

# Erwärmung elektrischer Maschinen – Teil 2

Dieser Teil über Erwärmung elektrischer Maschinen geht auf die einzelnen Verlustarten ein und zeigt, wie diese bestimmt werden können. Anschließend wird ein einfaches thermisches Modell eines elektromechanischen Energiewandlers vorgestellt und vermittelt, wie man hierüber den zeitlichen Temperaturverlauf mathematisch ermitteln kann. Auf dieser Basis kann dann im nächsten Beitrag der Überlastungsfaktor abhängig von der Betriebsart und weiteren Parametern berechnet werden.

Prof. Dr.-Ing. Helmuth Biechl  
Werner-von-Siemens-Labor für  
Elektrische Antriebe und Mechatronik  
Fachhochschule Kempten

In Teil 1 über Erwärmung elektrischer Maschinen haben wir besprochen, dass elektromechanische Energiewandler grundsätzlich überlastbar sind, was das Drehmoment oder die mechanische Leistung anbetrifft. Entscheidend ist die Wicklungstemperatur, die einen bestimmten, von den verwendeten Isolierstoffen abhängigen Grenzwert nicht überschreiten darf, um die Lebensdauer nicht zu reduzieren. Auf dem Typenschild einer elektrischen Maschine ist die so genannte Wärmeklasse angegeben. Dieser Buchstabe gibt die höchstzulässige Dauertemperatur der Isoliermaterialien an. Heutzutage findet man überwiegend die Wärmeklasse F, die Isoliermaterialien mit einer Dauergrenztemperatur von 155°C kennzeichnet. Nun gibt es in der Praxis häufig Betriebsweisen, die Pausen enthalten, d.h. es tritt periodisch eine Belastungsphase gefolgt von einer Pausenzeit auf. Abhängig vom Last-Pausen-Verhältnis stellt sich unter Umständen während der Belastung nicht die Temperatur ein, für die die Maschine bemessen ist. Mit anderen Worten: Man kann die Maschine während der Belastungsphase stärker belasten, als es dem Dauerbetrieb entspricht. Eine Antriebsaufgabe lässt sich deshalb mit einem kleineren und damit auch preiswerteren Motor realisieren als wenn wir diese Zusammenhänge nicht berücksichtigen würden. Das Ziel ist es, für verschiedene Betriebsarten auf verhältnismäßig einfache Weise den Überlastungsfaktor berechnen zu können. In Teil 1 haben wir bereits die nachfolgende Gleichung für die Gesamtverluste  $P_V$  in einem elektromechanischen Energiewandler angegeben. Sie lautet:

$$P_V = P_{V,Fe} + P_{V,I} + P_{V,E} + P_{V,R} + P_{V,Z}$$

Wir sehen, die Gesamtverluste setzen sich aus mehreren verschiedenen Einzelverlusten zusammen. Auf die Eisenverluste  $P_{V,Fe}$ , die wiederum aus Wirbelstromverlusten  $P_{V,W}$  und Hystereseverlusten  $P_{V,Hy}$  bestehen, sind wir bereits eingegangen. An dieser Stelle sollen noch einige weitere Informationen über Elektrobleche vermittelt werden. Für drehende elektrische Maschinen kommen in der

Regel kaltgewalzte, nicht kornorientierte Elektrobleche mit 0,5mm Dicke zur Anwendung, die in EN 10106 näher spezifiziert sind. Zur Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit und damit auch der Wirbelstromverluste wird dem Eisen bis zu 4% Silizium beigemischt. Allerdings beeinflusst der Siliziumgehalt auch die Magnetisierbarkeit des Eisens, indem die so genannte magnetische Polarisation  $J$  mit zunehmendem Siliziumgehalt sinkt, d.h. die relative Permeabilität ( $\mu_r$ ) geht zurück. Die großen Hersteller bieten zahlreiche verschiedene Blechsarten an. Man kann aus Katalogen fertig gestanzte Bleche aus einer Vielzahl von möglichen Varianten auswählen, die genau die gewünschten Abmessungen und Nutformen aufweisen. So gibt es zum Beispiel mehrere tausend verschiedene Nutgeometrien, die zur Auswahl stehen. Die Hersteller dieser Bleche bieten auch ganze Läufer oder Statoren an, die sich entweder nach Norm (IEC) oder eigenen Wünschen fertigen lassen. Die Kennzeichnung der vielen verfügbaren Blechsarten erfolgt durch die vor- und nachgestellten Buchstaben M und A, der Angabe der

Ummagnetisierungsverluste bei  $\hat{B} = 1,5T$  und 50Hz sowie der Blechstärke  $d$ . Zum Beispiel gelten für die Bezeichnung M250-50A die spezifischen Verluste  $v_{15} = 2,5W/kg$  und eine Blechstärke von  $d = 0,5mm$ . Bei der Bezeichnung M800-50A sind für die spezifischen Verluste  $v_{15} = 8W/kg$  anzusetzen. Die Gesamtverlustziffer  $v_{15}$  gibt bei einem Scheitelwert von  $\hat{B} = 1,5T$  und einer Frequenz von  $f = 50Hz$  an, welche Leistung bei zeitlich sinusförmiger Magnetisierung pro kg Blechpaket in Verluste (Wärme) umgewandelt wird. Die Bestimmung der Verlustziffer erfolgt messtechnisch an genormten Blechproben im so genannten Epsteinapparat. In der Praxis werden die Eisenverluste vereinfacht nach folgender Näherungsformel bestimmt:

$$P_{V,Fe} = m_{Fe} \cdot v_{15} \cdot \left( \frac{\hat{B}}{1,5T} \right)^2 \cdot k_f \cdot k_B$$

Dabei ist  $m_{Fe}$  die Masse des vom Magnetfeld durchsetzten Eisens. Der Faktor  $k_f$  berücksichtigt mit der Näherung

$$k_f \approx \left( \frac{f}{50Hz} \right)^{1,6}$$

die unterschiedliche Abhängigkeit der Verlustanteile (Wirbelstromverluste, Hystereseverluste) von der Frequenz. Die Auswirkung des Stanzens und anderer mechanischer Bearbeitungsverfahren berücksichtigt der Faktor  $k_B$ , der bei heute üblichen Bearbeitungsmethoden in ausreichender Näherung mit  $k_B \approx 1,3$  angesetzt werden kann. Betrachten wir hierzu ein Beispiel: Ein Eisenabschnitt in einer elektrischen Maschine, der aus Elektroblechen des Typs M250-50A aufgebaut ist, wird von einem magnetischen Feld mit  $\hat{B} = 1,2T$  bei  $f = 100Hz$  durchsetzt. Wie groß sind die Eisenverluste (= Ummagnetisierungsverluste), wenn der Blechpaketabschnitt die Masse  $m_{Fe} = 20kg$  aufweist? Es gilt:

$$P_{V,Fe} = m_{Fe} \cdot v_{15} \cdot \left( \frac{\hat{B}}{1,5T} \right)^2 \cdot \left( \frac{f}{50Hz} \right)^{1,6} \cdot k_B = 20kg \cdot 2,5 \frac{W}{kg} \cdot \left( \frac{1,2T}{1,5T} \right)^2 \cdot \left( \frac{100Hz}{50Hz} \right)^{1,6} \cdot 1,3 = 126W$$

Es entstehen also in dem betrachteten Abschnitt Ummagnetisierungsverluste in der Höhe von  $P_{V,Fe} = 126W$ . Soweit zu den Eisenverlusten.

Als nächstes wenden wir uns den Stromwärmeverlusten  $P_{V,I}$  zu. Es handelt sich dabei um die in Wicklungen aufgrund des elektrischen Widerstandes auftretenden Wärmeverluste, die gelegentlich auch als Kupferverluste bezeichnet werden. Es gilt:

$$P_{V,I} = \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot R_i$$

Das Zeichen  $\Sigma$  (Sigma) stellt ein mathematisches Symbol dar und bedeutet eine Summe, d.h. die Stromwärmeverluste aller Wicklungen sind zu addieren. Die Erregerverluste  $P_{V,E}$  sind in dieser Gleichung nicht erfasst. Sie werden gesondert berücksichtigt. Bei Wechselstrom ist zu beachten, dass für den Widerstand der jeweiligen Wicklung nicht der Gleichstromwiderstand, d.h. der ohmsche Widerstand, zu verwenden ist, sondern der so genannte Wechselstromwiderstand (nicht zu verwechseln mit dem Scheinwiderstand), der den Stromverdrängungseffekt berücksichtigt. Für Drehstrommaschinen mit drei Strängen gilt für die Drehstromwicklung:

$$P_{V,I} = 3 \cdot I_{Str}^2 \cdot R_{Str}$$

$R_{Str}$  ist dabei der Strangwiderstand und  $I_{Str}$  der Strangstrom, d.h. bei Dreieckschaltung ist anzusetzen:

$$I_{Aussen} = \sqrt{3} \cdot I_{Str}$$

Mit  $I_{au\ddot{a}u\ddot{e}n}$  als Außenleiter- oder Zuleitungsstrom. Nachdem auch Bürstenübergangswiderstände auftreten, müssen wir bei Vorhandensein von Bürsten diese Verlustart auch noch berücksichtigen. Wir können sie formal den Stromwärmeverlusten der jeweiligen Wicklung, auf die der Strom übertragen wird, zuordnen. Man kann sie wie folgt ermitteln:

$$P_{V,B} = \Delta U_B \cdot I$$

Pro Bürstenpaar gilt:  $\Delta U_B = 0,2V - 0,6V$  für Metallgraphit- oder Metallkohlebürsten und  $\Delta U_B = 1V - 2V$  für Kohle- und Graphitbürsten. Die Erregerverluste  $P_{V,E}$  werden häufig separat von den anderen Verlustarten angegeben, da die Erregerwicklung in den überwiegenden Fällen nicht vom Laststrom durchflossen wird und diese Verluste deshalb zumindest näherungsweise als konstant anzusetzen sind. Es gilt:

$$P_{V,E} = I_E^2 \cdot R_E$$

Je nach Maschinentyp fließt durch die Erregerwicklung ein Gleich- oder Wechselstrom. Ganz unabhängig von der Belastung ist der Strom  $I_E$  üblicherweise auch nicht. Näheres hierüber werden wir besprechen, wenn die einzelnen elektrischen Maschinen behandelt werden. Als nächstes widmen wir uns den Reibungsverlusten  $P_{V,R}$ , die durch Luftreibung der bewegten Teile, vor allem des Ventilators, sowie durch Lager- und Bürstenreibung entstehen. Auf Berechnungsmethoden hierfür wollen wir an dieser Stelle verzichten. In der Praxis, d.h. in den Unternehmen, die elektrische Maschinen herstellen, kennt man in etwa

die Reibungsverluste, die abhängig von den geometrischen Abmessungen und der Drehzahl entstehen. Näherungsweise kann man festhalten, dass die Luftreibungsleistung etwa proportional zur dritten Potenz der Drehzahl verläuft, wohingegen die Lager- und Bürstenreibung direkt proportional zur Drehzahl ist. Bei Verwendung eines Fremdlüfters, wie es bei drehzahlgeregelten Antrieben normalerweise der Fall ist, ist die Lüfterleistung meist konstant. Sie könnte aber auch von der Maschinenleistung abhängig gemacht werden, so dass bei hohen Leistungen und damit auch hohen Verlusten mehr Kühlung zur Verfügung steht. Auf die verschiedenen Kühlverfahren werden wir an späterer Stelle noch genauer eingehen. In unserer Formel über die Gesamtverluste sind als letzter Term noch die so genannten Zusatzverluste  $P_{V,Z}$  zu erwähnen. Zusatzverluste sind Verluste, die durch die bereits angesprochenen Verlustarten nicht erfasst werden und in der Regel schwierig zu berechnen sind. Als Beispiel sind Eisenverluste in den nicht aktiven Maschinenteilen (= Maschinenteile, die nicht der Führung des Hauptflusses dienen) zu nennen, die aufgrund des Streufeldes entstehen oder auch Eisenverluste, die durch Oberwellen des Luftspaltfeldes zum Beispiel bedingt durch Nutung hervorgerufen werden. Zusatzverluste werden in der Regel auf der Basis von Erfahrungswerten pauschal mit 0,5% - 1,0% der Bemessungsleistung angesetzt. Bild 1 zeigt beispielhaft für eine 4kW-Gleichstrom-Nebenschlussmaschine (GNM), wie sich die einzelnen Anteile der Gesamtverluste in Abhängigkeit der Belastung verhalten. In Bild 2 ist ein so genanntes Sankey-Diagramm des Leistungsflusses in einer elektrischen Maschine zu sehen.

Es zeigt auf anschauliche Weise, wie bei einem Elektromotor die eingespeiste elektrische Leistung  $P_1$  durch Abzug der Einzelverluste in Stator und Rotor in die mechanische Leistung  $P_2$  übergeht. Für unsere weiteren Überlegungen, die zur Berechnung des Überlastungsfaktors führen sollen, gehen wir von einem einfachen thermischen Modell aus, das in Bild 3 dargestellt ist. Wir sehen einen homogenen Körper mit einer bestimmten Masse  $m$  und einer so genannten Wärmekapazität  $C_9$ . Diese ergibt sich zu:

$$C = m \cdot c$$

wobei  $c_9$  die spezifische Wärmekapazität darstellt, die für jeden Stoff einen in Tabellen nachzulesenden charakteristischen Wert aufweist. Für Eisen findet man

$$c = 0,456 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \text{ d.h. bei einer Masse von } m = 100\text{kg} \text{ ergibt sich eine}$$

Wärmekapazität von

$$C = c \cdot m = 0,456 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 100\text{kg} = 45,6 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

Um Eisen mit einer Masse von  $m = 100\text{kg}$  um 1K zu erwärmen, benötigt man somit 45,6kJ, das sind 0,0127kWh. Soll eine Erwärmung um 100K, also zum Beispiel von 20°C auf 120°C, erfolgen, so werden gemäß nachstehender Gleichung

$$\Delta W = C \cdot \Delta = 45,6 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \cdot 100\text{K} = 4560\text{kJ} = 1,27\text{kWh}$$

an Wärmeenergie benötigt. Weiterhin gibt unser Körper in Bild 3 aufgrund der Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  zum umgebenden Kühlmittel Wärme ab, d.h. es fließt sozusagen Wärmeenergie vom erwärmten Körper zum Kühlmittel. Man kann diesen Vorgang durch die Wärmeabgabefähigkeit  $A$  beschreiben, die besagt, wie viel Wärmeleistung (= Wärmeenergie pro Zeit) pro Kelvin Temperaturdifferenz auftritt. Die Wärmeabgabefähigkeit lässt sich wiederum aus dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  und der Berührungsfläche  $O$  gemäß

$$A = \alpha \cdot O$$

bestimmen. An der Kontaktfläche  $O$  zwischen Körper und Kühlmittel erfolgt der Wärmeübergang, der von der Art der sich berührenden Stoffe und der Strömungsgeschwindigkeit  $v_K$  des Kühlmittels abhängt. Auch hier sind genaue Berechnungen möglich, worauf wir jedoch hier verzichten wollen. Nehmen wir an, die Wärmeabgabefähigkeit  $A$  hat den Wert  $A = 40 \text{ W/K}$ , so ergibt sich bei einer Temperaturdifferenz von  $\Delta\vartheta = 100 \text{ K}$  zwischen Körper und Kühlmittel ein Wärmefluss (=Wärmeleistung)  $P_{th}$  von:

$$P_{th} = A \cdot \Delta = 40 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 100 \text{ K} = 4 \text{ kW}$$

Wir nehmen nun vereinfachend an, dass unsere elektrische Maschine durch einen homogenen Körper nachgebildet werden kann, was in der Praxis natürlich nicht exakt der Fall ist. Eine Maschine setzt sich neben dem Gehäuse, den Lagerschilden und der Welle aus Stator, Rotor und Luftspalt sowie Wicklungen zusammen und kann deshalb thermisch als nicht komplett homogen betrachtet werden. Dennoch besteht der größte Anteil der Masse aus Eisen und wir können zumindest in einer gewissen Näherung so tun als wäre unsere Maschine ein homogener Körper. Wollte man die Unterschiede berücksichtigen, so gibt es natürlich auch hierfür mathematische Modellierungsmöglichkeiten. Man kann für die einzelnen Komponenten jeweils eine Wärmekapazität und eine Wärmeabgabefähigkeit zum angrenzenden Maschinenteil ansetzen und erhält dadurch letztendlich ein thermisches Ersatzschaltbild, aus Wärmewiderständen und Wärmekapazitäten, das es erlaubt, die Temperatur in den einzelnen Maschinenteilen zu berechnen. Man kann auch die gesamte Maschine mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) in tausende kleinster Einheiten unterteilen d.h. diskretisieren\* und so die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung innerhalb der Maschine mit hoher Genauigkeit bestimmen. Hierzu ist allerdings ein erheblicher Aufwand erforderlich, obgleich man durch kommerzielle Softwarepakete bei dieser Arbeit stark unterstützt wird. Im Rahmen dieser Ausführungen soll lediglich ein einfaches Verfahren angewendet werden, das zwar nur ein genähertes Ergebnis liefert, dafür aber schnell und überschaubar zu Resultaten führt, die für unsere Zwecke ausreichend genau sind. Temperaturunterschiede innerhalb der Maschine wollen wir dadurch berücksichtigen, indem wir den Heißpunkt durch Addition von 15K zur errechneten Temperatur ermitteln. Wir wollen nun annehmen, dass das Kühlmittel eine konstante und von der Maschinentemperatur unabhängige Temperatur  $\vartheta_K$  aufweist. Wenn wir die Maschine, die zunächst die Temperatur des Kühlmittels hat, einschalten und belasten, so werden die dabei entstehenden Verluste die Maschine erwärmen.

\* Diskretisierung: Eine gegebene Aufgabe wird diskretisiert, indem z.B. eine Maschine in einfache Teilbereiche, die so genannten Elemente, in endlicher (finiter) Anzahl, zerlegt wird.

Kühlmitteltemperatur, wird immer mehr Wärme abgeführt. Dies geht so lange, bis die Maschinentemperatur so hoch ist, dass die erzeugte Verlustleistung vollständig abgegeben wird. In diesem Fall ist dann ein so genanntes thermisches Gleichgewicht (= thermischer Beharrungszustand) entstanden, d.h.:

$$P_V = A \cdot \Delta\vartheta_\infty$$

Der zeitliche Temperaturverlauf bei der Erwärmung lässt sich wie folgt mathematisch beschreiben:

$$\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta_\infty \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Dabei ist  $\Delta\vartheta(t)$  die zeitabhängige Temperaturdifferenz, die als Übertemperatur bezeichnet wird, und  $\Delta\vartheta_\infty$  die stationäre Übertemperatur, die sich - wie bereits erwähnt - nach sehr langer Zeit einstellt.  $T_\vartheta$  ist die thermische Zeitkonstante, die bei elektrischen Maschinen, je nach Größe und Kühlverfahren, im Bereich einiger 10min liegt. Es gilt:

$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{P_V}{A}$$

$$T = \frac{C}{A}$$

Je größer also bei gegebener Wärmeabgabefähigkeit  $A$  die Verlustleistung  $P_V$  ist, umso größer fällt die stationäre Übertemperatur  $\Delta\vartheta_\infty$  aus. Weiterhin sieht man, dass bei gegebener Verlustleistung  $P_V$  die stationäre Übertemperatur  $\Delta\vartheta_\infty$  umso kleiner wird, je größer die Wärmeabgabefähigkeit  $A$  ist. Diese aus den Gleichungen abgeleiteten Beziehungen passen gut mit der praktischen Erfahrung zusammen. Je besser wir kühlen (großes  $A$ ), desto geringer die Maschinentemperatur  $\Delta\vartheta_\infty$  oder anders ausgedrückt: Je größer die Verluste, desto höher die Übertemperatur  $\Delta\vartheta_\infty$ . Bild 4 zeigt graphisch den zeitlichen Verlauf der Übertemperatur  $\Delta\vartheta(t)$  des Körpers in Bild 3. Die Tangente im Ursprung des Zeitverlaufes schneidet die horizontale Asymptote  $\Delta\vartheta_\infty$  bei der thermischen Zeitkonstante  $T_\vartheta$ . Nach der Zeit  $t = T_\vartheta$  hat der Körper 63% seiner stationären Übertemperatur  $\Delta\vartheta_\infty$  erreicht. Nehmen wir an, die thermische Zeitkonstante hat den Wert  $T_\vartheta = 25\text{min}$  und die stationäre Übertemperatur ergibt sich zu  $\Delta\vartheta_\infty = 85\text{K}$ . Welche Übertemperatur stellt sich nach der Belastungszeit  $t_b = 15\text{min}$  ein? Wir setzen an:

$$\Delta\vartheta(t_b) = \Delta\vartheta_\infty \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_b}{T}} \right) = 85\text{K} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{15\text{min}}{25\text{min}}} \right) = 38,4\text{K}$$

Wenn die elektrische Maschine also zunächst die Kühlmitteltemperatur von zum Beispiel  $\vartheta_K = 20^\circ\text{C}$  aufweist, so hat sie nach der Betriebszeit von  $t_b = 15\text{min}$  die Temperatur  $\vartheta(t_b) = 58,4^\circ\text{C}$  erreicht. Erst nach sehr langer Zeit stellt sich schließlich die stationäre Maschinentemperatur von  $\vartheta_\infty = 105^\circ\text{C}$  ein. Wir sehen, dass die Maschine nach der Betriebszeit  $t_b = 15\text{min}$  noch lange nicht die Endtemperatur angenommen hat. Nehmen wir an, die Maschine wird bei periodischem Betrieb nur 15min belastet, gefolgt von einer langen Pause, bei der sie sich wieder weitgehend abkühlt. Bei diesem Betriebsfall ist die Maschine thermisch bei weitem noch nicht ausgenutzt, da die Isoliermaterialien eine deutlich höhere Temperatur verkraften (v. a. bei Wärmeklasse F oder H). Wenn wir nun während der Betriebszeit die Maschine gezielt überlasten, so können wir mehr Leistung erzeugen, als das für Dauerbetrieb erlaubt ist und sie somit optimal ausnutzen. Wichtig ist nur, dass nach einer gewissen Zeit  $t_b$  auch eine Entlastung, d.h. eine Pause, eintritt, da sonst die Temperatur so weit ansteigen würde, dass die Wicklungsisolierung zu Schaden käme. Wie groß diese Überlastung nun sein darf, werden wir im nächsten Beitrag quantitativ bestimmen.

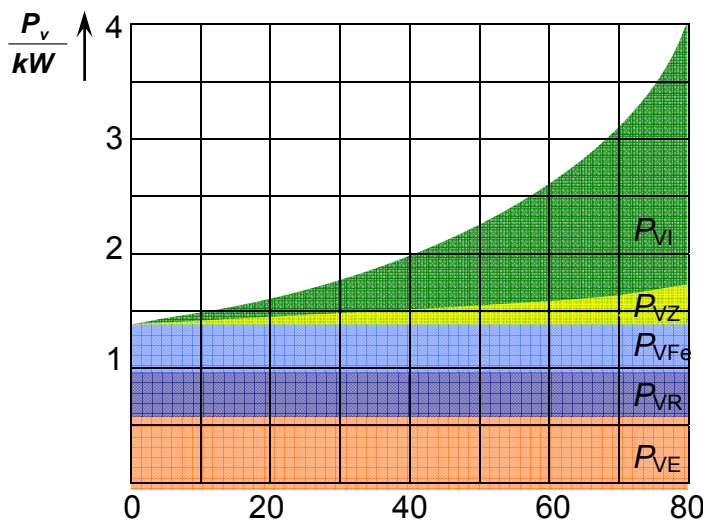


Bild 1: Darstellung der belastungsabhängigen Einzelverluste  $P_{VI}$ ,  $P_{VFe}$ ,  $P_{VE}$ ,  $P_{VR}$  und  $P_{VZ}$  einer Gleichstrom-Nebenschlussmaschine

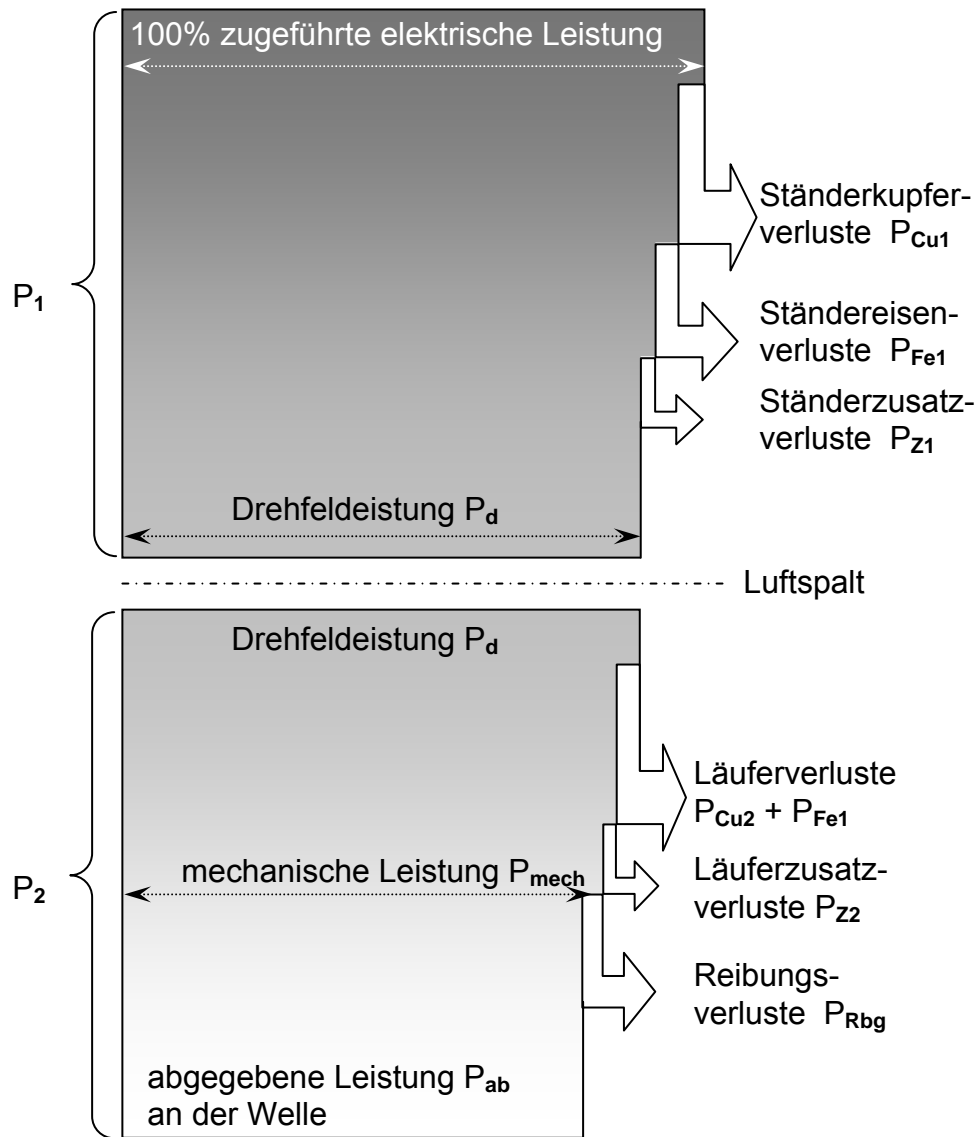


Bild 2: Darstellung des Leistungsflusses durch eine elektrische Maschine

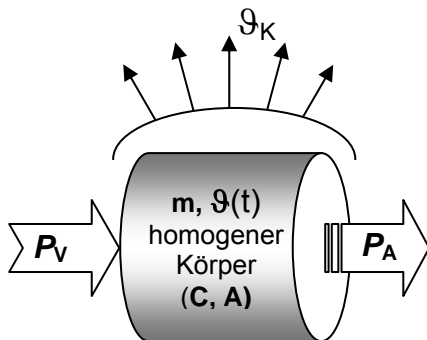


Bild 3 Vereinfachtes thermisches Modell zur Bestimmung des zeitlichen Temperaturverlaufes eines homogenen Körpers bei Wärmezuführung ( $P_V$ ) und gleichzeitiger Wärmeabgabe ( $P_A$ ),  $\Delta\Theta(t) = \Theta(t) - \Theta_K$

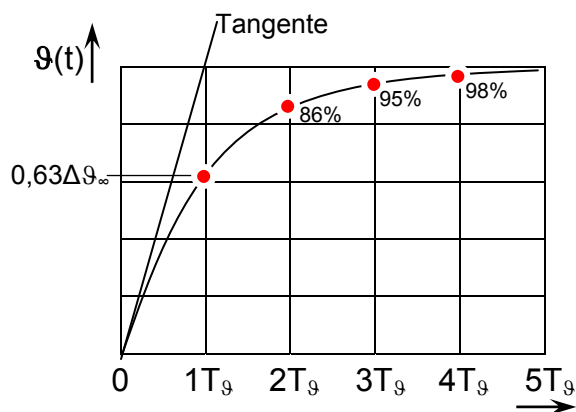


Bild 4: Zeitlicher Verlauf der Übertemperatur  $\Delta\Theta(t)$  eines homogenen Körpers bei konstanter Wärmezuführung  $P_V$  und konstanter Kühlmitteltemperatur  $\Theta_K$