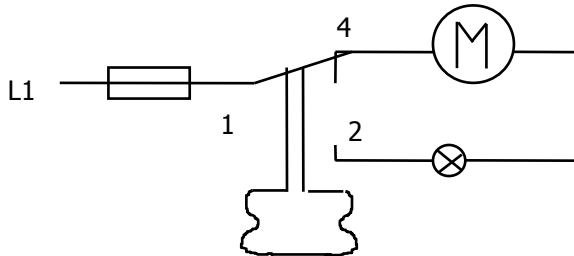
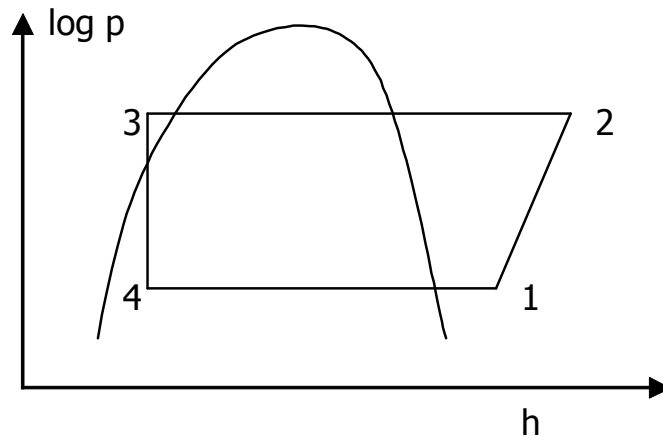


Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Kältetechnik

Elektrotechnik



Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Umrechnung von °C auf K erfolgt ohne Kommastelle, also: $T = \vartheta + 273$

A. Kältetechnik

Wirkt auf eine Masse **m** eine Beschleunigung **a**, so entsteht eine Kraft **F**, deren Größe durch folgende Formel beschrieben wird:

$$F = m \cdot a \quad \text{in } kg \cdot \frac{m}{s^2}, \text{ Newton N}$$

Speziell gilt für die Erdbeschleunigung mit der Größe $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$

$$F_g = m \cdot g$$

Wirkt eine Kraft **F** auf eine Fläche **A** so erzeugt sie einen Druck **p**:

$$p = \frac{F}{A} \quad \frac{N}{m^2} = Pa \text{ (Pascal)}$$

Druckverlust am E-Ventil

$$\Delta p_{E - \text{Ventil}} = p_c - p_o - p_{\text{hydro}}$$

$$\Delta p_{E - \text{Ventil}} = p_c - p_o + p_{\text{hydro}}$$

Für die Kraftübersetzung gilt:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad \text{oder} \quad F_1 \cdot A_2 = F_2 \cdot A_1$$

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h \quad \rho = (\text{rho}) \text{ ist die Dichte der Flüssigkeit in } \frac{kg}{m^3}$$

g ist die Erdbeschleunigung in $\frac{m}{s^2}$

h ist die Höhe der Flüssigkeitssäule

Für Wasser gilt: 10m Wassersäule entsprechen dem Druck von 1 bar.

Für Wasser erhält man $\rho = 1 \frac{kg}{dm^3} \text{ oder } 1000 \frac{kg}{m^3}$

Arbeit und Leistung

$$W = F \cdot s \quad \mathbf{F} \text{ ist die Kraft in Newton } \mathbf{N}, \mathbf{s} \text{ ist der Weg in Meter } \mathbf{m}$$

$$P = \frac{W}{t} \quad \mathbf{P} \text{ für die Leistung, } \mathbf{t} \text{ für die Zeit in Sekunden, } \mathbf{W} \text{ für die Arbeit in Joule}$$

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Masse, Volumen

$$m = V \cdot \rho \quad \text{Einheit } \frac{kg}{m^3} \text{ oder Einheit } \frac{kg}{dm^3}$$

Bei Gasen spielt auch der Kehrwert der Dichte eine Rolle. Diese Größe heißt das spezifische Volumen v .

$$v = \frac{1}{\rho} \quad \text{in } \frac{m^3}{kg} \text{ oder } \frac{dm^3}{kg}$$

Berechnet man die Masse eines Gases mit Hilfe des spezifischen Volumens v gilt:

$$m = \frac{V}{v} \quad \text{oder durch Umstellen nach } V: V = m \cdot v$$

Als Massenstrom \dot{m} gilt die pro Zeit bewegte Masse m , also $\dot{m} = \frac{m}{t}$ in $\frac{kg}{s}$

Gleiches gilt für den Volumenstrom \dot{V} , also $\dot{V} = \frac{V}{t}$ in $\frac{m^3}{s}$ oder $\frac{m^3}{h}$

$$Q = \% \cdot m \cdot c \cdot \Delta T + m \cdot c_{\text{Atmung}} \quad m \text{ für die Masse in } kg, c \text{ in } \frac{kJ}{kg \cdot K} \text{ und } \Delta T \text{ in } K.$$

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad \text{oder auch } \dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad \text{Als Einheit entsteht die Größe } \frac{kJ}{s} \text{ wobei gilt } 1 \frac{kJ}{s} = 1 kW$$

Wärmemenge zur Abkühlung des Kühlgutes

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad m \text{ ist die Masse des Kühlgutes, } c_a \text{ ist ihre spez. Wärmekapazität vor dem Erstarren, } \Delta T \text{ ist die Temperaturdifferenz zwischen Beschickungstemperatur und der Erstarrungstemperatur in } K$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_c}{c \cdot \Delta T} \quad \text{in } \frac{kg}{h} \quad c \text{ spez. Wärmekapazität von Wasser} = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$Q = m \cdot s \quad s \text{ ist die spezifische Schmelzwärme in } \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_w = m \cdot c_w \cdot \Delta T \quad c_w \text{ ist die spez. Wärmekapazität nach dem Erstarren, } \Delta T \text{ ist die Temperaturdifferenz zwischen Erstarrungstemperatur und der Endtemperatur des Kühlgutes}$$

$$Q = m \cdot r \quad r \text{ ist die spez. Verdampfungswärme in } \frac{kJ}{kg}$$

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta T$$

A ist die Fläche in m^2 , k der Wärmedurchgangskoeffizient

in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ und ΔT die Temperaturdifferenz zwischen den Wandseiten in K .

Gasgesetze

allgem. Gasgesetz $\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \text{konstant}$

Als Zustandsgrößen für Gase bezeichnet man:

Die Temperatur T

Den Druck p

Das Volumen V

Das Produkt dieser 3 Größen ist konstant.

Läßt man jeweils eine dieser Größen fest, dann ändern sich die verbleibenden Größen nach folgenden Gesetzmäßigkeiten:

a. **isobare** Zustandsänderungen (**Druck** p bleibt konstant)

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Der Index 1 bezieht sich auf die Werte im Zustand 1,

entsprechend der Index 2 auf den Zustand 2

b. **isotherme** Zustandsänderungen (**Temperatur** bleibt konstant)

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

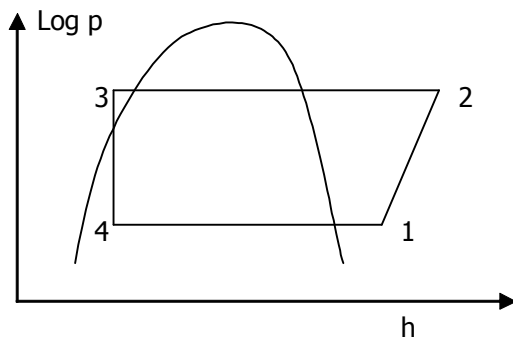
c. **isochore** Zustandsänderungen (**Volumen** bleibt konstant)

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Zustandsänderungen, bei denen keine Wärmezufuhr oder Abgabe erfolgt, heißen **isentrop**e Zustandsänderungen. Bei solchen Änderungen bleibt die **Entropie** s konstant.

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

3. $h, \log p$ – Diagramm



- 4 → 1: Im Verdampfer; wobei 1 bereits Verdichtereingang ist
 - 1 → 2: Im Verdichter
 - 2 → 3: Im Verflüssiger
 - 3 → 4: Im E-Ventil
- Alle außenliegende Punkte werden ohne Striche benannt.

Kälteleistung:

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) = \dot{m} \cdot q_0$$

\dot{m} ist der Massenstrom des Kältemittels in $\frac{kg}{s}$
 $h_1 - h_4$ ist die Enthalpiedifferenz vom Eintritt des

$$q_0 = h_1 - h_4$$

volumetrische Kälteleistung q_{0vol}

$$q_{0vol} = \frac{q_0}{v_1} = \frac{h_1 - h_4}{v_1}$$

v_1 ist dabei das spezifische Volumen des Saugdampfes im Zustand 1 am Verdichtereingang

Die Einheit von q_{0vol} ist $\frac{kJ}{m^3}$

$$\dot{Q}_0 = \dot{V} \cdot q_{0vol} = \dot{V}_{geo} \cdot q_{0vol} \cdot \lambda$$

\dot{V} ist der Volumenstrom, der vom Verdichter

$$q_{0vol} \text{ in } \frac{kJ}{m^3} \quad \lambda = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{geo}}$$

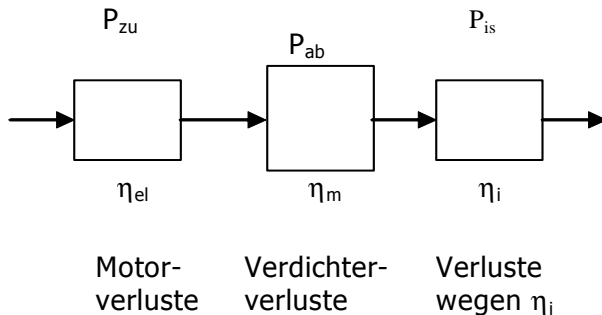
$\lambda = (\text{Lambda})$

$$\dot{V}_{geo} = z \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot s \cdot n \cdot 60 \quad \text{in } \frac{m^3}{h}$$

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

z	Zylinderzahl
d	Zylinderdurchmesser in m
s	Hublänge in m
n	Drehzahl in min ⁻¹
60	Anpassungsfaktor in min/h

Verdichterleistung P $P = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$ in kW



Die aus dem h, log p –Diagramm ermittelte Leistung P_i kann durch Division mit den einzelnen Wirkungsgraden zur Ermittlung der Anschlussleistung benutzt werden:

$$P_{zu} = \frac{P_{is}}{\eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{el}}$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \text{ in kW}$$

$\eta =$ (eta)

Zweistufige Verdichtung

$$\frac{p_z}{p_0} = \frac{p_c}{p_z}$$

p_0 Verdampfungsdruck, p_c Verflüssigungsdruck, p_z Zwischendruck

aufgelöst nach p_z erhält man $p_z = \sqrt{p_0 \cdot p_c}$

Beleuchtungswärme

$$\dot{Q}_{Lampe} = P \cdot t \cdot \frac{3600}{1000}$$

P in W und t in h/d gibt mit dem Faktor 3,6 : $\frac{kJ}{d}$

Personenwärme

$$\dot{Q}_{Personen} = n \cdot q \cdot t$$

n: Anzahl der Personen, t durchschnittliche tägliche

Aufenthaltszeit in $\frac{h}{d}$ und q Wärmemenge pro Person in $\frac{kJ}{h}$

Als Erfahrungswerte für q in $\frac{kJ}{h}$ gelten:

Ruhend, sitzend	420
Leichte Arbeit	500
Werkarbeit	840
Schwere Arbeit	1600

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

$$\dot{Q}_{\text{Ventilator}} = P \cdot t \cdot 3,6$$

P Ventilatorleistung in W, t die Einschaltzeit in $\frac{h}{d}$

Lufterneuerungswärme

$$\dot{Q}_{\text{Luft}} = \dot{m} \cdot \Delta h = V \cdot \rho \cdot n$$

\dot{m} ist der Massenstrom der Luft, Δh die Enthalpiedifferenz zwischen Luft Eintrittszustand und Endzustand.

$$\dot{Q}_{\text{Eis}} = \dot{m} \cdot q \cdot \frac{x_1 - x_2}{1000}$$

\dot{m} ist der Massenstrom der Luft in $\frac{kg}{d}$

q ist die Schmelzwärme des Eises mit $335 \frac{kJ}{kg}$

x_1, x_2 sind die Wassergehalte der Luft in $\frac{g}{kg}$

$$\dot{Q}_{\text{Eis2}} = \dot{m} \cdot \frac{x_1 - x_2}{1000} \cdot c_{\text{Eis}} \cdot (273K - T_0)$$

c_{Eis} ist die spez. Wärmekapazität des

Eises = $2,1 \frac{kJ}{kg \cdot K}$, x_1, x_2 in $\frac{g}{kg}$

Und T_0 die Verdampferetemperatur in K

Abtauwärme

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = P \cdot t \cdot 3,6$$

P für Heizleistung in W, t für Abtauzeit in h/d

$$\dot{Q}_0 = \frac{\dot{Q}_{\text{ges}}}{t_{\text{lauf}} \cdot 3600}$$

\dot{Q}_{ges} in $\frac{kJ}{d}$ und die Laufzeit t_{lauf} in $\frac{h}{d}$ liefert die Einheit kW

5. Verdampferberechnung

$$\dot{Q}_0 = A \cdot k \cdot \Delta T_m$$

A Verdampferoberfläche in m^2

k Wärmedurchgangskoeffizient in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

ΔT_m Temp.differenz zwischen Luft eintritts- und Austrittstemperatur am Verdampfer

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) = \dot{m} \cdot q_0$$

\dot{m} ist der Massenstrom des Kältemittels in $\frac{kg}{s}$

$h_1 - h_4$ ist die Enthalpiedifferenz vom Eintritt des

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

in K ΔT_m ist eigentlich die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz:

ΔT_1 : Temp.-Differenz zwischen Verdampfeintrittstemperatur und Verdampfungstemperatur

ΔT_2 : Temp.-Differenz zwischen Verdampferaustrittstemperatur und Verdampfungstemperatur

6. Verflüssigerberechnung

Weitgehend gelten die Formeln, die schon in der Verdampferberechnung stehen:

$$\dot{Q}_c = A \cdot k \cdot \Delta T_m$$

A Verflüssigeroberfläche in m^2

k Wärmedurchgangskoeffizient in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

ΔT_m Temp.differenz zwischen Lufterintritts- und Austrittstemperatur am Verflüssiger

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = \dot{Q}_0 + P_i$$

\dot{m} ist der Massenstrom des Kältemittels in $\frac{kg}{s}$

$h_1 - h_4$ ist die Enthalpiedifferenz vom Eintritt des

Kältemittels bis zum Ausgang des Verflüssigers in $\frac{kJ}{kg}$

$$A = \left[n_1 \cdot a \cdot b - n_2 \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{2} \right] + d \cdot \pi \cdot l$$

n_1 Anzahl der Lamellen

a Lamellenlänge in m

b Lamellenbreite in m

n_2 Anzahl der Lamellenbohrungen

d Durchmesser der Bohrungen in m^2

l Gesamtrohrlänge in m

Bestimmen der Gesamtrohrlänge

$$l = \frac{A}{d \cdot \pi}$$

l Rohrlänge in m

A Verflüssigeroberfläche in m^2

d Rohrdurchmesser in m

Bestimmen des Luftvolumenstromes:

$$\dot{V}_L = \frac{\dot{Q}_c}{c \cdot \rho \cdot \Delta T} \text{ in } \frac{m^3}{h} \text{ oder } \dot{V}_L = \frac{\dot{Q}_c}{\rho \cdot \Delta h} \text{ in } \frac{m^3}{h}$$

Δh Enthalpiedifferenz zwischen Lufterintritt und Austritt in $\frac{kJ}{kg}$

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

ΔT Temperaturdifferenz zwischen Lufteintritt und Austritt in K

ρ Dichte der Luft in $\frac{kg}{m^3}$

c spezifische Wärmekapazität der Luft = $1 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

Ventilatorleistung:

$$P_{Vent.} = \frac{\dot{V}_L \cdot \Delta p}{\eta}$$

in W

\dot{V}_L in $\frac{m^3}{s}$

Δp Druckdifferenz in Pa

η Gesamtwirkungsgrad etwa 0,5 bis 0,8

7. Berechnen des E-Ventils

Oft werden die Druckverluste auch in Temperaturdifferenzen umgewandelt und direkt in K angegeben.

Druckabfall in geraden Leitungen:

$$(1) \quad \Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2}$$

in Pa

λ

Rohrreibungskoeffizient (Cu = 0,03, Stahl = 0,04)

l

Rohrlänge in m

d

Rohrdurchmesser in m

ρ

Dichte des Mediums in kg/m^3

w

Strömungsgeschwindigkeit in m/s

Bei steigenden Flüssigkeitsleitungen ist zusätzlich der hydrostatische Druckverlust zu addieren.

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h$$

ρ ist die Dichte der Flüssigkeit in $\frac{kg}{m^3}$

g ist die Erdbeschleunigung in $\frac{m}{s^2}$

h ist die Höhe der Flüssigkeitssäule

Bei fallenden Druckleitungen ist dieser Wert vom Druckverlust abzuziehen.

Rohrleitungsdurchmesser

$$d_i = \sqrt{\frac{\dot{m}_{km} \cdot v \cdot 4}{w \cdot \pi}}$$

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Geschwindigkeit in Leitungen

$$w = \frac{\dot{m}_{km} \cdot v \cdot 4}{d_i^2 \cdot \pi}$$

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

8.2. Auswahl nach Strömungsgeschwindigkeiten

Saugleitung:	4 – 12 m/s
Druckleitung:	8 – 15 m/s
Flüssigkeitsleitung:	0,5 – 1 m/s

Mittlere Werte aus diesen Bereichen benutzt man, um die Rohrdurchmesser zu bestimmen. Berechnen des Kältemittelvolumenstromes

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_0}{q_0} \cdot 3600 \text{ in } \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad \text{und} \quad \dot{Q}_0 \text{ in kW} \quad q_0 \text{ in } \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Saugleitung

$$\dot{V}_{\text{Saug}} = \frac{\dot{m}}{\rho_1} = \dot{m} \cdot v_1 \text{ in } \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \text{und} \quad \dot{m} \text{ in } \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad \rho_1 \text{ Dichte am Saugstutzen}$$

in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ oder v_1 das spez. Volumen in $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

Druckleitung

$$\dot{V}_{\text{Druck}} = \frac{\dot{m}}{\rho_2} = \dot{m} \cdot v_2 \text{ in } \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \text{und} \quad \dot{m} \text{ in } \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad \rho_2 \text{ Dichte am Druckstutzen}$$

in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ oder v_2 das spez. Volumen in $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

Flüssigkeitsleitung

$$\dot{V}_{\text{Flüssig}} = \frac{\dot{m}}{\rho_3} = \dot{m} \cdot v_3 \text{ in } \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \text{und} \quad \dot{m} \text{ in } \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad \rho_3 \text{ Dichte am}$$

Ausgang des Verflüssigers in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ oder v_3 das spez. Volumen in $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

Achtung: Die Dichte des flüssigen Kältemittels ist vielfach in $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$ angegeben. Dann muss dieser Zahlenwert mit dem Faktor 1000 multipliziert werden.

$$\text{Also: } 1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Bestimmen des Rohrquerschnittes

$$A = \frac{\dot{V}}{w \cdot 3600} \quad \text{in } m^2 \quad \dot{V} \text{ in } \frac{m^3}{h} \quad \text{und die Fließgeschwindigkeit } w \text{ in } \frac{m}{s}$$

für w ist jeweils ein Mittelwert einzusetzen

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot w \cdot 3600}} \quad \text{in } m \quad \dot{V} \text{ in } \frac{m^3}{h} \quad \text{und die Fließgeschwindigkeit}$$
$$w \text{ in } \frac{m}{s}$$

$$w = \frac{\dot{V}}{A \cdot 3600} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot d^2 \cdot 3600} \quad \text{in } \frac{m}{s} \quad A \text{ in } m^2 \quad \dot{V} \text{ in } \frac{m^3}{h}, \quad d \text{ in } m$$

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad \text{in } Pa \quad \lambda \quad \text{Rohrreibungskoeffizient (Cu = 0,03, Stahl = 0,04)}$$

l Rohrlänge in m
 d Rohrdurchmesser in m
 ρ Dichte des Mediums in kg/m³
 w Strömungsgeschwindigkeit in m/s

9. Kältezahlen

Kältezahl nach Carnot:

$$(1) \quad \varepsilon_c = \frac{T_c}{T_c - T_0} \quad T_c : \text{Verflüssigungstemperatur in K} \quad \varepsilon = (\text{epsilon})$$
$$T_0 : \text{Verdampfungstemperatur in K}$$

Die Carnot'sche Kältezahl kann in einer realen Anlage nie erreicht werden.

$$(2) \quad \varepsilon_{is} = \frac{h_1 - h_4}{h_2' - h_1} \quad \text{isentropie oder ideale Kältezahl}$$

Die h-Werte sind die Enthalpien der zugehörigen Punkte im h, log p - Diagramm

$$(3) \quad \varepsilon_i = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad \text{praktische oder indizierte Kältezahl}$$

Die so ermittelten Zahlen haben keine Einheit.
Sie geben an, welche Kälteleistung pro kW eingesetzter Antriebsleistung möglich ist.

$$(4) \quad \eta_G = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_c} \quad \eta_G \text{ heißt der Gütegrad und beurteilt den tatsächlichen}$$

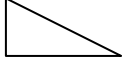
Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

10. Flächen und Körperberechnungen

Rechtecke: 

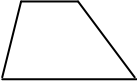
$$A = a \cdot b$$

a, b Seitenlängen

Dreiecke: 

$$A = \frac{g}{2} \cdot h$$

g : Grundseite, h Höhe auf g

Trapez: 

$$A = \frac{a+b}{2} \cdot h$$

a, b : die parallelen Seiten, h Abstand von a bis b

Kreis:

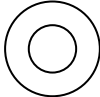


$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

d : Durchmesser des Kreises

$$U = d \cdot \pi$$

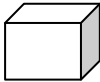
Kreisring:



$$A = \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4}$$

D : äußerer Durchmesser, d innerer Durchmesser

Würfel:

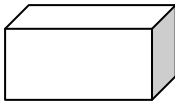


$$V = a^3$$

a : Kantenlänge

$$O = 6 \cdot a^2$$

Quader:

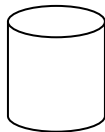


$$V = a \cdot b \cdot h$$

a, b : Seitenlängen der Grundfläche, h : Höhe des Quaders

$$O = 2 \cdot (a \cdot b + a \cdot h + b \cdot h)$$

Zylinder:



$$V = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h$$

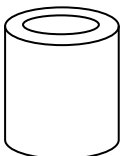
d : Durchmesser des Zylinders

h : Höhe des Zylinders

$$O = \frac{d^2 \cdot \pi}{2} + d \cdot \pi \cdot h$$

O ist die Oberfläche des Zylinders mit Boden und Deckel

Rohr:



$$V = \frac{(d_a - 2 \cdot s)^2 \cdot \pi}{4} \cdot l$$

d_a Außendurchmesser,

s Wandstärke

V Innenvolumen des Rohres

$$V_{cu} = d_a \cdot \pi \cdot l \cdot s$$

V_{cu} Volumen des Kupfers

l ist die Länge des Rohres

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

B. Elektrotechnik

1. Gleichstrom

Grundlagen

Stromdichte: $J = \frac{I}{A}$ in $\frac{A}{mm^2}$ I Stromstärke in A

Elektrische Ladung: $Q = I \cdot t$ in As A Querschnitt in mm^2
 I Stromstärke in A
 t Zeit in s

Ohmsches Gesetz: $U = R \cdot I$ U Spannung in V
 I Stromstärke in A
 R Widerstand in Ω

$$I = \frac{U}{R} \quad R = \frac{U}{I}$$

Leiterwiderstand $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$ in Ω ρ spez. Widerstand in $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$
 l Leiterlänge in m
 A Leiterquerschnitt in mm^2

$$R = \frac{l}{\chi \cdot A}$$
 in Ω χ spez. Leitfähigkeit in $\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$
$$\chi = \frac{1}{\rho} \quad \chi_{Cu} = 56 \frac{m}{\Omega \cdot mm^2} \quad \chi = (\text{kappa})$$

Widerstand und Temperatur

$$\Delta R = R_{kalt} \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta$$
 in Ω ΔR Widerstandsänderung in Ω

$$\Delta R = R_{warm} - R_{kalt}$$
 in Ω $\Delta \vartheta$ Temperaturänderung in K

$$\vartheta = (\text{teta})$$

$$R_{warm} = R_{kalt} + R_{kalt} \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta$$
 in Ω α Temperaturbeiwert in $1/K$

Der Temperaturbeiwert α eines Werkstoffes gibt an, um welchen Wert sich der Widerstand des Werkstoffes sich je Ohm erhöht, wenn die Temperatur um 1K steigt.

Für Kupfer gilt $\alpha_{Cu} = 0,0039 \frac{1}{K}$ $\alpha = (\text{alpha})$

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Elektr. Leistung $P = U \cdot I$ in W U Spannung am Widerstand in V
 I Stromstärke durch den Widerstand in A

$$P = \frac{U^2}{R} \text{ in } W \quad R \text{ Widerst}$$

Elektr. Arbeit $W = P \cdot t$ in Ws P Leistung in W $P = I^2 \cdot R$ in W
 t Zeit in s

Bei größeren Leistungen wird die Leistung in kW und die Zeit in Stunden h angegeben. Die Einheit der Arbeit wird dann Kilowattstunden kWh.

$$1Ws = 1Joule = 1J \quad 1kWh = 3600000 Ws$$

Verlustleistung

$R_l = \frac{2 \cdot l}{\chi \cdot A}$ in Ω Verluste auf der Leitung entstehen bei Hin- und Rückleitung. Deshalb muss die Leitungslänge doppelt genommen werden.

$$I = \frac{U}{R + R_l}$$

I ist der Strom, der sich einstellt, wenn zu dem

Verbraucherwiderstand R der Leitungswiderstand aus Hin- und Rückleitung addiert wird

$$P_v = I^2 \cdot \frac{2 \cdot l}{\chi \cdot A} \text{ in } W \quad q = \frac{2 \cdot l \cdot \rho \cdot I_n \cdot \cos \varphi}{U_v} \quad q = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot \rho \cdot I_n \cdot \cos \varphi}{U_v} \quad \varphi = (\text{phi})$$

Gerätewiderstand berechnen:

$$R = \frac{U^2}{P}$$

R Gerätewiderstand, P Nennleistung, U Nennspannung

Leitungswiderstand und Strom berechnen:

$$R_l = \frac{2 \cdot l}{\chi \cdot A} \text{ und } I = \frac{U}{R + R_l}$$

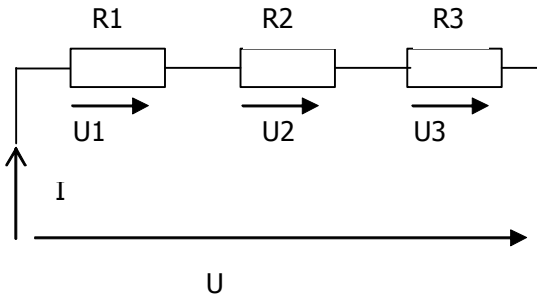
Geräteleistung berechnen:

$$P_{Gerät} = I^2 \cdot R$$

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Reihen- und Parallelschaltungen von Widerständen

Reihenschaltung:

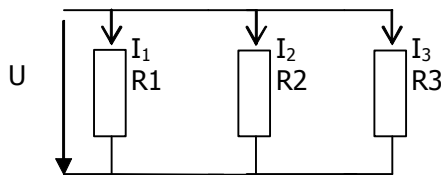


$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

$$R_g = R_1 + R_2 + R_3$$

Am größten Einzelwiderstand liegt die höchste Teilspannung.
Durch alle Widerstände einer Reihenschaltung fließt derselbe Strom I.

Parallelschaltung:



$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Die Spannung an jedem Teilwiderstand ist gleich groß.
Durch den kleinsten Widerstand fließt der größte Strom.

Speziell für 2 Widerstände gilt:

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Der Kondensator

$$c = \frac{Q}{U} \text{ in } F \text{ Farad } c \text{ Kapazität des Kondensators}$$

Q Ladungsmenge in As
 U Spannung am Kondensator in V

$$c = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

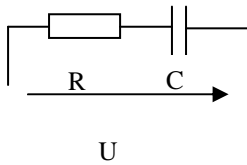
ϵ_0 elektrische Feldkonstante

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$$

A Plattenfläche in m^2 d Plattenabstand (Isolierstoffdicke) in m ϵ_r Dielektrizitätszahl

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Schaltungen mit Kondensatoren



Die Spannung am Kondensator steigt beim Laden des Kondensators von Null auf den Wert U der Eingangsspannung.

Der Ladestrom ist beim Einschalten nur durch den Widerstand begrenzt, dann sinkt er gegen Null.

Bei parallelgeschalteten Kondensatoren addieren sich ihre Kapazitäten.

$$C_{ges} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Speziell für 2 Kondensatoren gilt:

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

$$C_{ges} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Die Spule

Einheit von L $[L] = \frac{V \cdot s}{A} = H$ H: Henri

$U_{ind} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ist die Änderung der Stromstärke in einem Zeitraum

$U_{ind} = N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ N Windungszahl der Spule Φ magnetischer Fluss in Vs $\Phi = (\text{Phi})$

$$U_{ind} = B \cdot l \cdot v \cdot z$$

B magnetische Flussdichte in $\frac{Vs}{m^2}$

l Länge der Leiterschleife in m

v Geschwindigkeit der Leiterbewegung in $\frac{m}{s}$

z Anzahl der Windungen

2. Wechselstrom

Der Wechselstrom entsteht durch Induktion in einer Leiterschleife, die in einer Drehbewegung durch ein Magnetfeld bewegt wird.

Kenngrößen:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

ω Kreisfrequenz in 1/s

$\omega = (\text{omega})$

f Frequenz in 1/s oder Hz

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

$$f = \frac{1}{T}$$

T Periodendauer in s

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

$u(t)$ Momentanwert der Spannung für eine Zeit t

\hat{U} Scheitelwert der sinusförmigen Spannung

ω Kreisfrequenz in $1/s$

$$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

U_{eff} heißt Effektivwert der Wechselspannung

Transformatorgesetze:

Die Spannungen am Kondensator verhalten sich umgekehrt wie ihre Ströme.
 \ddot{u} Übersetzungsverhältnis

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \ddot{u}$$

N_1 Windungszahl der Primärseite

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

N_2 Windungszahl der Sekundärseite

Wechselstromwiderstände

$$U = R \cdot I \quad P = U \cdot I$$

Zwischen Strom und Spannung gibt es keine Phasenverschiebung.
Kondensatoren:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot c}$$

X_c Blindwiderstand des Kondensators (kapazitiver Blindwiderstand) in Ω

ω Kreisfrequenz in $1/s$ c Kapazität des Kondensators in F (Farad)

Am Kondensator eilt der Strom um 90° der Spannung voraus. Die am Kondensator entstehende Leistung heißt kapazitive Blindleistung Q_c .

$$Q_c = \frac{U_c}{I_c} = \frac{U_c^2}{X_c} = I_c^2 \cdot X_c$$

in *var* (volt-ampere-reaktiv) oder auch in Watt W

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Spulen:

$$X_L = \omega \cdot L$$

X_L Blindwiderstand der Spule (induktiver Blindwiderstand) in Ω

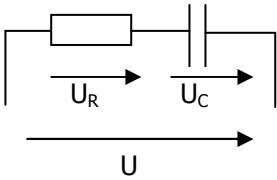
ω Kreisfrequenz in $1/s$

L Induktivität der Spule in H (Henri)

An Spulen eilt die Spannung um 90° dem Strom voraus. Die an der Spule entstehende Leistung heißt induktive Blindleistung Q_L

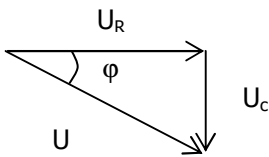
$$(11) \quad Q_L = \frac{U_L}{I_L} = \frac{U_L^2}{X_L} = I_L^2 \cdot X_L \quad \text{in var (volt-ampere-reaktiv) oder auch in Watt W}$$

Reihenschaltung von Widerstand und Kondensator



Scheinwiderstand Z: $Z = \frac{U}{I}$ in Ω

Zeigerdiagramm der Spannungen



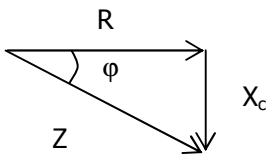
$$U^2 = U_R^2 + U_C^2$$

$$U_R = \sqrt{U^2 - U_C^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U}$$

$$U_R = U \cdot \cos \varphi$$

Zeigerdiagramm der Widerstände



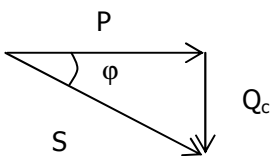
$$Z^2 = R^2 + X_c^2$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}$$

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

Zeigerdiagramm der Leistungen



$$S^2 = P^2 + Q_c^2$$

$$S = \frac{U}{I}$$

in VA Voltampere

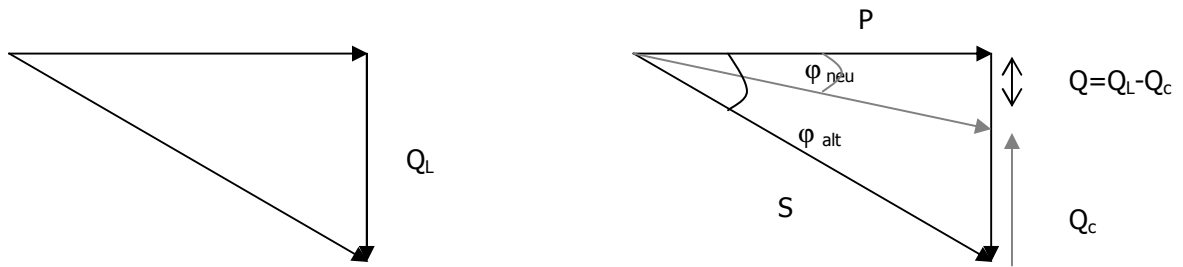
$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$\cos \varphi$ heißt auch Leistungsfaktor.

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Im Zeigerdiagramm subtrahiert sich die kapazitive Blindleistung von der induktiven Blindleistung.



$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi_{alt} - \tan \varphi_{neu})$$

Blindleistung

Q_c : Die zur Kompensation benötigte kap.

P : Die Wirkleistung des Motors in W

φ_{alt} : Phasenverschiebung ohne Kondensator

φ_{neu} : Phasenverschiebung mit Kondensator

Nach dem Festlegen der benötigten Blindleistung berechnet sich die Kapazität des Kondensators:

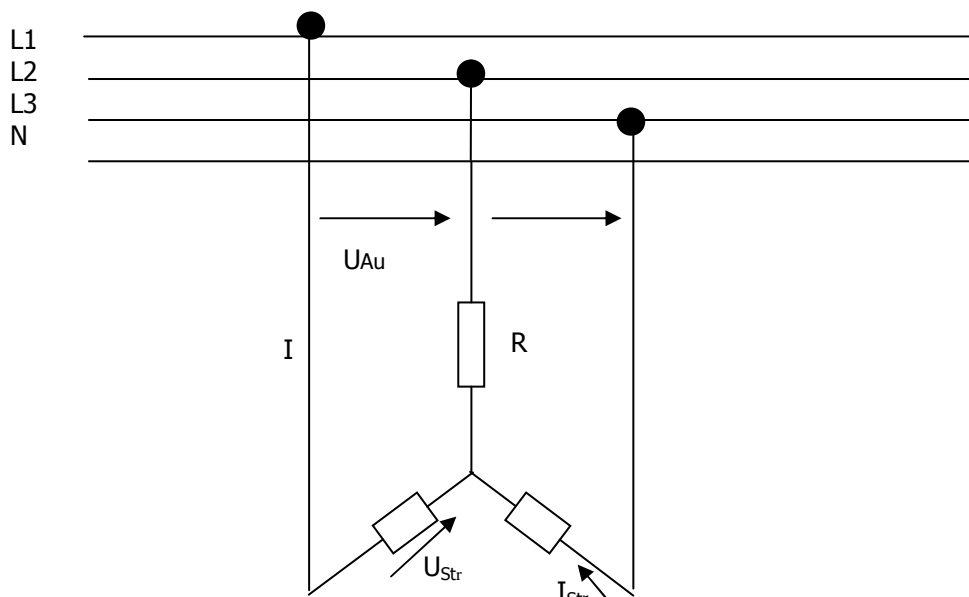
$$C = \frac{Q_c}{U^2 \cdot 2\pi \cdot f} \text{ in F für Farad}$$

3. Drehstrom

$U_{L1,N} = \frac{U_{L1,L2}}{\sqrt{3}}$, d.h. die Spannungen im „normalen“ Stromnetz sind damit 400V und

$$\frac{400V}{\sqrt{3}} \approx 230V$$

Die Sternschaltung Y



Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Bei der Sternschaltung gilt:

$$I_{Str} = I$$

und

$$U_{Str} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

Außenleitergrößen immer ohne Index

$$R = \frac{U_{Str}}{I_{Str}}$$

Für die Wirkleistung der gesamten Schaltung gilt:

$$P = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str} \text{ oder } P = U \cdot I \cdot \sqrt{3}$$

Befinden sich an Stelle der Wirkwiderstände Scheinwiderstände, wie z.B. die Wicklungstränge bei Motoren, dann muss die Phasenverschiebung zusätzlich berücksichtigt werden.

$$P = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \text{ oder } S = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \text{ und } S^2 = P^2 + Q^2$$

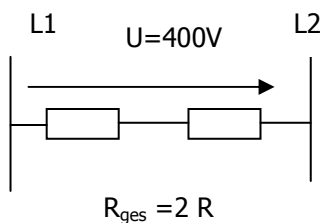
Der N-Leiter wird bei symetrischer Belastung nicht gebraucht. Der Summenstrom im Sternpunkt wird Null.

Bei Störungen wie Ausfall eines Außenleiters oder Ausfall eines Widerstandes ergeben sich allerdings unterschiedliche Restleistungen.

Störungen **ohne N-Leiter** bei Y-Schaltung

a. Ausfall **eines** Außenleiters L3

Ersatzschaltung:



$$P = \frac{U^2}{2R} \quad I = \frac{U}{2R}$$

Die Leistung geht auf die Hälfte zurück.
Bei Ausfall eines weiteren Außenleiters ist keine Leistung mehr vorhanden.

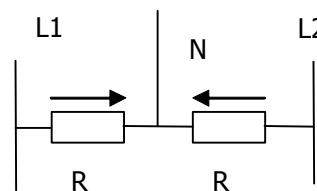
b. Ausfall eines Widerstandes

Es ergibt sich die gleiche Schaltung wie in a. und damit auch die gleichen Formeln.

Störungen **mit N-Leiter** bei Y-Schaltung

a. Ausfall **eines** Außenleiters L3

Ersatzschaltung:



Die Spannung und der Strom in den restlichen Widerständen ändert sich nicht.

$$P = \frac{2}{3} \cdot P_{\text{vorher}}$$

Die Leistung geht nur um ein Drittel zurück.
Bei Ausfall von 2 Außenleitern

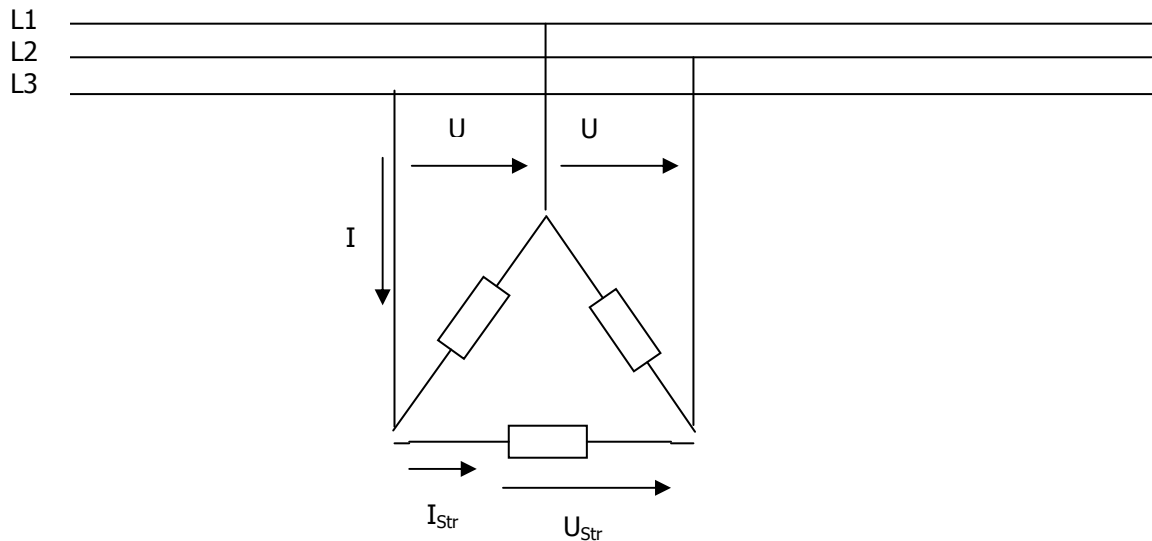
$$P = \frac{1}{3} \cdot P_{\text{vorher}}$$

b. Ausfall von Widerständen

Es ergibt sich die gleiche Schaltung wie in a. und damit auch die gleichen Formeln.

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Die Δ - Schaltung



$$U_{Str} = U \quad R = \frac{U}{I_{Str}} \quad I_{Str} = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Für die Wirkleistung der gesamten Schaltung gilt:

$$P = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str} \text{ oder } P = U \cdot I \cdot \sqrt{3}$$

Befinden sich an Stelle der Wirkwiderstände Scheinwiderstände, wie z.B. die Wicklungsstränge bei Motoren, dann muss die Phasenverschiebung zusätzlich berücksichtigt werden.

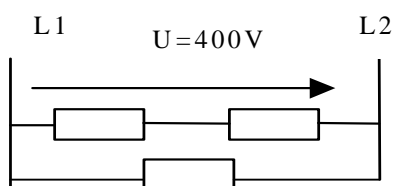
$$P = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \text{ oder } S = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \text{ und } S^2 = P^2 + Q^2$$

Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer

Der N-Leiter wird bei der Δ - Schaltung nicht gebraucht

a. Störungen bei Ausfall eines Außenleiters L3

Es ergibt sich folgende Ersatzschaltung



$$R_{ges} = \frac{2R \cdot R}{2R + R} = \frac{2}{3}R$$

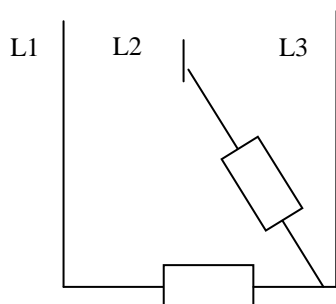
$$R_{ges} = \frac{2R \cdot R}{2R + R} = \frac{2}{3}R$$

$$P_{Störung} = \frac{U^2}{\frac{2}{3}R} = \frac{3}{2} \cdot \frac{U^2}{R}$$

$$P_{Störung} = \frac{1}{2} \cdot P_{vorher}$$

b. Störung durch Ausfälle von Widerständen

Wenn 1 Widerstand ausfällt, ändert sich für die beiden anderen Widerstände nichts.



Bei Ausfall eines weiteren Widerstandes sinkt die Leistung um ein weiteres Drittel

auf $P = \frac{1}{3} \cdot P_{vorher}$

$$P_{Störung} = \frac{2}{3} \cdot P_{vorher}$$

Die Strombelastung in den Außenleitern ändert sich:

Vorher war die Stromstärke: $I = \frac{U}{R} \cdot \sqrt{3}$

Nachher in L1 und L2 : $I_{Störung} = \frac{U}{R}$

In L3 ergibt sich nicht die Summe der beiden Ströme, sondern wegen der Phasenverschiebung wird auch dieser Strom so groß wie in L1 und L2