

Berechnung der Läuferstillstandserwärmung von Asynchronmaschinen zur Bestimmung der Auslösezeit t_E für die Zündschutzart „e“

Dipl.-Ing. Uwe Dreger, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, AG 3.72
Dr.-Ing. Frank Lienesch, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, AG 3.72

Kurzfassung:

Für explosionsgeschützte Asynchronmaschinen der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit e“ muss die Auslösezeit t_E bestimmt werden. Insbesondere für Maschinen großer Leistung stößt die messtechnische Bestimmung an die Grenzen der Prüffelder. Eine Möglichkeit ist die Berechnung, die in der derzeitigen Norm nur grundsätzlich erläutert wird. Die Veröffentlichung zeigt eine Möglichkeit auf, den Stabstrom des Rotors bei blockierter Maschine unter Berücksichtigung der Stromverdrängung zu berechnen. Des Weiteren wird aus dem Stabstrom die Erwärmung berechnet und zur Verdeutlichung des Verfahrens mit messtechnisch ermittelten Werten einer Beispielmachine verglichen.

Einleitung:

Eine potentielle Zündquelle für explosionsgeschützte Betriebsmittel ist die „heiße Oberfläche“. Bei elektrischen Antrieben zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen der Zone 1 (IEC 60079-10) dürfen an den für das Gas zugänglichen Oberflächen auch im Störfall keine Temperaturen auftreten, die oberhalb der Temperaturklasse liegen. Für Antriebe der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ (IEC/EN 60079-7) ist deshalb auch die Läufererwärmung im blockierten Zustand bei Bemessungsspannung zu ermitteln. Dies geschieht üblicherweise an einer blockiert ans Netz geschalteten Maschine durch Temperaturmessung an kritischen Stellen der Läuferstäbe und der Kurzschlussringe.

Abhängig von der Netzkonstellation des Prüffeldes ist es bei großen Maschinen sehr aufwendig oder nicht mehr möglich, die Einschaltung bei blockiertem Läufer durchzuführen, da der Anzugsstrom ein Vielfaches des Bemessungsstromes beträgt. Wenn eine Prüfung nicht mehr durchgeführt werden kann oder die möglichen Prüfbedingungen zu stark von den Bemessungsdaten abweichen, muss die Ermittlung der Erwärmung auf eine andere Art und Weise z.B. durch Berechnung erfolgen. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) prüft und zertifiziert seit Jahrzehnten elektrische Maschinen bis hin zu Leistungen von einigen Megawatt. Die Veröffentlichung soll einen weiteren Ansatz zur Berechnung der Staberwärmung darstellen.

Normenanforderung:

In der EN 60079-7:2003 Anhang A wird das Prüf- und Berechnungsverfahren für die Erwärmung der Maschine spezifiziert. Vorzugsweise sollen dabei Messungen durchgeführt werden, um auch die Richtigkeit von Berechnungen zu kontrollieren.

Zur Berechnung der Läufererwärmung ist folgendes in der Norm festgelegt:

„Bei der Erwärmungsberechnung des Läufers im Kurzschluss ist die Temperaturzunahme aus der entwickelten Jouleschen Wärme unter Berücksichtigung der Wärmeentwicklung in den Stäben und Ringen sowie der entsprechenden Wärmekapazität des Käfigs zu errechnen. Der Einfluss der Stromverdrängung auf die Wärmeverteilung in den Läuferstäben muss, die Wärmeableitung zum Eisen darf berücksichtigt werden.“

Zur Berechnung der entwickelten Jouleschen Wärme (Staberwärmung) werden neben den Materialkonstanten der Werkstoffe von Stab und Ring auch der Stabstrom, der Ringstrom und die jeweilige Stromverdrängung benötigt. Zur Ermittlung dieser Größen gibt die EN 60079-7 jedoch keine Informationen. Ebenfalls gibt es keine Informationen, wie eine mögliche Wärmeableitung an das Eisen berücksichtigt werden kann.

Bisher wurde von der PTB nur bei Rechteck-Stäben und nur in Ausnahmefällen folgendes Berechnungsverfahren akzeptiert:

$$\Theta = S^2 \cdot 0,0065 \quad (1)$$

Θ = Erwärmung in K/s
 S = Stromdichte in A/mm^2
 0,0065 Faktor für Kupfer bei 90 °C

Abhängig von der Stabhöhe tritt beim Stillstand im Stab eine z.T. erhebliche Stromverdrängung auf. Diese bewirkt, dass der Strom bei 50 Hz überwiegend im ersten oberen cm der Stabhöhe fließt [1].

Um die in den Stäben auftretende Stromverdrängung zu berücksichtigen, wird die ermittelte Stromerwärmung mit der Stabhöhe in cm multipliziert. Da die Berücksichtigung der Stromverdrängung jedoch relativ ungenau ist, wird die aus der Staberwärmung ermittelte Erwärmungszeit aus Sicherheitsgründen um 40% gekürzt. Dies ist gleichbedeutend mit einem Erwärmungsaufschlag von 67%. Eine Berücksichtigung vom internen Wärmeausgleich im Leiter sowie ein Wärmeausgleich zum Blechpaket findet nicht statt.

Theoretische Überlegungen

Bei Maschinen mit kleiner Leistung kann die Erwärmung immer durch die Messung ermittelt werden. Die Berechnung der Läufererwärmung ist insbesondere bei Großmaschinen interessant, da der Läufer deutlich wärmer als der Ständer wird. Diese Maschinen sind in der üblichen Bemessung des Läufers von der Erwärmung her überwiegend stabkritisch.

Hierbei stellen sich mehrere Fragen:

Wie kann der Rotorstabstrom ermittelt werden, und wie groß ist der Unterschied der Ströme in den einzelnen Stäben? Wie kann der Einfluss der Stromverdrängung bestimmt werden? Wie kann der innere Wärmeausgleich im Stab berücksichtigt werden? Darf eine Wärmeableitung an das Eisen berechnet werden, und wenn möglich, welchen Einflüssen unterliegt sie?

Alle folgenden Berechnungen und Vergleiche mit Messungen wurden für einen realen Motor mit folgenden Bemessungsdaten durchgeführt:

$$\begin{array}{lll} P = 980 \text{ kW} & U = 6000 \text{ V} & I = 105,4 \text{ A;} \\ \cos \varphi = 0,92 & f = 50 \text{ Hz} & n = 2993 \text{ }^1/\text{min} \end{array}$$

Teil 1: Rotorstabstrom

Aus dem Ersatzschaltbild (Abb. 1) der Asynchronmaschine ist zu sehen, dass der Läuferstrom (bezogen auf den Ständer) durch

$$\underline{I}'_2 = \underline{I}_1 - \underline{I}_0 \quad (2)$$

berechnet werden kann.

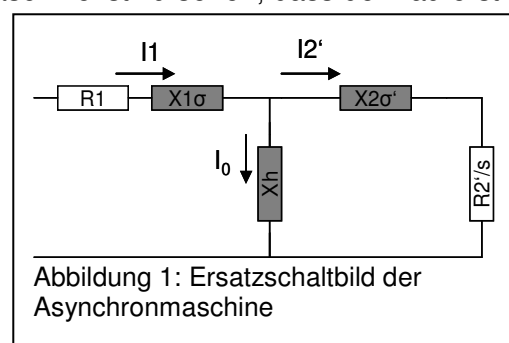
Im Kurzschluss beträgt der Stabstrom

$$\underline{I}'_{2K} = \underline{I}_{1K} - \underline{I}_0 \quad (3)$$

I_0 wird beim Leerlaufversuch ermittelt. I_{1k} ist der Kurzschlussstrom der Ständerwicklung. Kann der Kurzschlussstrom bei Bemessungsspannung nicht direkt durch die Messung bestimmt werden, muss auch er alternativ berechnet werden. Basierend auf den möglichen Messpunkten muss der Bemessungswert extrapoliert werden. Dazu stehen:

- Sättigungsfaktoren,
- eine Hochrechnung doppellogarithmisch – linear oder
- Polynome 2.ter bzw. 3.ter Ordnung (Abb. 2)

zur Verfügung [2].



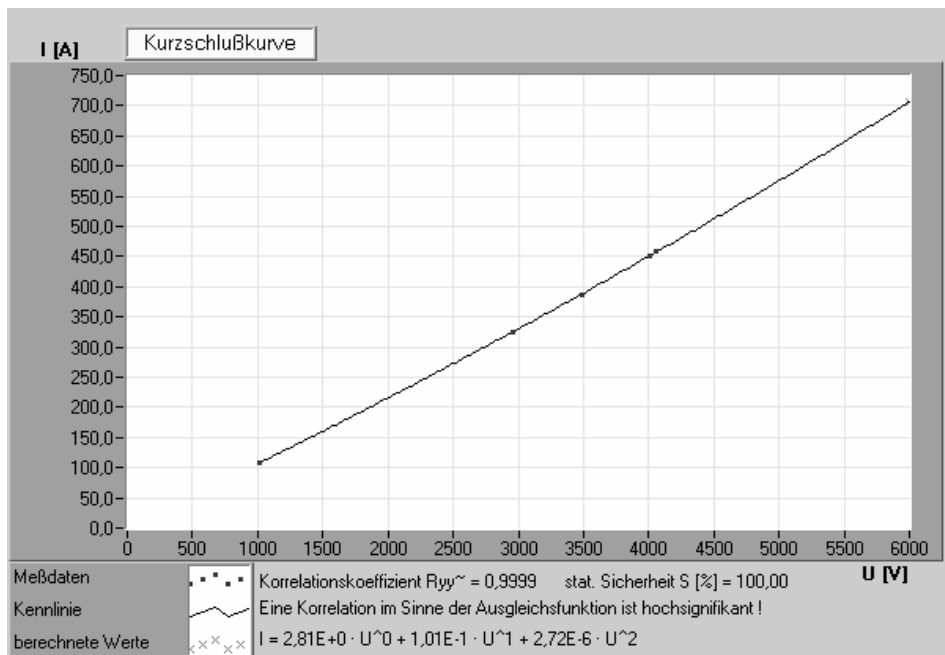


Abbildung 2: Extrapolation vom Kurzschlussstrom Ständerwicklung

Anschließend muss der Stabstrom auf den Läufer bezogen werden [3,4].

$$I_2 = \frac{I_{2K} \cdot n_{St} \cdot n_L \cdot \gamma}{n_{rSt} \cdot n_{pG} \cdot 0,99} \quad (4)$$

γ = Wicklungsfaktor Stator

n_{rSt} = Rotorstabzahl

n_{St} = Ständernutzahl

n_L = Eff.-Leiter pro Nut

n_{pG} = parallele Gruppen

Wenn die Ständerwicklung in Dreieck geschaltet ist, muss I_2 durch $\sqrt{3}$ geteilt werden.

Beispielmaschine:

Leerlaufmessung:

$$I_0 = 20,05 \text{ A}; \cos \varphi_0 = 0,0804$$

Kurzschluss (auf U_N berechnet):

$$I_{1K} = 706,1 \text{ A}; \cos \varphi_K = 0,1197$$

Wicklungsdaten:

$$n_{St} = 60; n_L = 22; \gamma = 0,8919; n_{pG} = 2; n_{rSt} = 50$$

Daraus folgt nach (3)

$$I_{2K} = 686,07 \text{ A};$$

sowie nach (4)

$$\underline{\underline{I_2 = 8158,7 \text{ A}}}$$

Die Kurzschlussmessung wurde bei reduzierter Spannung mit einem Ständerstrom von $I_{StM} = 458,5 \text{ A}$ ($U_M = 4062 \text{ V}$) durchgeführt. Somit ergibt sich nach dem Dreisatz bei der Messung ein Stabstrom von

$$I_{2M} = \frac{8158,7 \text{ A} \cdot 458,5 \text{ A}}{706,1 \text{ A}} = 5298 \text{ A}$$

Berechnung des Stabstromes und der Stromverdrängung durch Finite Elemente Methode (FEM):

Basierend auf der Maschinengeometrie der Beispielmaschine und dem Ständerstrom bei der Kurzschlussmessung wurde eine Vergleichsrechnung mit der Finite Elemente Methode durchgeführt. Die 2D-Simulation in Abbildung 3 zeigt die berechneten Stromdichten der einzelnen Kurzschlussstäbe der Beispielmaschine.

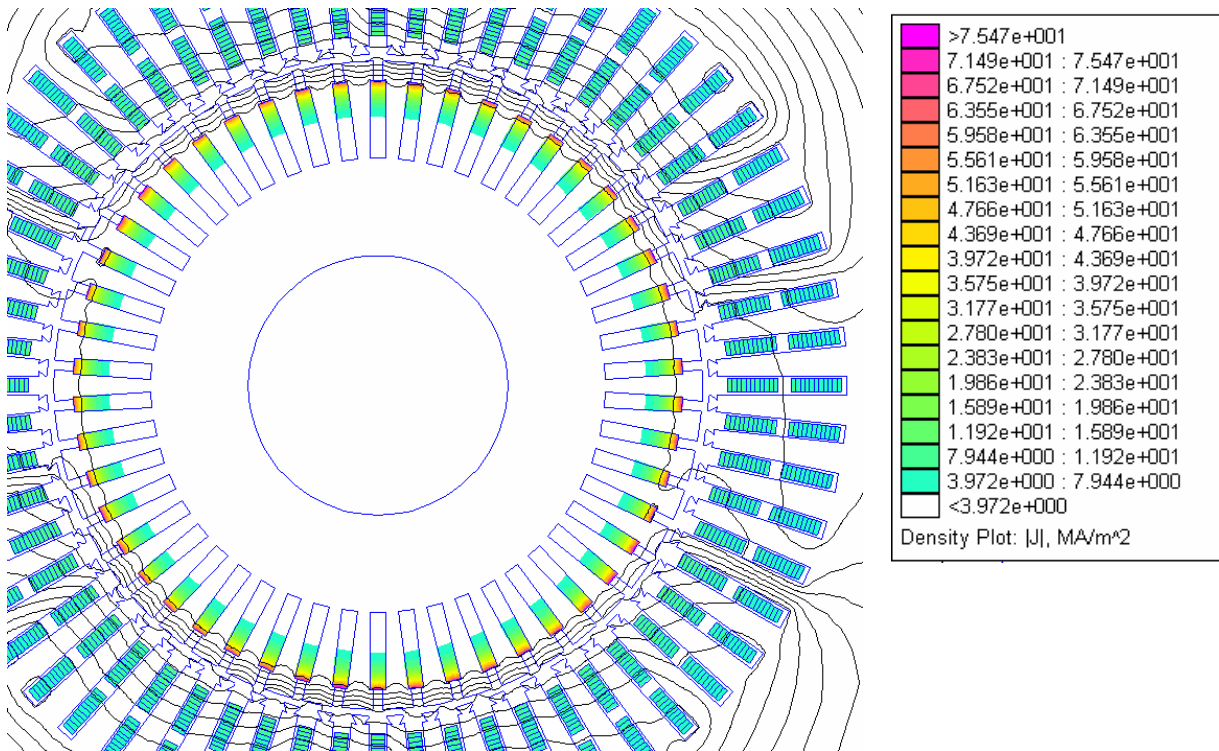


Abbildung 3: FEM 2D-Berechnung einer kompletten Asynchronmaschine

Der Stabstrom des Läufers ist von der Position des Rotors abhängig. Der Mittelwert der Effektivwerte der einzelnen Stabströme beträgt bei der Simulation $I_{2M} = 5364$ A. Die Differenz zur analytischen Rechnung ist sehr gering und beträgt bei dieser Maschine lediglich 1,2 %.

Größer ist der Unterschied der einzelnen Stabströme untereinander, abhängig von der geometrisch betrachteten Läuferposition zum Ständer. In der Abbildung 4 sind die Abweichungen der einzelnen Effektivwerte der Stabströme vom Mittelwert dargestellt, die mit der FEM Simulation ermittelt wurden.

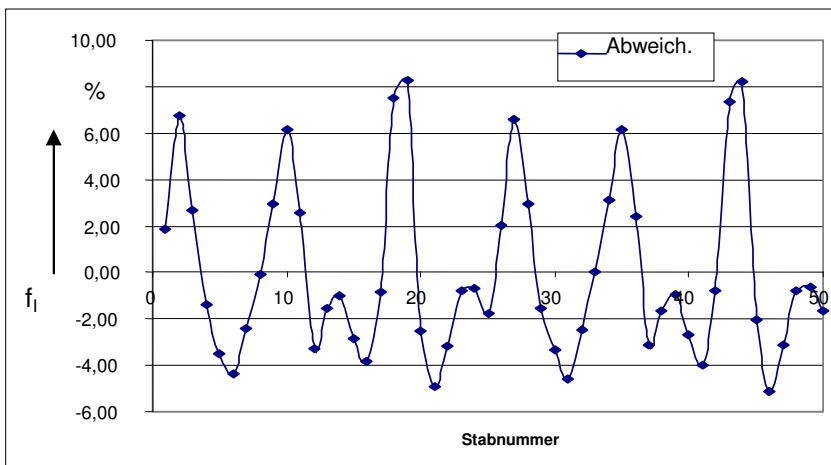


Abbildung 4: Abweichung der Stabströme vom Mittelwert

Für die Beispielmachine beträgt der Strom im Stab 19 $I_{19} = 5808$ A im Stab 20 $I_{20} = 5228$ A, diese Stromdifferenz von 11,1 % bewirkt, dass der Stab 19 eine ca. 23 % höhere Wärmeentwicklung haben wird als Stab 20. Die max. Abweichung vom Mittelwert beträgt bei diesem Beispiel 8,3 %.

Bei der Betrachtung der Stromdichte eines einzelnen Stabes aus Abbildung 3 ist zu sehen, dass mit der FEM Simulation auch die Stromverdrängung in den Stäben ermittelt wird. Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Stromdichte in einem einzelnen Stab der Beispielmachine. Die Höhe der Stromdichte vom Nutgrund zum oberen Stabende ist in Abbildung 5 dargestellt. Der mittlere Strom in diesem Stab beträgt $I_2 = 5465$ A.

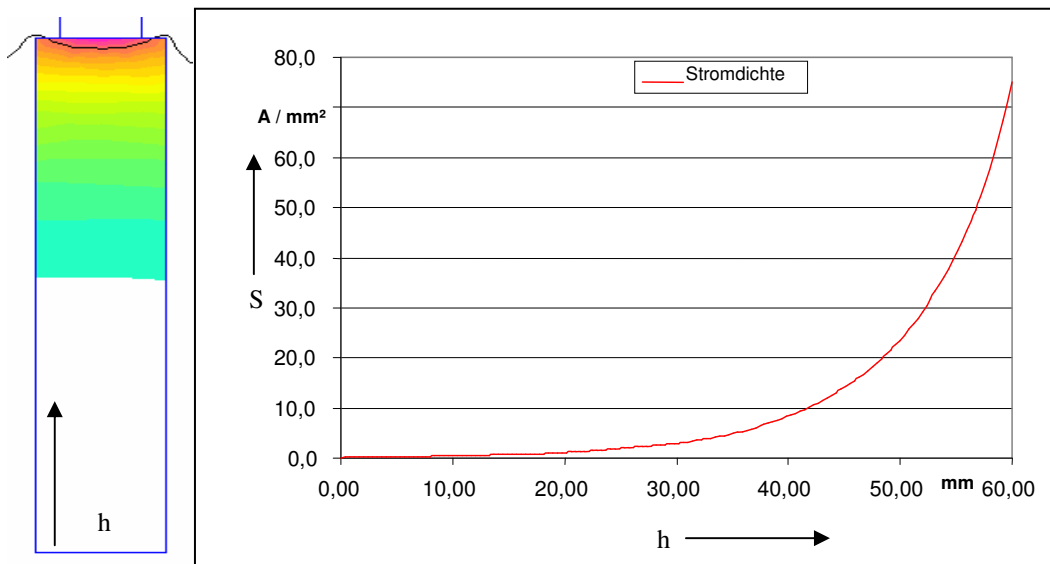


Abbildung 5: Darstellung der Stromdichte im Stab 1 mit $I_2 = 5465 \text{ A}$ in Abhängigkeit der Höhe vom Nutgrund

Analytische Ermittlung der Stromverdrängung:

Die Stromverdrängung ist von der Geometrie und der Leitfähigkeit der Stäbe sowie von der Frequenz abhängig. Eine Berechnung der Stromverdrängung durch eine Finite Elemente Methode ist sehr aufwendig und somit nur in speziellen Fällen sinnvoll.

Eine Alternative könnte das Teileiterverfahren sein. Hierbei wird der Stab in seiner Höhe in mehrere Einzelleiter zerlegt betrachtet. Wenn die Teileiter beginnend im Nutgrund fortlaufend als 1, 2, 3, 4 ... n gezählt werden, so gelten für die mit den Teileitern gebildeten Schleifen [5].

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 \cdot R_1 - \underline{I}_2 \cdot R_2 + \underline{I}_1 \cdot j\omega L_1 &= 0 \\ \underline{I}_2 \cdot R_2 - \underline{I}_3 \cdot R_3 + (\underline{I}_1 + \underline{I}_2) \cdot j\omega L_2 &= 0 \\ \underline{I}_3 \cdot R_3 - \underline{I}_4 \cdot R_4 + (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3) \cdot j\omega L_3 &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

usw.

Der Teileiterwiderstand $R_1, R_2 \dots R_n$ ist aus der Geometrie nach

$$R_n = \frac{\delta \cdot l}{A} = \frac{l}{\kappa \cdot A} = \frac{l}{\kappa \cdot h \cdot b} \quad (6)$$

leicht zu berechnen. Die Teileiterinduktivität L_n kann wie folgt angesetzt werden:

$$L_n = \mu_0 \cdot \frac{l \cdot h}{b} \quad (7)$$

- l = Stablänge
- h = Teileiterhöhe
- b = Leiterbreite

Durch Umstellen der Gleichungen kann ausgehend von der Annahme, dass im untersten Teileiter 1 A fließt, der Strom jedes Teileiters berechnet werden.

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= 1A \\ \underline{I}_2 &= (\underline{I}_1 \cdot R_1 + j\omega L_1 \cdot \underline{I}_1) / R_2 \\ \underline{I}_3 &= (\underline{I}_2 \cdot R_2 + j\omega L_2 \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2)) / R_3 \\ \underline{I}_4 &= (\underline{I}_3 \cdot R_3 + j\omega L_3 \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3)) / R_4 \end{aligned} \quad (8)$$

USW.

Der tatsächliche Strom jedes Teilleiters $I_{n,St}$ wird anschließend berechnet aus:

$$I_{n,St} = I_n \cdot \frac{I_{St}}{\sum_1^n I_n} \quad (9)$$

$I_{n,St}$ = tatsächlicher Teilleiterstrom
 I_{St} = tatsächlicher Stabstrom

Beispielmaschine:

Kupferstab: $h_{ges} = 60 \text{ mm}$ $b = 12 \text{ mm}$ $l = 1 \text{ m}$
 Stabstrom: $I = 5298 \text{ A}$ $f = 50 \text{ Hz}$ $\Theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 Mit 20 Teilleiter gerechnet folgt nach Gleichung (6) und (7):

$$R_n = \frac{0,0124 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 1\text{m}}{12\text{mm} \cdot \frac{60\text{mm}}{20}} = 0,4789\text{m}\Omega$$

$$L_n = \frac{1,25664 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{60\text{mm}}{20}}{12\text{mm}} = 3,1416 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

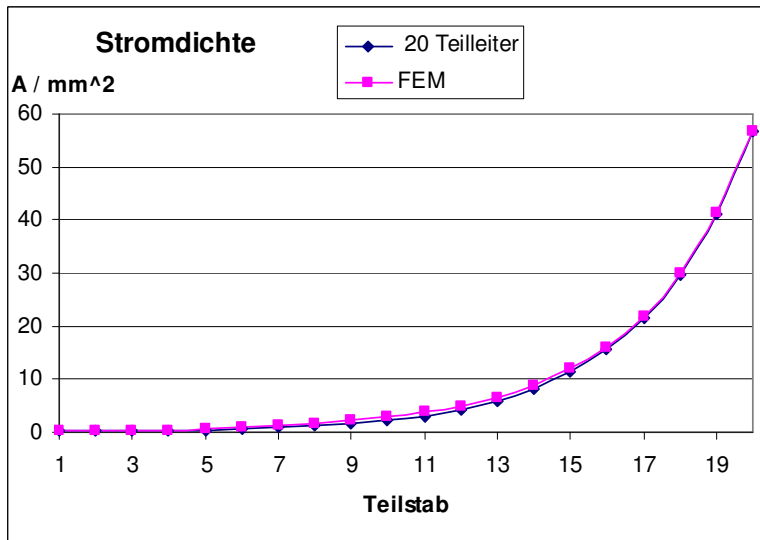
$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz} = 314,16\text{Hz}$$

Teilleiterstrom I_n	Real in A	Imaginär in A	Betrag in A		Betrag * Gl.(9) in A	Stromdichte in A/mm ²
I_1	1	0	1		7,429	0,21
I_2	1	0,206	1,021		7,585	0,21
I_3	0,958	0,618	1,14		8,469	0,24
I_4	0,788	1,228	1,459		10,839	0,30
I_5	0,365	2,000	2,033		15,103	0,42
I_6	-0,470	2,846	2,885		21,433	0,60
I_7	-1,892	3,600	4,064		30,189	0,84
I_8	-4,054	3,957	5,665		42,087	1,17
I_9	-7,032	3,482	7,847		58,296	1,62
I_{10}	-10,728	1,557	10,841		80,534	2,24
I_{11}	-14,745	-2,578	14,968		111,197	3,09
I_{12}	-18,230	-9,752	20,674		153,589	4,27
I_{13}	-19,705	-20,683	28,567		212,22	5,90
I_{14}	-16,918	-35,674	39,482		293,315	8,15
I_{15}	-6,780	-54,152	54,575		405,434	11,26
I_{16}	14,518	-74,027	75,437		560,421	15,57
I_{17}	51,071	-90,910	104,273		774,644	21,52
I_{18}	106,358	-97,269	144,129		1070,737	29,74
I_{19}	181,691	-81,710	199,218		1479,993	41,11
I_{20}	273,861	-28,708	275,362		2045,664	56,82
Summe	531,054	-475,972	713,139		5298	

Tabelle 1: Teilleiterströme nach Gleichung (8)

Die Summe aus den Teilleiterströmen bei der Annahme, dass in dem untersten Teilleiter 1 A fließt, beträgt 713,14 A. Der tatsächliche Stabstrom beträgt jedoch 5298 A. Somit kann der reale Teilleiterstrom berechnet werden durch Multiplikation mit dem Faktor $5298 \text{ A} / 713,14 \text{ A} = 7,429$ (Gleichung (9)).

Ein Vergleich der Stromdichten der Teileiter aus dem Teileiterverfahren mit denen aus der FEM Simulation (Stab 8) zeigt, dass das Teileiterverfahren gut geeignet ist, bei rechteckigen Stäben und ausreichend hoher Teileiteranzahl die jeweiligen Stromdichten zu berechnen (Abb. 6).



Für diesen Vergleich wurden die Stromdichten der FEM Simulation an den Stellen betrachtet, an denen sich bei dem Teileiterverfahren die Teileitermitte befindet.

In Abbildung 5 ist eine höhere Stromdichte am Rand des Stabes berechnet worden. Beim Teileiterverfahren kann dies durch die Erhöhung der Teileiterzahl erreicht werden.

Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass die Zerlegung in 20 Teileiter in der Regel vollkommen ausreichend ist.

Abb. 6: Vergleich der Berechnung der Teileiterströme und der FEM

Teil 2: Rotorstaberwärmung

Im ersten Teil wurde der Strom in den Kurzschlussstäben einer blockierten Asynchronmaschine unter Berücksichtigung der Stromverdrängung rechnerisch bestimmt. Im zweiten Schritt soll ein einfaches Verfahren dargestellt werden, wie aus den jeweiligen Stabstromdichten und der Geometrie die Erwärmung der Stäbe unter Berücksichtigung des Wärmeausgleichs im Stabmaterial bestimmt werden kann.

Bei konstanter Stromdichte im gesamten Querschnitt kann die Erwärmung nach folgender Formel berechnet werden [2]:

$$\Theta = S^2 \cdot \frac{1 + \alpha \cdot (\vartheta - 20)}{c \cdot \gamma \cdot \sigma} \cdot t \cdot 1000 \quad (10)$$

Θ = Erwärmung in K

S = Stromdichte in A/mm²

α = Temp.-koeffizient der elektr. Leitfähigkeit in 1/K

ϑ = Stabtemperatur in °C

c = Spez. Wärmekapazität in J/(kg*K)

γ = elektr. Leitfähigkeit in S*m/mm²

σ = Dichte Stabmaterial in kg/dm³

t = Zeit in s

Für handelsübliches Kupfer gelten die folgenden Werte:

$$\alpha = 0,0041 \text{ 1/K}; \quad c = 386 \text{ J/(kg*K)}; \quad \gamma = 58 \text{ S*m/mm}^2; \quad \sigma = 8,96 \text{ kg/dm}^3$$

Bei dem Teileiterverfahren wurde für jeden Teileiter der Beispielmachine der Strom entsprechend Tabelle 1 bestimmt. In Abbildung 7 ist der Einfluss der Stromverdrängung (Gleichung 10) auf die Staberwärmung im Vergleich zum Gleichstrom deutlich erkennbar.

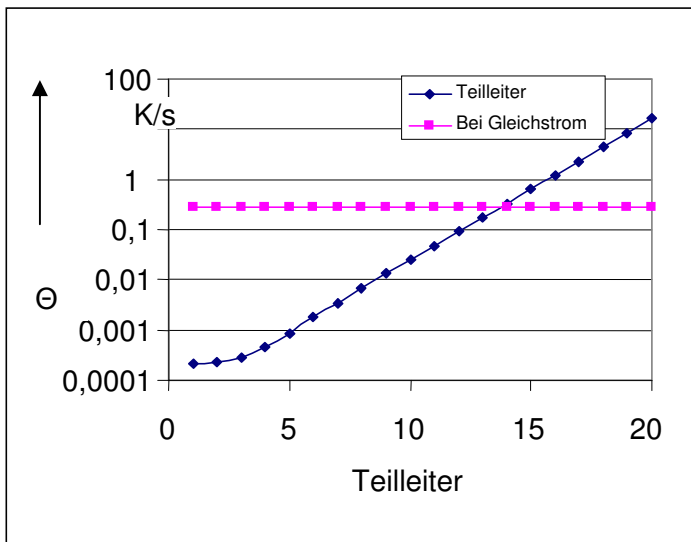


Abb. 7: Joulesche Erwärmung ohne Wärmeausgleich im Stab

Um den Wärmeausgleich im Stab zu berücksichtigen, kann das thermische Ersatzschaltbild der Stabanordnung nach Abbildung 8 herangezogen werden.

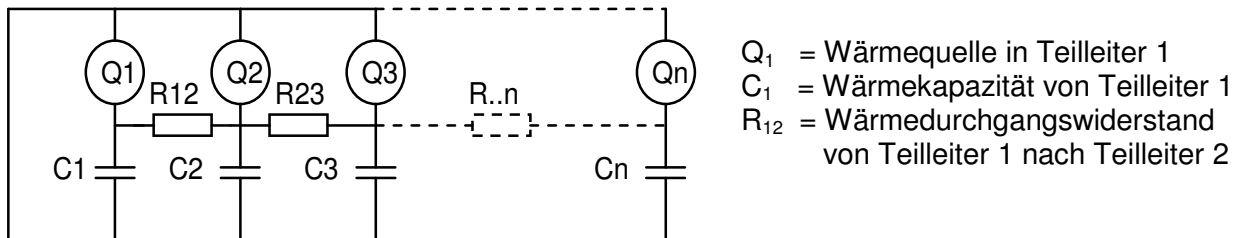


Abb. 8: Thermisches Ersatzschaltbild der Stabanordnung

Das dargestellte thermische Ersatzschaltbild ist die einfachste Form zur Berücksichtigung des Wärmeausgleiches im Leiter. Hierbei wird der Wärmeausgleich vom Stab zum Eisen des Läufers nicht berücksichtigt.

Zur Bestimmung der Erwärmung in Abhängigkeit von der Zeit kann das Ersatzschaltbild mit einem beliebigen Schaltungssimulationsprogramm (z.B. PSpice, MatCad,...) gelöst werden. Hierbei werden die Wärmequellen als Konstantstromquellen, die Wärmekapazitäten als elektrische Kapazitäten und die Wärmedurchgangswiderstände als elektrische Widerstände eingesetzt. Die sich ergebenden Spannungen an den Kapazitäten entsprechen der Temperatur des Teilleiters.

$$Q_1 = I_1^2 \cdot R_1 \quad \text{in W bzw. J/s} \quad (11)$$

$$C_1 = c \cdot m \quad \text{in J/K} \quad (12)$$

$$R_{12} = \frac{l}{\lambda \cdot A} \quad \text{in K}\cdot\text{s/kJ} \quad (13)$$

- m = Masse des Teilleiters in kg
- l = Länge des Wärmetransports in m (entspricht der Teilleiterhöhe)
- λ = Wärmeleitfähigkeit in $\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$ ($Cu = 0,372 \text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$)
- A = Fläche vom Wärmeausgleich in m^2 (Stablänge * Stabbreite)

Bei der Simulation der Schaltung entspricht

- 1 kJ/s \Rightarrow 1 A
- 1 kJ/K \Rightarrow 1 F
- 1 K·s/kJ \Rightarrow 1 Ω

Die Erwärmung des einzelnen Teilleiters 1 bis n entspricht dann der Spannung an der jeweiligen Kapazität C_1 bis C_n : $1 \text{ V} \Rightarrow 1 \text{ K}$

Beispielmaschine:

Da die Teilleiter gleiche Abmessungen haben, ist:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = R_3 = \dots R_n \\ C_1 &= C_2 = C_3 = \dots C_n \\ R_{12} &= R_{23} = R_{34} = \dots R_{(n-1)n} \end{aligned}$$

Nach Gleichung (6) $R_1 = 0,478927 \text{ m}\Omega$

(11) $Q_1 = 7,429^2 \cdot A^2 \cdot 0,4789 \text{ m}\Omega = 26,43 \text{ mW} \Rightarrow 0,02643 \text{ mA}$

$Q_2 = 7,585^2 \cdot A^2 \cdot 0,4789 \text{ m}\Omega = 27,55 \text{ mW} \Rightarrow 0,02755 \text{ mA}$

usw.

(12) $C_1 = 386 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 8,96 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot 0,1 \cdot 0,12 \cdot 0,03 \text{ dm}^3 = 124,5 \frac{\text{J}}{\text{K}} \Rightarrow 0,1234 \text{ F}$

(13) $R_{12} = \frac{0,003 \text{ m}}{0,372 \frac{\text{kJ}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}} \cdot 1 \text{ m} \cdot 0,012 \text{ m}} = 0,672 \frac{\text{K} \cdot \text{s}}{\text{kJ}} \Rightarrow 0,672 \Omega$

Die Berechnung des thermischen Ersatzschaltbildes für die elektrische Schaltung mit den ermittelten Werten zeigt die Teilleitererwärmung als Funktion der Zeit. Die maximale Stabtemperatur ergibt sich an der Oberfläche des obersten Teilleiters und ist in Abbildung 9 dargestellt. Der Temperaturverlauf stimmt mit der Messung der Beispielmaschine überein. Bei der adiabatischen Rechenmethode nach Gleichung (1) zeigt sich im Vergleich hingegen ein linearer Anstieg. Ohne den bereits erwähnten Sicherheitsabschlag liegt der Temperaturverlauf deutlich zu niedrig und kann nicht zur Bestimmung der Rotorstaberwärmung verwendet werden, obwohl die Stromverdrängung in Form eines Faktors berücksichtigt wurde (Faktor = Stabhöhe in cm).

Mit dem Sicherheitszuschlag ist der Temperaturverlauf ab einer Erwärmungszeit von 7 Sekunden oberhalb des Messergebnisses und damit auf der sicheren Seite. Im Umkehrschluss ist jedoch die berechnete Erwärmung nach dem bisherigen Verfahren in diesem Beispiel unter 7 s unterhalb der Messung und damit unsicher.

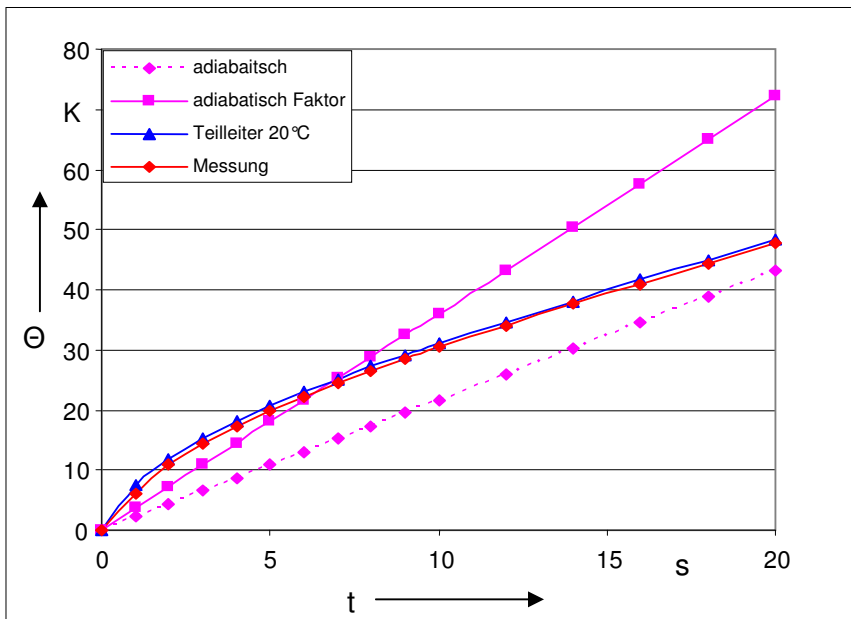


Abb. 9: Staberwärmung in Abhängigkeit der Zeit bezogen auf $\Theta = 20^\circ\text{C}$ Umgebungstemperatur

Die Berechnung der Staberwärmung mit dem hier beschriebenen Verfahren zeigt im Vergleich zur Messung eine sehr gute Übereinstimmung. Die Berechnung wurde bisher jedoch mit dem Teilleiterverfahren bezogen auf 20°C Kupfertemperatur durchgeführt. Aus dem Erwärmungsverlauf ist zu sehen, dass der Stab nach 20 s eine Temperatur von ca. $20^\circ\text{C} + 50\text{ K} = 70^\circ\text{C}$ erreicht. Wenn die Materialdaten, die Stromverdrängung und die Lösung des Ersatzschaltbildes auf die mittlere Temperatur von $(70^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C})/2 = 45^\circ\text{C}$ bezogen werden, ergeben sich die Ergebnisse von Abbildung 10. Die berechnete Erwärmung nach dem Teilleiterverfahren steigt um einige K an, da mit der Erwärmung auch der Widerstand und damit die Verluste wiederum ansteigen.

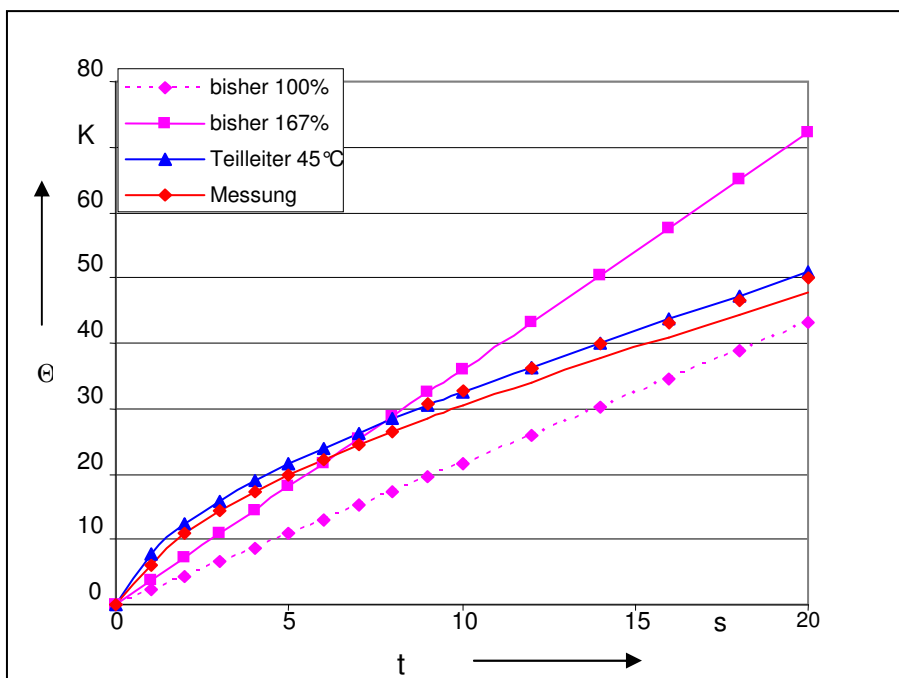


Abb. 10: Staberwärmung in Abhängigkeit der Zeit bezogen auf $\Theta = 45^\circ\text{C}$, mittlere Temperatur

Obwohl der Vergleich der Rechnung mit der Messung sehr gute Ergebnisse in der Staberwärmung zeigt, ist dieses Verfahren nur als Hilfsmittel zur Arbeitserleichterung gedacht. Grundsätzlich sollen nach wie vor die Maschinen im blockierten Zustand gemessen werden, um die Ergebnisse der Berechnungen abzustützen. Ein Vergleich der Berechnung mit der Messung kann auch eventuelle

Fehler bei der Messung hervorbringen oder die Grenzen für die Spannungsreduzierung beim Versuch aufzeigen.

Wesentliche Vorteile der beschriebenen Berechnungsmethode gegenüber dem bisher in PTB verwendeten Verfahren sind:

- 1.) Das Ergebnis der Berechnung entspricht im zeitlichen Verlauf sehr gut der Messung.
- 2.) Berechnung für andere Frequenzen z.B. 60 Hz möglich (50 Hz Messung vorhanden).
- 3.) Berechnung für von der Messung abweichende Stabmaterialien und -geometrien möglich.

Der Nachteil ist hingegen, dass die Ermittlung der Staberwärmung etwas aufwendiger ist. Dies kann aber durch die Programmierung der einzelnen Berechnungsschritte gelöst werden. In der PTB steht dazu ein Software-Tool zur Verfügung. Damit kann im ersten Schritt der Mittelwert des Stabstromes berechnet werden. Mit dem zweiten Schritt wird dann die Staberwärmung durch iterative Lösung des thermischen Ersatzschaltbildes bestimmt.

Zusammenfassung:

Zur rechnerischen Bestimmung der Auslösezeit t_E für explosionsgeschützte Maschinen muss zunächst der Stabstrom bei blockierter Maschine unter Berücksichtigung der Stromverdrängung berechnet werden. Die Berechnung mit einer Finite Elemente Methode ist sehr aufwendig. Eine einfache Alternative ist die Verwendung des Teilleiterverfahrens. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der Berechnungen mit dem Teilleiterverfahren und der Finiten Elemente Methode. Lediglich der Einfluss der Position des Stabes kann mit dem Teilleiterverfahren nicht nachgebildet werden.

Die Ergebnisse der Rotorstaberwärmung bei der Beispielmachine lassen sich durch das beschriebene Verfahren sehr gut nachbilden. Jedoch muss bei der Bewertung folgendes beachtet werden:

- Da der bei der Stabstromberechnung ermittelte Strom den Mittelwert der Stabströme darstellt und die einzelnen Ströme abhängig von der Position des Läufers zum Ständer um 10% und mehr variieren, stellt sich natürlich auch die Frage, ob bei der Messung oder Berechnung auch der wärmste Punkt ermittelt wurde.
- Die Rotorstäbe werden im Blechpaket verstemmt, damit lose Stäbe keine Funken erzeugen. Durch die Verstemmung verbessert sich der Wärmeübergang vom Stab zum Paket deutlich. Der Einfluss ist jedoch analytisch nicht oder nur schwer bestimmbar. Es stellt sich die Frage, in welcher Form und wie stark der Wärmefluss in das Blechpaket berücksichtigt werden kann.
- Die Erhöhung der Anzahl der Teilleiter erhöht die Stromdichte im obersten Stab und damit auch die errechnete Erwärmung.
- Der Einfluss von Kühlschlitzen, der Übergang vom Blechpaket und der Kurzschlussring muss in die korrekte Bewertung einfließen. Weiterführende 3-D Simulationen geben Aufschlüsse über den Stromverlauf und die Erwärmung.
- Ein weiterer Punkt ist die Stromverdrängung im Stab, die abhängig vom Widerstand des Stabes und somit auch von der Temperatur ist.

Die Berechnung muss weiterhin durch messtechnische Untersuchungen abgestützt werden. Zur Absicherung der Berechnungsmethode sollen in der PTB weitere unterschiedliche Maschinentypen untersucht werden.

Trotz der noch ungeklärten Punkte kann die einfache Berechnungsmethode dem Konstrukteur bei der Auslegung der Asynchronmaschine für Zündschutzart „e“ eine gute Abschätzung geben und ist hilfreich bei der Interpretation von Messungen. Insbesondere bei vergleichbaren Maschinen innerhalb einer Baugruppe lässt sich der Prüfungsaufwand minimieren.

Literaturverzeichnis:

- [1] Seinsch
Grundlagen elektrischer Maschinen und Antriebe
B.G. Teubner-Verlag, 3. Auflage
- [2] PTB-Prüfregeln
 - Explosionsgeschützte Maschinen der Schutzart „Erhöhte Sicherheit „e““
 - Prüf- und Zertifizierungsverfahren nach Richtlinie 94/9/EG für explosionsgeschützte Antriebe
- [3] Bödefeld, Sequenz;
Elektrische Maschinen
Springer Verlag; 7. Auflage
- [4] Vaske, Riggert
Elektrische Maschinen und Umformer Teil2: Berechnung elektrischer Maschinen
B.G. Teubner-Verlag; 8. Auflage
- [5] Möller, Vaske;
Elektrische Maschinen und Umformer Teil 1: Aufbau, Wicklungsweise und Betriebsverhalten
B.G. Teubner-Verlag; 12. Auflage