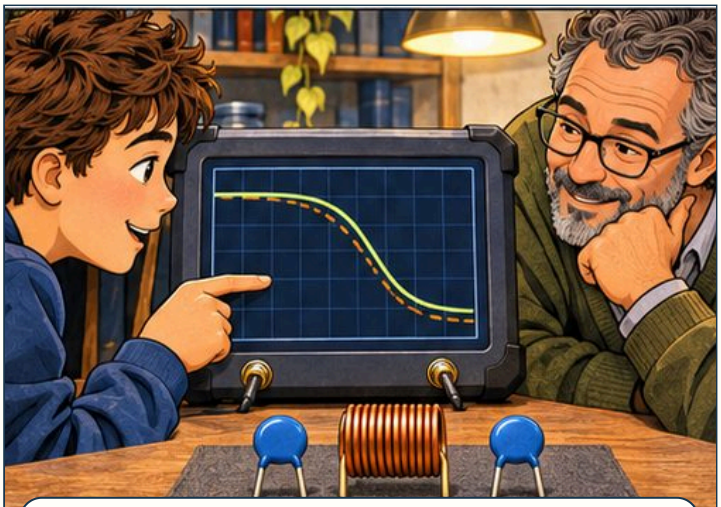
Nahe bestimmter Resonanzen verändert sich ihr Verhalten.



Datenblätter nennen zu prüfende Grenzen.



Der Pikofarad- oder Mikrohenrywert allein genügt also nicht.

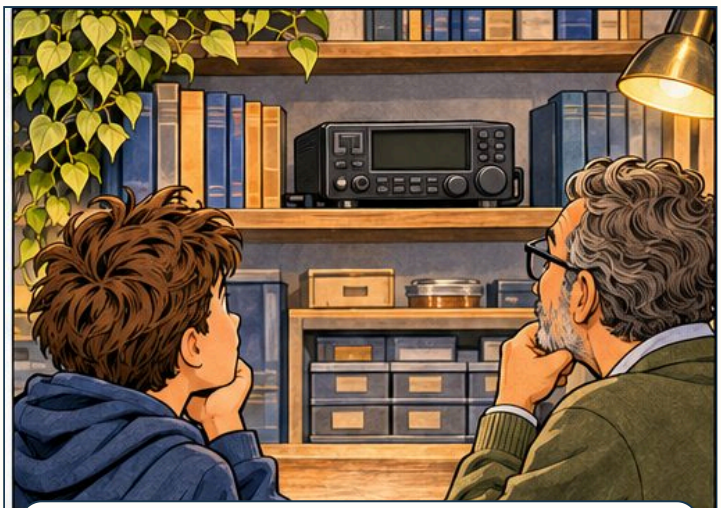


Der Junge lernt, über die erste Zeile hinauszulesen.

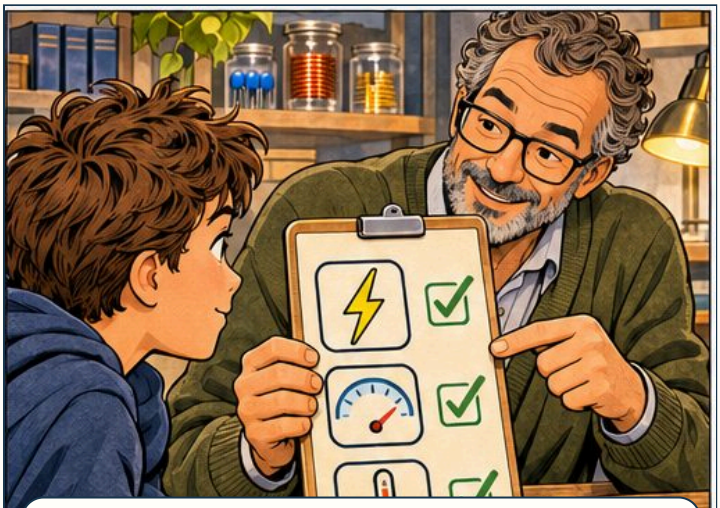
Ein Messplatz qualifiziert keinen Sender



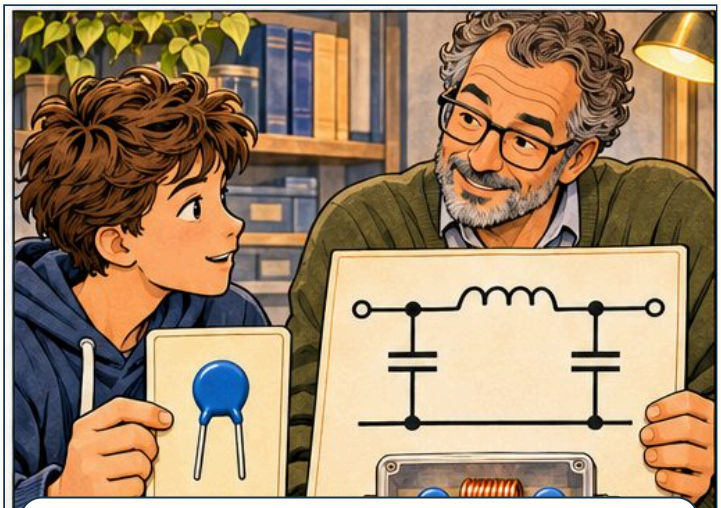
Ihr Demonstrator erhält ausschließlich das vorgesehene Kleinsignal des Analysators.



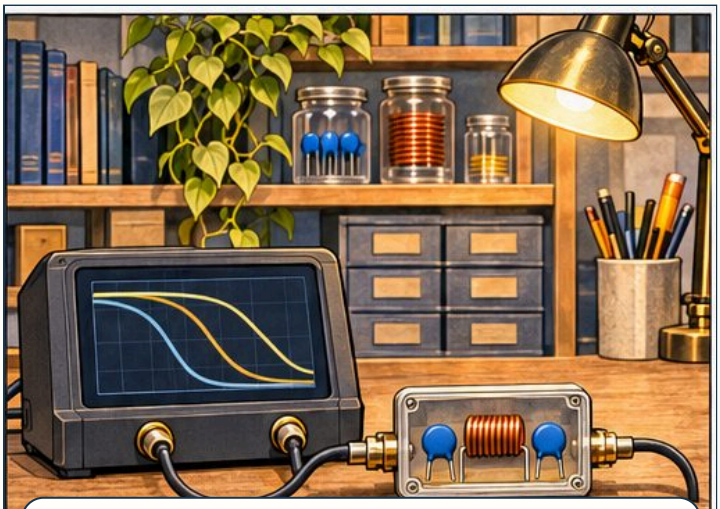
Sendebetrieb würde weitere Prüfungen erfordern.



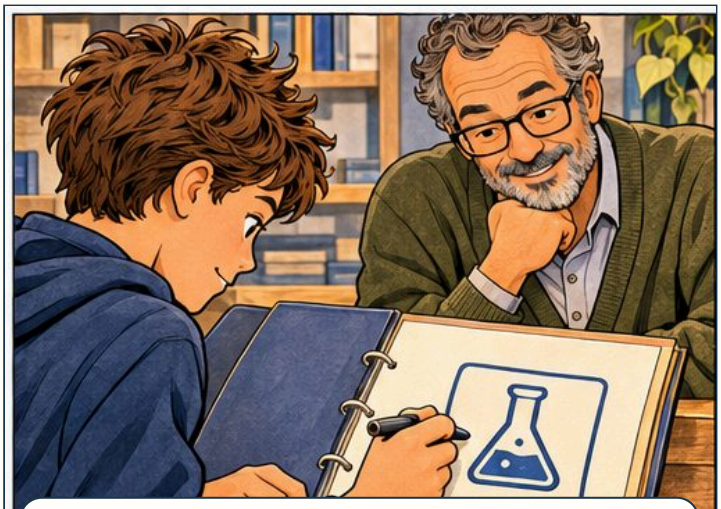
Spannungen, Ströme, Erwärmung und Belastbarkeit müssten untersucht werden.



Die Spannungsfestigkeit eines Kondensators qualifiziert nicht den ganzen Filter.

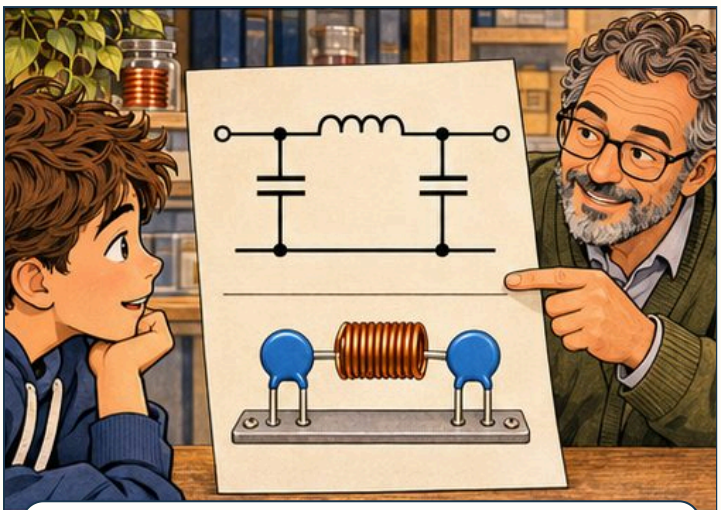


Leistungsversuche gehören nicht zu diesem Workshop.

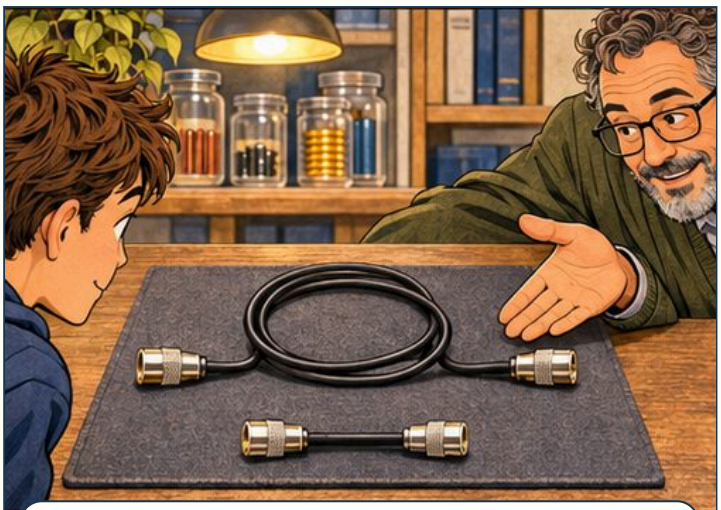


Der Junge hält die Grenzen ihres Aufbaus deutlich fest.

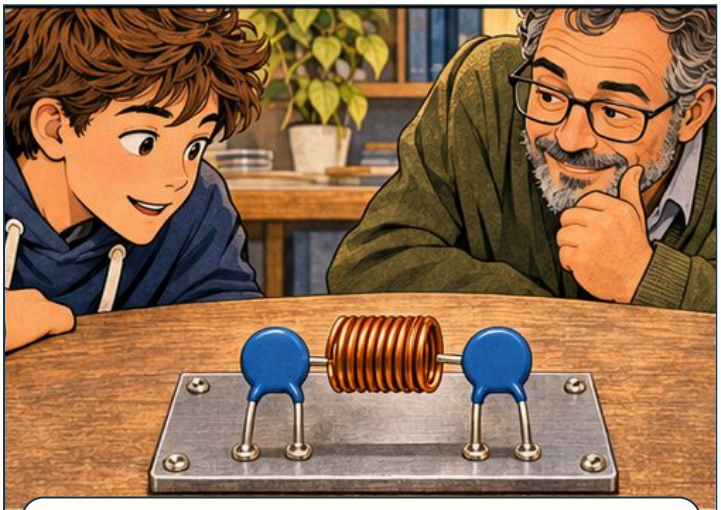
Den Aufbau planen



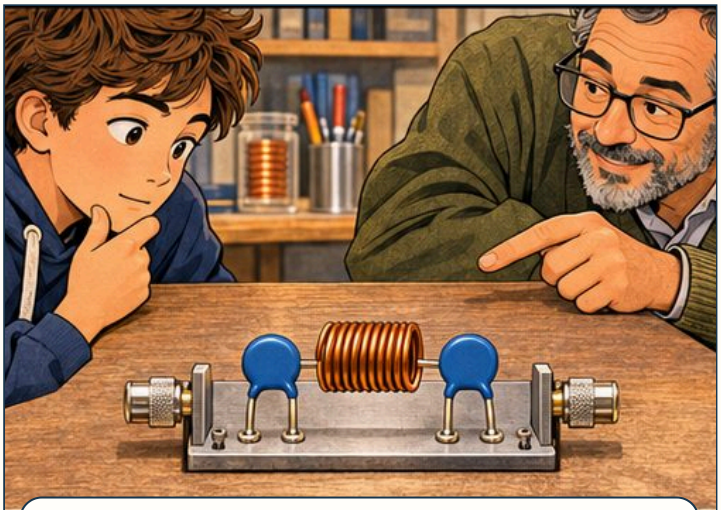
Das Schaltbild zeigt Verbindungen, aber nicht ihre gesamte Geometrie.



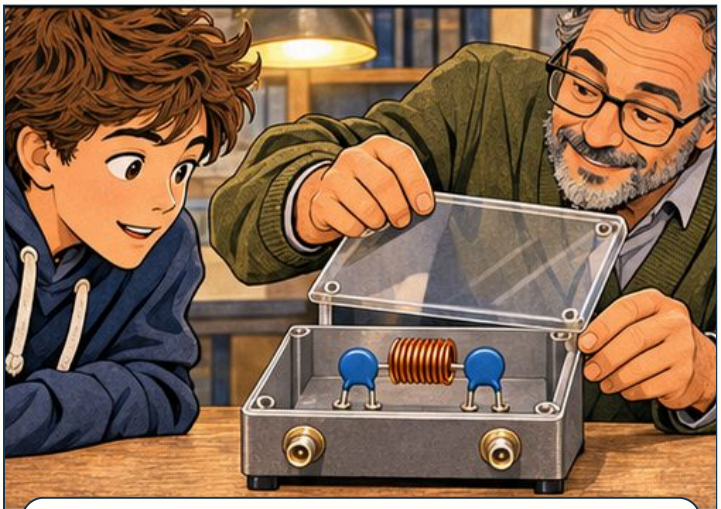
Bei diesen Frequenzen können Leitungslänge und Anordnung wichtig sein.



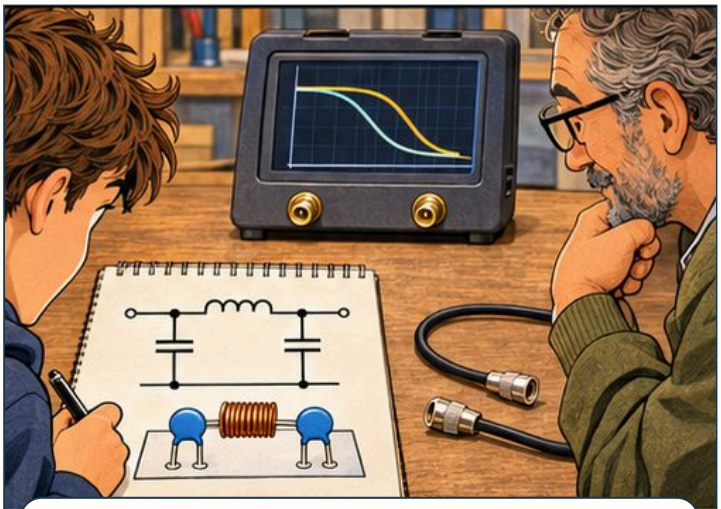
Sie planen gemeinsame Masse und kurze Verbindungen.



Direkt koppelnde Signalwege werden ebenfalls getrennt.



Henri bereitet einen geeigneten Messdemonstrator vor.

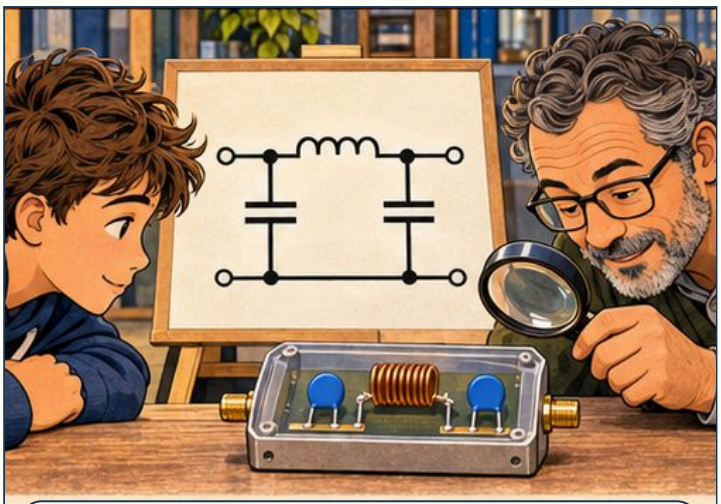


Verbindung für Verbindung vergleicht Lucas Aufbau und Schaltbild.

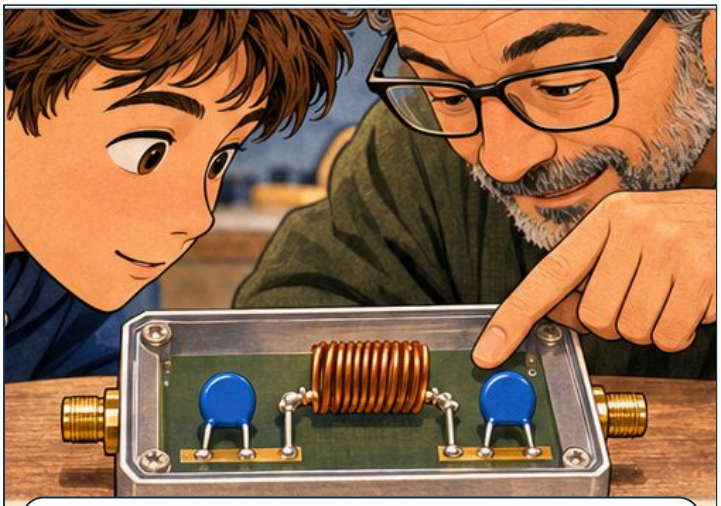
Vor dem Anschließen prüfen



Die Messquelle bleibt während der Vorbereitung ausgeschaltet.



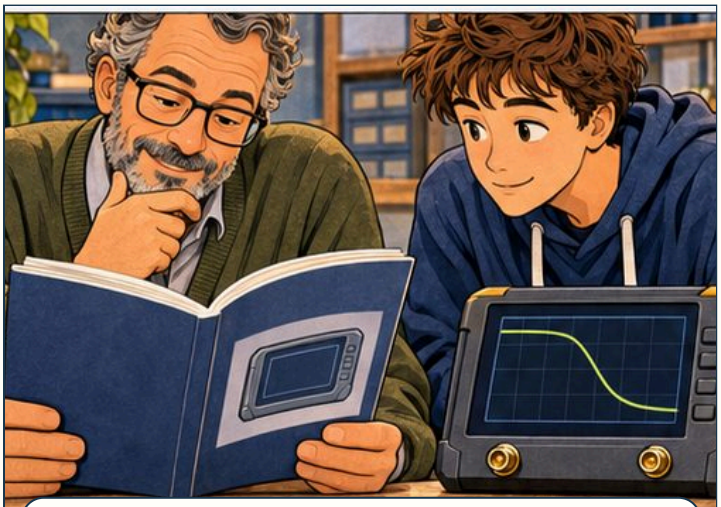
Sie prüfen Verbindungen, Bauteile und gemeinsame Masse.



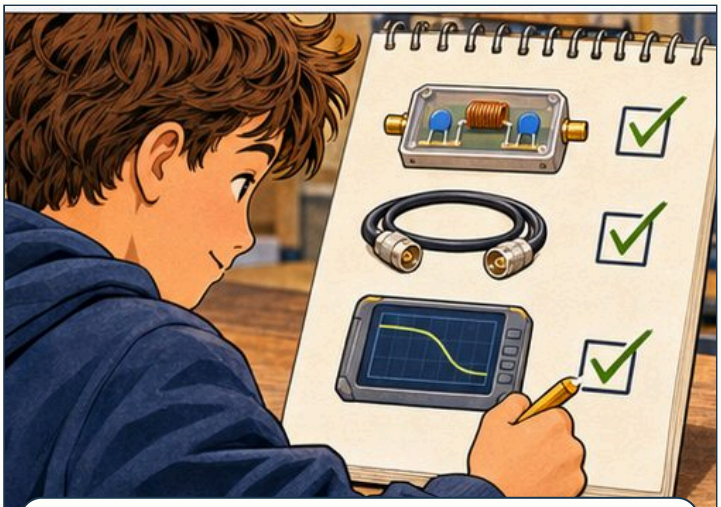
Sie suchen Kurzschlüsse, Verdrahtungsfehler und beschädigte Teile.



Danach werden Stecker und Kabel geprüft.



Der Mentor prüft die Eingangsgrenzen des Geräts.



Vor dem ersten Sweep beendet der Junge seine Checkliste.

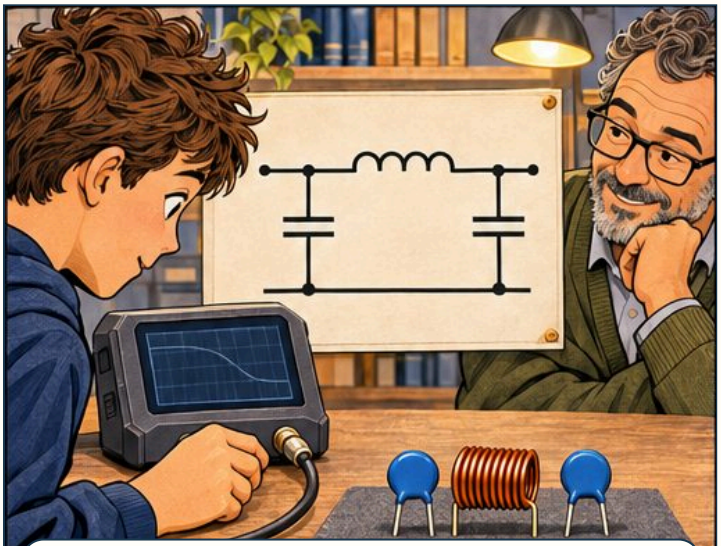
Der Analysator stellt Fragen



Der Netzwerkanalysator sendet ein bekanntes Kleinsignal.



Er durchläuft einen gewählten Frequenzbereich.



Tor 1 speist den Filtereingang.



Tor 2 erfasst die Übertragung am Ausgang.



Der Parameter S21 beschreibt diese Übertragung.



Die Tore liefern die vorgesehenen 50-Ω-Bezüge.

Richtig kalibrieren



Kabel und Adapter wirken an der Messung mit.



Daher folgen sie dem Kalibrierverfahren des Geräts.



Passende Standards werden nach Anleitung angeschlossen.



Die Bezugsebenen liegen an den Kabelenden.



Danach bleiben diese Verbindungen möglichst unverändert.



Der Junge notiert Aufbau und Sweep-Einstellungen.

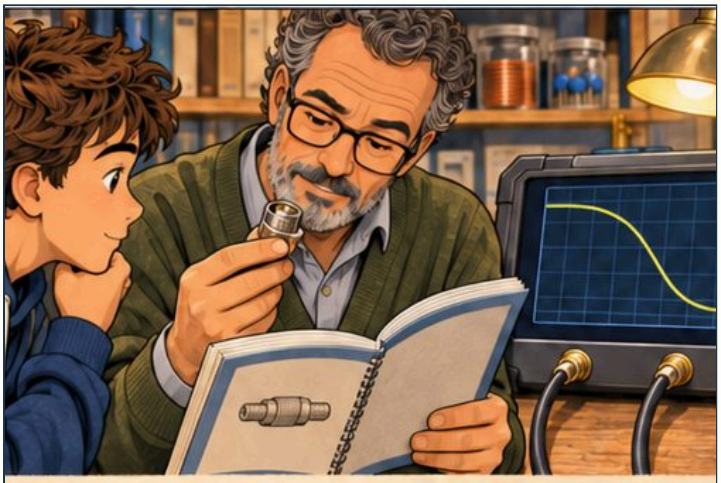
Den direkten Weg prüfen



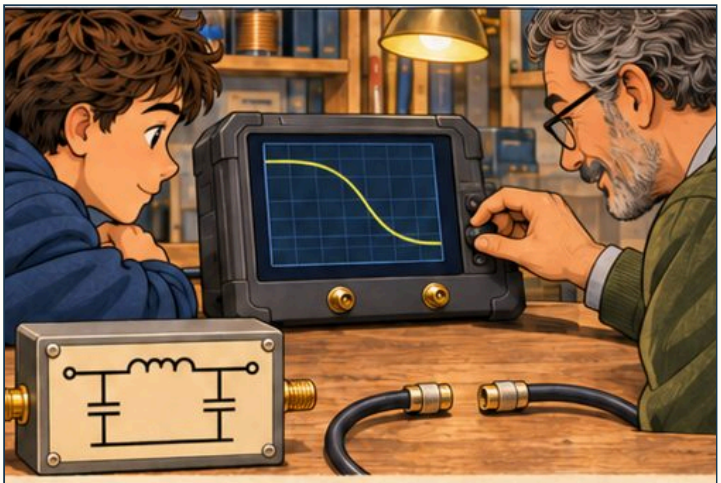
Vor dem Filter prüft eine Durchverbindung den Bezug.



Die erwartete Übertragung muss zu dieser Verbindung passen.



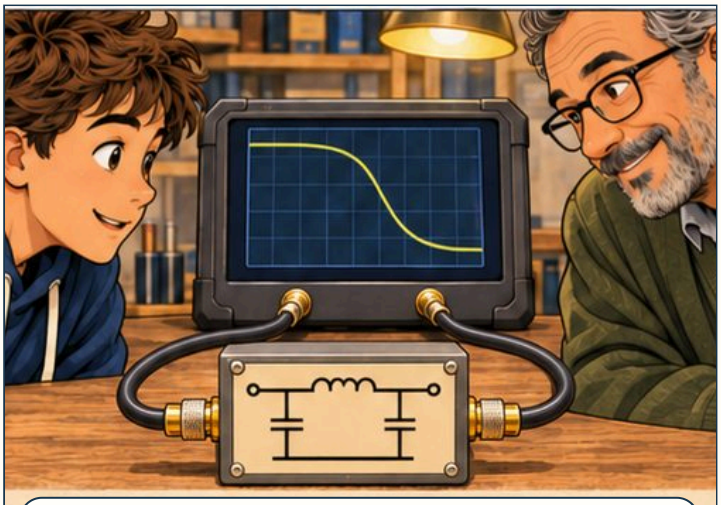
Bei Auffälligkeiten werden Kabel, Kalibrierung und Einstellungen untersucht.



Ein Filter wird nicht verändert, um Messplatzfehler zu verdecken.



Nach der Prüfung wird die Quelle zum Anschließen gestoppt.

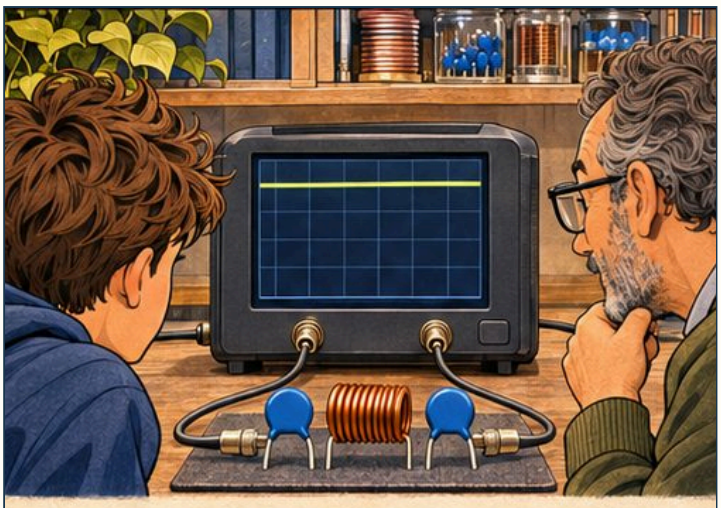


Danach liegt der Filter zwischen beiden Kabeln.

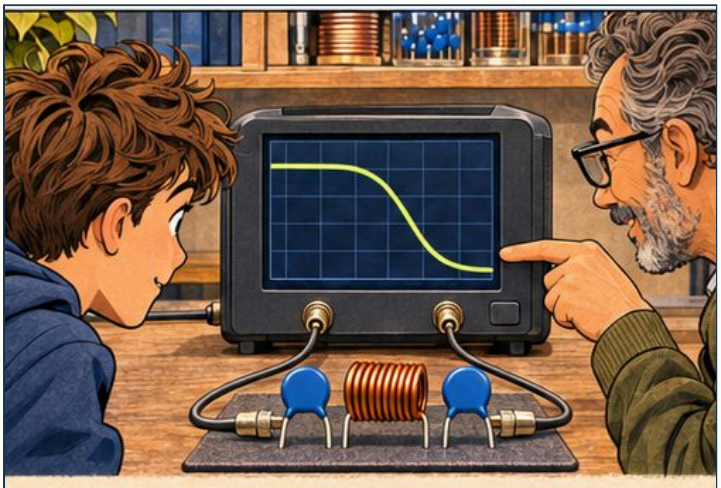
Der erste Sweep



Sie starten einen Sweep über Nutzband und Übergangsbereich.



Bei tiefen Frequenzen liegt die Kurve höher.



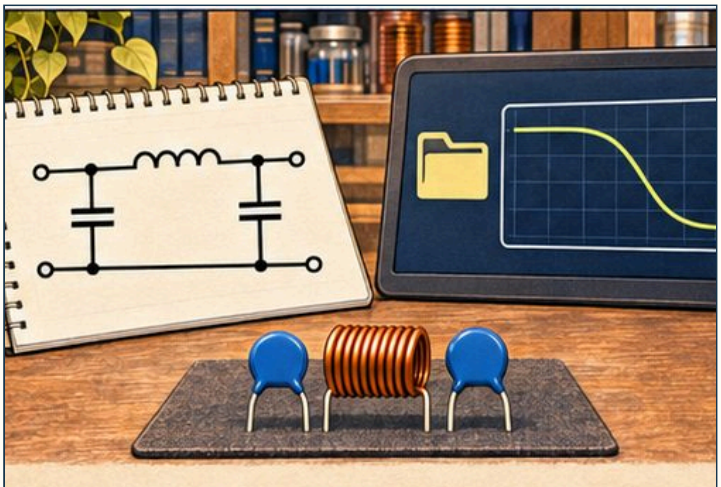
Mit steigender Frequenz fällt sie anschließend ab.



Der Junge erkennt die erwartete Form, ohne perfekte Übereinstimmung anzunehmen.



Er speichert Kurve und Messbedingungen.



Ein gespeichertes Ergebnis erlaubt Vergleiche nach jeder Änderung.

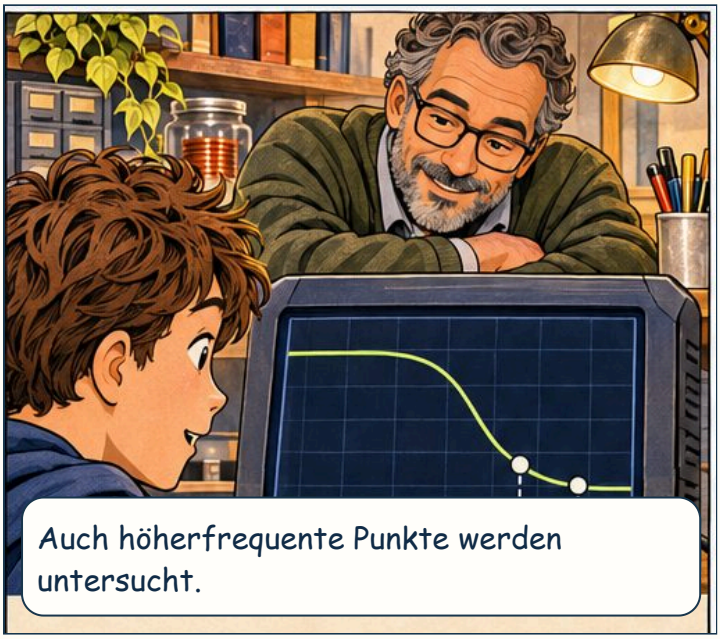
Genaue Punkte ablesen



Marker kennzeichnen die berechneten Vergleichsfrequenzen.



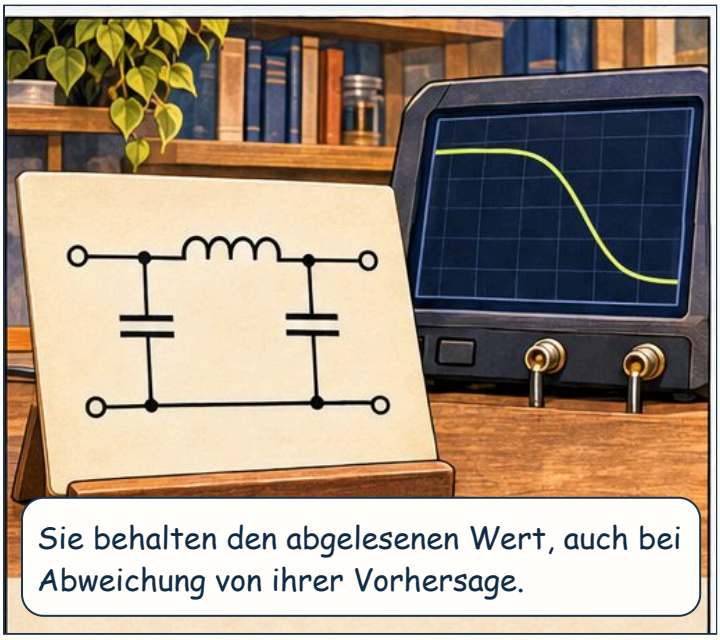
Sie lesen die Übertragung nahe der erwarteten Grenze ab.



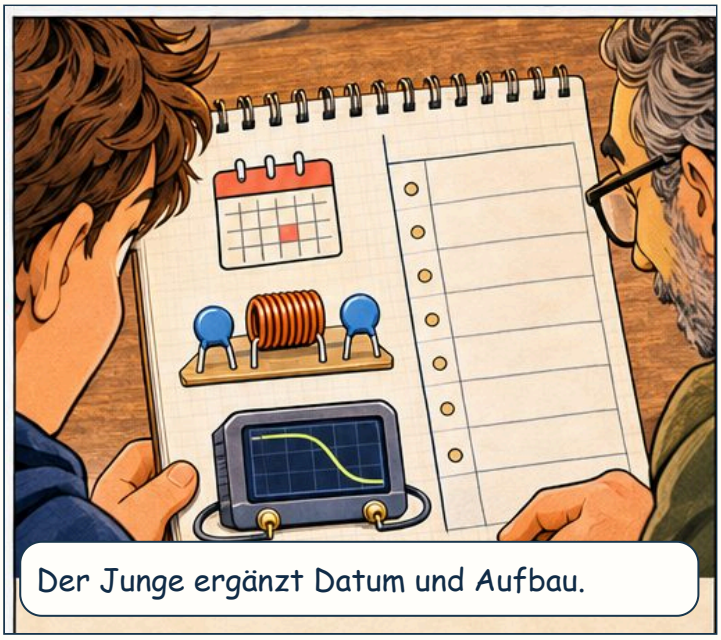
Auch höherfrequente Punkte werden untersucht.



Die tatsächlichen Anzeigen kommen in die Messwertspalte.



Sie behalten den abgelesenen Wert, auch bei Abweichung von ihrer Vorhersage.



Der Junge ergänzt Datum und Aufbau.

Eine Abweichung verstehen



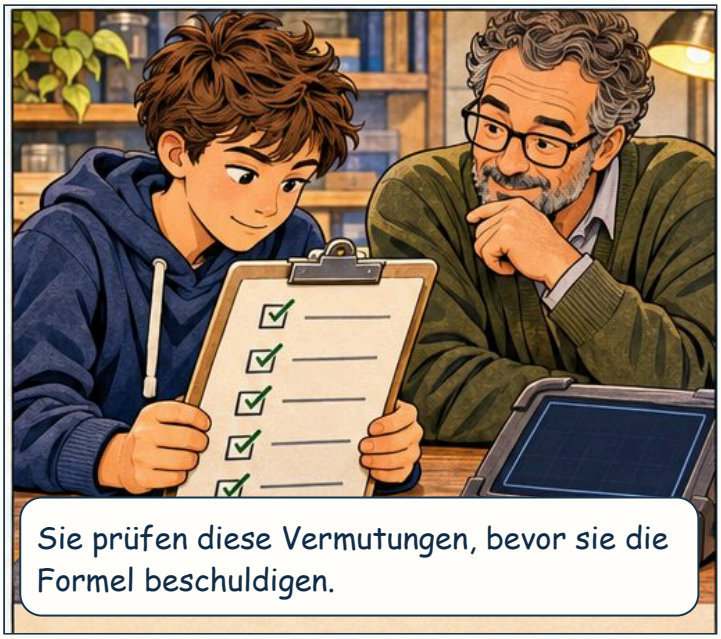
Die gemessene Grenze kann von der berechneten abweichen.



Gewählte Werte und Toleranzen liefern erste Hinweise.



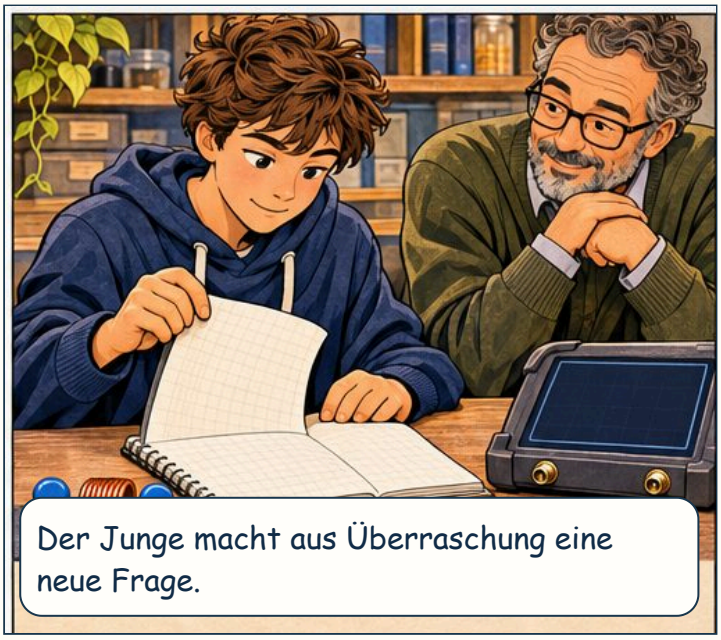
Auch Verluste, Aufbau und Kalibrierung verdienen Prüfung.



Sie prüfen diese Vermutungen, bevor sie die Formel beschuldigen.

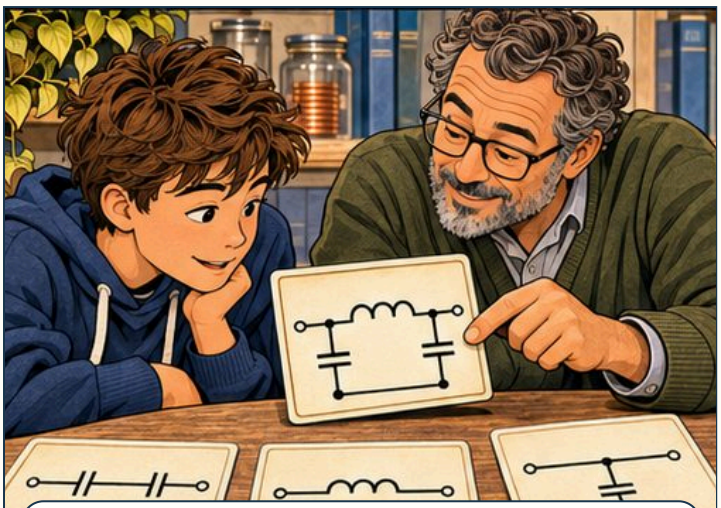


Eine abweichende Kurve erklärt ihre Ursache nicht allein.

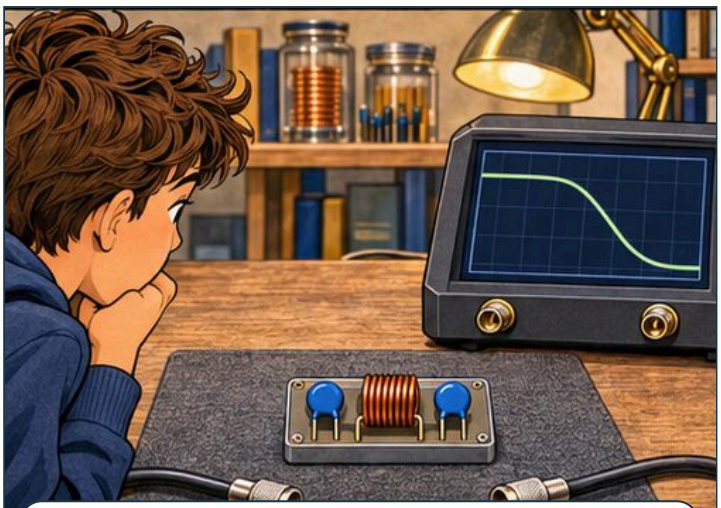


Der Junge macht aus Überraschung eine neue Frage.

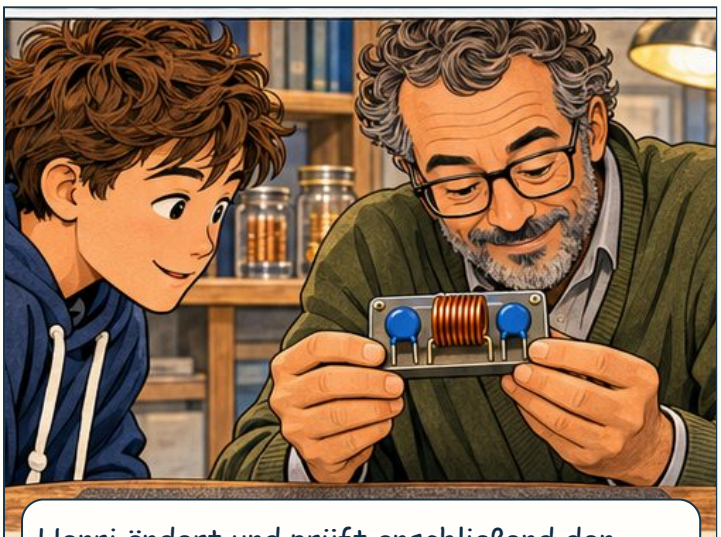
Eine Änderung nach der anderen



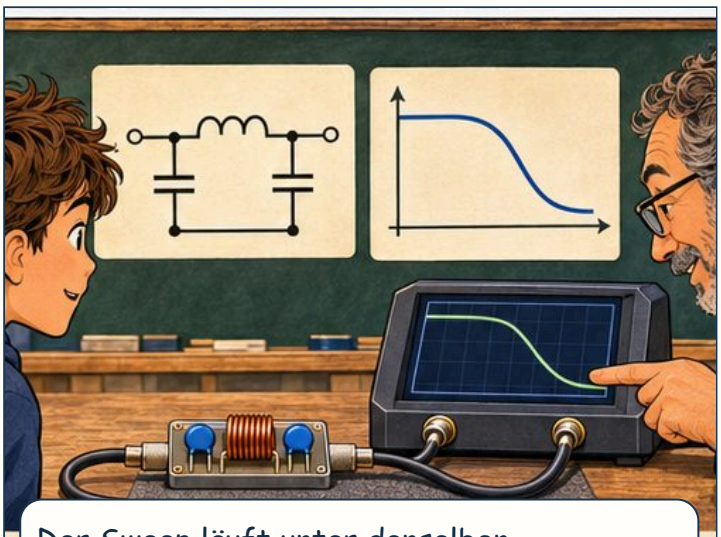
Sie wählen eine Vermutung und planen eine begründete Änderung.



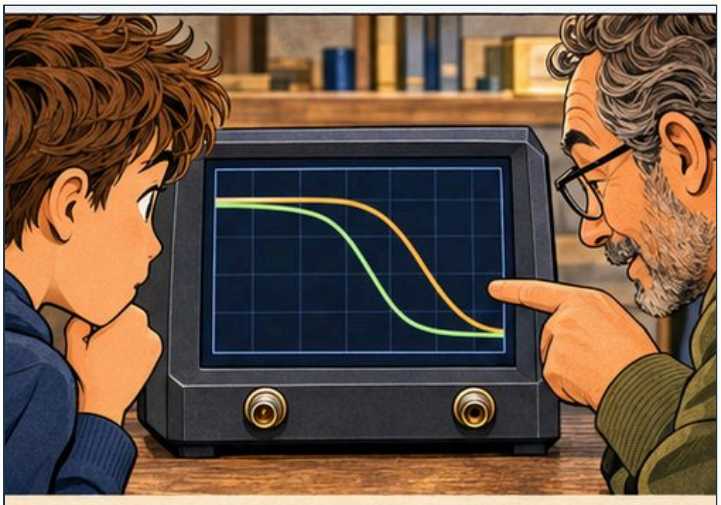
Vor dem Eingriff wird die Quelle gestoppt und das Modul getrennt.



Henri ändert und prüft anschließend den Aufbau.



Der Sweep läuft unter denselben dokumentierten Bedingungen erneut.

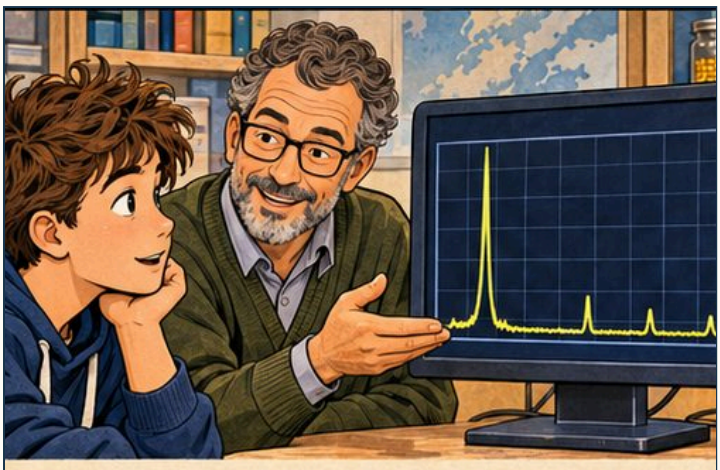


Sie vergleichen alte und neue Kurve.

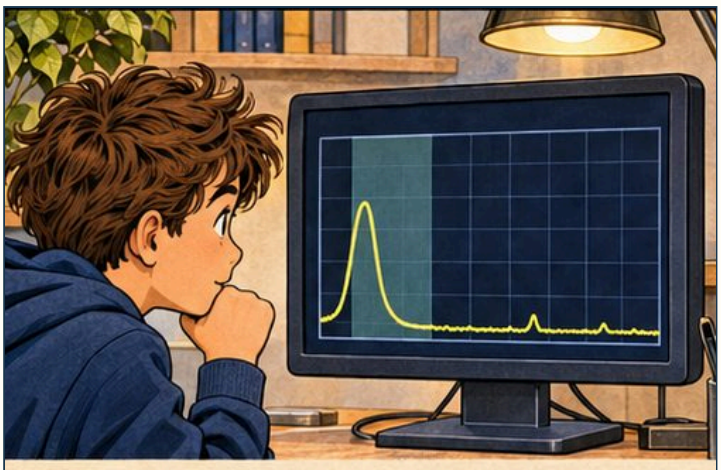


Die Methode vermischt nicht mehrere mögliche Ursachen.

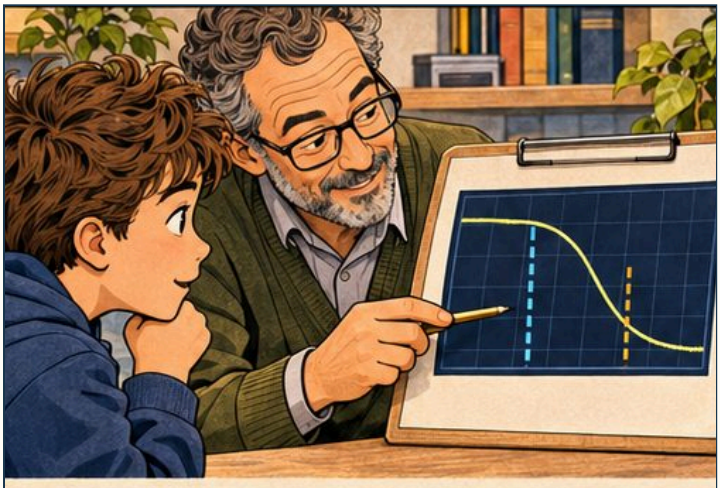
Dämpfung hat Grenzen



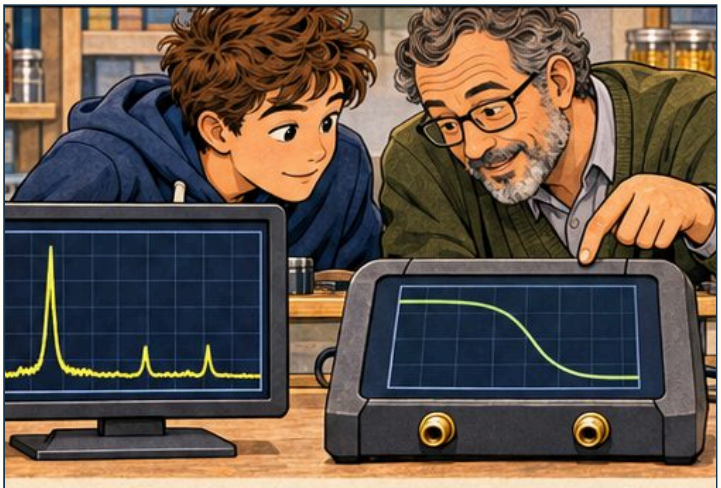
Ein Tiefpass entfernt nicht alle unerwünschten Signalanteile.



Ein Anteil im Durchlassbereich wird nur wenig gedämpft.



Die Unterdrückung hängt von Frequenz und Aufbau ab.



Eine vollständige Spektralprüfung erfordert weitere geeignete Messungen.



Ein vorhandener Filter beweist keine Vorschriftskonformität der Station.



Der Junge unterscheidet nützliche Funktion und allgemeine Garantie.

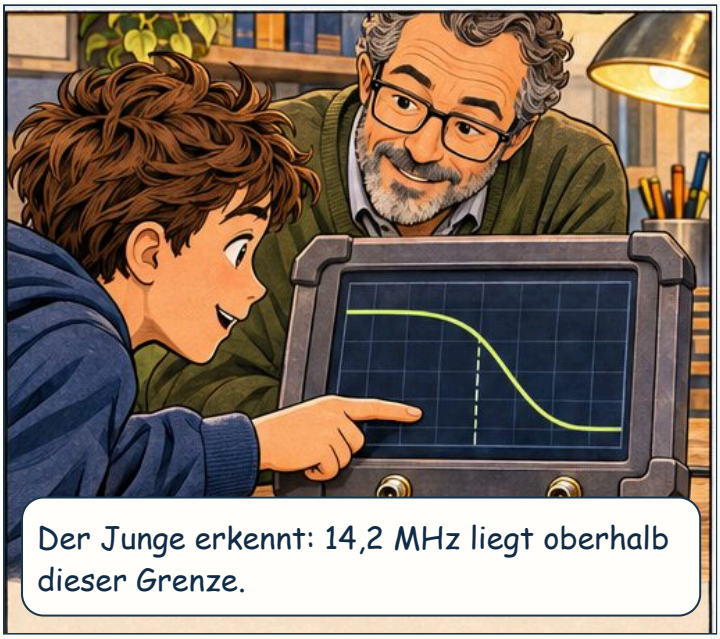
Die Nutzfrequenz muss passieren



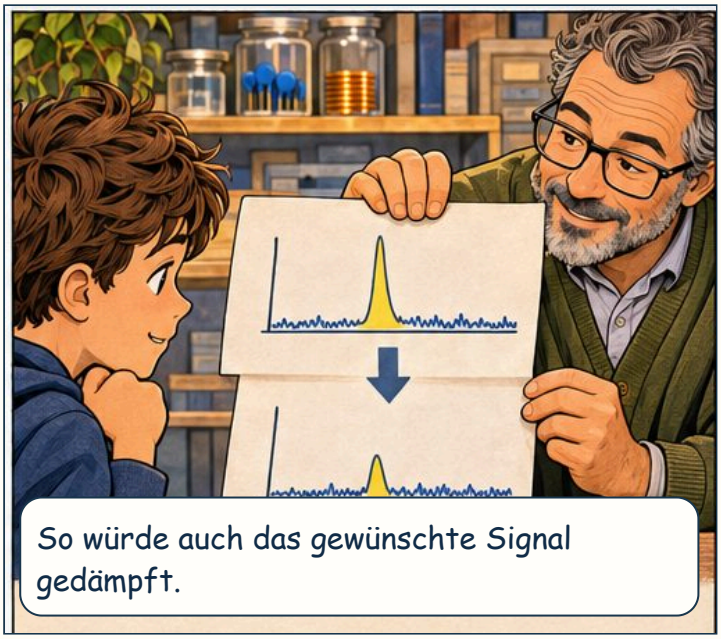
Schließlich stellt der Mentor im Stationsbild eine Denkfalle.



Die Zeichnung kombiniert 14,2 MHz mit ihrer 10-MHz-Grenze.



Der Junge erkennt: 14,2 MHz liegt oberhalb dieser Grenze.



So würde auch das gewünschte Signal gedämpft.



Vor jeder Nutzung muss das Pflichtenheft erneut geprüft werden.



Ein Rechenbeispiel ist kein Universalfilter.

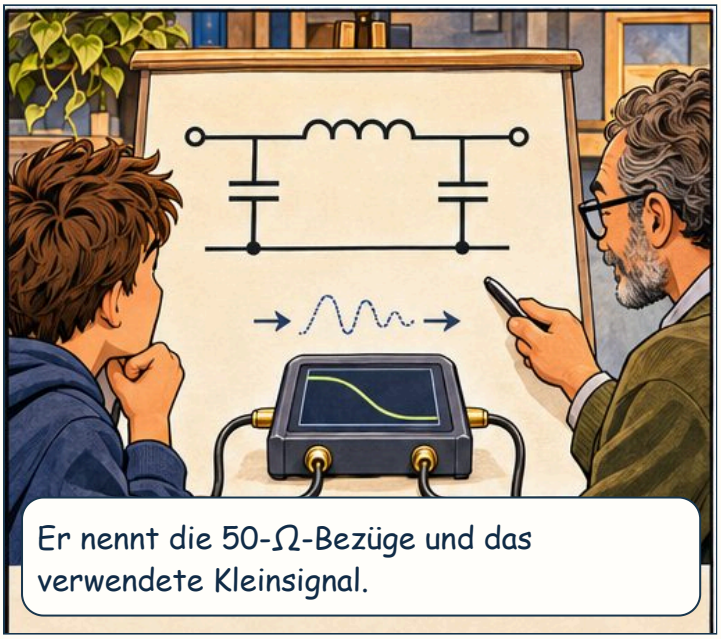
Eine Erklärung zum Weitergeben



Lucas sammelt Anforderungen, Schaltbild, Rechnungen und Bauteilauswahl.



Er trennt Vorhersagen von tatsächlich beobachteten Ergebnissen.



Er nennt die 50-Ω-Bezüge und das verwendete Kleinsignal.



Kurven, Kalibrierung und Versuchsgrenzen bleiben dokumentiert.



Henri spielt einen Besucher und fragt ein letztes Mal.



Jetzt erklärt der Junge, warum jede Bedingung zählt.

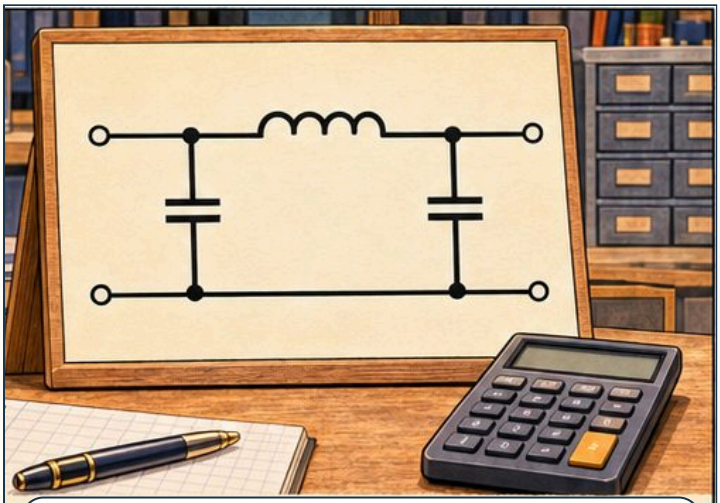
Verstehen, berechnen, messen



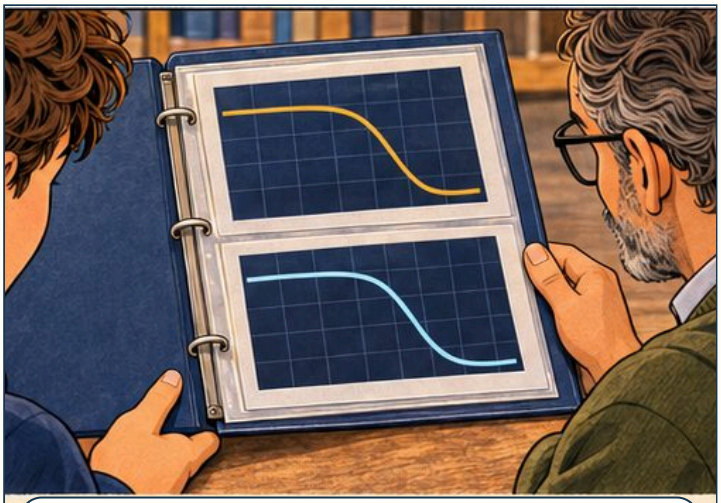
Die drei Bauteile kommen zurück in den Lehrkasten.



Der Junge verbindet nun Anforderungen mit einem Filterverhalten.



Er berechnet diesen π-Butterworth und prüft seine Einheiten.



Er kann auch messen, vergleichen und Abweichungen hinterfragen.



Sein Heft bewahrt eine Methode samt Annahmen und Grenzen.



Im Club beginnt die nächste Entdeckung bereits mit einer Frage.