Elektrische Maschinen und Antriebe

In Teil 3 über Erwärmung elektrischer Maschinen wird die Gleichung zur Berechnung des Überlastfaktors bei Kurzzeitbetrieb abgeleitet. Kurzzeitbetrieb bedeutet eine periodische Belastung des Antriebs mit dazwischen liegenden Pausen, wobei in den Betriebspausen eine vollständige Abkühlung des Elektromotors erfolgt. Es wird ein konkretes Beispiel gerechnet, bei dem die Leistung eines Normmotors zu bemessen ist.

In den beiden zurückliegenden Beiträgen über Erwärmung elektrischer Maschinen haben wir wichtige Grundlagen gelegt, um die mechanische Überlastung von elektrischen Maschinen berechnen zu können, wenn diese periodisch be- und entlastet werden. Wir wollen nun unsere Überlegungen fortsetzen. In einer gewissen Näherung lässt sich die Verlustleistung P_V wie folgt ansetzen:

$$P_V = v_i \cdot P_r \cdot \left(\frac{I}{I_r} \right)^2 + v_k \cdot P_r$$

Dabei ist P_r die Bemessungsleistung, die bei Motoren immer die an der Welle abgegebene mechanische Leistung bedeutet. Sie ist auf dem Typenschild angegeben. Der Proportionalitätsfaktor v_i gibt an, welcher Anteil der Bemessungsleistung beim Bemessungsstrom I_r auf die stromabhängigen Verluste fallen. Gilt zum Beispiel $v_i = 0{,}05$, so heißt das, dass bei Bemessungsbetrieb 5% der Bemessungsleistung als stromabhängige Verluste auftreten. Der zweite Summand in obiger Gleichung stellt die konstanten, d.h. stromunabhängigen Verluste dar. Sie werden auch als Leerlaufverluste bezeichnet. Zu ihnen zählen die Eisen- und Reibungsverluste sowie die Erregerverluste. Der Faktor v_k gibt an, welcher Anteil der Bemessungsleistung als konstante Verluste auftreten. Wir können nun schreiben:

$$\frac{P_v}{P_{v,r}} = \frac{v_i \cdot P_r \cdot \left(\frac{I}{I_r} \right)^2 + v_k \cdot P_r}{v_i \cdot P_r + v_k \cdot P_r}$$

Für den Bemessungsbetrieb gilt $I = I_r$, weshalb sich obige Gleichung ergibt. Wir wollen nun einige Umformungen vornehmen. Als erstes dividieren wir Zähler und Nenner durch v_i und P_r. Wir erhalten dann:

$$\frac{P_v}{P_{v,r}} = \frac{\left(\frac{I}{I_r} \right)^2 + \frac{v_k}{v_i}}{1 + \frac{v_k}{v_i}}$$

Als nächstes führen wir die nachfolgenden Abkürzungen ein:

$$i = \frac{I}{I_r}$$

$$v = \frac{v_k}{v_i}$$

Es ergibt sich dann:

$$\frac{P_v}{P_{v,r}} = \frac{i^2 + v}{1 + v}$$

Die Größe i stellt den so genannten Stromüberlastungsfaktor dar. Zum Beispiel bedeutet i = 1,3 , dass wir die elektrische Maschine mit $I = 1{,}3\ I_r$, d.h. mit einem um 30% höheren Strom als dem Bemessungsstrom I_r betreiben. Diese Größe wollen wir letztendlich für verschiedene Belastungsprofile berechnen. Der Faktor v steht für die Verlustaufteilung, d.h. das Verhältnis aus v_k und v_i. Zum Beispiel gilt für v = 0,6, dass $v_k = 0{,}6 v_i$ anzusetzen ist. Mit anderen Worten: Im Bemessungsbetrieb sind die konstanten Verluste 60% der stromabhängigen Verluste. Die Verlustaufteilung v erhält man entweder über Messungen im Prüffeld oder man erfragt sie beim Hersteller. Angegeben wird die Verlustaufteilung weder auf dem Typenschild noch in einem gesonderten Datenblatt. Nun erinnern wir uns an ein Ergebnis, das in Teil 2 über Erwärmung elektrischer Maschinen genannt wurde. Es lautet:

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

Wir haben diese Beziehung bereits diskutiert. Die stationäre Übertemperatur $\Delta\vartheta_\infty$ verhält sich bei konstanter Wärmeabgabefähigkeit A proportional zur Verlustleistung P_v. Daraus folgt nun:

$$\frac{P_v}{P_{v,r}} = \frac{i^2 + v}{1 + v} = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta}$$

Im Bemessungsbetrieb stellt sich die stationäre Übertemperatur $\Delta\vartheta_{\infty,r}$ ein. Bei Dauerbetrieb, der nicht den Bemessungsstrom I_r zur Folge hat sondern I, d.h. bei Teil- oder Überlast, ergibt sich eine von $\Delta\vartheta_{\infty,r}$ abweichende stationäre Übertemperatur, nämlich $\Delta\vartheta_\infty$. Wir betrachten nun als erstes den so genannten Kurzzeitbetrieb. Es gibt verschiedene Betriebsarten, d.h. genormte Belastungsprofile, auf die wir im Einzelnen noch eingehen werden. Sie sind alle mit einem Kurzzeichen versehen. S1 bedeutet Dauerbetrieb. Das heißt: Betrieb mit konstanter Belastung, die so lange ansteht, dass die Maschine den thermischen Beharrungszustand erreicht. Früher war übrigens das Kurzzeichen für Dauerbetrieb DB. Gelegentlich sieht man es noch auf dem Typenschild älterer Maschinen. Das Kurzzeichen der Betriebsart wird immer auf dem Typenschild vermerkt. Das Kurzzeichen S2 kennzeichnet den Kurzzeitbetrieb, der wie folgt definiert ist: Betrieb mit konstanter Belastung, dessen Dauer nicht ausreicht, den thermischen Beharrungszustand zu erreichen, und einer nachfolgenden Zeit im Stillstand mit stromlosen Wicklungen von solcher Dauer, dass die wieder abgesunkenen Maschinentemperaturen nur noch weniger als 2K von der Kühlmitteltemperatur abweichen. Die entsprechende Kennzeichnung ist S2, ergänzt durch eine Angabe der Betriebsdauer, zum Beispiel S2-30min. Mit einfacheren Worten heißt das: Auf eine Betriebszeit t_b, die nicht so groß ist, dass die Maschine ihre stationäre Übertemperatur $\Delta\vartheta_\infty$ erreicht, folgt eine Pause, in der sie praktisch vollständig abkühlt, d.h. die Kühlmitteltemperatur annimmt. Nach der Pausenzeit t_p folgt dann wieder die Belastungsphase, so dass sich ein periodischer Betrieb ergibt. Bild 1 zeigt in einem Diagramm die Verläufe der normierten Verlustleistung $P_v/P_{v,r}$ sowie der normierten Übertemperatur $\Delta\vartheta/\Delta\vartheta_{\infty,r}$. Wir sehen deutlich, dass die normierte Übertemperatur nach der Belastungszeit t_b noch nicht den Wert 1 angenommen hat. Das bedeutet: Die Betriebszeit (= Belastungszeit) war nicht lange genug, so dass die Maschinentemperatur den stationären Endwert erreicht hätte. Im Anschluss an die Betriebsphase folgt eine Pause, d.h. die Maschine wird abgestellt. Diese Pause ist so lange, dass eine vollständige Abkühlung auf die Kühlmitteltemperatur erfolgt. Danach beginnt das Spiel von vorne. Wir sehen auch, dass am Ende der Betriebszeit die Maschine bei weitem noch nicht die erlaubte Temperatur erreicht hat. Hierzu müsste sie deutlich länger betrieben werden. Die gestrichelte grüne Linie gibt an, wie die Temperatur bei Dauerbetrieb, d.h. S1, verlaufen würde. An diesen Verhältnissen sehen wir nun, dass wir die Maschine während der Betriebszeit viel höher hätten belasten können. Am Ende der Belastungszeit darf die Maschine die stationäre Übertemperatur $\Delta\vartheta_{\infty,r}$ erreichen. Die verwendeten Isoliermaterialien sind hierfür ausgelegt. Allerdings muss die Überlast nach der Zeit t_b beendet sein. Ansonsten würde ja die Maschinentemperatur über den erlaubten Wert ansteigen und zu den bereits besprochenen Wicklungsschäden führen bzw. eine vorzeitige Alterung bewirken. Es ist somit zulässig:

$$\Delta\vartheta(t_b) = \Delta\vartheta_{\infty,r} = \Delta\vartheta_{\infty,ü}\left(1 - e^{-\frac{t_b}{T_b}}\right)$$

Bei Überlast verläuft die Übertemperatur nämlich nach folgender Gleichung:

$$\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta_{\infty,ü}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_b}}\right)$$

Dabei stellt $\Delta\vartheta_{\infty,ü}$ die fiktive stationäre Übertemperatur bei Überlast dar, die- wie soeben erwähnt- nicht zulässig ist und nur theoretisch erreicht werden kann. T_b ist die thermische Zeitkonstante (Wärmezeitkonstante), die während des Betriebes gilt. Aus der vorletzten Gleichung folgt nun durch Umstellung:

$$\frac{\Delta\vartheta_{\infty,ü}}{\Delta\vartheta_{\infty,r}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_b}{T_b}}}$$

Weiterhin haben wir vorhin gezeigt, dass gilt:

$$\frac{\Delta\vartheta_{\infty,ü}}{\Delta\vartheta_{\infty,r}} = \frac{i^2 + v}{1 + v}$$

Somit erhalten wir:

$$\frac{i^2 + v}{1 + v} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_b}{T_b}}}$$

Wir lösen nun nach dem Stromüberlastungsfaktor i auf. Es ergibt sich schließlich:

$$i = \frac{I_ü}{I_r} = \sqrt{\frac{1+v}{1-e^{-\frac{t_b}{T_b}}} - v}$$

Dabei ist $I_ü$ der Strom bei Überlast. Diese Gleichung stellt ein sehr wichtiges Ergebnis dar. Sie erlaubt es, auszurechnen, mit welchem Strom $I_ü$ wir einen Elektromotor bei Kurzzeitbetrieb belasten dürfen. Weiterhin folgt daraus die abgegebene Leistung, da näherungsweise angesetzt werden kann:

$$P_ü = P_r \cdot i$$

Wir wollen hierzu gleich ein konkretes Beispiel betrachten. Wie hoch sind der erlaubte Stromüberlastungsfaktor i, der Überlaststrom $I_ü$ sowie die Überlastleistung $P_ü$ bei den nachfolgenden Daten eines elektromechanischen Energiewandlers: P_r = 22kW (S1), I_r = 40A, T_b = 30min, t_b = 15min, v = 0,6. Wir setzen an:

$$i = \sqrt{\frac{1+v}{1-e^{-\frac{t_b}{T_b}}} - v} = \sqrt{\frac{1+0{,}6}{1-e^{-\frac{15\text{min}}{30\text{min}}}} - 0{,}6} = 1{,}86$$

Damit erhalten wir:

$$I_ü = i \cdot I_r = 1{,}86 \cdot 40\text{A} = 74{,}4\text{A}$$

$$P_ü = i \cdot P_r = 1{,}86 \cdot 22\text{kW} = 40{,}9\text{kW}$$

Nachdem wir bei der Herleitung des Überlastfaktors ein einfaches thermisches Modell zugrunde gelegt haben, ist es ratsam, die oben berechneten Werte großzügig zur sicheren Seite abzurunden. Wir ziehen deshalb in der Praxis 10% von den berechneten Werten ab. Es ergibt sich dann:

$$I_ü \approx 67\text{A}$$

$$P_ü \approx 37\text{kW}$$

Wir können also bei dem gegebenen Belastungsprofil S2-15min, d.h. dem Kurzzeitbetrieb mit t_b = 15min, die Maschine mit $I_ü$ = 67A statt mit I_r = 40A belasten oder -was die mechanische Leistung betrifft- mit $P_ü$ = 37kW statt mit P_r = 22kW. Dies stellt eine erhebliche Veränderung dar. Die Frage lässt sich jedoch auch wie folgt stellen: Während der Belastungszeit ist eine mechanische Leistung $P_ü$ = 22kW erforderlich. Wie groß ist dann die Motorleistung P_r bei S1 zu bemessen, d.h. welcher Motor ist zu verwenden? Dazu rechnen wir:

$$P_r = \frac{P_ü}{i} = \frac{22\text{kW}}{1{,}86} = 11{,}8\text{kW}$$

Aus Sicherheitsgründen schlagen wir noch 10% drauf und erhalten:

$$P_r \approx 1{,}1 \cdot 11{,}8\text{kW} = 13\text{kW}$$

Wir wählen einen Normmotor mit $P_r = 15\text{kW}$ bei S1 aus (Normreihe: ...7,5kW; 11kW; 15kW; 18,5kW; 22kW; 30kW; 37kW; 45kW; ...). Wir können also durch Berücksichtigung der Überlastfähigkeit einen um zwei Stufen kleineren Normmotor auswählen und erfüllen unsere Antriebsaufgabe somit mit minimalem Aufwand. Zur Verdeutlichung seien die Gewichte von Drehstrommotoren mit Käfigläufer genannt, die eine Drehzahl von $n = 3000\text{min}^{-1}$ aufweisen:

$$P_r = 22\text{kW}: m = 176\text{kg}$$

$$P_r = 15\text{kW}: m = 130\text{kg}$$

Wir haben somit $\Delta m = 46\text{kg}$ Gewichtseinsparung bewirkt, das entspricht einer Reduzierung um 26%. Selbstverständlich ist ein 15kW-Motor auch deutlich kleiner und preiswerter als ein 22kW-Motor. Zum Schluss wollen wir noch ein mathematisches Kriterium angeben, das es uns erleichtert, festzustellen, ob Kurzzeitbetrieb vorliegt. Wir können von S2 ausgehen, wenn gilt:

$$\frac{t_b}{T_b} < 3 \quad \text{und} \quad \frac{t_p}{T_p} > 3$$

T_b ist die thermische Zeitkonstante während der Betriebszeit t_b. T_p ist dann sinngemäß die thermische Zeitkonstante während der Pausenzeit t_p. Die beiden Zeitkonstanten können sich unterscheiden, da es in der Praxis vorkommt, dass zum Beispiel während des Betriebes der Lüfter für Kühlung sorgt und während der Pause nicht. Das ist bei Eigenkühlung (Lüfter sitzt auf der Welle) der Fall. Schließlich gilt:

$$T_\vartheta = \frac{C_\vartheta}{A}$$

Wenn sich die Wärmeabgabefähigkeit A ändert, so ändert sich auch die thermische Zeitkonstante T_ϑ. Bei Fremdkühlung (separater Lüfter, der unabhängig von der Motordrehzahl läuft) sind die beiden Zeitkonstanten T_b und T_p gleich groß. In Teil 4 über Erwärmung elektrischer Maschinen wollen wir noch auf den so genannten Aussetzbetrieb, der mit S3 abgekürzt wird, eingehen. Dieser ist dadurch charakterisiert, dass die Pause nicht lange genug ist, um die Maschine vollständig abzukühlen. Es stellt sich dann eine stationäre Schwingung der Temperatur ein, die zwischen einem unteren und einem oberen Grenzwert hin und her pendelt (Bild 2). Nachdem der Aussetzbetrieb- ebenso wie der Kurzzeitbetrieb- in der Praxis häufig vorkommt, wollen wir auch hier Berechnungen zum Stromüberlastungsfaktor anstellen. Die weiteren Betriebsarten sollen jedoch nur noch beschrieben werden, ohne konkrete Berechnungen durchzuführen. Mit der Beschreibung der Kühlarten werden wir diese Thematik dann beenden.

Aufgabe:

Gegeben sei ein elektrischer Antrieb mit periodischer Belastung, bei der während des Betriebes mit $t_b = 20\text{min}$ eine mechanische Leistung von $P_{mech} = 35\text{kW}$ benötigt wird. Die anschließende Pause beträgt $t_p = 120\text{min}$. Es gelten die folgenden weiteren Daten: $T_b = 20\text{min}$,

T_p = 35min, v = 0,5. Mit welcher Dauerleistung P_r ist der Elektromotor aus einer Normreihe auszuwählen?

Lösung:

$$\frac{t_b}{T_b} = \frac{20\text{min}}{20\text{min}} = 1 < 3$$

$$\frac{t_p}{T_p} = \frac{120\text{min}}{35\text{min}} = 3{,}43 > 3$$

also S2 (Kurzzeitbetrieb)

$$i = \sqrt{\frac{1+v}{1-e^{-\frac{t_b}{T_b}}} - v} = \sqrt{\frac{1+0{,}5}{1-e^{-\frac{20\text{min}}{20\text{min}}}} - 0{,}5} = 1{,}37$$

$$P_r = \frac{P_{mech}}{i} = \frac{35\text{kW}}{1{,}37} = 25{,}5\text{kW}$$

+10% Sicherheitsmarge ergibt: $P_r \approx 28{,}1$kW $\rightarrow$ $P_r = 30$kW (Normwert)

Es kann somit ein 30kW-Normmotor eingesetzt werden anstatt eines 37kW-Normmotors.

Im vierten Teil über Erwärmung elektrischer Maschinen wird ausführlich auf den periodischen Aussetzbetrieb eingegangen. Dieser ist dadurch charakterisiert, dass die Pausenzeit so kurz ist, dass eine vollständige Abkühlung nicht mehr erfolgen kann. Durch ein konkretes Rechenbeispiel wird gezeigt, wie der Überlastungsfaktor in diesem Betriebsfall zu berechnen ist. Erläuterungen zu den verschiedenen Kühlverfahren schließen diese Thematik ab.

Nachdem wir uns in Teil 3 über Erwärmung elektrischer Maschinen ausführlich mit dem Kurzzeitbetrieb befasst haben, wollen wir nun den so genannten periodischen Aussetzbetrieb behandeln. Diese Betriebsart, die das Kurzzeichen S3 erhält, kommt in der Praxis- ebenso wie der Kurzzeitbetrieb- relativ häufig vor. Der Aussetzbetrieb ist dadurch charakterisiert, dass einerseits die Betriebszeit t_b nicht so lange ist, dass es zum thermischen Beharrungszustand kommt, andererseits ist die Pausenzeit t_p so kurz, dass sich die Maschine- im Gegensatz zum Kurzzeitbetrieb- nicht vollständig abkühlen kann. Bild 1 zeigt die normierten Zeitverläufe der Verlustleistung sowie der Übertemperatur in Abhängigkeit der Zeit. Man erkennt, dass die Temperatur eine Schwingung ausführt, die im Laufe der Zeit aufklingt und sich schließlich zwischen den beiden Grenzwerten $\Delta\vartheta_1$ und $\Delta\vartheta_2$ einpendelt. Betrachten wir zunächst den Zeitpunkt t = 0. Der elektromechanische Wandler, der zunächst nach einer längeren Stillstandszeit die Kühlmitteltemperatur (z.B. Umgebungstemperatur bei Luftkühlung) angenommen hat, wird nun eingeschaltet und sogleich belastet, d.h. der Motor mechanisch, indem er mechanische Leistung abgibt und der Generator durch Abgabe elektrischer Leistung. Hierdurch entstehen Verluste, die zu einem Temperaturanstieg der Maschine führen. Die dabei auftretende Differenz der Maschinentemperatur zur Kühlmitteltemperatur, d.h. die auftretende Übertemperatur, bewirkt gleichzeitig eine gewisse Abgabe von Wärme. Nach der Betriebszeit t_b wird die Maschine abgeschaltet, obgleich die stationäre Übertemperatur, also der thermische Gleichgewichtszustand, noch nicht erreicht ist. Die nun folgende Pausenzeit führt zu einer Abkühlung mit der thermischen Pausenzeitkonstanten T_p gemäß nachfolgender Beziehung:

$$\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta(t_b)\cdot e^{-\frac{(t-t_b)}{T_p}}$$

Allerdings ist- wie bereits erwähnt- diese Pausenzeit nicht lange genug, als dass eine vollständige Abkühlung während dieser Phase erfolgen könnte. Mit anderen Worten: Bei der zweiten Belastungszeit ist die Anfangstemperatur, d.h. der Temperaturstartwert, nun höher als bei der ersten Belastungszeit. Somit ergibt sich am Ende der zweiten Belastungszeit auch eine höhere Temperatur als am Ende der ersten Belastungszeit. Nach einiger Zeit stellt sich somit eine stationäre Schwingung der Übertemperatur $\Delta\vartheta$ ein, die zwischen dem unteren Grenzwert $\Delta\vartheta_1$ und dem oberen Grenzwert $\Delta\vartheta_2$ hin und her pendelt. Bevor wir nun versuchen wollen, diesen Betriebsfall mathematisch zu untersuchen und auch hier den Stromüberlastungsfaktor i bestimmen, sei noch die genaue Definition des periodischen Aussetzbetriebes nach der Norm IEC 60034-1 des internationalen elektrotechnischen Komitees genannt. Man versteht darunter folgendes: “Ein Betrieb, der sich aus einer Folge identischer Spiele zusammensetzt, von denen jedes eine Betriebszeit t_b mit konstanter Belastung und eine Stillstandszeit

(=Pausenzeit) t_p mit stromlosen Wicklungen umfasst, wobei der Anlaufstrom die Übertemperatur nicht merklich beeinflusst. Die Kennzeichnung ist S3, ergänzt durch die relative Einschaltdauer, zum Beispiel S3-25%“. Man geht in der Praxis vom periodischen Aussetzbetrieb aus, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$\frac{t_b}{T_b} < 3 \quad \text{und} \quad \frac{t_p}{T_p} < 3$$

Betrachten wir nun den thermisch eingeschwungenen Zustand, d.h. die stationäre Schwingung der Übertemperatur $\Delta\vartheta(t)$. Zum Zeitpunkt t_1 gilt:

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_2 \cdot e^{-\frac{t_p}{T_p}} \qquad (1)$$

Für den Zeitpunkt t_2 lässt sich ansetzen:

$$\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_1 + (\Delta\vartheta_{\infty,ü} - \Delta\vartheta_1)\cdot\left(1 - e^{-\frac{t_b}{T_b}}\right) \qquad (2)$$

Der Index ü steht hierbei, wie schon in den zurückliegenden Beiträgen, für Überlast. Wir können die Gleichungen (1) und (2) sehr einfach auf Plausibilität hin überprüfen. Betrachten wir hierzu Gleichung (1), die den Abkühlvorgang beschreibt. Nehmen wir zunächst an, die Pausenzeit sei $t_p = 0$. Damit ergibt sich mathematisch:

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_2 \cdot e^{-\frac{0}{T_p}} = \Delta\vartheta_2$$

Das Ergebnis bedeutet, dass keine Abkühlung erfolgt ist, was nicht anders zu erwarten war. Als Nächstes nehmen wir $t_p \rightarrow \infty$ an, d.h. eine unendlich lange Pausenzeit. Zu erwarten ist dann als Ergebnis $\Delta\vartheta_2 = 0$, was einer vollständigen Abkühlung auf die Kühlmitteltemperatur entspricht. Wir setzen nun unsere Gleichung an:

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_2 \cdot e^{-\frac{\infty}{T_p}} = 0$$

Das mathematische Ergebnis stimmt offensichtlich mit der praktischen Erfahrung überein. Als Nächstes wollen wir Gleichung (2) näher unter die Lupe nehmen. Wir nehmen hierzu $t_b \rightarrow \infty$ an, d.h. eine unendlich lange Betriebszeit. Die Übertemperatur müsste sich dann -entsprechend unserer Anschauung- dem Wert $\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_{\infty,ü}$ annähern. Wir setzen hierzu an:

$$\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_1 + (\Delta\vartheta_{\infty,ü} - \Delta\vartheta_1)\cdot\left(1 - e^{-\frac{\infty}{T_b}}\right) \Rightarrow$$

$$\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_1 + (\Delta\vartheta_{\infty,ü} - \Delta\vartheta_1)\cdot(1 - 0) = \Delta\vartheta_{\infty,ü}$$

Die Gleichung liefert somit das erwartete Ergebnis. Um nun unseren Stromüberlastungsfaktor i zu erhalten, setzen wir Gleichung (1) in Gleichung (2) ein. Es ergibt sich dann:

$$\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_2 \cdot e^{-\frac{t_p}{T_p}} + \left(\Delta\vartheta_{\infty,ü} - \Delta\vartheta_2 \cdot e^{-\frac{t_p}{T_p}} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_b}{T_b}} \right)$$

Durch Umstellen finden wir nun:

$$\frac{\Delta\vartheta_{\infty,ü}}{\Delta\vartheta_2} = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_p}{T_p} + \frac{t_b}{T_b}\right)}}{1 - e^{-\frac{t_b}{T_b}}}$$

Wir wissen, dass als thermisch zulässige Belastung $\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_{\infty,r}$ auftreten darf, d.h. am Ende der Belastungszeit darf die Übertemperatur den Wert $\Delta\vartheta_{\infty,r}$ annehmen. Dafür ist der elektromechanische Wandler schließlich ausgelegt worden. Wir erhalten somit:

$$\frac{\Delta\vartheta_{\infty,ü}}{\Delta\vartheta_{\infty,r}} = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_p}{T_p} + \frac{t_b}{T_b}\right)}}{1 - e^{-\frac{t_b}{T_b}}} = \frac{i^2 + v}{1 + v}$$

Auf den Zusammenhang

$$\frac{\Delta\vartheta_{\infty,ü}}{\Delta\vartheta_{\infty,r}} = \frac{i^2 + v}{1 + v}$$

sind wir in Teil 3 über Erwärmung elektrischer Maschinen ausführlich eingegangen. Wir können nun nach dem Stromüberlastungsfaktor i auflösen und erhalten als Endergebnis:

$$i = \frac{I_ü}{I_r} = \sqrt{(1 + v) \cdot \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_p}{T_p} + \frac{t_b}{T_b}\right)}}{1 - e^{-\frac{t_b}{T_b}}} - v}$$

Diese Gleichung beschreibt die Stromüberlastbarkeit bei periodischem Aussetzbetrieb, d.h. bei S3. Betrachten wir hierzu ein konkretes Beispiel für einen Elektromotor bei dem folgende Parameter gelten sollen: v = 0,7; t_b = 12min; T_b =22min; t_p = 25min; T_p = 22min; I_r = 42A; P_r =22kW. Wie groß sind nun der Stromüberlastungsfaktor i, der Überlaststrom $I_ü$ sowie die mechanische Überlastleistung $P_ü$? Wir setzen hierzu in obige Gleichung ein und finden:

$$i = \frac{I_ü}{I_r} = \sqrt{(1 + 0{,}7) \cdot \frac{1 - e^{-\left(\frac{25\,\text{min}}{22\,\text{min}} + \frac{12\,\text{min}}{22\,\text{min}}\right)}}{1 - e^{-\frac{12\,\text{min}}{22\,\text{min}}}} - 0{,}7} = 1{,}61$$

$$I_{\ddot{u}} = \cdot I_r = 1{,}61 \cdot 42\mathrm{A} = 67{,}6\mathrm{A}$$

$$P_{\ddot{u}} = \cdot P_r = 1{,}61 \cdot 22\mathrm{kW} = 35{,}4\mathrm{kW}$$

Wie bereits beim Kurzzeitbetrieb demonstriert, wollen wir auch hier aus Sicherheitsgründen 10% von den berechneten Werten abziehen. Es ergibt sich dann:

$$I_{\ddot{u}} \approx 60{,}8\mathrm{A}$$
$$P_{\ddot{u}} \approx 32\mathrm{kW}$$

Unser Motor mit der Bemessungsleistung P_r = 22kW kann also bei periodischem Aussetzbetrieb mit $P_{\ddot{u}}$ = 32kW belastet werden. Würde man den Effekt der Überlastbarkeit nicht berücksichtigen, so wäre hierfür ein um zwei Stufen größerer Normmotor, nämlich mit P_r = 37kW, erforderlich, der entsprechend größer, schwerer und teurer wäre. Wie bereits in Teil 3 über Erwärmung elektrischer Maschinen ausgeführt, sind es in der Regel betriebswirtschaftliche Gründe, die es notwendig machen, elektrische Maschinen zu überlasten. Es können aber auch noch Gewichts- und Abmessungsaspekte hinzukommen. An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass die Gleichung

$$P_{\ddot{u}} = \cdot P_r$$

nur in einer gewissen Näherung Gültigkeit besitzt, da sich der Wirkungsgrad η bei Überlast in der Regel geringfügig verschlechtert, d.h. $\eta_r > \eta_{\ddot{u}}$. Bei Drehstrommotoren kommt noch hinzu, dass auch der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ sinkt. Diese Abhängigkeiten kann man beim Hersteller erfragen, wenn sie nicht den jeweiligen Katalogen entnehmbar sind. Bild 2 zeigt den ungefähren Verlauf der normierten Leistung in Abhängigkeit des Stromüberlastungsfaktors i. Durch den pauschalen Abzug von 10% haben wir diesem Sachverhalt in unserem Beispiel näherungsweise Rechnung getragen. Ein noch größerer Sicherheitsfaktor kann allerdings nicht schaden. Wir haben nun die Betriebsarten S1, S2 und S3 kennen gelernt. Darüber hinaus gibt es noch S4 - S10. Hierbei sind zum Beispiel noch die erhöhten Verluste beim Anlauf oder bei der elektrischen Bremsung berücksichtigt. S8 charakterisiert den ununterbrochenen periodischen Betrieb (d.h. keine Pausen), mit Last- und evtl. auch Drehzahländerungen, der in Bild 3 dargestellt ist. Details hierzu können den erwähnten Normen aber auch einschlägigen Büchern entnommen werden. Es würde den beabsichtigten Umfang dieser Serie sprengen, hierauf näher einzugehen. Bei der Bemessung elektromechanischer Wandler wird üblicherweise von einer Kühlmitteltemperatur von ϑ_K = 40°C ausgegangen. Fällt diese im realen Betrieb geringer aus, so entsteht hierdurch eine thermische Reserve, die ebenfalls eine erhöhte Leistungsabgabe erlaubt. Bild 4 zeigt prinzipiell die Überlastbarkeit in Abhängigkeit der Kühlmitteltemperatur. Allerdings ist der genaue Zusammenhang vom Typ und der Größe des elektromechanischen Wandlers abhängig, so dass hier der Hersteller zu Rate gezogen werden muss. Abschließend sei zur Überlastung von elektrischen Maschinen noch folgendes angemerkt: Es sollte kein Stromüberlastungsfaktor mit $i > 2$ zum Einsatz kommen, auch wenn sich ein entsprechender Rechenwert ergibt. In der Praxis treten Begrenzungen auf, die bei Gleichstrommaschinen durch die Überlastbarkeit des Kommutators gegeben ist, bei

Asynchronmaschinen durch das Kippmoment ($M_K = 2...3M_{D,r}$) und bei Synchronmaschinen durch die Stabilität, d.h. der Polradwinkel ϑ_P muss deutlich unter 90° liegen. Außerdem ergäbe sich bei einem sehr hohen Stromüberlastungsfaktor bei kurzer Belastungszeit eine so genannte adiabatische Erwärmung der Leiter, d.h. eine Erwärmung ohne nennenswerte Wärmeabgabe. Dieser Betriebsfall kann mit dem zugrunde gelegten thermischen Modell nicht mehr korrekt erfasst werden. Hersteller konzipieren elektrische Maschinen in aller Regel für Dauerbetrieb (S1) und rechnen sie entsprechend den Anforderungen in die dafür charakteristische Betriebsart um. Um nun dem Kunden diese Beschreibung des realen Einsatzes zu erleichtern, wurden die standardisierten Betriebsarten eingeführt. Selbstverständlich kann auch der Anwender bei entsprechenden Kenntnissen die Daten einer Maschine, die für Dauerbetrieb konzipiert wurde, für die jeweilige Betriebsart umrechnen. Ab S4 sollte dies jedoch mit Software-Unterstützung erfolgen. Üblicherweise werden elektromechanische Wandler ab einer gewissen Größe mit einem thermischen Motorschutz versehen, der durch Thermistoren, d.h. temperaturabhängige Widerstände, die im Wickelkopf des Stators untergebracht sind, realisiert wird. Hierdurch lässt sich ein Schaden durch Überhitzung vermeiden. Zuletzt wollen wir noch auf die Belüftung und Kühlung elektrischer Maschinen eingehen. Die Belüftung bzw. Kühlung ist für die Auslegung elektromechanischer Wandler von großer Bedeutung. Die in der elektrischen Maschine entstehende Verlustwärme wird dadurch nach außen abgeführt und die auftretende Temperatur somit begrenzt. Je wirkungsvoller die Kühlung ausgelegt ist, desto kleiner kann der Wandler bei gleicher Leistung gebaut werden, bzw. umso mehr Leistung kann er bei gleicher Baugröße abgeben. Man unterscheidet grundsätzlich folgende Kühlarten:

1. Selbstkühlung: Die Maschine wird ohne Verwendung eines Lüfters durch Luftbewegung (Konvektion) und Strahlung gekühlt.

2. Eigenkühlung: Die Kühlluft wird durch einen am Läufer angebrachten oder von ihm angetriebenen Lüfter bewegt.

3. Fremdkühlung: Die Kühlluft wird durch einen Lüfter bewegt, der nicht von der Welle der Maschine angetrieben wird oder die Kühlung erfolgt durch ein anderes fremdbewegtes Kühlmittel. Dadurch wird die Kühlung unabhängig von der Motordrehzahl.

Weiterhin wird auch noch nach der Wirkungsweise der Kühlung unterschieden:

1. Durchzugsbelüftung: Die Verlustwärme wird an die die Maschine durchströmende Kühlluft abgegeben, die sich ständig erneuert.

2. Oberflächenbelüftung: Die Verlustwärme wird von der Oberfläche der geschlossenen Maschine an das Kühlmittel abgegeben.

3. Kreislaufkühlung: Die Verlustwärme wird über ein Zwischenkühlmittel abgeführt, das die Maschine und einen Wärmetauscher, der sich im Kreislauf befindet, durchströmt.

4. Flüssigkeitskühlung: Die Maschine oder Maschinenteile werden von Wasser oder von einer anderen Flüssigkeit durchströmt oder in eine Flüssigkeit getaucht.

5. Direkte Leiterkühlung: Eine oder mehrere Wicklungen werden durch ein Kühlmittel gekühlt, das innerhalb der Leiter strömt. Es gibt die direkte Gaskühlung, bei der ein Gas wie zum Beispiel Wasserstoff verwendet wird und die direkte Flüssigkeitskühlung, bei der zum Beispiel entionisiertes Wasser zum Einsatz kommt. Diese Kühlmethoden stellen die effektivsten aller Kühlvarianten dar, da der größte Teil der Wärme unmittelbar am Ort der Entstehung abgeführt wird.

Die Kühlmethode elektrischer Maschinen wird sehr präzise durch den internationalen IC-Code beschrieben (IEC 60034-6 Part 6, DIN EN 60034-6, VDE 0530 Teil 6). Derzeit gibt es allerdings keine Festlegung, die eine IC-Kennzeichnung auf dem Leistungsschild (=Typenschild) vorschreibt. Die Norm sieht folgende Bezeichnung vor:

IC a b c d e

Dabei haben die Platzhalter a - e die nachfolgend beschriebene Bedeutung:

a: Ziffer, die die Kühlkreisanordnung beschreibt, zum Beispiel 4 für Oberflächenkühlung.

b: Buchstabe für das primäre Kühlmittel (kann entfallen, wenn dieses Luft darstellt), zum Beispiel W für Wasser.

c: Ziffer, die die Bewegungsart des primären Kühlmittels beschreibt, zum Beispiel 1 für Eigenkühlung.

d: Buchstabe für das sekundäre Kühlmittel, zum Beispiel U für Öl.

e: Ziffer, die die Bewegungsart des sekundären Kühlmittels kennzeichnet (kann bei getrennter, unabhängiger Baugruppe, die die Bewegung von Wasser erzwingt, entfallen), zum Beispiel 5 für eingebaute, unabhängige Baugruppe.

Die Tabellen, die die oben beschriebenen Ziffern und Buchstaben des IC-Codes näher erläutern, sind der Norm oder speziellen Büchern zu entnehmen. Mit diesen Ausführungen wollen wir nun die Thematik über Erwärmung elektrischer Maschinen beenden.

Aufgabe:

Mit welchem maximalen Strom $I_ü$ kann ein Elektromotor betrieben werden, wenn folgende Daten gelten: t_b = 10min; t_p = 20min; T_b = 30min; T_p = 50min; v = 0,6; I_r = 45A?

Lösung:

$\frac{t_b}{T_b} = \frac{10\text{min}}{30\text{min}} = 0{,}33 \quad < \quad 3;$ $\qquad \frac{t_p}{T_p} = \frac{20\text{min}}{50\text{min}} = 0{,}4 \quad < \quad 3$ $\qquad \Rightarrow$ S3 (periodischer Aussetzbetrieb)

$$i = \frac{I_{\ddot{u}}}{I_r} = \sqrt{(1+k) \cdot \frac{1-e^{-\left(\frac{t_p}{T_p}+\frac{t_b}{T_b}\right)}}{1-e^{-\frac{t_b}{T_b}}} - k} = \sqrt{(1+0{,}6) \cdot \frac{1-e^{-\left(\frac{20\text{min}}{50\text{min}}+\frac{10\text{min}}{30\text{min}}\right)}}{1-e^{-\frac{10\text{min}}{30\text{min}}}} - 0{,}6} = 1{,}53$$

$$I_{\ddot{u}} = i \cdot I_r = 1{,}53 \cdot 45\text{A} = 68{,}9\text{A}$$

-10% (Sicherheitsabschlag): $I_{\ddot{u}} \approx 62\text{A}$