

THERMISCHE ASPEKTE EISENLOSER BÜRSTEN- GLEICHSTROMMOTOREN UND BÜRSTENLOSER GLEICHSTROMMOTOREN

Einleitung und Prinzip

Der Prozess der Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie ist immer mit Verlusten verbunden. Diese Leistungsverluste werden vorwiegend in Wärmeleistung umgewandelt und steigen tendenziell zusammen mit der abgegebenen mechanischen Leistung. Die in einem Elektromotor erzeugte Wärmeenergie führt zu einem Temperaturanstieg, in dessen Folge Wärme (durch Leitung und Konvektion) von warm nach kalt übertragen und schließlich aus dem Motor abgeführt wird.

Eine der größten Herausforderungen für Hersteller von Elektromotoren besteht darin sicherzustellen, dass die Ist-Innentemperatur des Motors niemals die zulässige Höchsttemperatur seiner Komponenten überschreitet. Die thermischen Phänomene bestimmen in Abhängigkeit von Motorkonstruktion und verwendeten Materialien die Leistung des Motors.

Konstrukteure versuchen meist, die Motorleistung durch Verbesserungen in zwei Bereichen zu steigern, ohne dass dabei eine Überhitzung oder Beschädigung von Komponenten riskiert wird:

Verlustminimierung: Der Wirkungsgrad bei der Leistungsumwandlung wird verbessert, indem erreicht wird, dass bei einer gegebenen mechanischen Leistung weniger Wärme erzeugt wird bzw. die mechanische Leistung bei gleichbleibender Wärmeenergie steigt.

Verbesserung der Möglichkeit des Motors, die erzeugte Wärmeenergie an die Umgebung abzuführen (Wärmeableitung), sodass die Innentemperatur weniger stark steigt und bei identischem Anstieg der Innentemperatur mehr Wärme erzeugt werden kann.

Um Ihnen das Verständnis dieses Phänomens zu erleichtern, stellen Sie sich eine undichte Badewanne vor, die gleichzeitig gefüllt wird.

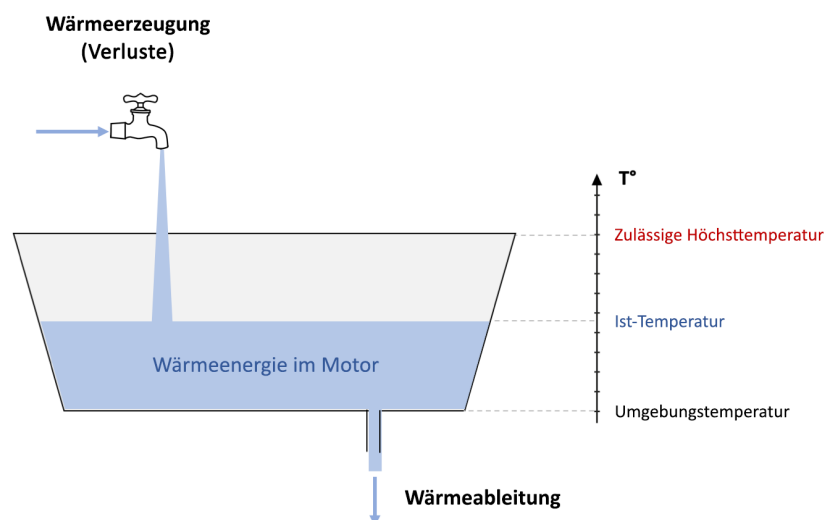


Abbildung 1: Wasseranalogie zur Wärmeübertragung in einem Motor

Das aus dem Hahn fließende Wasser entspricht der Wärmeenergieerzeugung im Motor. Sobald sich Wasser in der Badewanne sammelt, führt der Druck am Boden dazu, dass – in Entsprechung zur Wärmeableitung – Wasser aus der Badewanne austritt. Je höher der Wasserstand, desto höher der Druck am Boden der Badewanne und desto mehr Wasser tritt aus.

In Entsprechung dazu ist die Wärmeableitung eines Motors proportional zur Differenz zwischen der Innentemperatur des Motors und der Außentemperatur der Umgebung. So wie der Wasserfluss vom Durchmesser des Abflusslochs abhängt, hängt auch die Wärmeableitung vom Wärmewiderstand ab. Dieser definiert, wie gut bzw. schlecht Wärme aus dem Motor abgeleitet werden kann. Je niedriger der Wärmewiderstand, desto einfacher und schneller wird die Wärme aus dem Motor abgeleitet, was einer größeren Verlustleistung entspricht:

Die Volumenkapazität einer Badewanne ist begrenzt, sodass sie überläuft, wenn der Wasserstand einen bestimmten Punkt überschreitet. Entsprechend ist die Wärmekapazität der Komponenten eines Motors begrenzt, sodass die Komponenten innerhalb von Sekunden beschädigt werden können, wenn die Ist-Temperatur einen bestimmten Wert überschreitet. Die Nennleistung des Motors muss die Anforderung erfüllen, die Temperatur innerhalb des zulässigen Betriebstemperaturbereichs zu halten.

Meist ist die Spule die entscheidende Komponente, da dies genau der Ort ist, an dem die Joule-Erwärmung stattfindet. Bei zu hohen Temperaturen würde die Isolationsbeschichtung um den Kupferdraht schmelzen und den Motor dauerhaft beschädigen.

Stationärer Betrieb

Bürsten-Gleichstrommotoren

Ein kernloser Bürsten-Gleichstrommotor ist typischerweise als selbsttragende Spule ausgelegt, die sich im Luftspalt zwischen einem Permanentmagneten und dem Gehäuse dreht, die beide Teil des Stators sind.

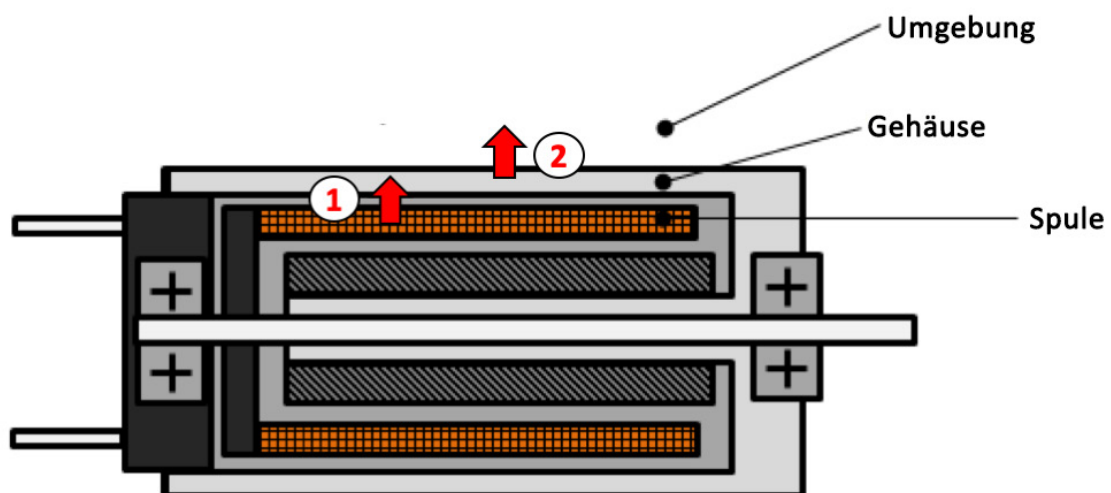


Abbildung 2: Wärmeableitung in einem kernlosen Bürsten-Gleichstrommotor

Die in der rotierenden Spule erzeugte Joule-Erwärmungsleistung (W) hängt direkt mit ihrem elektrischen Widerstand R (Ω) und dem durch sie fließenden Strom I (A) zusammen. Kernverluste gibt es keine, da der Rotor eisenlos ist.

$$P_{\text{Verlust}} = R * I^2$$

P_{Verlust} : Joule-Erwärmungsleistung (W), die bei Elektromotoren als Verlust betrachtet wird.

R: elektrischer Widerstand der Spule (Ω)

I : in der Spule (A) fließender elektrischer Strom, abhängig von Drehmomentkonstante des Motors und Lastmoment

Bei steigender Spulentemperatur wird die Wärme von der Spule an das Gehäuse (1) und von dort an die Umgebung (2) übertragen (siehe Abbildung 2). Diese beiden aufeinanderfolgenden Schritte haben unterschiedliche Wärmewiderstände (R_{th1} und R_{th2}), da unterschiedliche Materialien unterschiedlich wärmeleitfähig sind und daneben Form, Masse und Oberfläche der einzelnen Teile beeinflussen, wie Wärme übertragen wird.

Eine Frage des Gleichgewichts zwischen Erzeugung und Ableitung ...

Unter der Annahme, dass der durch die Spule fließende elektrische Strom nicht überdurchschnittlich hoch ist, steigen die Spulentemperatur und zugleich die Wärmeableitung bis zu einem Punkt (da proportional zu $T_{\text{Spule}} - T_{\text{Umg}}$), an dem die Wärmeableitung die Wärmeerzeugung genau kompensiert. An diesem Punkt bleibt die Wärmeenergie im Motor dauerhaft konstant. Die Temperatur der Komponenten verändert sich damit nicht länger.

Wie bei der Badewanne, die pro Sekunde exakt so viel Wasser verliert, wie aus dem Hahn zufließt, sodass sich der Wasserstand auf einer gegebenen Höhe in der Badewanne stabilisiert, stabilisiert sich auch die Spule bei einer bestimmten Temperatur. Liegt die Spulentemperatur geringfügig über diesem stabilisierten Wert, kann die Temperatur durch die leicht erhöhte

Verlustleistung wieder auf den stabilisierten Wert gesenkt werden. Damit ist der stationäre Zustand erreicht.

Die konstante Temperatur der Spule lässt sich als Funktion des elektrischen Stroms I (A), des elektrischen Widerstands R (Ω), der Wärmewiderstände R_{th1} und R_{th2} (K / W) (addiert, da in Serie) und die Umgebungstemperatur T_{Umg} (K) berechnen, da sich Wärmeableitung und Wärmeerzeugung im stationären Zustand ausgleichen:

$$P_{\text{Verlust}} = R * I^2 = \frac{T_{\text{Spule}} - T_{\text{Umg}}}{R_{th1} + R_{th2}} = P_{\text{Umg}}$$

$$\rightarrow T_{\text{Spule}} = R * I^2 * (R_{th1} + R_{th2}) + T_{\text{Umg}}$$

Der elektrische Widerstand steigt mit steigender Temperatur ...

Da der elektrische Widerstand (R) der Spule von ihrer Ist-Temperatur abhängt und die Spulentemperatur weit über der Umgebungstemperatur liegt, muss unbedingt der tatsächliche elektrische Widerstand der Spule bei einer gegebenen Temperatur berücksichtigt werden.

Bei einem Anstieg der Spulentemperatur um 100 °C ($T_{\text{Spule}} - T_{\text{Umg}}$), ergibt sich aus der Formel oben beispielsweise, dass der Spulenwiderstand bei 122 °C um 39 % höher liegt als bei 22 °C (R_{22}). Das ist ein enormer Unterschied, welcher bei den thermischen Berechnungen nicht vernachlässigt werden darf.

Aufgrund dieses Phänomens ist die Joule-Erwärmungsleistung $R \cdot I^2$ bei hohen Temperaturen daher größer (vorausgesetzt, der Strom verändert sich nicht). Die Spule erreicht ihren endgültigen stationären Zustand damit bei einer Temperatur, die wie folgt berechnet werden kann:

Diagramm 1 illustriert, dass die Spulentemperatur nach einer Weile (abhängig von der thermischen Zeitkonstante) immer langsamer ansteigt, bis sie ihre endgültige stationäre Temperatur erreicht.

$$R_{T_{\text{Spule}}} = R_{22} * (1 + \alpha * (T_{\text{Spule}} - 22))$$

$R_{T_{\text{Spule}}}$: elektrischer Widerstand der Spule (Ω)

R_{22} : elektrischer Widerstand der Spule bei 22 °C (Ω)

α : Temperaturkoeffizient des Widerstands für Kupfer (0.0039/°C)

T_{Spule} : Spulentemperatur (°C)

$$T_{\text{Spule}} = \frac{R_{22} * I^2 * (R_{th1} + R_{th2}) * (1 - 22\alpha) + T_{\text{Umg}}}{1 - \alpha * R_{22} * I^2 * (R_{th1} + R_{th2})}$$

I : in der Spule (A) fließender elektrischer Strom

R_{th1} : Wärmewiderstand Rotor/Gehäuse (K/W)

R_{th2} : Wärmewiderstand Gehäuse/Umgebung (K/W)

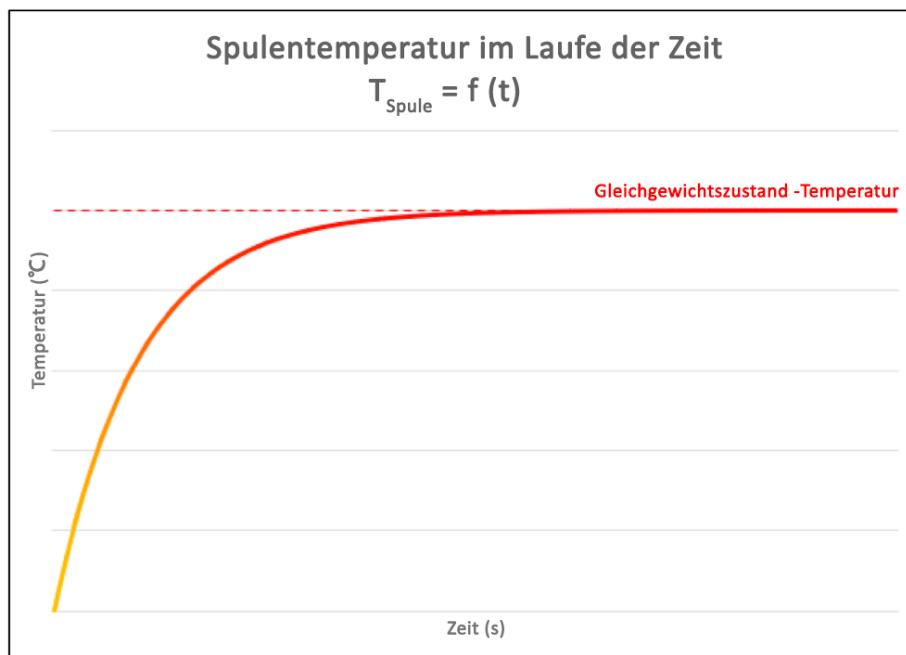


Diagramm 1: Die Spulentemperatur stabilisiert sich bei einer gegebenen Temperatur, wenn der Strom dauerhaft konstant bleibt.

Nehmen wir nun an, der elektrische Strom I wäre höher (zum Beispiel aufgrund einer höheren Drehmomentbelastung): Die Spule würde sich dann bei einer höheren Temperatur als vorher stabilisieren. Die höchste zulässige Temperatur der stabilisierten Spule darf die vom Kupferdrahthersteller angegebene zulässige Höchsttemperatur der Spule nicht überschreiten (z. B. 125 °C). Damit ist ein maximaler elektrischer Stromwert definiert, der mit der vorherigen Formel

zurückgerechnet werden kann und in den technischen Daten eines Motors üblicherweise als „Nennstrom“ oder „maximaler Dauerstrom“ bezeichnet wird. Da Drehmoment und Strom proportional sind (sofern keine Sättigung vorliegt), wird dadurch auch das „Nenn Drehmoment“ oder „maximale Dauerdrehmoment“ definiert.

Bürstenlose Gleichstrommotoren

Bürstenlose Motoren funktionieren nach demselben Prinzip wie Bürstenmotoren (Laplace-Kraft, die auf ein Elektron einwirkt, das sich in einem Magnetfeld bewegt), nur dass die Spule im Stator befestigt ist und der Permanentmagnet sich mit der Welle dreht. Die Phasenkommutierung erfolgt elektronisch.

Eine zusätzliche Wärmequelle im Motor ...

Ein Magnetfeld, das sich im Verhältnis zum Stator bewegt – der Eisenbleche enthält, um das Magnetfeld im Motor zu schließen –, führt zu einem Phänomen, das als „Kernverluste“ bezeichnet wird und darin besteht, dass im Blechpaket des Stators (Laminierung) ein elektrischer Strom induziert wird. Dieser Strom führt dazu, dass im Stator Wärme erzeugt wird, die zu der bereits in der Spule erzeugten Joule-Erwärmung (wie bei Bürstenmotoren) hinzukommt. Da Kernverluste proportional zur Motordrehzahl sind, können sie bei niedriger Drehzahl vernachlässigt werden. Bei hohen Drehzahlen übertreffen sie jedoch oft die Joule-Verluste. Aus diesem Grund muss das Drehmoment bei hoher Drehzahl reduziert werden.

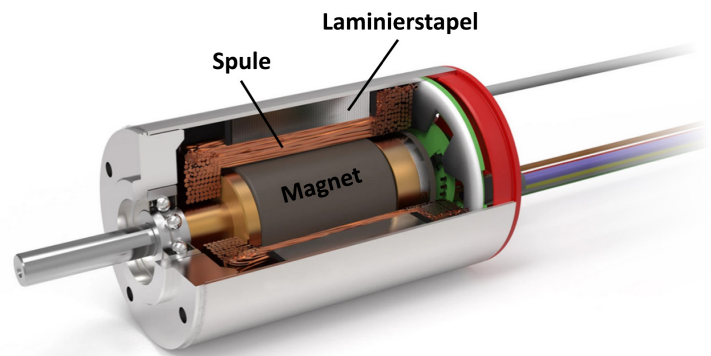


Abbildung 3: Konstruktionsbeispiel für einen bürstenlosen Gleichstrommotor

Zurück zur Wasseranalogie: Das entspräche einer Badewanne mit zwei Wasserquellen, von denen eine die Joule-Verluste und die andere die Kernverluste sind.

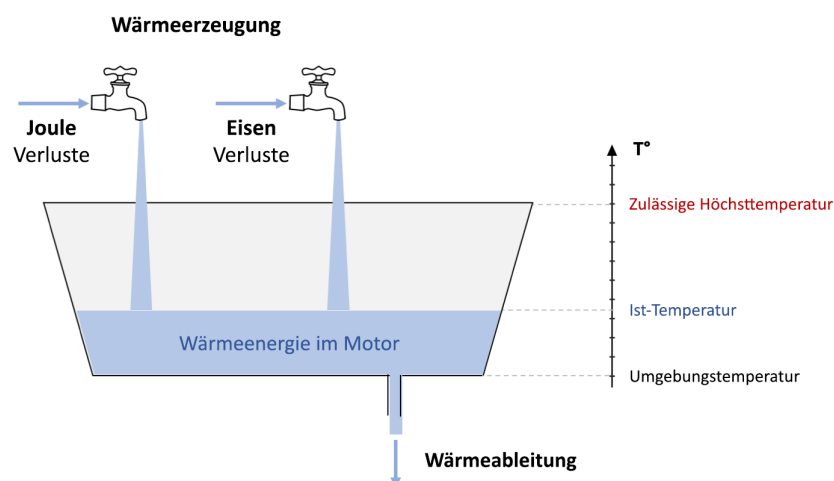


Abbildung 4: Wasseranalogie der Wärmeübertragung in einem bürstenlosen Gleichstrommotor mit doppelter Wärmequelle

Durch ihre mechanische Konstruktion können bürstenlose Motoren viel höhere Drehzahlen erreichen als Bürstenmotoren, da ihre Drehzahl nicht durch das mechanische Bürsten-/Kollektor-Kommutierungssystem begrenzt ist.

Die Aufteilung auf die beiden Wärmequellen kann als Balance-Akt zwischen den Joule-Verlusten bei hohem Drehmoment (niedrige Drehzahl) und den Kernverlusten bei hoher Drehzahl (niedriges Drehmoment) betrachtet werden. Das durch die Wärme verursachte und zu lösende Problem bleibt jedoch dasselbe: Die Spulentemperatur muss unter der zulässigen Höchsttemperatur gehalten werden.

Auswirkung des Wärmewiderstands auf die Leistung

Wie bereits erwähnt, werden für die Wärmeübertragung von der Spule in die Außenumgebung zwei verschiedene Wärmewiderstände berücksichtigt. R_{th1} ist von der Motorkonstruktion abhängig. R_{th2} ist demgegenüber sowohl von der Motorkonstruktion als auch der Betriebsumgebung abhängig. Wird ein Kontakt zwischen dem Motor und einem anderen Körper mit hoher Wärmeleitfähigkeit hergestellt, kann der Motor Wärme besser ableiten und bei einer niedrigeren Temperatur arbeiten, bspw. durch:

- Umhüllen des Motorkörpers (zusätzliches Gehäuse/Ummantelung o. ä.)
- Einen konvektionsfördernden Luftstrom um den Motorkörper
- Montage der Motorvorderseite auf einem Metallkörper

In Abhängigkeit von der Konfiguration und vor allem von der Wärmeleitfähigkeit des Materials können diese umgebenden Elemente die Ableitung der Motorwärme an die Außenumgebung begünstigen oder hindern.

Meist werden Motoren auf Metallteilen montiert – oft mit der Vorderseite an einer Halterung oder einem Rahmen aus Metall. Die gute Wärmeleitfähigkeit von Metall fördert die Wärmeableitung aus dem Motor (siehe Abbildung 5), sodass der Motor besser gekühlt wird als in einer Umgebung nur aus Luft.

Der Wert des Wärmewiderstands R_{th2} kann damit geändert werden, um in Abhängigkeit von der Motormontagekonfiguration in der Anwendung die bessere Kühlleistung zu berücksichtigen (Material, Größe, Oberfläche und Wärmekapazität des externen Elements beeinflussen allesamt den tatsächlichen zu berücksichtigenden R_{th2}).

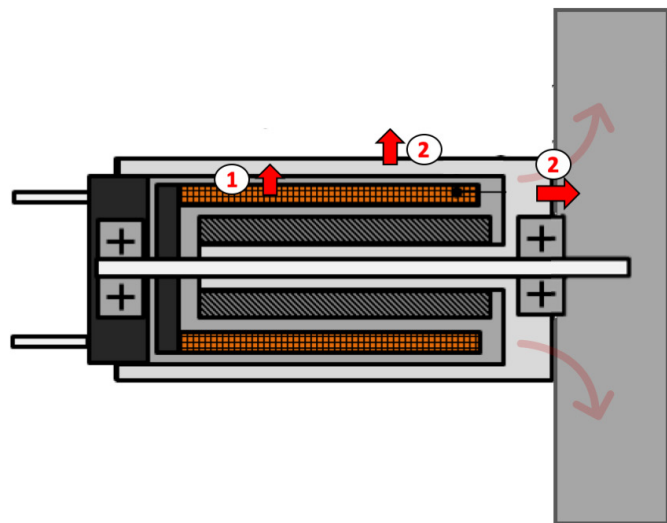


Abbildung 5: Wärmeableitung durch externe Elemente in Kontakt mit dem Motorkörper

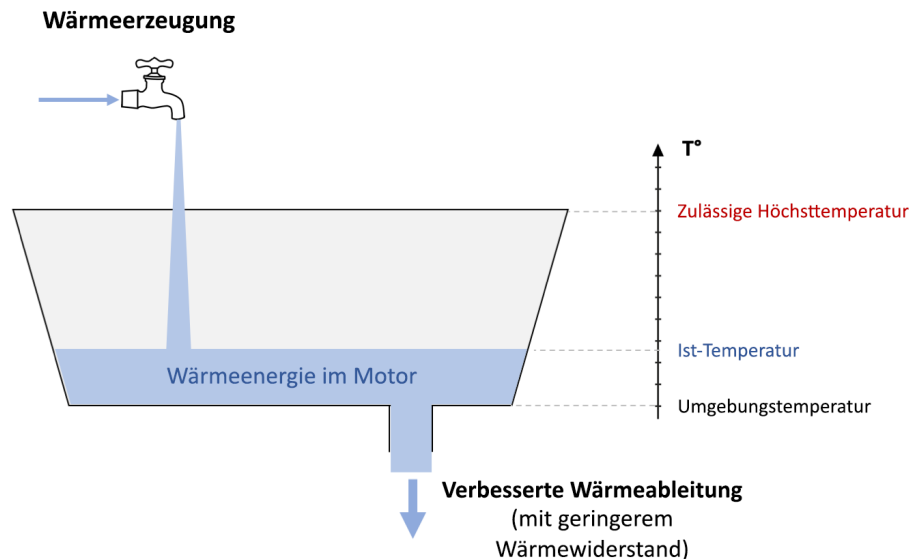


Abbildung 6: Wasseranalogie einer höheren Wärmeableitung durch einen geringeren Wärmewiderstand. Da der Wasserstand in diesem Fall niedriger ist, ist ein höheres Drehmoment (mehr Wärmeerzeugung) möglich, bevor der Wasserstand seine zulässige Höchsttemperatur erreicht.

Die Entsprechung bei der Badewannenanalogie wäre ein größerer Durchmesser für den Abfluss, durch den das Wasser schneller abfließt, ohne dass dafür der Wasserstand (Druck) in der Badewanne höher sein muss.

Dieser Zusammenhang ist in der Theorie anwendungsspezifisch. Als Faustregel kann in dieser Situation bei der thermischen Berechnung jedoch der halbe Wert von R_{th2} berücksichtigt werden (je niedriger der Wert, desto besser die Kühlung). Daraus folgt ein höheres Nenndrehmoment (maximales Dauerdrehmoment) für dieselbe maximale Spulentemperatur T_{Spule} (solange das Drehmoment proportional ist zum elektrischen Strom I).

Motor konstruktoren und -hersteller wie Portescap arbeiten ab einer frühen Entwurfsphase mit dem Kunden zusammen, um die Umgebungsbedingungen und somit die Möglichkeiten zur Wärmeabfuhr des Motors in einer gegebenen Anwendung zu bewerten und damit dessen Potenzial voll auszuschöpfen.

Transienter Betrieb

Spitzendrehmoment

Einige Anwendungen erfordern nur kurzzeitig ein hohes Drehmoment. Industrielle Elektrowerkzeuge wie Schraubendreher benötigen beim Einschrauben eine hohe Drehzahl und dann beim Anziehen etwa eine Sekunde lang ein hohes Drehmoment.

Solange die Spulentemperatur die zulässige Höchsttemperatur nicht überschreitet, ist es akzeptabel, einen Motor mit einem elektrischen Strom zu versorgen, der den maximalen Dauerstrom des Motors überschreitet. Die Dauer dieses Vorgangs muss jedoch begrenzt werden.

Bei einer leeren Badewanne entspräche dies einem plötzlichen Aufdrehen des Wasserhahns und einem dadurch sehr kräftigen Wasserfluss. Da Spitzendrehmomente üblicherweise für eine kurze Dauer (einige Sekunden) betrachtet werden, kann die Wärmeableitung (die eine längere Zeitkonstante hat) typischerweise vernachlässigt und das System als adiabatisch betrachtet werden.

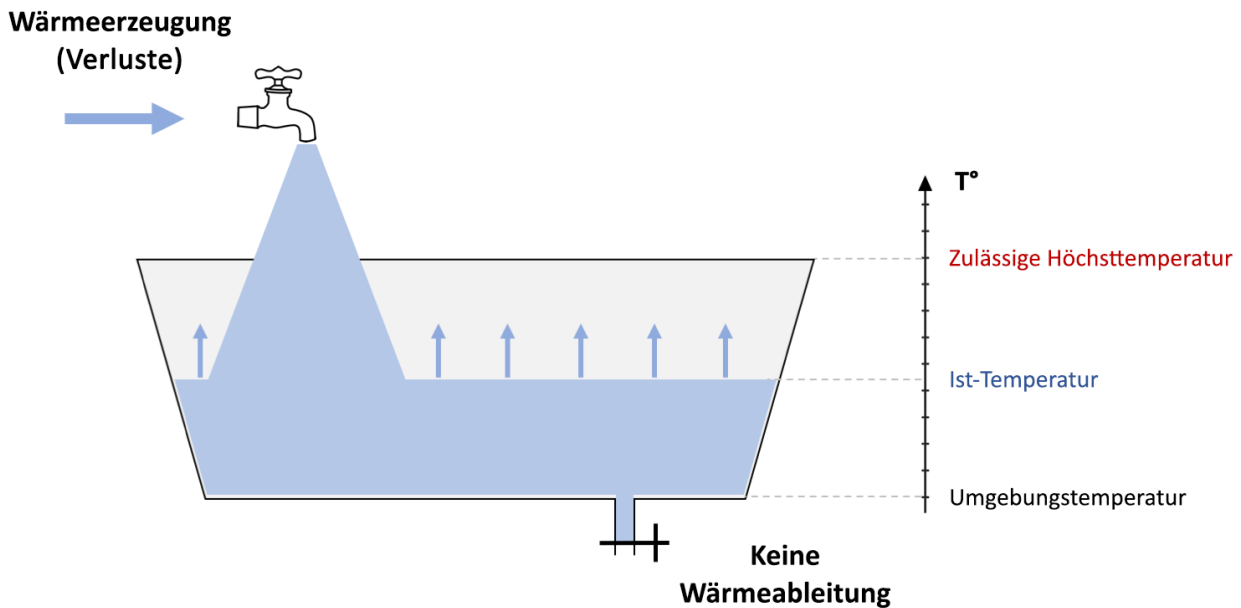


Abbildung 7: Bei einem kurzzeitig sehr hohen Strom kann die Ableitung vernachlässigt werden.

Der Wasserstand würde schnell ansteigen und die Badewanne innerhalb von Sekunden gefüllt sein. Entsprechend würde die Spulentemperatur innerhalb von Sekunden ihre zulässige Höchsttemperatur erreichen. Die folgende Formel ergibt die Temperatur der Spule über die Zeit, für die die Wärmeableitung vernachlässigt wird (kurze Zeit):

Dies zeigt, dass auch die Wärmekapazität der Spule von Bedeutung ist. Eine höhere Wärmekapazität ermöglicht es, einem Spitzenstrom für eine längere Dauer (oder einem höheren Spitzenstrom für dieselbe Dauer) standzuhalten. Je größer eine Badewanne ist, desto länger dauert das Befüllen.

$$T_{Spule}(t) = \frac{R * I^2}{C_{th}} * t + T_{Umgebung}$$

t : Zeit (s)

C_{th} : Wärmekapazität der Spule (J/K)

Nutenlose bürstenlose Motoren eignen sich besonders gut für kurze Spitzendrehmomente:

- Mit der nutenlosen Statorbauweise ist ein hohes Drehmoment mit hohem Strom erreichbar, typischerweise das 10-Fache des maximalen Dauerdrehmoments des Motors mit 10-fach höherem Strom (bei anderen (nutenlosen) Konstruktionen ist das Drehmoment aufgrund der Magnetsättigung auf einen Höchstwert begrenzt, sodass ein so hoher Strom ein deutlich tieferes Drehmoment erzielt).
- Nutenlose Spulenbauweisen können dank ihrer höheren Wärmekapazität eine große Menge an Wärmeenergie aufnehmen.
- Die Ingenieure eines Motorenherstellers arbeiten idealerweise eng mit dem Kunden zusammen, wenn dieser Spitzendrehmomente benötigt, um die beste Lösung für die besonderen Herausforderungen der konkreten Anwendung zu definieren.

Periodischer Betriebszyklus

In einigen Fällen besteht die Drehmomentanforderung der Anwendung aus einem gegebenen Drehmomentprofil, das sich regelmäßig wiederholt. In Abhängigkeit vom Drehmomentprofil und der Dauer der einzelnen Zyklusschritte kann das höchste Drehmoment das maximale Dauerdrehmoment des Motors während des Zyklus bis zu einem bestimmten Grad überschreiten.

Ist die Dauer eines Zyklus (Wiederholungsperiode) wesentlich kürzer als die thermische Zeitkonstante, wird üblicherweise ein äquivalenter Dauerdrehmomentwert (oder Stromwert) berücksichtigt, der als quadratischer Mittelwert (QMW) berechnet werden kann, da die Joule-Erwärmung proportional² ist.

Sobald der QMW definiert ist, kann dieser Strom als Dauerwert betrachtet werden. Dann gilt es nur noch sicherzustellen, dass er nicht größer als das maximale Dauerdrehmoment des Motors ist.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

I_{RMS} : Quadratischer Mittelwert des Stroms (entspricht in Bezug auf die Wärmeerzeugung einem Dauerstrom) (A)

T : Dauer eines gegebenen Betriebszyklus (s)

$i(t)$: elektrischer Augenblicksstrom (A)

Zur Erinnerung: Auch hier spielt der Einfluss des bereits erwähnten Wärmewiderstands (in Abhängigkeit von der Motorumgebung in der Anwendung) eine Rolle, da dieser Fall dem stationären Betrieb gleichzusetzen ist (wobei nach wie vor angenommen wird, dass die Dauer des Betriebszyklus kürzer als die thermische Zeitkonstante ist).

Bürstenloser Gleichstrommotor mit aktiver Luftstromkühlung

Da das Wärmemanagement der Schlüssel zur Motorleistung ist, haben Ingenieure weitere Möglichkeiten zu seiner Verbesserung aufgetan. Eine dieser Möglichkeiten besteht darin, Statorn mit einem integrierten Luftpfad zu konstruieren, sodass der Luftstrom Wärme vom Motor ableiten kann. Im Gegensatz zu Konstruktionsmassnahmen, welche hauptsächlich auf einer besseren Wärmeabfuhr beruhen, zielt dies auf eine stärkere Wärmekonvektion ab. Dieser zusätzliche Luftstrom lässt sich als reduzierter Wärmewiderstand auffassen, da er dazu beiträgt, die Wärme aus dem Motor abzuleiten.

In einigen Fällen kann der Luftstrom von einer externen Quelle wie einem Druckluftsystem angetrieben werden. Wenn der Motor jedoch in einem tragbaren Gerät verbaut

ist oder sich in einer Umgebung befindet, in der keine Druckluft verfügbar ist, kann an der Motorwelle ein Lüfter angebaut werden, der den Luftstrom während des Betriebs durch den Motorkörper treibt. In diesem Fall ist der Luftstrom umso stärker und der Wärmewiderstand umso kleiner, je höher die Motordrehzahl (und damit die Lüfterdrehzahl) ist. Anders ausgedrückt können die Drehmomente bei solchen Motoren überraschenderweise bei hoher Drehzahl sehr viel höher sein als bei niedriger Drehzahl, da die Wärmeableitung erheblich verbessert wird, wenn der Lüfter schneller läuft. Das gilt bis zu einem gewissen Punkt, da die Antriebsluft des Lüfters ein Lastmoment für den Motor mit sich bringt, das bei sehr hohen Drehzahlen schließlich zu einer zusätzlichen Wärmeerzeugung führt.

Fazit

Die Leistung von Elektromotoren hängt von vielen Aspekten ab, unter anderem vom Wärmemanagement. Ein Motor lässt sich je nach Betriebszyklus, Umgebung und entscheidenden Erfolgsfaktoren der konkreten Anwendung wie maximales Drehmoment, höchste Drehzahl, beste Energieeffizienz zur Verlängerung der Batteriebensdauer oder Betrieb bei möglichst niedriger Temperatur in vielen Hinsichten verbessern. Sie sollten darauf achten, dass Ihr Partner Sie umfassend unterstützt, Ihre kundenseitigen Herausforderungen versteht und mit der Wahl der besten Lösung für die konkrete Anwendung für maximalen Erfolg sorgt. **P**

WEITERE INFORMATIONEN

Rue Jardinière 157
CH 2301 La Chaux-de-Fonds
Schweiz
Telefon: +41 32 925 62 40
Fax: +41 32 925 62 88
sales.europe@portescap.com
www.portescap.com

WENDEN SIE SICH AN EINEN INGENIEUR:

www.portescap.com/de-de/kontaktieren-sie-uns

Daniel Muller

Anwendungstechniker Portescap

Portescap