

THERMODYNAMISCHE ERMITTLUNG VON WECHSELRICHTERVERLUSTEN

G. Bühler

1 EINLEITUNG

Zur Auslegung großer elektrischer Anlagen (Kabelquerschnitte, Trafoleistungen, Kühlbedarf, Absicherung etc.) ist die Erstellung einer Leistungsbilanz erforderlich. Für diese Leistungsbilanz ist die Kenntnis sämtlicher Beiträge wie auftretende Ströme und Spannungen bzw. Verlustleistungen notwendig.

Im Folgenden wird die Messung der Verluste eines 250 kVA-Wechselrichters aus dem Kühlluftstrom beschrieben. Während Wechselrichter der Leistungsklasse um 250 kVA beim Einsatz für induktive Erwärmung wassergekühlt betrieben werden, wurde für den Wechselrichter im hier beschriebenen Fall aus Gründen einer einfachen Realisierung eine Luftkühlung gewählt. Dies erschwert die Ermittlung der Verlustleistung erheblich aufgrund komplizierter Strömungsverhältnisse im Austrittsquerschnitt und diverser weiterer Parameter, welche den Energieinhalt der Luft beeinflussen (neben Temperatur auch Dichte und Luftfeuchte). Die Bestimmung der rel. geringen Verluste aus den elektrischen Größen bei hoher Gesamtleistung ist schwer, da dies letztlich auf die Differenz großer Zahlen (aufgenommene minus abgegebener Leistung) hinausläuft. Das im Folgenden beschriebene Verfahren basiert auf in der Meteorologie gebräuchlichen empirischen Gleichungen, welche mittels Software gelöst werden können, wodurch die Zuhilfenahme von Tabellen bzw. Diagrammen entfällt. Im Anschluss wird dennoch auf ein vereinfachtes, diagrammgestütztes Verfahren hingewiesen, welches ohne Rechner auskommt und erste Anhaltswerte liefert.

2 HERLEITUNG

2.1 Enthalpieberechnung

Als einzige Messgrößen werden die Lufttemperaturen im Ein- und Austritt sowie Feuchte und Druck der Umgebungsluft benötigt. Da die Feuchte den Energieinhalt maßgeblich beeinflusst, reicht ein Haarhygrometer aufgrund seiner geringen Messgenauigkeit ($\approx 3...5\%$) nicht aus. Es bieten sich zwei genauere Verfahren an: die Taupunktbestimmung sowie die psychrometrische Methode ($\approx 1...2\%$ bei einer Temperaturauflösung von 0,1 K), welche hier aus Gründen der einfachen Handhabung gewählt wurde. Die Messung der Luftfeuchte im Austritt ist nicht erforderlich, da die Zustandsänderung bei konstantem Wasserdampfgehalt x stattfindet (im Wechselrichter wird die Luft ausschließlich erwärmt und Wasser weder zu- noch abgeführt).

Ein Aspirationspsychrometer besteht im Wesentlichen aus zwei von einem Luftstrom mit einer Mindestgeschwindigkeit von 2-3 m/s umströmten Thermometern, wobei die Temperatur des trockenen und des mit Wasser befeuchteten Thermometers verglichen wird. Die von der Luftfeuchte abhängige Temperaturdifferenz (das feuchte Thermometer ist aufgrund der Verdunstungswärme, die dem Wasser entzogen wird, kühler) ist ein Maß für die Feuchte und ist beispielsweise an einem Diagramm ablesbar (**Bild 1**). Dabei sinkt die Temperatur am feuchten Thermometer umso stärker, je trockener die Luft ist.

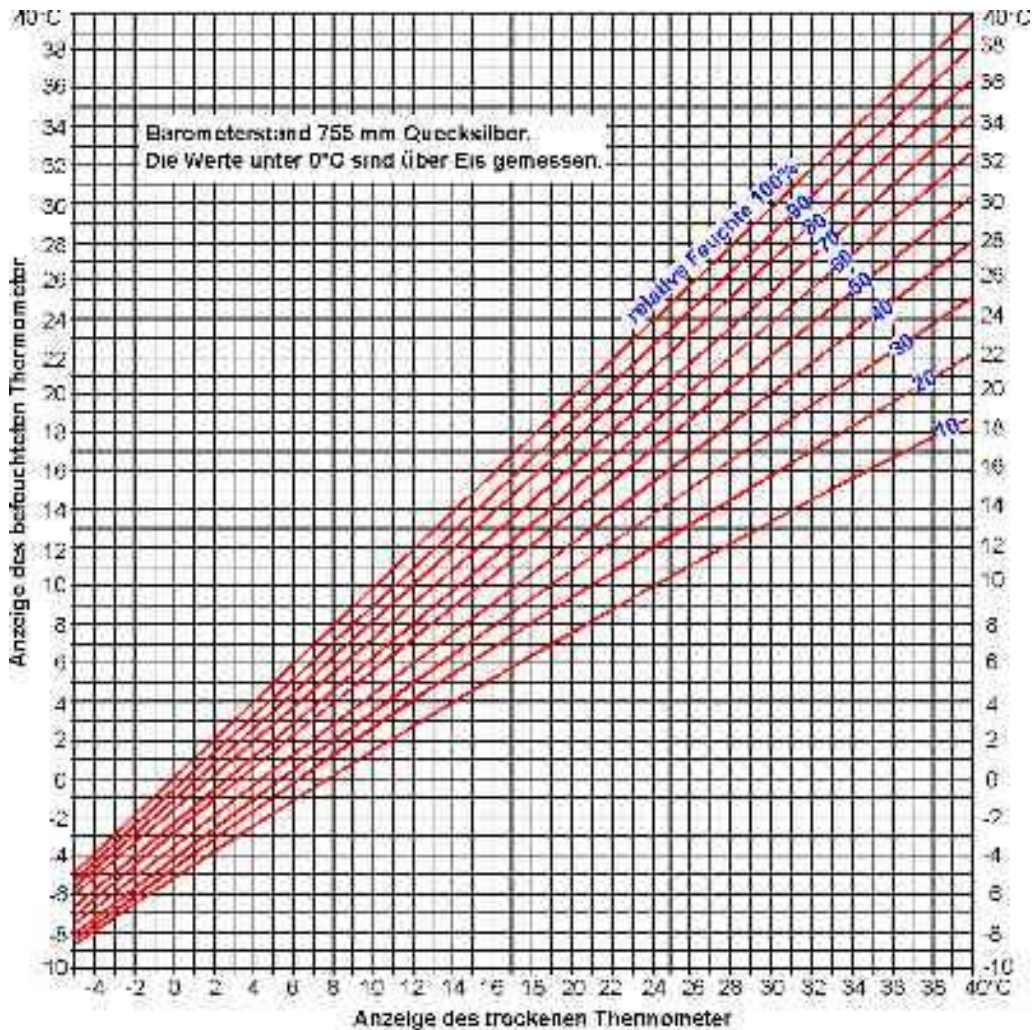


Bild 1: Luftfeuchte in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Trocken- und Feuchtthermometer bei normalem Atmosphärendruck

Bild 1 zeigt eine anschauliche Darstellung der Abhängigkeiten. Mit den gemessenen Trocken- ϑ_T [°C] und Feuchttemperaturen ϑ_F [°C] folgt für die relative Luftfeuchte r :

$$r = \frac{6,1078 \cdot e^{\frac{17,08085 \cdot \vartheta_F}{234,175 + \vartheta_F}} - 0,00066 \cdot (1 + 0,00115 \cdot \vartheta_F) \cdot 1013,246 \cdot (\vartheta_T - \vartheta_F)}{6,1078 \cdot e^{\frac{17,08085 \cdot \vartheta_T}{234,175 + \vartheta_T}}} \quad (2.1)$$

Über den Sättigungsdampfdruck p_s lässt sich der Wasserdampfpartialdruck e errechnen und daraus die Dichte ρ der Luft. Der allein von der Temperatur, nicht jedoch vom Gesamtdruck abhängige Sättigungsdampfdruck ist der bei gegebener Temperatur maximal mögliche Partialdruck des Wasserdampfes.

$$p_s = 6,1078 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot \vartheta_T}{237,3 + \vartheta_T}} \quad (2.2)$$

Der Wasserdampfpartialdruck e folgt aus:

$$e = r \cdot p_s \quad (2.3)$$

Die Dichte setzt sich additiv aus dem Anteil des Trockengases und des Dampfanteils zusammen:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (p - e)}{(\vartheta_T + 273) \cdot 760} + 0,806 \cdot \frac{273 \cdot e}{(\vartheta_T + 273) \cdot 760} \quad (2.4)$$

Das erste Glied beschreibt den Gewichtsanteil des trockenen Gases ($p - e$), das zweite denjenigen des Wasserdampfes. Der Faktor 0,806 ist der Wert der Dichte [kg/m³] von Wasserdampf im Normzustand 0 °C, 760 Torr. Für Luft mit $\rho_0 = 1,293$ kg/m³ (0 °C, 760 Torr) wird die auf p und ϑ_T bezogene Dichte:

$$\rho = \frac{0,465 \cdot p - 0,175 \cdot e}{\vartheta_T + 273} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2.5)$$

p ist in der Einheit [mmHG] = [Torr] einzusetzen und bezeichnet den statischen Luftdruck am Messpunkt. Da im hier beschriebenen Fall die Druckänderungen sehr gering sind, kann für p näherungsweise der Umgebungsluftdruck ($\hat{=}$ Barometerablesung) eingesetzt werden, ansonsten ist der Wert nach

$$p = p_{Luft} [\text{mmHG}] + \frac{p_{stat} [\text{mmWS}]}{13,6} \quad (2.6)$$

zu korrigieren. Aufgrund des sehr niedrigen statischen Druckes wurde aus Gründen der Empfindlichkeit in [mmWS] gemessen, so dass dieser noch durch die Dichte von Quecksilber zu dividieren ist, um den Wert in [Torr] zu erhalten.

Mit dem vorher bereits ermittelten Wasserdampfpartialdruck e folgt für den Wasserdampfgehalt x :

$$x = \frac{0,622 \cdot e}{p \cdot 133,28 - e} \quad (2.7)$$

Für die Enthalpie h gilt schließlich:

$$h = 1,006 \cdot \vartheta_T + x \cdot (2502 + 1,860 \cdot \vartheta_T) \quad (2.8)$$

Dieser Formalismus ist, bis auf die Feuchtemessung, auf den Zustand im Einlass sowie im Auslass anzuwenden. Die Enthalpiedifferenz Δh ist ein Maß für die der Luft zugeführte Energie. Um die Leistung zu erhalten, ist noch die Kenntnis der Ausströmgeschwindigkeit notwendig.

2.2 Mittlere Ausströmgeschwindigkeit

Der hier rechteckige Austrittsquerschnitt wurde in Teilflächen aufgeteilt, an deren Eckpunkten jeweils eine Messung der Ausströmgeschwindigkeit w bzw. des dynamischen Drucks p_{dyn} mittels Staurohr und Mikromanometer durchgeführt wurde. Die Beziehung

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (2.9)$$

muss auf der linken Seite noch um die Erdbeschleunigung g erweitert werden, wenn p_{dyn} in [mmWS $\hat{=}$ kg/m²] gemessen wird. Demnach ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit aus:

$$w = \sqrt{\frac{2gl}{\rho}} \quad (2.10)$$

l ist die mit dem Manometer gemessene Fadenlänge in [mmWS]. Für ρ ist der in Abschnitt 2.1 errechnete Wert für den Luftaustritt einzusetzen. Geht man von einer mittleren Luftdichte aus, so sind lediglich sämtliche im Messquerschnitt gewonnenen Staudrücke zu mitteln, um einen Wert für die mittlere Ausströmgeschwindigkeit zu bekommen. Im vorliegenden Fall handelte es sich um einen rechteckigen Querschnitt mit den Abmessungen 120 x 230 mm². **Bild 2** zeigt die gemessene örtliche Abhängigkeit der Ausströmgeschwindigkeit, die einen Mittelwert von $w = 11,4$ m/s liefert. Interessanterweise wurde ein ähnlicher Wert mit einem im Segelsport verwendeten Handanemometer gemessen, so dass dies für überschlägige Berechnungen sicher eine weniger aufwändige Alternative ist.

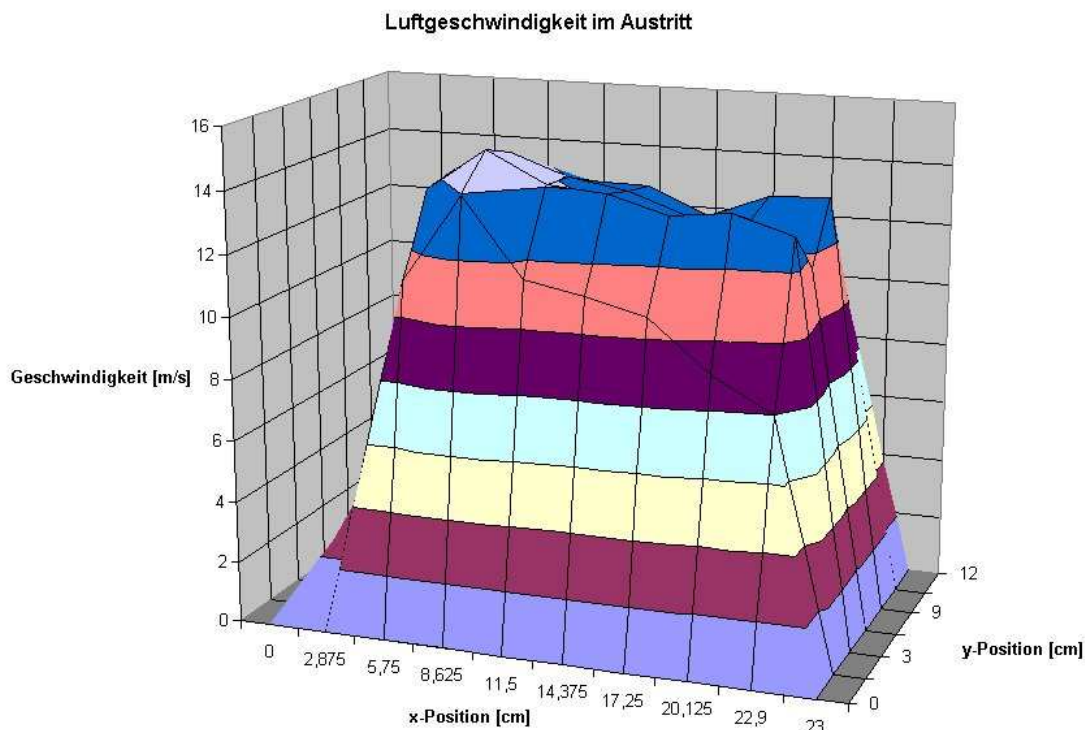


Bild 2: Geschwindigkeitsverteilung im rechteckigen Austrittsquerschnitt

In **Bild 2** gibt die x-y-Ebene die Dimensionen der Fläche wieder, während auf der z-Achse die zugehörige Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen ist. Die leichte Unsymmetrie ist darauf zurückzuführen, dass lediglich an einem von zwei Kühlkörpern gemessen wurde. Um einen höheren Temperaturhub zwischen Ein- und Auslass zu erhalten, wurde der Kanal zum nicht benötigten Kühlkörper (rechts) verschlossen.

2.3 Verlustleistung

Die dem Luftstrom zugeführte Wärmeleistung \dot{Q} (Schalt-/Durchlassverluste der IGBTs, Durchlassverluste der Freilauf- und Gleichrichterioden sowie Verluste des Lüftermotors selbst) folgt aus:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h = w \cdot A \cdot \rho \cdot \Delta h \quad (2.11)$$

Die Praxis bzw. eine Überprüfung der Methode mittels eines Heizwiderstandes als alleinige Wärmequelle zeigte eine hinreichende Genauigkeit ($\pm 10\%$) der Messmethode.

3 VEREINFACHTES VERFAHREN

Obwohl ein h,x-Diagramm auf den ersten Blick recht verwirrend aussieht, gestattet es doch eine schnelle Ermittlung der interessierenden Größen. In **Bild 3** ist beispielhaft eine Zustandsänderung von A nach B dargestellt. Dies entspricht einer reinen Erwärmung von 20 °C (y-Achse links) und 30 % rel. Feuchte (blaue, gekrümmte Linie mit rot eingekreistem Wert rechts) auf 28 °C bei konstantem Wasserdampfgehalt x . Dabei vermindert sich die Luftfeuchtigkeit auf gut 20 % rel. Feuchte. Gleichzeitig liest man eine Enthalpiedifferenz von 37 kJ/kg-31 kJ/kg = 6 kJ/kg ab (schräg verlaufende, rote Geraden).

Möchte man ohne Rechner auskommen, so kann man mit der psychrometrischen Temperaturdifferenz beispielsweise in das Diagramm **Bild 1**, oder, wenn genauere Werte erforderlich sind, in die vom Deutschen Wetterdienst herausgegebenen Aspirations-Psychrometer-Tafeln, Vieweg-Verlag gehen, um daraus die rel. Luftfeuchte im Einlass zu ermitteln. Mit dieser und der Temperaturdifferenz (trocken) zwischen Ein- und Austritt (entspr. Zustand A und B) erhält man aus dem Mollier-Diagramm unmittelbar die Enthalpiedifferenz bzw. mit der anemometrischen Handmessung der Ausströmgeschwindigkeit schließlich die Wärmeleistung.

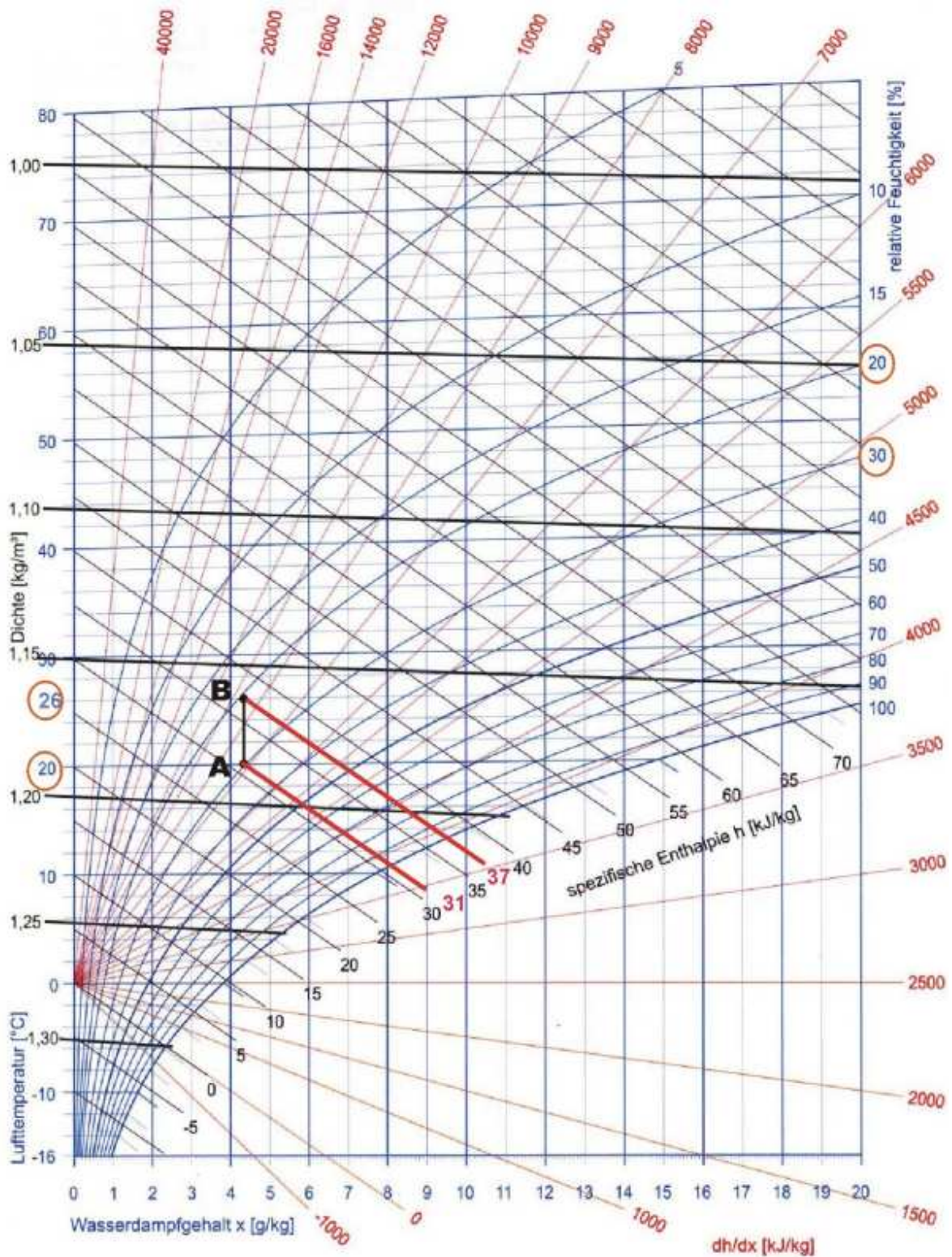


Bild 3: Mollier-Diagramm für feuchte Luft bei 1 bar