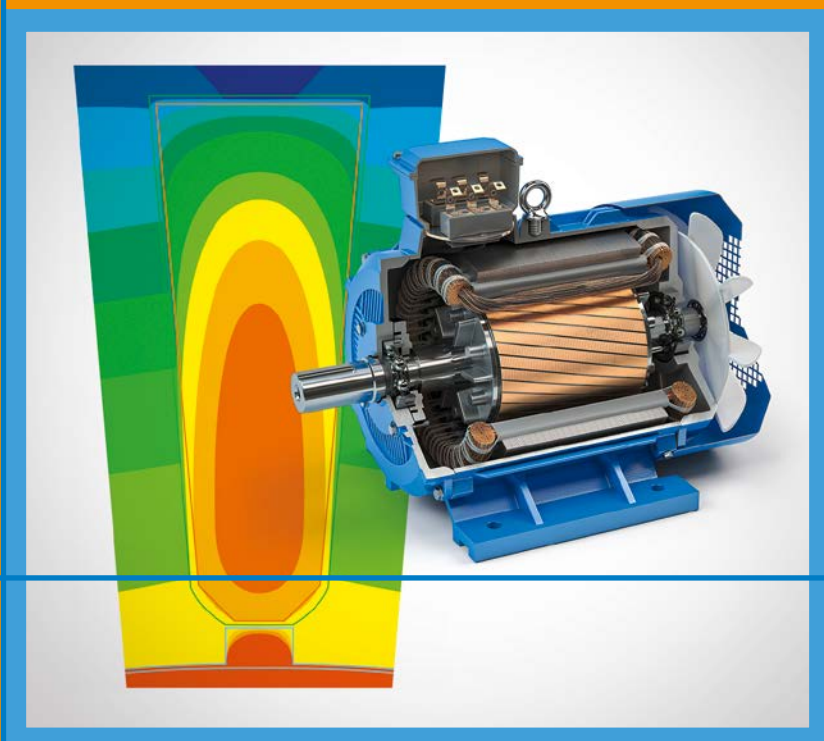


Eugen Nolle



Elektrische Maschinen

Erwärmung und Kühlung



HANSER

Nolle

Elektrische Maschinen – Erwärmung und Kühlung



Blieben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-ufluf-3x4p7

plus.hanser-fachbuch.de

Eugen Nolle

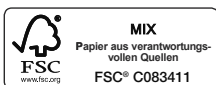
Elektrische Maschinen

Erwärmung und Kühlung

HANSER

Über den Autor:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Eugen Nolle war Professor an der Hochschule Esslingen.



Print-ISBN: 978-3-446-48299-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-48386-6

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text- und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

Kolbergerstraße 22 | 81679 München | info@hanser.de

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © Eugen Nolle, stock.adobe.com/Maksym_Yemelyanov

Satz: le-tex publishing services, Leipzig

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Inhalt

Vorwort	XI
1 Definitionen und Normen	1
1.1 Kühlungsarten	1
1.1.1 Statische Wandler, Transformatoren, Drosseln	1
1.1.2 Elektromechanische Wandler, Motoren, Generatoren	3
1.2 Betriebsarten (Bemessungsklassen)	7
1.3 Isolierstoffklassen	9
2 Einleitung	13
2.1 Analogiebetrachtungen, Wachstumsgesetze	14
2.2 FEM-Simulationen	14
2.3 Wärmeschaltbilder, thermische Ersatzschaltungen	15
3 Physikalische Grundlagen, Materialeigenschaften	17
3.1 Physikalische Grundlagen	17
3.2 Materialeigenschaften gebräuchlicher Werkstoffe	18
4 Wachstumsgesetze	29
5 Maschinen- und Geräteverluste	33
5.1 Verlustarten	33
5.1.1 Last- bzw. stromunabhängige Verluste	33
5.1.2 Last- bzw. stromabhängige Verluste	34
5.1.3 Mechanische Verluste	34
5.1.4 Erregerverluste	35

5.1.5	Zusatzverluste	35
5.1.5.1	Klassische Zusatzverluste	35
5.1.5.2	Zusatzverluste bei permanent erregten Synchronmaschinen	36
5.1.5.3	Zusatzverluste durch Umrichterspeisung	36
5.2	Verlustminimum, maximaler Wirkungsgrad	37
5.3	Temperaturabhängigkeit der Verluste	39
5.3.1	Allgemeine Situation und Vorgehensweise	39
5.3.2	Temperaturabhängigkeit der Eisenverluste	40
5.3.3	Temperaturabhängigkeit der Wicklungsverluste	41
5.3.3.1	Klassisch ohmsche Verluste, DC-Verluste	41
5.3.3.2	Wicklungszusatzverluste durch den Skineneffekt	41
5.3.3.3	Wicklungszusatzverluste durch den Proximityeffekt	42
5.3.4	Übergangsverluste	42
5.3.5	Temperaturabhängigkeit der mechanischen Verluste	43
5.3.6	Temperaturabhängigkeit der Erregerverluste	43
5.3.7	Vereinfachte Temperaturskalierung der gesamten Zusatzverluste	43
6	Grundlagen der thermischen Analyse	45
6.1	Grundlagen der thermischen Ersatzschaltbilder	45
6.1.1	Basiselemente thermischer Ersatzschaltungen	45
6.1.1.1	Wärmequellen, Symbol und Eigenschaften	45
6.1.1.2	Wärmewiderstände, Symbol und Eigenschaften	46
6.1.1.3	Wärmekapazitäten, Symbol und Eigenschaften	46
6.1.2	Grundgleichungen thermischer Ersatzschaltungen	47
6.1.2.1	Wärmeströme, 1. Kirchhoff'scher Satz	47
6.1.2.2	Temperaturgefälle, 2. Kirchhoff'scher Satz	48
6.1.2.3	Verfahren der Netzwerkanalyse	49
6.2	Praktische Berechnung der Wärmeleitungswiderstände	50
6.2.1	Wärmeleitung in einfachen Körpern	50
6.2.1.1	Wärmeleitung in zylindrischen bzw. quaderförmigen Körpern	50
6.2.1.2	Wärmeleitung in einer Rohrwand	51
6.2.1.3	Wärmeleitung durch eine Kugelschale	53
6.2.2	Effektive Wärmeleitung in Wicklungen	54
6.2.2.1	Wicklungen aus Rundlackdraht	54
6.2.2.2	Wicklungen aus Flachlackdraht	56
6.2.2.3	Folienwicklungen	57

6.2.3	Effektive Wärmeleitung in Elektroblechpaketen	59
6.2.3.1	Effektive Wärmeleitung in der Blechebene	60
6.2.3.2	Effektive Wärmeleitung senkrecht zur Blechebene	60
6.3	Wärmeübergang durch natürliche bzw. freie Konvektion	61
6.3.1	Natürliche Konvektion an vertikalen Flächen	64
6.3.1.1	Luftkühlung	64
6.3.1.2	Ölkühlung	66
6.3.1.3	Wasserkühlung an freien Flächen	67
6.3.2	Natürliche Konvektion an horizontalen Flächen	69
6.3.2.1	Luftkühlung	70
6.3.2.2	Ölkühlung	71
6.3.2.3	Wasserkühlung	71
6.4	Wärmeübergang durch forcierte Konvektion	73
6.4.1	Offene Kühlkreise	73
6.4.1.1	Luftkühlung	73
6.4.1.2	Ölkühlung	74
6.4.1.3	Wasserkühlung	75
6.4.2	Geschlossene Kühlkreise, z. B. Rohrkühlung	75
6.4.2.1	Ölkühlung	76
6.4.2.2	Wasserkühlung	76
6.5	Siedekühlung in Kältemittel	77
6.6	Besondere Wärmeübergänge	79
6.6.1	Wärmeübergang über den Luftspalt von elektrischen Maschinen ..	79
6.6.2	Wärmewiderstand von Kühlrippen	81
6.6.3	Wärmeübergang für zusammengesetzte Oberflächen	83
6.6.4	Überlagerung von Kühleffekten	85
6.7	Wärmeübergang durch Strahlung	86
6.8	Reale Wärmequellen	88
6.8.1	Temperaturverlauf in Gebieten mit inneren Wärmequellen	88
6.8.1.1	Ebene Wand mit symmetrischer Kühlung	89
6.8.1.2	Ebene Wand mit asymmetrischer Kühlung	92
6.8.1.3	Wicklungen auf Wickelrohr	94
6.8.2	Ersatzschaltung der realen Wärmequelle	97
6.8.2.1	Elemente der realen Wärmequelle	97
6.8.2.2	Verhalten bei zeitlich veränderlicher Temperatur	98

7	Wärmeschaltbilder für elektrische Maschinen	101
7.1	Wärmeschaltbilder des Transformators	102
7.1.1	Wärmeschaltbild des Kleintransformators	102
7.1.2	Wärmeschaltbild des ölgekühlten Verteilerttransformators	103
7.2	Wärmeschaltbild der Asynchronmaschine	105
7.3	Wärmeschaltbilder für andere elektrische Maschinen	106
7.3.1	Wärmeschaltbild der Synchronmaschine	107
7.3.1.1	Wärmeschaltbild der elektrisch erregten Synchronmaschine	107
7.3.1.2	Wärmeschaltbild der permanent erregten Synchronmaschine	107
7.3.1.3	Wärmeschaltbild der Reluktanzmaschine	108
7.3.2	Wärmeschaltbild für Gleichstrom- bzw. Stromwendermaschinen ..	108
7.3.2.1	Wärmeschaltbild der klassischen Gleichstrommaschine ..	108
7.3.2.2	Wärmeschaltbild der permanent erregten Gleichstrommaschine	110
7.3.2.3	Wärmeschaltbild des Universalmotors	110
7.3.3	Wärmeschaltbild für Elektronik- bzw. Schrittmotoren	110
7.3.4	Wärmeschaltbild für Transversal- und Axialflussmaschinen	111
7.4	Vereinfachte Wärmeschaltbilder	111
7.4.1	Situationsabhängige Vereinfachung der Wärmeschaltbilder	112
7.4.1.1	Leicht vereinfachtes Wärmeschaltbild der Asynchronmaschine	112
7.4.1.2	Vereinfachtes Wärmeschaltbild der Gleichstrommaschine	113
7.4.2	Wärmeschaltbilder für den stationären Betrieb	114
7.4.3	Vereinfachte Wärmeschaltbilder für transiente Vorgänge	115
7.4.3.1	Wärmeschaltbild für transiente Vorgänge	116
7.4.3.2	Einfacher Erwärmungsvorgang im Ein-Körper-Modell	117
7.4.3.3	Abkühlvorgang im Ein-Körper-Modell	119
7.4.3.4	Spezielle Abschätzung für die Betriebsarten S3 bis S6	120
7.4.4	Wärmeschaltbild für subtransiente Vorgänge	123
8	Beispiele für Erwärmungsvorgänge in elektrischen Maschinen	127
8.1	Erwärmung des Kleintransformators EI 84b	127
8.2	Erwärmung der Asynchronmaschine	133

8.2.1	Temperaturverlauf bei Bemessungsbelastung	135
8.2.1.1	Temperaturverlauf im vollständigen Wärmeschaltbild ...	135
8.2.1.2	Temperaturverlauf im Ein-Körper-Modell	139
8.2.2	Temperaturverlauf in der Abkühlphase	140
8.2.3	Der Temperatursprung	142
8.2.3.1	Der Temperatursprung im Normalbetrieb	142
8.2.3.2	Der Temperatursprung im Überlast- bzw. Störfall	143
8.2.3.3	Kurzschlussversuch zur Messung des Temperatursprunges	143
8.3	Die Asynchronmaschine in unterschiedlichen Betriebsarten	144
8.3.1	Dauerbetrieb „S1“ der Asynchronmaschine	145
8.3.1.1	Erwärmung der Asynchronmaschine im Dauerbetrieb ...	145
8.3.2	Kurzzeitbetrieb „S2“ der Asynchronmaschine	145
8.3.2.1	Erwärmungsphase im Kurzzeitbetrieb	146
8.3.2.2	Abkühlphase im Kurzzeitbetrieb	148
8.3.2.3	S2-Betrieb der Asynchronmaschine mit Sonderwicklung ..	149
8.3.3	Die Asynchronmaschine in den höheren Betriebsarten	151
8.3.3.1	S3-Aussetzbetrieb	152
8.3.3.2	S4-Aussetzbetrieb mit thermisch relevantem Anlauf	152
8.3.3.3	S5-Aussetzbetrieb mit thermisch relevantem Anlauf und Abbremsung	153
8.3.3.4	S6-Durchlaufbetrieb mit periodisch aussetzender Belastung	154
8.3.3.5	Höhere Betriebsarten, äquivalente Ersatzleistung	155
8.4	Erwärmung bei Störfällen, Explosionsschutz	157
8.4.1	Asynchronmotor mit blockiertem Rotor an voller Betriebsspannung	158
8.4.2	Schweranlauf beim Asynchronmotor	160
8.4.3	Kurzschluss bei Transformatoren	162
9	Lösungen	165
10	Quellen	169
	Index	171

Vorwort

Elektrische Maschinen sind ein unverzichtbarer Bestandteil unserer modernen Gesellschaft, wobei immer neue Anwendungsbereiche, so z. B. aktuell durch die Elektromobilität mit ihren großen Umsatzerwartungen, hinzukommen.

Dazu sind ihr Aufbau, die Wirkungsweise und das Betriebsverhalten in vielen Lehrbüchern, Aufsätzen und Internetquellen, so u. a. auch in dem Lehrbuchklassiker Fischer/Nolle, „Elektrische Maschinen“, ausführlich beschrieben.

Demnach erfolgt die Energieumwandlung in den elektrischen Maschinen allgemein mit erfreulich guten bis sehr guten Wirkungsgraden, aber trotzdem nicht ohne Verluste. Dabei sind Letztere die Ursache für deren Erwärmung, die aus unterschiedlichen Gründen nach oben begrenzt ist.

So lassen z. B. viele der vorrangig verbauten Isolierstoffe nur bei Einhaltung von materialspezifischen Grenztemperaturen eine gewünschte bzw. vorgegebene Mindestgebrauchsdauer erwarten, oder aus Gründen des Brand- bzw. Explosionsschutzes müssen Temperaturobergrenzen zwingend eingehalten werden.

Dabei möchte man aus wirtschaftlichen Gründen die, i. d. R. als Isolierstoffklasse vorgegebene, zulässige Erwärmung möglichst gut ausnutzen, da ansonsten die Maschinen unnötig groß, schwer und auch zu teuer sind.

Aus diesen Gründen kommt der thermischen Analyse von elektrischen Maschinen zunehmend eine immer größere Bedeutung zu, für die sich im Laufe ihrer langen Geschichte mehrere unterschiedliche Verfahren herausgebildet haben und die im Rahmen dieses Buches auch angesprochen werden.

Als Schwerpunktthema werden davon hier aber die thermischen Ersatzschaltbilder, auch als Wärmeschaltbilder bezeichnet, ausführlich behandelt, da sie in unterschiedlich detaillierter Form eine aktuell meist ausreichend genaue Beschreibung der thermischen Situation bei einem überschaubaren Rechenaufwand ermöglichen.

Ergänzend zum Buchinhalt sind unter plus.hanser-fachbuch.de auch umfangreichere Herleitungen von wesentlichen Zusammenhängen, sowie zusätzliche Beispiele und Aufgaben zu einzelnen Kapiteln abrufbar.

Dabei sind die Rechenwerte in den Beispielen und Aufgaben allg. mit fünf signifikanten Stellen angegeben, um so Unstimmigkeiten durch Rundungsfehler mit Zwischenergebnissen nach Möglichkeit zu vermeiden. Bei Endtemperaturen bzw. allgemein bei Endergebnissen sind, auch im Hinblick auf die hier übliche Messgenauigkeit, zwei signifikante Stellen jedoch meist ausreichend genau.

Oftmals ergeben einfache FEM-Simulationen keinen zuverlässigen, präzisen Überblick der thermischen Situation in den elektrischen Maschinen und Geräten, da dort die besonders kritischen Wärmeübergänge ja als Vorgabewerte definiert werden müssen. Daher können diese im Buch ausführlich besprochenen Wärmeübergänge auch dort erheblich zur Verbesserung der Simulationsergebnisse beitragen.

Letzteres lässt sich erst mithilfe der sog. Multiphysik-FEM umgehen, wobei die dazu erforderliche Hard- und Software und die zu deren Bedienung erforderliche Manpower doch eher nur in Forschungseinrichtungen bzw. größeren Konzernen zur Verfügung stehen.

Daher soll dieses Buch vorrangig kleinere und mittelständische Firmen, sonstige Einrichtungen, Labore, Berechnungsingenieure und Entwickler bei der thermischen Optimierung der „Elektrischen Maschinen“ unterstützen.

Dazu wünscht der Autor viel Erfolg!

Ein besonderer Dank gilt dabei auch dem Lektorat mit Herrn Frank Katzenmayer und Frau Christina Kubiak für die stets hilfreiche und freundliche Unterstützung.

Sersheim, im September 2024

Eugen Nolle

1

Definitionen und Normen

Die unvermeidlichen Verluste bei der Energieumwandlung führen vorrangig zu einer Erwärmung der elektrischen Geräte und Maschinen. Dabei wird diese Eigenerwärmung insbesondere durch die verwendeten Isolierstoffe und die erwartete Nutzungsdauer begrenzt, sodass die Maschinen in angemessener Weise ausgeführt, gekühlt und betrieben werden müssen. Dies hat schon sehr früh zur Festlegung von Bau-, Kühlungs- und Betriebsarten, sowie zur Definition von Isolierstoffklassen geführt.

1.1 Kühlungsarten

Aus historischen Gründen ist das Bezeichnungssystem der Kühlungsarten für statische bzw. elektromechanische Wandler noch unterschiedlich.

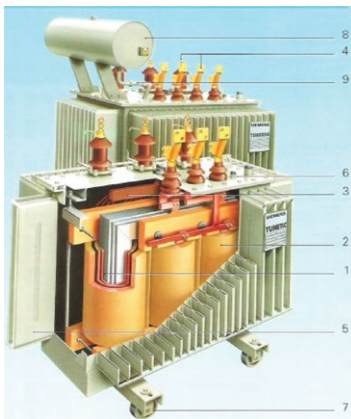
1.1.1 Statische Wandler, Transformatoren, Drosseln [1, 2]

Diese verrichten meist weitgehend abgegrenzt in Umspannwerken, Trafostationen, Schaltschränken oder anderweitig in Maschinen und Geräten eingebaut ihren Dienst, was die Vielfalt der vorkommenden Ausführungen begrenzt. Entsprechend diesen Gegebenheiten wird daher hier nur nach Kühlmittel und dessen Bewegung unterschieden. Erfolgt dabei die Wärmeabgabe über mehrere separate Kühlkreise, wird für diese eine entsprechende Angabe den Verlusten folgend, also i. d. R. von innen nach außen, gemacht.

Dabei gelten die Abkürzungen nach Tabelle 1.1.

Tabelle 1.1 Bezeichnungen bei den Kühlungsarten für ruhende Wandler

Kühlmittel	Zeichen
Luft	A
Wasser	W
Gas	G
Mineralöl	O
synt. Öl, Silikonöl, Ester; Isolierflüssigkeit nicht brennbar	K, L
Kühlmittelbewegung	Zeichen
natürlich	N
erzwungen, nicht gerichtet	F
erzwungen, gerichtet	D

**Bild 1.1** Beispiele für Kühlungsarten von Transformatoren. Links: Verteilerttransformator, Kühlungsart ONAN (Quelle: Siemens, für Lehrzwecke), rechts: Kleintransformator, Kühlungsart AN (Quelle: Riedel, für Lehrzwecke)

Die Angabe erfolgt damit, wie z. B. in Bild 1.1 angegeben, in der Form:

- ONAN
für einen Verteilerttransformator mit natürlicher Ölkühlung im inneren Kühlkreis und natürlicher Luftkühlung außen, bzw.
- AN
für einen Kleintransformator mit natürlicher Luftkühlung.

1.1.2 Elektromechanische Wandler, Motoren, Generatoren [3]

Anders als Transformatoren kommen elektrische Maschinen in vielfältigster Form auch in unserem direkten Lebensumfeld zum Einsatz. Dementsprechend gab es schon von Anfang an eine große Vielfalt an Ausführungen, die im Laufe der Zeit bekanntlich immer weiter zugenommen hat.

Dies hat dazu geführt, dass hier schon sehr früh ein alphanumerisches Bezeichnungssystem eingeführt wurde, bei dem in festgelegter Reihenfolge, beginnend mit den Kennbuchstaben

- IC für International Cooling,
- die Angaben
- zur Kühlkreis-Anordnung als Kennzahl,
 - zum Kühlmittel als Buchstabe und
 - für die Kühlmittel-Bewegung wieder als Kennzahl
- gemacht werden.

Das vollständige Bezeichnungssystem bei drehenden/bewegten Maschinen ist aktuell in der DIN EN 60 034-6 festgelegt und nachfolgend in Kurzform tabellarisch angegeben.

Tabelle 1.2 Kennziffern für die Kühlkreis-Anordnung

Kennziffer	Kurzbezeichnung	Beispiel
0	Freier Kühlkreis	Durchzugbelüftung
1	Kühlkreis mit Zuführung über Rohr oder Kanal	Durchzugbelüftung mit Zuführung über Rohr
2	Kühlkreis mit Abführung über Rohr oder Kanal	Durchzugbelüftung mit Abführung über Rohr
3	Kühlkreis mit Zu- und Abführung über Rohre oder Kanäle	Durchzugbelüftung mit Zu- und Abführung über Rohre
4	Oberflächenbelüftung	Oberflächenbelüftung: evtl. mit Rippen zur verbesserten Wärmeübertragung
5	Eingebauter Wärmetauscher (umgebendes Kühlmittel)	Oberflächenbelüftung: eingebauter Wärmetauscher zur verbesserten Wärmeübertragung
6	Angebauter Wärmetauscher (umgebendes Kühlmittel)	Oberflächenbelüftung: angebauter Wärmetauscher zur verbesserten Wärmeübertragung
7	Eingebauter Wärmetauscher (zugeführtes Kühlmittel)	Wasserkühlung: eingebauter Wärmetauscher

Tabelle 1.2 Kennziffern für die Kühlkreis-Anordnung (*Fortsetzung*)

Kennziffer	Kurzbezeichnung	Beispiel
8	Angebauter Wärmetauscher (zugeführtes Kühlmittel)	Wasserkühlung: angebauter Wärmetauscher
9	Getrennt angeordneter Wärmetauscher (umgebendes oder nicht umgebendes Kühlmittel)	Wasserkühlung: getrennter Wärmetauscher

Tabelle 1.3 Kennbuchstaben für Kühlmittel

Kennbuchstabe	Kühlmittel	Englische Bezeichnung
A	Luft	Air
F	Kältemittel, z. B. R600a	
H	Wasserstoff	Hydrogen
N	Stickstoff	Nitrogen
C	Kohlendioxid	Carbon dioxide
W	Wasser	
U	Öl	Huile
S	Jegliches andere	
Y	Noch nicht bestimmt	

Tabelle 1.4 Kennziffern für die Kühlmittel-Bewegungsart

Kennziffer	Kurzbezeichnung	Beispiel
0	Freie Kühlung	Freie Konvektion durch Temperaturdifferenz
1	Eigenkühlung	Eigenbelüftung durch Ventilator mit Drehzahl der Hauptmaschine
2, 3, 4		Freigehalten für zukünftige Verwendung
5	Eingebaute, unabhängige Baugruppe	Eingebauter Fremdlüfter mit eigenem elektrischem Antrieb
6	Angebauter, unabhängiger Baugruppe	Angebauter Fremdlüfter mit eigenem elektrischem Antrieb

Kennziffer	Kurzbezeichnung	Beispiel
7	Getrennte, unabhängige Bau- gruppe oder Kühlmittel-Be- triebsdruck	Getrennter Fremdlüfter, z. B. mit gemeinsamer Luftzufuhr für mehrere Maschinen
8	Antrieb durch relative Bewegung	Fahrmotor
9	Antrieb durch sonstige Bewegungsarten	

Tabelle 1.5 Beispiel einer gebräuchlichen Kühlungsart bei Normmotoren

Bezeichnung					Bedeutung	
IC					IC-Code (International Cooling)	
	4				Kühlkrisanordnung: Oberflächenbelüftung	
		A			Primäres Kühlmittel: Luft	
			1		Kühlmittelbewegung im primären Kühlkreis: Eigenkühlung	
				A	Sekundäres Kühlmittel: Luft	
					1	Kühlmittelbewegung im sekundären Kühlkreis: Eigenkühlung

Dabei kann in der sog. Kurzform der Kühlungsart der Kennbuchstabe „A“ für das Kühlmittel Luft entfallen, sodass alternativ die gleichwertigen Darstellungen gelten:

IC4A1A1 in ausführlicher Schreibweise, bzw. IC411 in Kurzform.

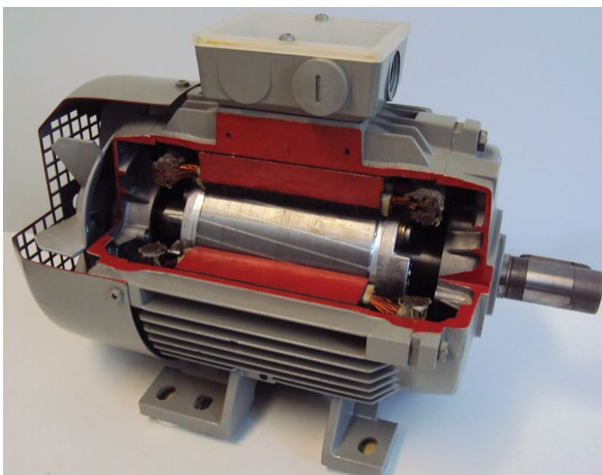


Bild 1.2 Normmotor Bg 100/4 in der Kühlungsart IC4A1A1 bzw. IC411