



20-1002

**Belastungszyklus (durchschn. Leistung) und
thermische Überlegungen im
Zusammenhang mit elektrischen
Aktuatoren, speziell Drehmagnete,
Hubmagnete und Voice-Coil-Aktuatoren
(Tauchspulenmotoren)**

1. Einleitung

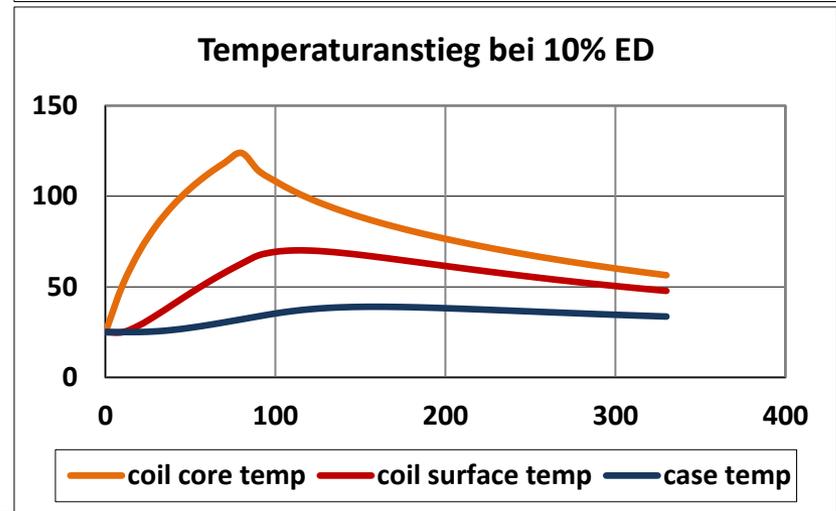
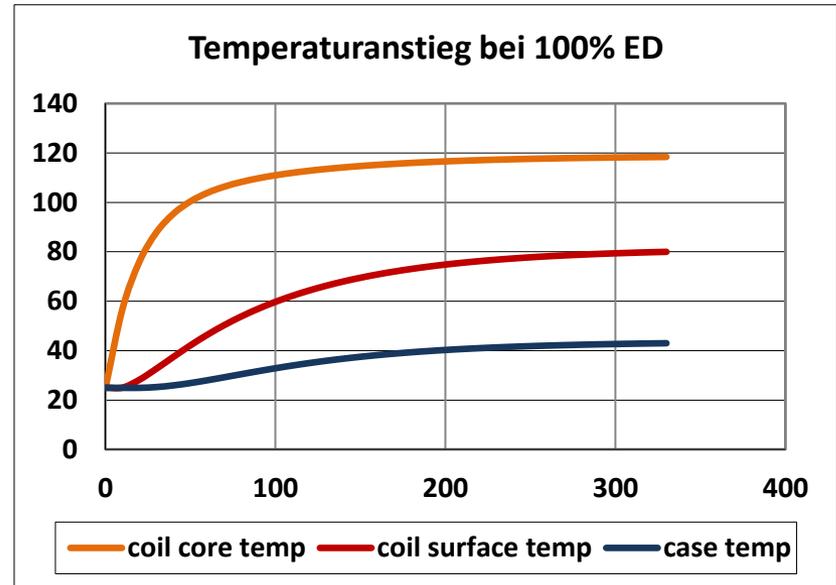
Der Begriff "Arbeitszyklus" wird häufig zur Beschreibung der Performance elektromechanischer Aktoren verwendet, wird jedoch ungenau angewendet und kann falsch interpretiert werden. Was mit dem Begriff wirklich beschrieben wird, ist der Anregungszustand, bei dem die innere Spulentemperatur des Aktuators die maximale Temperatur erreicht, die für die Isolierung (oder einem anderen bei der Konstruktion verwendeten Material) sicher zulässig ist.

- 100% Einschaltdauer oder 100%ED (ED wird in Europa verwendet und steht für Effective Duty) beschreibt einen Zustand, in dem der Aktuator kontinuierlich mit konstanter Leistung bestromt wird und nach einiger Zeit eine stabile Temperatur erreicht, bei der die Eingangsleistung (elektrisch) und die Ausgangsleistung (in Form von Wärme, die von

der Oberfläche abgestrahlt wird und/oder an die befestigten Teile abgeleitet wird (Anforderungen an den Kühlkörper können spezifiziert werden) und/oder durch Konvektion abgegeben wird) im Gleichgewicht sind, so dass die Grenztemperatur für das Isolationssystem erreicht wird.

- 50% Einschaltdauer oder 50%ED beschreibt einen Zustand, in dem der Stellantrieb mit der doppelten Leistung erregt wird, die erforderlich ist, um die Grenztemperatur zu erreichen, aber in dem die Erregung intermittierend ist (z.B. 100ms ‚EIN‘ gefolgt von 100ms ‚AUS‘). Die durchschnittliche Leistungsaufnahme ist somit dieselbe, jedoch führt der höhere angelegte Strom zu einem höheren Amperewindungs-Produkt, das von der Spule entwickelt wird, und somit zu einem höheren magnetischen Fluss und einer höheren Kraft/Drehmoment.

- In ähnlicher Weise wird bei anderen Arbeitszyklen davon ausgegangen, dass die während des "EIN"-Teils des Zyklus angelegte Leistung zunimmt, wenn gleichzeitig der zulässige Arbeitszyklus in % abnimmt; die entsprechend erhöhte Eingangsleistung führt zu höheren Kräften, solange der Aktuator nicht in der magnetischen Sättigung betrieben wird.
- Die Diagramme rechts zeigen das typische thermische Verhalten von elektromechanischen Aktuatoren mit Erregung bei 100% und bei 10% Einschaltdauer.
- Die Diagramme zeigen, wie bei einem Aktor bei 100% Einschaltdauer die Temperatur allmählich in Richtung einer Gleichgewichtstemperatur von 120° ansteigt; beim Aktor mit 10% Einschaltdauer steigt die Spule schnell auf diese Temperatur an - jetzt wird im Diagramm rechts die Leistung abgeschaltet; die Temperatur der Spulenoberfläche und des Gehäuses steigen noch einige Zeit weiter an, da Wärme vom Spulenkern übertragen wird, bevor sie abzukühlen beginnt.

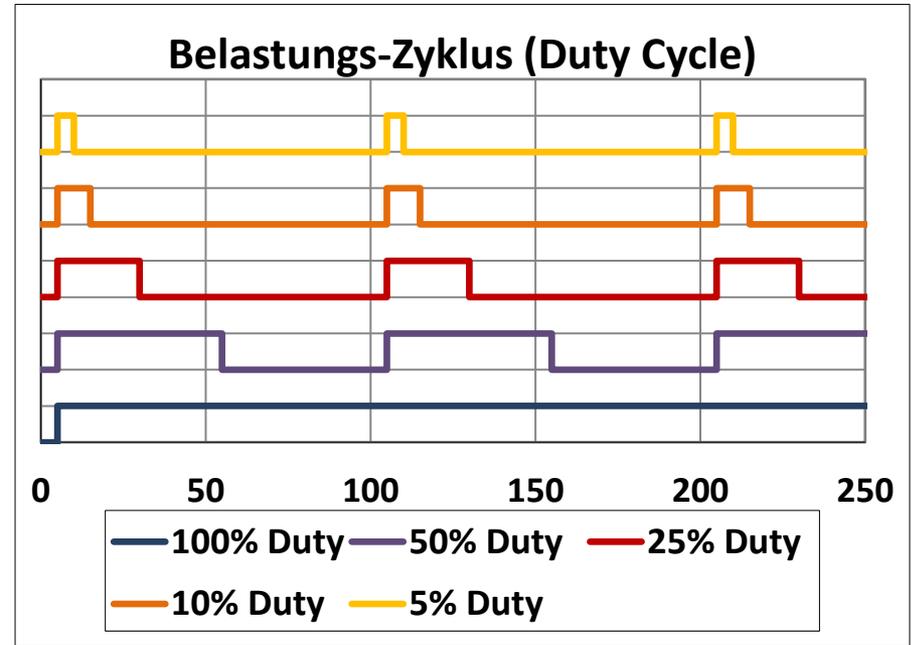


2. Belastungszyklus

Die Lehrbuchdefinition des Belastungszyklus, wie sie von den meisten Ingenieuren angewendet wird, lautet:

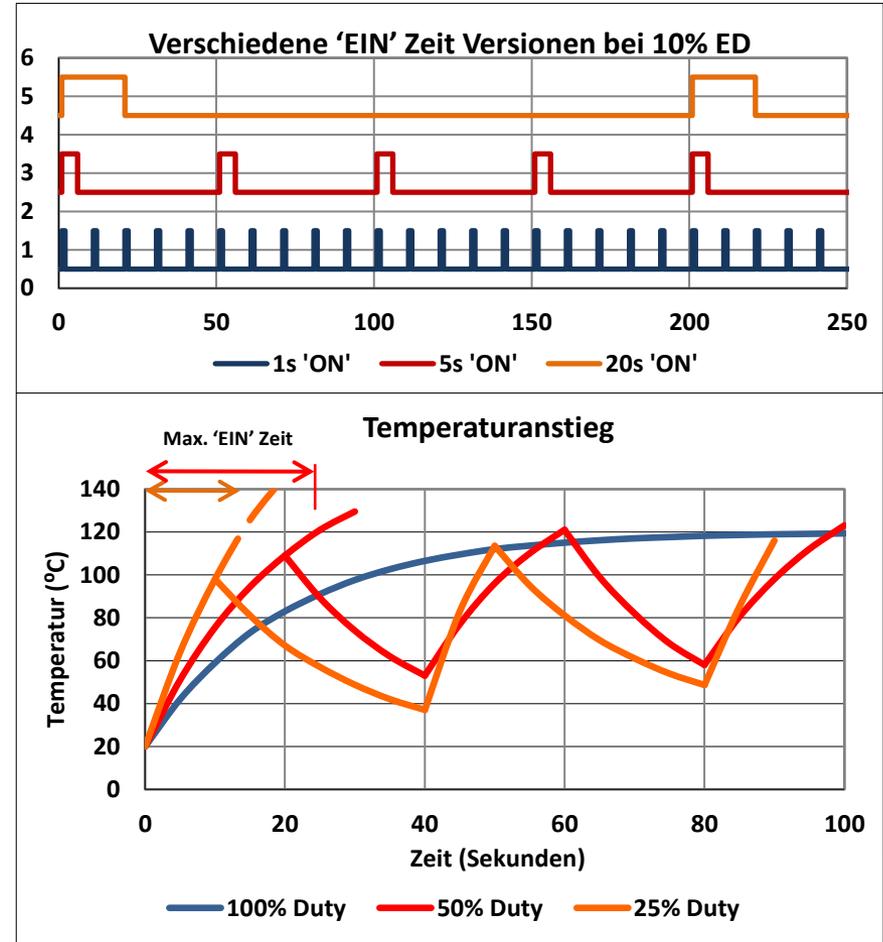
$$\text{Zeit 'EIN'} / (\text{Zeit 'EIN'} + \text{Zeit 'AUS'})$$

- Dies ist in der Grafik rechts dargestellt
- Dies ist bei elektromechanischen Stellantrieben in Bezug auf die Ein- und Ausschaltzeiten korrekt, berücksichtigt jedoch nicht die während der Einschaltphase an das Gerät angelegte Energiemenge.



3. Maximale 'EIN' Zeit

- Die obere Grafik veranschaulicht mehrere verschiedene Zeitdiagramme, die die 'EIN'- und 'AUS'-Phasen eines Anregungszyklus darstellen. Alle 3 Graphen im oberen Diagramm entsprechen einem Tastverhältnis von 10%, die Einschaltzeit pro Schaltvorgang ist jedoch in jedem Fall unterschiedlich.
- Die untere Grafik zeigt, wie sich die Spulentemperatur bei einem M190-Röhrenhubmagnet im Laufe der Zeit bei unterschiedlichem Arbeitszyklus bis zur maximalen Spulentemperatur von 120°C entwickelt. Ausgehend von 20°C erreicht dieser bei 50% Einschaltdauer 120° innerhalb von etwa 24 Sekunden, bei 25% Einschaltdauer erreicht der gleiche Hubmagnet diese Temperatur innerhalb von etwa 14 Sekunden; dies ist die "maximale Einschaltdauer" für diesen Belastungszyklus für dieses Bauteil. Es ist zu beachten, dass bei nachfolgenden Betriebszyklen, wenn das Teil nicht vollständig auf 20°C abkühlen konnte, die Zeit bis zum Erreichen dieser Temperatur kürzer ist. Die "maximale Einschaltdauer" wird normalerweise in den Daten für jede Arbeitszyklusbedingung angegeben. Wird diese Einschaltzeitbegrenzung überschritten, überhitzt der Aktuator und kann zerstört werden. Ein extremes Beispiel für einen kritischen Einschaltzustand wäre eine Sperre, die jeden Tag nur 15 Minuten lang unter Spannung steht. Obwohl das Tastverhältnis sehr klein ist (<1%), ergibt sich aus der Einschaltdauer pro Schaltvorgang, dass es sich effektiv um eine 100%ige Einschaltdauer handelt.



4. Umgebungs-Temperatur und Wärmeabfuhr



- Die meisten veröffentlichten Daten für elektrische Aktoren gehen von einem Betrieb unter spezifizierten Umgebungstemperaturbedingungen aus und können auch Anforderungen an die Kühlkörper spezifizieren.
- **Betrieb bei erhöhter Umgebungs-Temperatur** - Wenn ein elektrischer Aktuator bei einer höheren Umgebungstemperatur als spezifiziert betrieben wird, verringert sich die Leistung, die in den Aktuator eingespeist werden kann ohne die Temperatur der Spule über die sichere Grenze zu erhöhen. In diesem Fall muss möglicherweise die Erregerleistung oder der Arbeitszyklus reduziert werden, um eine Überhitzung zu vermeiden. Umgekehrt kann es bei kalten Umgebungsbedingungen zulässig sein, die Erregerleistung ohne Überhitzungsgefahr zu erhöhen.
- **Bedingungen für die Wärmeabfuhr** - Veröffentlichte Daten können eine Beschreibung der Kühlungsbedingungen enthalten, unter denen die gemessenen Daten entstanden sind. Übliche Bedingungen sind entweder ein unendlicher Kühlkörper (z.B. ein massiver Aluminium- oder Kupferblock), der an der Montagefläche / Halterung befestigt ist, oder eine Aluminiumplatte definierter Größe (wobei angenommen wird, dass sie der Struktur entspricht, an der das Gerät im Gebrauch befestigt wäre). Bei Anwendungen, bei denen die Kühlkörperbedingungen schlecht sind, kann es notwendig sein, die an das Gerät angelegte Leistung zu reduzieren.

5. Spulen-Temperatur und Temperatur-Koeffizient des Widerstands #1

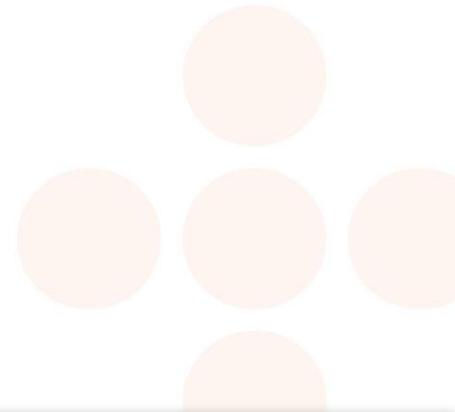
- Die maximale Leistung, die an einen bestimmten elektrischen Aktor angelegt werden kann, wird durch die Temperaturbelastbarkeit der Isolationsmaterialien und durch die Effizienz der Wärmeableitung aus dem Aktuator begrenzt. Aus den in Abschnitt 1 gezeigten Diagrammen wird deutlich, dass es große Temperaturunterschiede zwischen der Spule und dem Gehäuse eines Geräts geben kann.
- Der Widerstand einer Metallspule steigt mit zunehmender Temperatur der Spule. Wenn der Temperaturanstieg in °K ausgedrückt wird, ändert sich der Widerstand gemäß der Gleichung.

$$R(T_2) = R(T_1) * (1 + \alpha(T_2 - T_1))$$

α = Temperatur-Koeffizient des Widerstands

T_2 = Endtemperatur der Spule in °K

T_1 = Anfangstemperatur der Spule in °K



5. Spulen-Temperatur und Temperatur-Koeffizient des Widerstands #2

- Der Widerstand der Spule eines elektrischen Aktuators kann durch Messung der Spannung und des Stroms über die Spule berechnet werden.
- Wenn der Widerstand auf diese Weise bei einer bekannten Starttemperatur [R(T₁)] und im ungünstigsten Betriebszustand [R(T₂)] gemessen wird, kann die Spulen-Temperatur im ungünstigsten Betriebszustand nach folgender Formel berechnet werden:

$$T_2 = T_1 + \frac{\frac{R(T_2)}{R(T_1)} - 1}{\alpha}$$

T₂ = Endtemperatur der Spule in °K

T₁ = Anfangstemperatur der Spule in °K

R(T₂) = Widerstand am Ende (worst case)

R(T₁) = Widerstand am Anfang bei T₁

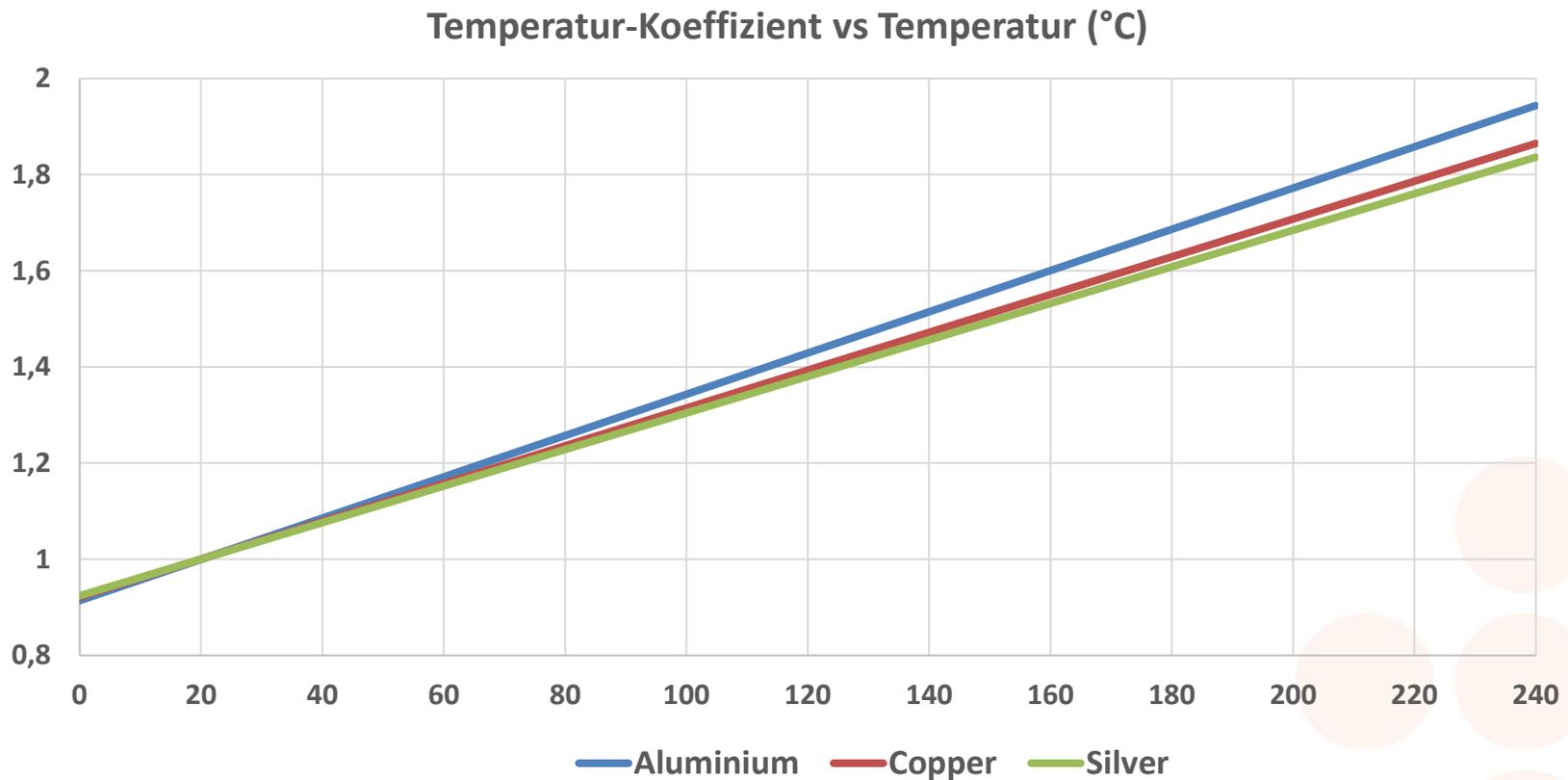
α = Temperatur-Koeffizient des Widerstands
(α für Kupfer 0,00393/°K)



5. Spulen-Temperatur und Temperatur-Koeffizient des Widerstands #3



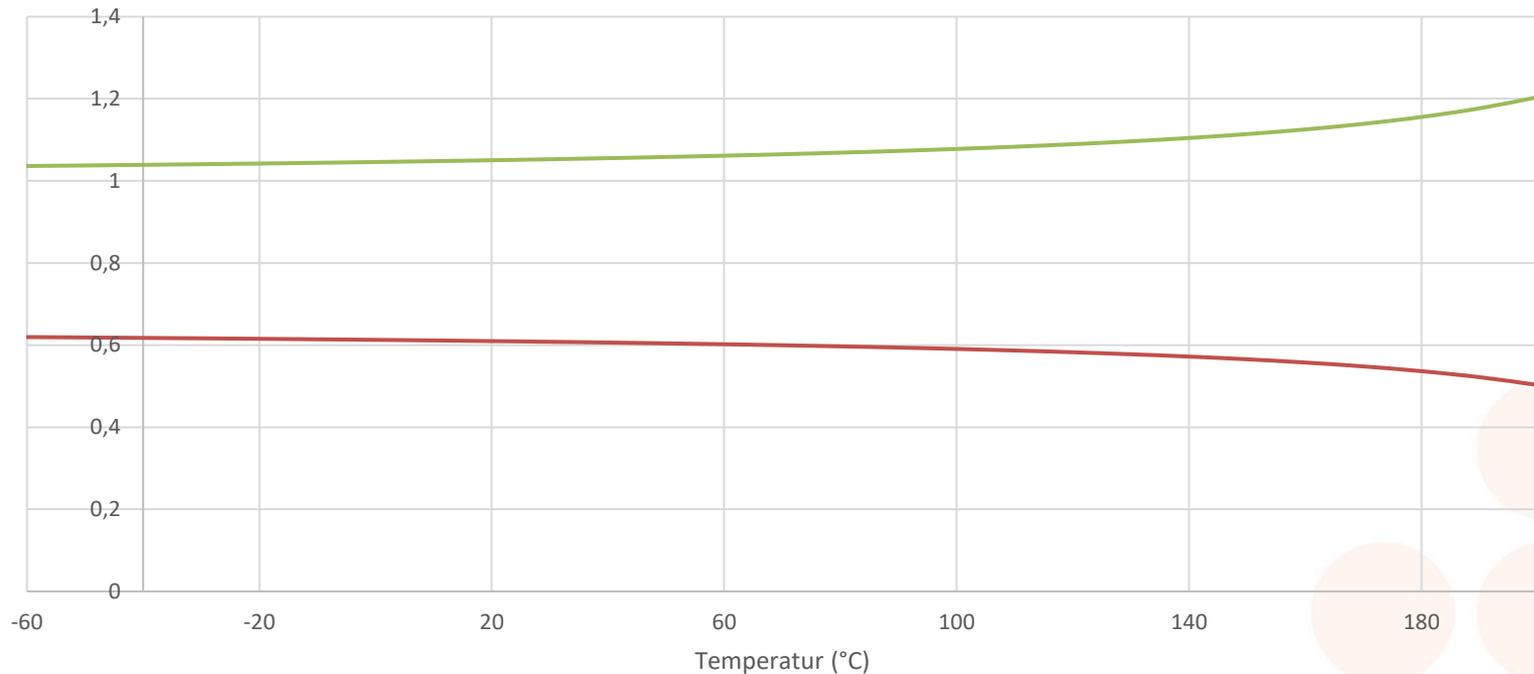
- Für eine schnelle Abschätzung des Temperaturanstiegs, wenn der Widerstandserhöhungsfaktor der Spule gemessen wird, kann der Temperaturanstieg aus dem folgenden Diagramm ermittelt werden:



5. Spulen-Temperatur und Temperatur-Koeffizient des Widerstands #4

- Die Leitfähigkeit von Silber oder Aluminium im Vergleich zu Kupfer wird bei verschiedenen Temperaturen gezeigt. Die Vorteile der Verwendung von Silberdraht zum Wickeln der Spule werden bei höheren Temperaturen größer.

Leitfähigkeit in Relation zu Kupfer (ein hoher Wert ist besser)



— Aluminium — Silver

6. Mechanismen zur Wärmeableitung in Stellantriebsvorrichtungen



- Die Materialien eines Aktuators haben eine spezifische Wärmekapazität. Ohne jegliche Energiedissipation definiert diese Eigenschaft, wie stark die Temperatur von 1 Gramm Material (in °K) ansteigt, wenn 1 Joule Energie in die Probe eingebracht wird. Die Wärmekapazität des Aktuators erhält man durch Multiplikation mit der Bauteilmasse. Bevor die Wärme durch Konduktion oder einen anderen Mechanismus abgeführt wird, wird Energie absorbiert durch Erhöhung der Temperatur des Spulenmaterials; dies ist der primäre Mechanismus, der die maximale Einschaltzeit für einen elektrischen Aktor bestimmt.
- Der primäre Mechanismus für die Wärmeableitung aus den von Geeplus angebotenen elektrischen Aktuatoren ist die Wärmeleitung.
 - Bei Voice-Coil-Aktuatoren bewegt sich die Spule innerhalb eines Luftspalts in der magnetischen Topfanordnung; ein endlicher Luftspalt ist für den Betrieb der Voice-Coil-Motoren erforderlich (Ferrofluid kann dem Luftspalt hinzugefügt werden, um die Wärmeabfuhr von diesen Vorrichtungen zu verbessern). Während sich die Spule bewegt, kann die Wärmeableitung mit der sich ändernden Spulenposition variieren.
 - Bei Hubmagneten und Drehmagneten ist die Spule typischerweise auf einen Kunststoffspulenkörper gewickelt und der Außendurchmesser mit Isolierband umwickelt. Zwischen dem Außendurchmesser der Spule und dem Gehäuse des Aktors besteht typischerweise ein Luftspalt.
 - Luft ist kein guter Wärmeleiter. Wie aus den Diagrammen in Abschnitt 1 ersichtlich ist, kann es bei diesen elektrischen Aktuatoren einen großen Temperaturunterschied zwischen Spule und Gehäuse geben.
- Geeplus empfiehlt, dass der Temperaturanstieg der Spule von elektrischen Aktuatoren in der Endanwendung unter den ungünstigsten Betriebsbedingungen (maximale Umgebungstemperatur und maximale Erregerleistungsbedingungen) getestet werden sollte.

7. Verbesserung des thermischen Verhaltens von elektrischen Aktuatoren

- Möglicherweise kann ein "Pick and Hold"-Verstärker eingesetzt werden, um den Stromverbrauch und die Verlustleistung im Durchschnitt zu reduzieren. Beim Anfang der Bewegung wird eine hohe Leistung aufgebracht, um die erforderliche Einzugskraft/Geschwindigkeit zu erzeugen, und die Leistung dann reduziert, um in der Endposition zu halten. Dies kann sehr vorteilhaft für Aktuatoren sein, die einen großen Kraft-/Drehmomentanstieg in der Halteposition aufweisen.
- Bei vielen Stellantrieben kann die Temperaturbelastbarkeit des Aktuators erweitert werden, um den Betrieb bei höheren Temperaturen / höheren Leistungsstufen durch die Verwendung von Isoliermaterialien mit höheren Temperaturen zu ermöglichen.
 - Es ist zu beachten, dass mit steigender Temperatur auch der Spulenwiderstand zunimmt und mehr Leistung in Wärme umgewandelt wird.
- Die Verlustleistung von Aktuatoren kann auch durch Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit zwischen der Spule und dem Gehäuse des Aktors erhöht werden. Dadurch verringert sich die Spulentemperatur bei einer gegebenen Leistungsaufnahme und Gehäusetemperatur.
 - Dies ist technisch gesehen eine bessere Möglichkeit, die Leistung eines Aktors zu verbessern, aber es kann schwierig zu realisieren sein, wenn die Spule mit einem Material umgossen oder vergossen werden muss, das eine bessere Wärmeleitfähigkeit als Luft hat.

8. Kurzfristiger Betrieb (maximale ‚EIN‘-Zeit)

- Bei sehr kurzzeitigem Betrieb mit hoher Erregerleistung ist die Wärmeabfuhr von der Spule durch Leitung oder einen anderen Mechanismus nicht signifikant.
- Unter diesen Bedingungen ist der Hauptfaktor, der den Temperaturanstieg begrenzt, die Wärmekapazität der Spule selbst. Für eine gegebene Energiemenge wird die Spulentemperatur um einen festen Betrag ansteigen.
- Die Fähigkeit einer Spule, Energie zu absorbieren, wird durch die Masse der Spule und durch die spezifische Wärmekapazität des Spulen-Materials bestimmt. Die beiden Faktoren können multipliziert werden, um die Wärmekapazität für die Spule in Joule pro °C zu erhalten.

