

Kapitel 4

Kondensator und Kapazität

Im Kälteanlagenbau finden Kondensatoren bei den Wechselstromverdichtern ihre Anwendung. Sie werden dort als **Anlauf- bzw. Betriebskondensator** bezeichnet. Aber auch in Steuerungen für Kälteanlagen finden sie Anwendung. Dort wird meist das Zeitverhalten von Kondensatoren ausgenutzt. Wesentlich ist auch der Einsatz bei der Kompensation von elektrischen Anlagen. Das wesentliche Verhalten und die Wirkungsweise wird in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

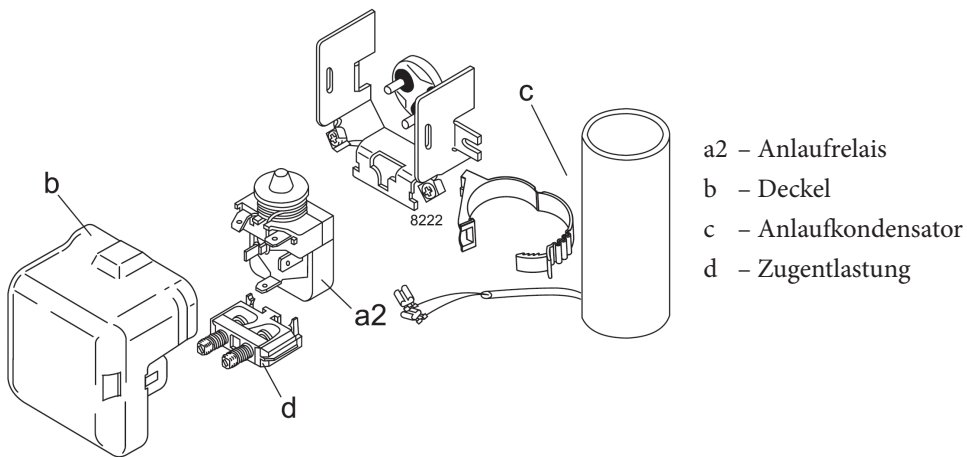


Abb. 4.1: Anlaufkondensator an einem Verdichter SC15 (Quelle: Danfoss)

4.1 Kapazität von Kondensatoren

Das einfachste Modell eines Kondensators ist der **Plattenkondensator** mit Luft zwischen den Platten. Es handelt sich hierbei um zwei Metallplatten, die sich nicht berühren dürfen. Diese werden an eine Gleichspannung gelegt und somit unterschiedlich geladen.

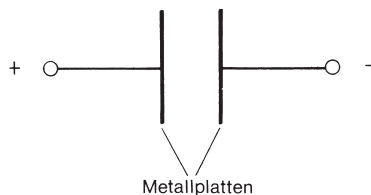


Abb. 4.2: Plattenkondensator

Wird die Spannungsquelle entfernt, so bleiben die Platten aufgeladen. Ein Kondensator ist also in der Lage, elektrische Ladungen zu speichern. Die Menge an gespeicherter elektrischer Ladung wird als **Kapazität C** bezeichnet.

Die Kapazität C gibt das Speichervermögen eines Kondensators an.

Die Größe der Kapazität lässt sich aus der gespeicherten Ladungsmenge Q und der Spannung zwischen den Platten berechnen. Die Kapazität gibt also das **Fassungsvermögen elektrischer Ladungen** für eine bestimmte Spannung an.

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{in} \quad \frac{\text{As}}{\text{V}} = 1 \text{ F (F = Farad)} \quad (4.1)$$

Die in der Anwendung vorkommenden Kapazitäten sind um mehrere Zehnerpotenzen kleiner als 1 Farad. Die im Kälteanlagenbau vorkommenden Kapazitäten liegen meist im Bereich von μF ($\mu = 10^{-6} = \text{Mikro}$).

Die Kapazität eines Kondensators lässt sich aber auch nach seinen geometrischen Abmessungen bestimmen. Diese sind Plattenabstand d und Plattenfläche A . Bei einem kleinen Plattenabstand sind die Anziehungskräfte auf die Ladungen groß. Die Kapazität wird dadurch größer. Eine große Plattenfläche hat zur Folge, dass der Kondensator viele Ladungen aufnehmen kann und dadurch auch eine große Kapazität hat.

Die Kapazität ist proportional der Plattenfläche und umgekehrt proportional dem Plattenabstand.

$$C \sim \frac{A}{d}$$

Die Kapazität ist außerdem noch von einer Naturkonstanten, der elektrischen Feldkonstanten ϵ_0 (sprich Epsilon), abhängig.

$$\text{Elektrische Feldkonstante } \epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

Somit kann die Kapazität berechnet werden mit:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad \text{in} \quad \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \text{m} = \frac{\text{As}}{\text{V}} = \text{F} \quad (4.2)$$

Um die Kapazität zu erhöhen, bringt man einen Isolierstoff, das **Dielektrikum**, zwischen die Platten. Der Effekt, der sich dabei einstellt, wird elektrische Polarisierung genannt. Im Dielektrikum richten sich die Ladungen so aus, dass mehr Ladungen auf die Platten gebracht werden. Ein Maß für die Kapazitätserhöhung ist die **Dielektrizitätszahl** ϵ_r . Diese gibt an, um wie viel sich die Kapazität, bezogen auf Luft (Vakuum) zwischen den Platten, erhöht. So wird die Kapazität z. B. bei einem keramischen Isolierstoff mehr als 3000-fach erhöht. Man spricht dann auch von Keramikkondensatoren.

Vollständig lässt sich die Kapazität berechnen mit:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (4.3)$$

In der Kältetechnik spielt die Umwandlung einer physikalischen Größe, z. B. Druck, in eine elektrische Größe eine immer wichtigere Rolle, da dieses Signal dann entsprechend weiterverarbeitet werden kann. So kann ein **Drucktransmitter** nach dem Prinzip einer Kapazitätsänderung aufgrund einer Plattenabstandsänderung arbeiten. Dabei wirkt der Druck auf eine Metallplatte eines Kondensators. Je nach Größe des Drucks sind diese eng zusammen oder weit auseinander. Dies bedeutet, dass die Kapazitätsänderung ein Maß für die Druckänderung darstellt. Befindet sich der Kondensator in einem elektrischen Stromkreis, so hat dies auch eine Stromänderung zur Folge. Man kann also einem elektrischen Stromwert einen Druckwert zuordnen.

Bei dem Schaltzeichen eines Kondensators werden die beiden Platten dargestellt, siehe Abbildung 4.3. Er wird mit dem Buchstaben C gekennzeichnet.

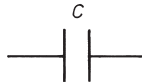


Abb. 4.3: Schaltzeichen eines Kondensators

4.2 Schaltung von Kondensatoren

Bei Wechselstromverdichtermotoren werden oft im Anlaufmoment zwei Kondensatoren parallel geschaltet, um das Anlaufverhalten zu verbessern. Es ist daher die Frage zu klären, wie sich Kondensatoren verhalten, wenn sie in Reihe oder parallel geschaltet sind.

Ähnlich wie bei der Untersuchung von Widerständen soll auch bei den Kondensatoren ein Ersatzkondensator ermittelt werden, der die gleichen Eigenschaften aufweist wie eine Anzahl parallel geschalteter Kondensatoren. Das Verhalten soll am Beispiel von drei parallel geschalteten Kondensatoren untersucht werden.

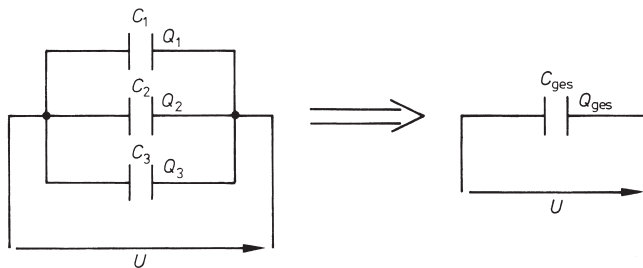


Abb. 4.4: Ersatzkondensator einer Parallelschaltung

Für die Parallelschaltung gilt nach (4.1):

$$C_1 = \frac{Q_1}{U}, \quad C_2 = \frac{Q_2}{U} \quad \text{und} \quad C_3 = \frac{Q_3}{U}$$

Ebenso gilt für den Ersatzkondensator: $C_{\text{ges}} = \frac{Q_{\text{ges}}}{U}$

Da man sich die Parallelschaltung auch als Addition der Plattenflächen vorstellen kann, muss der Ersatzkondensator die gleiche Ladungsmenge haben wie die drei Ladungsmengen der Parallelschaltung.

$$Q_{\text{ges}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Da $Q_{\text{ges}} = C_{\text{ges}} \cdot U$, $Q_1 = C_1 \cdot U$, $Q_2 = C_2 \cdot U$ und $Q_3 = C_3 \cdot U$ ist, kann man schreiben:
 $C_{\text{ges}} \cdot U = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U + C_3 \cdot U$

Nach Ausklammern und Kürzen der Spannung U erhält man:

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (4.4)$$

Allgemein gilt für n parallel geschalteter Kondensatoren:

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (4.5)$$

Dies bedeutet, dass eine Parallelschaltung von Kapazitäten eine Vergrößerung der Gesamtkapazität ergibt.

Zur Ermittlung des Ersatzkondensators einer Reihenschaltung von Kondensatoren betrachten wir Abbildung 4.5.

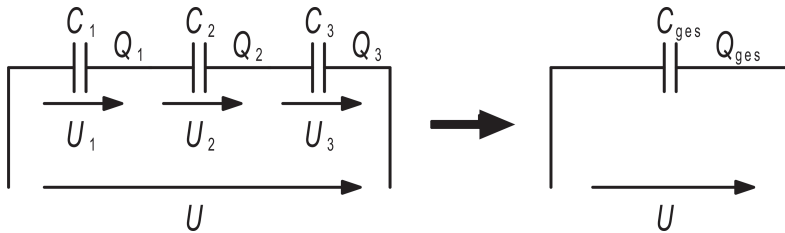


Abb. 4.5: Ersatzkondensator einer Reihenschaltung

Da bei der Reihenschaltung der gleiche Ladestrom fließt, kann jeder Kondensator nur die gleiche Ladungsmenge Q aufnehmen.

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_{\text{ges}}$$

Die Spannungen an den Kondensatoren teilen sich auf zu:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}, \quad U_3 = \frac{Q}{C_3} \quad \text{und} \quad U = \frac{Q}{C_{\text{ges}}}$$

Da $U = U_1 + U_2 + U_3$ ist, kann man schreiben:

$$\frac{Q}{C_{\text{ges}}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

Nach Ausklammern und Kürzen der Ladung Q erhält man:

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (4.6)$$

Allgemein gilt für n in Reihe geschalteter Kondensatoren:

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (4.7)$$

Bei einer Reihenschaltung von Kondensatoren ist der Ersatzkondensator immer kleiner als der kleinste Einzelkondensator.

Genau wie bei den Widerständen lassen sich Kondensatoren auch in gemischten Schaltungen, also Parallel- und Reihenschaltung kombiniert, darstellen. Hierbei sind die oben beschriebenen Gesetzmäßigkeiten entsprechend anzuwenden.

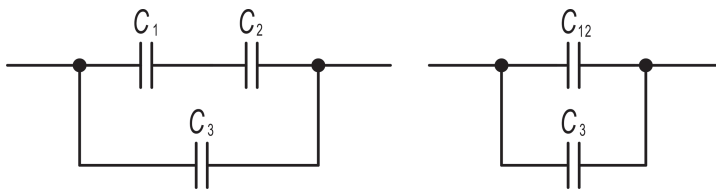
Beispiel

Ein defekter Anlaufkondensator eines Wechselstromverdichters hat eine Kapazität von $40 \mu\text{F}$. Dieser soll ausgetauscht werden. Zur Verfügung stehen jedoch nur drei Kondensatoren mit den Kapazitäten $75 \mu\text{F}$, $50 \mu\text{F}$ und $10 \mu\text{F}$.

Gesucht:

Wie sind diese zu schalten, damit man einen Ersatzkondensator von $40 \mu\text{F}$ erhält?

Lösung:



Aus der Reihenschaltung $75 \mu\text{F}$ und $50 \mu\text{F}$ folgt:

$$\frac{1}{C'_{\text{ges}}} = \frac{1}{75 \mu\text{F}} + \frac{1}{50 \mu\text{F}}$$

$$C'_{\text{ges}} = 30 \mu\text{F}$$

Aus der verbleibenden Parallelschaltung folgt:

$$C_{\text{ges}} = 30 \mu\text{F} + 10 \mu\text{F}$$

$$C_{\text{ges}} = 40 \mu\text{F}$$

Kapitel 8

Elektrische Antriebe in der Kältetechnik

In diesem Kapitel sollen die **elektromotorischen Antriebe**, die im Kälteanlagenbau eine wichtige Stellung einnehmen, näher betrachtet werden. Einen wesentlichen Teil stellen darin die Verdichterantriebe dar. Daneben sind aber elektromotorische Antriebe für den Verdampferventilator und Verflüssigerventilator von Bedeutung. Zu unterscheiden sind prinzipiell Wechselstrom- und Drehstromantriebe. Bei Drehstrommotoren, die im Kälteanlagenbau Anwendung finden, handelt es sich um einen Drehstrom-**Asynchronmotor**, auf dessen Betriebsverhalten im Kapitel 8.4 näher eingegangen wird.

8.1 Erzeugung eines Drehfelds

Am Beispiel einer Dreiphasenwechselspannung in Verbindung mit den Grundlagen aus Kapitel 5 wird die Entstehung eines Drehfelds beschrieben. Das Drehfeld ist notwendig, um eine Motorwelle in eine Rotation zu bringen. Betrachten wir hierzu drei Spulen eines Motors die an einer Dreiphasenwechselspannung nach Abbildung 8.1 angeschlossen sind.

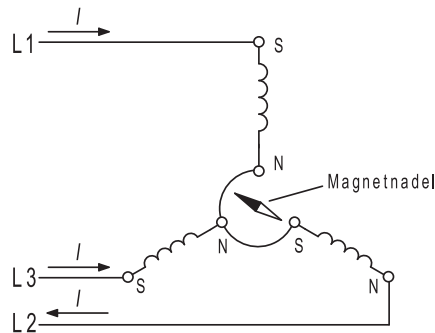


Abb. 8.1: Spulen an Dreiphasenwechselspannung

Die Spulen sind im Winkel von 120° angeordnet und im Stern zusammengeschaltet. In der Mitte der drei Spulen befindet sich eine Magnetnadel. Wird nun eine Dreiphasenwechselspannung nach Abbildung 7.1 angeschlossen, so werden die Spulen von einem Strom durchflossen, der seine Richtung ständig ändert. Dadurch entsteht an den Spulenenden ein **Magnetfeld mit wechselnden Polen**. Je nach momentaner Stromrichtung der drei Phasen ist an den Spulenenden ein resultierender Nordpol und Südpol festzustellen. Die Pole ändern ihre Lage mit der Änderung der Stromrichtung. Dadurch wird die Magnetnadel in Bewegung gesetzt. Nach einer abgelaufenen Periode hat sich die Magnetnadel um 360° gedreht.

In einem Motor befindet sich anstelle einer Magnetonadel ein sogenannter **Läufer** oder **Rotor**. Befindet sich dieser Rotor nun im rotierenden Magnetfeld, so wird in diesem ein Strom und damit auch ein Magnetfeld erzeugt. Die dadurch entstehende Kraftwirkung (vgl. Kapitel 5.2) wird in eine rotierende Bewegung des Läufers umgesetzt.

Die oben kurz dargestellten Erklärungen sind physikalisch weitaus komplizierter zu betrachten. Hierauf soll an dieser Stelle aber nicht weiter eingegangen werden. Wichtig ist die Erkenntnis, dass zur Entstehung eines Drehfelds eine Phasenverschiebung von Spannungen zur Erzeugung von rotierenden Magnetfeldern notwendig ist.

8.2 Drehzahl, Drehmoment und Leistung

Die an dem Läufer befindliche **Welle** dient der **Kraftübertragung zur Arbeitsmaschine**. Dabei dreht sich der Läufer mit der Drehzahl n (z. B. $n = 1400 \frac{1}{\text{min}}$). Die entstehende Kraft kann man sich an einem Punkt am Umfang der Welle vorstellen.

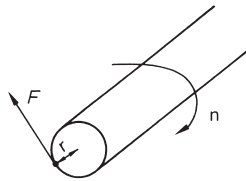


Abb. 8.2: Kraftübertragung an einer Welle

Für die mechanische Leistung gilt allgemein:

$$P = \frac{W}{t} \quad \text{mit} \quad W = F \cdot s \quad \text{wird} \quad P = F \cdot \frac{s}{t} = F \cdot v$$

Die Geschwindigkeit v des Punkts, an dem die Kraft wirksam wird, hängt von der Drehzahl n und dem zurückgelegten Weg s ab. Für eine Umdrehung ist der zurückgelegte Weg der Umfang der Welle:

$$s = 2 \cdot \pi \cdot r$$

Die dabei zurückgelegte Zeit ist:

$$t = \frac{1}{n}$$

Setzt man diese Werte in die Gleichung der Leistung ein, so erhält man:

$$P = F \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\frac{1}{n}} = F \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n \quad \text{oder} \quad P = (F \cdot r) \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

Das Produkt aus Kraft mal Weg ist das Drehmoment M .

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (8.1)$$

Da $P = \frac{U^2}{R}$ und $P = I^2 \cdot U$, gilt:

$$M \sim U^2 \quad \text{und} \quad M \sim I^2 \quad (8.2)$$

Das Drehmoment eines Motors ist dem Quadrat der Spannung und dem Quadrat des Stroms proportional.

Für den einwandfreien **Anlauf eines Verdichters** ist die Aussage später von wesentlicher Bedeutung.

Der oben hergeleitete Zusammenhang soll in einem Beispiel verdeutlicht werden.

Beispiel 1

Der elektrische Antrieb eines Verdichters hat bei einer Drehzahl $n = 1440 \frac{1}{\text{min}}$ ein Drehmoment $M = 10 \text{ Nm}$ (Nm = Newtonmeter).

Gesucht:

Welche mechanische Leistung wird an der Welle abgegeben?

Lösung:

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = 10 \text{ Nm} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1440 \frac{1}{\text{min}} = 10 \text{ Nm} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1440 \frac{1}{60\text{s}}$$

$$P = 1508 \text{ W} \approx 1,5 \text{ kW} \quad (1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws})$$

Beispiel 2

Für die Daten eines Motors wird die Drehzahl in der Einheit $\frac{1}{\text{min}}$ und das Drehmoment meistens in Nm angegeben. Die mechanische Leistung soll in der Einheit kW angegeben werden.

Gesucht:

Eine Gleichung, die für diese Einheit gültig ist.

Lösung:

$$P = M \cdot n \cdot 2 \cdot \pi \quad \text{in der Einheit} \quad \frac{\text{Nm}}{\text{min}} = \frac{\text{Ws}}{\text{min}} = \frac{\text{Ws}}{60 \text{ s}} = \frac{\text{kWs}}{1000 \cdot 60 \text{ s}}$$

$$P \quad \text{in} \quad \text{kW} \cdot \frac{1}{1000 \cdot 60} \cdot \quad \text{Daraus folgt:}$$

$$P = M \cdot n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{1000 \cdot 60} \quad \text{und} \quad \frac{2 \cdot \pi}{1000 \cdot 60} = \frac{1}{9549}$$

Allgemein gilt:

$$P = \frac{M \cdot n}{9549} \tag{8.3}$$

Wobei immer

- die Drehzahl in $\frac{1}{\text{min}}$
- das Drehmoment in Nm
- die Leistung in kW

angegeben werden müssen!

Beispiel 3

Es ist die Aufgabe aus Beispiel 1 mit der Formel (8.3) zu berechnen.

Lösung:

$$P = \frac{10 \text{ Nm} \cdot 1440 \frac{1}{\text{min}}}{9549} = 1,508 \text{ kW}$$

8.3 Der Wechselstrommotor im Kälteanlagenbau

Haupteinsatzgebiet des Wechselstrommotors in Kälteanlagen sind die Antriebe in **hermetischen Verdichtern**. Aber auch **Verdampfer- und Verflüssigerventilatormotoren** können als Wechselstrommotoren ausgeführt sein.

8.3.1 Aufbau und Betriebsverhalten

Da beim einphasigen Betrieb (Wechselstrom) einer Motorwicklung kein Drehfeld – wie in 8.1 beschrieben – auftreten kann, muss dieses mit einer **Hilfsphase** erzeugt werden. In dieser Hilfsphase muss eine zur **Hauptphase** phasenverschobene Wechselspannung entstehen. Diese beiden Phasen können dann in den Motorwicklungen ein Drehfeld entstehen lassen. Diese Hilfsphase entsteht durch eine zweite Motorwicklung die **Hilfswicklung**. Ein mit der Hilfswicklung in Reihe geschalteter Kondensator sorgt für die notwendige Phasenverschiebung (vgl. Kapitel 6.5). Nach DIN EN 60617-6 ist das Schaltzeichen eines solchen Motors genormt.

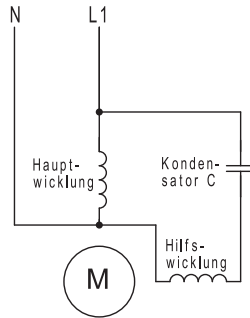


Abb. 8.3: Schaltzeichen eines Wechselstrommotors mit Hilfswicklung und Kondensator (Quelle: BFS Kälte-Klima-Technik)

Die **Hauptwicklung** hat die Aufgabe, die Kraftwirkung des magnetischen Felds auf die Motorwelle zu übertragen. Die Wicklungen werden wie folgt gekennzeichnet:

Hauptwicklung H_a : $U_1 - U_2$

Hilfswicklung H_i : $Z_1 - Z_2$

Soll die **Drehrichtung** eines Wechselstrommotors, der nach diesem Prinzip arbeitet, geändert werden, so ist der Kondensator entsprechend Abbildung 8.4 anzuschließen. Dies ist eventuell notwendig, wenn ein Ventilatormotor die falsche Drehrichtung hat.

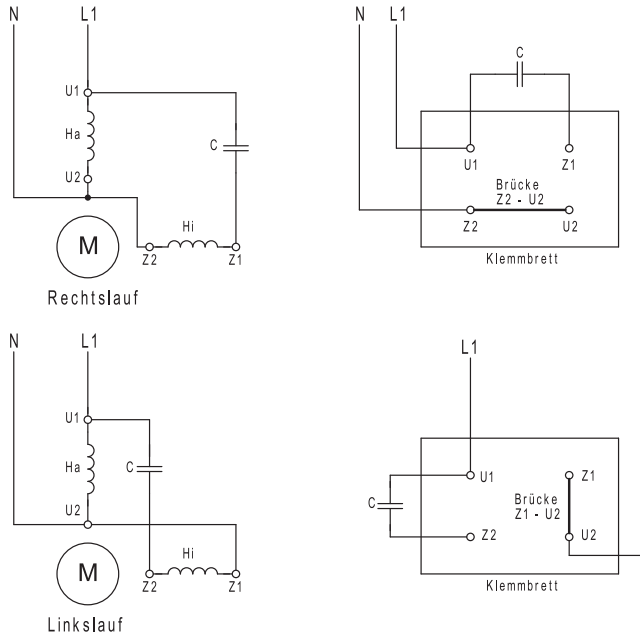


Abb. 8.4: Wechselstrommotor mit Bezeichnung der Wicklungen in Rechtslauf und Linkslauf (Quelle: BFS Kälte-Klima-Technik)