

**Prüf- und Zertifizierungsverfahren nach  
Richtlinie 94/9/EG für  
explosiongeschützte Antriebe**

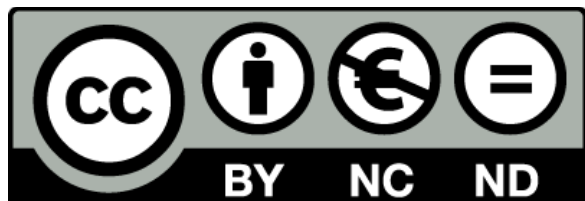
2. Ausgabe 2007

**Band 3**



Diese elektronische Version der PTB-Prüfregel Band 3 ist durch Digitalisierung der 2007 erschienenen Druckversion erzeugt worden. Die folgenden Seiten sind Bilddateien.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons Nutzerlizenz CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



**Empfohlene Zitierweise:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Prüf- und Zertifizierungsverfahren nach Richtlinie 94/9/EG für explosionsgeschützte Antriebe [online]. 2. Auflage 2007. Bearbeitet von Arbeitsgruppe 3.72 „Explosiongeschützte elektrische Antriebssysteme“. Braunschweig, © 2007, digitalisiert 2020. PTB-Prüfregeln, Band 3. ISSN 0341-7964.  
Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/510.20200811A>

**Herausgeber:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 13

Telefax: (05 31) 592-92 92

[www.ptb.de](http://www.ptb.de)

# PTB-Prüfregeln

## Band 3

### Prüf- und Zertifizierungsverfahren nach Richtlinie 94/9/EG für explosionsgeschützte Antriebe

#### 2. Ausgabe 2007

Bearbeitet von

Arbeitsgruppe 3.72

„Explosiongeschützte elektrische Antriebssysteme“

Herausgegeben von der

Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**

Braunschweig und Berlin

ISSN 0341-7964

Die PTB-Prüfregeln sollen als Unterlage und Richtlinie für die Prüfung von Messgeräten und Betriebsmitteln dienen. Den wesentlichen Teil einer Prüfregel bildet demnach die ausführliche Beschreibung der Prüfverfahren, der benötigten Normalgeräte und anderer Prüfmittel. Soweit es zum besseren Verständnis nützlich erscheint, wird auch auf die Ausführung der Gerätearten und auf Besonderheiten, die bei ihrer Anwendung zu beachten sind, eingegangen. Das Gebiet der PTB-Prüfregeln umfasst nicht nur die eich- und beglaubigungsfähigen Messgeräte, sondern auch Messgeräte und Objekte anderer Art, die im Bereich der PTB geprüft werden. Die Prüfregeln wenden sich sowohl an die Eichbehörden, staatlich anerkannten Prüfstellen und Überwachungsorgane als auch an die Prüflaboratorien von Industrie und Wirtschaft. Sie werden ferner für die Einrichtung von Prüfstellen und Messräumen sowie für Lehrzwecke von Nutzen sein.

Redaktion: Bernd Warnke  
Dr. Jens Simon (verantw.)  
Physikalische-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig

PTB-Prüfregeln Band 3  
2. Ausgabe 2007

Alle Rechte vorbehalten  
© 2008 by Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

1.	Grundlagen des Explosionsschutzes.....	1
1.1	Grundbegriffe.....	1
1.2	Zoneneinteilung und Zündschutzarten.....	3
1.2.1	Elektrischer Explosionsschutz.....	4
1.2.2	Nicht-elektrischer Explosionsschutz.....	5
1.2.3	Staubexplosionsschutz.....	6
1.3	Potentielle Zündquellen elektrischer Antriebe.....	7
1.3.1	Elektrische Entladungen.....	7
1.3.2	Heiße Oberflächen.....	8
1.3.3	Elektrostatik.....	9
2.	EU-Richtlinien und deren nationale Umsetzung.....	11
2.1	Zertifizierungsverfahren nach Richtlinie 94/9/EG.....	11
2.1.1	Begriffe und Definitionen der Richtlinie 94/9/EG.....	12
2.1.2	Konformitätsbewertung.....	14
2.1.3	Zulassungsverfahren der PTB.....	16
2.1.4	Kennzeichnung und Betriebsanleitung.....	17
2.2	Richtlinie 99/92/EG und Betriebssicherheitsverordnung.....	19
3.	Prüfung explosionsgeschützter Antriebe.....	21
3.1	Die mechanische Ausführung explosionsgeschützter Antriebe.....	21
3.1.1	Explosionsgeschützte Antriebe in „e“.....	22
3.1.2	Anschlusskästen und Verbindungskästen in „e“.....	27
3.1.3	Zubehörteile.....	29
3.1.4	Weitere Zündschutzarten „d“, „p“, „nA“, „tD“.....	33
3.2	Elektrisch-thermische Prüfung explosionsgeschützter Antriebe.....	36
3.2.1	Anforderungen an das Prüffeld.....	37
3.2.2	Typenprüfung elektrischer Maschinen in der Zündschutzart „e“.....	39
3.2.2.1	Dauerbetriebserwärmungen.....	39
3.2.2.2	Kurzschlussenerwärmung bei festgebremstem Läufer.....	43
3.2.2.3	Bestimmung der Auslösezeit $t_E$ , „indirekte Temperaturüberwachung.....	47
3.2.2.4	Schutz durch direkte Temperaturüberwachung (TMS).....	52
3.2.3	Typprüfungen in den Zündschutzarten „d“, „p“, „nA“ und „tD“.....	55
3.2.3.1	Druckfeste Kapselung „d“.....	55
3.2.3.2	Überdruckkapselung „p“.....	56
3.2.3.3	Zündschutzart „nA“.....	57
3.2.3.4	Staubschutz „tD“.....	57
3.2.4	Messunsicherheitsbetrachtung und Toleranzen.....	58
3.3	Prüfung und Zulassung umrichter gespeister Antriebe.....	60
3.3.1	Unterschiede in den Normenanforderungen.....	61
3.3.2	Allgemeines zur Prüfung umrichter gespeister Antriebe.....	62
3.3.3	Prüfalgorithmus für umrichter gespeiste Antriebe „e“ und „nA“.....	64

3.3.4	Zusätzliche Anforderungen an umrichter gespeiste Antriebe .....	67
3.4	Zusätzliche Anforderungen und Besonderheiten bei der Typenprüfung .....	71
3.4.1	Besondere Umgebungsbedingungen .....	71
3.4.2	Betrieb mit besonderen Anlaufverhältnissen .....	73
3.4.3	Verschiedene Maschinentypen .....	75
3.4.3.1	Motoren mit angebaute Arbeitsmaschine .....	75
3.4.3.2	Synchronmotoren und –generatoren .....	77
3.4.3.3	Klein- und Kleinstmotoren, Einphasenmotoren .....	78
3.4.4	Risikobewertung der Ständer- und Rotorzündgefahren .....	79
3.4.5	Kombination (Zusammenbau) von Motor und Pumpe .....	80
3.5	Berechnung elektrischer Maschinen .....	83
3.5.1	Berechnung der Dauerbetriebserwärmung .....	83
3.5.2	Berechnung der Kurzschluss erwärmung .....	84
4.	Errichtung, Betrieb, Instandhaltung und Reparatur explosionsgeschützter Betriebsmittel .....	88
4.1	Installation elektrischer Maschinen .....	89
4.2	Prüfung elektrischer Maschinen .....	91
4.3	Instandhaltung und Reparatur elektrischer Maschinen .....	92
5.	Explosionsschutz aus internationaler Sicht .....	96
5.1	Einteilung in Division, Internationale Kennzeichnung .....	97
5.2	Internationale Normung .....	99
5.3	IECEx .....	100
5.4	Prüfung elektrischer Maschinen im internationalen Vergleich .....	101
	Literaturverzeichnis .....	104



## Einleitung:

Der Einsatz von elektrischen Antrieben in der chemischen und petrochemischen Industrie hat eine sehr lange Tradition und geht einher mit der technologischen Entwicklung im letzten Jahrhundert. Dies betraf auch den Explosionsschutz, der für den sicheren Betrieb der Anlagen mit brennbaren Gasen und Dämpfen unumgänglich ist. Die zunehmende technologische Entwicklung stellt daher fortwährend neue Anforderungen an den Explosionsschutz. Der vorhandene hohe sicherheitstechnische Stand spiegelt sich in den geringen Unfallzahlen wider, die auf das Versagen der elektrischen Betriebsmittel zurückzuführen sind.

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) auch als Nachfolge der Chemisch-Technischen Reichsanstalt beschäftigt sich seit über 50 Jahren mit der Prüfung und Zulassung von elektrischen Betriebsmitteln für den Explosionsschutz [1]. Die lange Tradition und die anerkannte Unabhängigkeit der PTB haben zu einem internationalen Ansehen geführt, so dass Zulassungen der PTB auf eine weltweit hohe Akzeptanz stoßen.

Die gesetzlichen Grundlagen für den Betrieb von explosionsgefährdeten Anlagen waren zunächst national geregelt, wobei die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in alleiniger Verantwortung unter Anwendung der nationalen Normung für die Prüfung zuständig war [2]. Im Sinne des „New Approach“ der Europäischen Union haben sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen grundlegend geändert, so dass im Sinne der Deregulierung innerhalb der EU der freie Warenverkehr vorgesehen ist [3]. Hier seien vorab die EU-Richtlinien 94/9/EG und 99/92/EG sowie deren Umsetzung in nationales Recht erwähnt [4, 5].

Insbesondere der elektrischen Maschine kommt wirtschaftlich eine hohe Bedeutung zu, da sie im Leistungsbereich von 100W...10MW in der Industrie auch in explosionsgefährdeten Bereichen häufig eingesetzt wird. Dem entsprechend deckt die elektrische Maschine ein wesentliches Betätigungsfeld innerhalb des Explosionsschutzes der PTB ab. Durch die langjährige Tradition auf dem Gebiet bestand schon in den 60er Jahren der Wunsch, die Auslegung der Normen hinsichtlich der Prüfung von explosionsgeschützten Maschinen zu erläutern. In der PTB-Prüfregel „Explosionsschutzgeschützte Maschinen der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit e“ wurde diesem Wunsch entsprochen [6].

Während sich die alte Prüfregel ausschließlich aber gründlich mit der Ausführung in der Erhöhten Sicherheit „e“ befasst hat, wird in der neuen Fassung der elektrische Antrieb im Hinblick auf alle Zündschutzarten und deren technologische Entwicklung für den Explosionsschutz beurteilt. Neuere Antriebskonzepte wie umrichter gespeiste Antriebe mit den für den Explosionsschutz daraus resultierenden Anforderungen sollen ausführlich diskutiert werden. Steigende Anforderungen an die Messungen auch zur Vergleichbarkeit von Messergebnissen machen eine Messunsicherheitsbetrachtung unumgänglich [7].

Darüber hinaus sollen einige Grundlagen zur Zündung von brennbaren Gas/Luft-Gemischen besprochen werden, weil insbesondere die Anforderungen an Hochspannungsmaschinen und Maschinen größerer Leistung hinsichtlich der Prüfung und Beurteilung zugenommen haben. Entsprechend den Anforderungen der Richtlinie 94/9/EG müssen für den mechanischen Explosionsschutz die potentiellen Zündquellen einer Bewertung unterzogen werden, wobei unter Umständen auch Konstruktionsausführungen bei elektrischen Maschinen mit angebautem Aggregat (z.B. Pumpe) beachtet werden müssen.

Nach der Prüfung und Zertifizierung von explosionsgeschützten Antrieben werden diese installiert, gewartet, instand gesetzt und repariert. In Deutschland gelten dafür die gesetzlichen Bestimmungen der Betriebssicherheitsverordnung. Dem entgegen wurden auf internationaler Ebene diverse Normen erarbeitet.

Die internationalen Aspekte werden zunehmend höhere Bedeutung erlangen. Während in der Vergangenheit strenge Abgrenzungen zunächst innerhalb Europas aber insbesondere gegenüber dem nordamerikanischen Kontinent einen freien Warenaustausch verhindert haben, so ist eine stetige Annäherung insbesondere bei den Normungen auf IEC-Ebene trotz vorherrschender Skepsis erkennbar.

Anknüpfend an den Vorsätzen der zitierten ersten Prüfregel der PTB soll auch die Neuauflage der Prüfregel dazu beitragen, die Sicherheit für Mensch und Anlagen in der Praxis zu erhöhen und das dafür notwendige Wissen auf diesem Spezialgebiet zu publizieren, welches sich auf langjährige Erfahrung der PTB und den regen Gedankenaustausch mit vielen Fachkollegen stützt. Die Prüfregel richtet sich an alle betroffenen Kreise wie Hersteller, Betreiber, zuständigen Überwachungsorgane sowie Zulassungs- und Prüfstellen im In- und Ausland. Sie sollte als Interpretation der PTB für die umfangreichen Richtlinien, Verordnungen und Normen verstanden werden.

# 1. Grundlagen des Explosionsschutzes

In den technologischen Prozessen der chemischen und petrochemischen Industrie kommen brennbare Gase und Flüssigkeiten sehr häufig zur Anwendung oder sind elementarer Bestandteil des Prozesses. Brennbare Stäube sind in vielen Anlagen zur Speicherung oder Weiterverarbeitung von Lebensmitteln (z.B. Mehl) oder bei der Zerspaltung (z.B. Holzverarbeitung) anzutreffen. Um den sicheren Betrieb dieser Anlagen zu gewährleisten können eine Vielzahl von Maßnahmen ergriffen werden, die sich in 3 Grundphilosophien einteilen lassen [8, 9].

Für brennbare Gase und Flüssigkeiten muss zunächst seitens des Planers und Betreibers der Anlage verhindert werden, dass überhaupt explosionsfähige Atmosphären entstehen können. Der so genannte „Primäre Explosionsschutz“ sieht alle Maßnahmen vor, die dazu beitragen können, und steht im Vordergrund der Überlegungen. Dazu tragen verfahrenstechnische Abläufe bei, die z.B. stets unter- oder oberhalb der Explosionsgrenzen ablaufen können, oder durch Inertisieren wird Sorge getragen, dass keine Ex-Atmosphären entstehen. Zu einer Explosion kommt es, wenn ein **Brennstoff** im Gemisch mit **Luft** (d. h. ausreichend Sauerstoff) innerhalb der *Explosionsgrenzen* sowie eine **Zündquelle** vorliegen (Explosionsdreieck).

Lässt sich nicht vermeiden, dass brennbare Gase auftreten können, muss verhindert werden, dass es zur Zündung kommen kann. Hierbei spricht man vom „Sekundären Explosionsschutz“, der im wesentlichen aus Anforderungen an die Betriebsmittel besteht. Zündquellen können die unterschiedlichsten Ursachen haben, die bei den Betriebsmitteln vorwiegend im elektrischen oder mechanischen zu suchen sind.

Abschließend verhindert der „Tertiäre Explosionsschutz“ die Auswirkungen einer Explosion auf ein Mindestmaß, so dass es zu keiner Gefahr von Mensch und Anlagen kommen kann. Derartige Maßnahmen können sich auf das Betriebsmittel beschränken, aber auch für ganze Anlagen vorgesehen werden. Solche Maßnahmen sind:

- Explosionsfeste Bauweise,
- Explosionsdruckentlastung,
- Explosionsunterdrückung,
- Verhindern der Flammen- und Explosionsübertragung.

## 1.1 Grundbegriffe

Als explosionsfähige Atmosphäre werden entsprechend der EU-Richtlinie und deren nationale Umsetzung in der Explosionsschutzverordnung lediglich Gemische aus brennbaren Stoffen in Form von Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben mit Luft unter atmosphärischen Bedingungen definiert und die auf den Explosionsschutz aufbauenden wesentlichen Normen beschränken sich darauf. Die atmosphärischen Bedingungen sind definiert für Umgebungstemperaturen von -20 °C bis 60 °C und Umgebungsdrücken zwischen 0,8 bar und 1,1 bar. Darüber hinaus ist natürlich eine Vielzahl anderer Oxidationsreaktionen denkbar, die auch unter nicht atmosphärischen Bedingungen zu einer Explosion führen

können. In diesen Fällen gelten die Vorschriften nicht und es müssen gesonderte Bedingungen getroffen werden, die in diesem Bericht nicht diskutiert werden.

Lässt sich eine explosionsfähige Atmosphäre nicht vermeiden, müssen alle potentiellen Zündquellen in Betracht gezogen werden. Die EN 1127-1 (1997) [10] nennt 13 Zündquellen, die prinzipiell bei der Beurteilung herangezogen werden können:

- Heiße Oberflächen
- Flammen und heiße Gase
- Mechanisch erzeugte Funken
- Elektrische Anlagen
- Elektrische Ausgleichsströme, kathodischer Korrosionsschutz
- Statische Elektrizität
- Blitzschlag
- Elektromagnetische Felder im Bereich der Frequenzen 9 kHz – 300 GHz
- Elektromagnetische Strahlung im optischen Spektralbereich
- Ionisierende Strahlung
- Ultraschall
- Adiabatische Kompression, Stoßwellen, strömende Gase
- Chemische Reaktionen

Für elektrische Betriebsmittel im Explosionsschutz und insbesondere für elektrische Maschinen ist die Zündquelle „Temperatur“ für die Bewertung stets und für alle Zündschutzarten zu berücksichtigen. Entsprechend der höchsten Temperatur an einer Oberfläche (Außen und ggf. Innen) wird es gemäß der EN / IEC 60079-0 oder EN 50014 einer Temperaturklasse zugeordnet (Tab.1.1) [11]. Die Temperaturklassen werden eingeteilt von T1 bis T6. In Abhängigkeit der Zündtemperatur eines brennbaren Gases wird das elektrische Betriebsmittel ausgewählt, wobei die Zündtemperatur oberhalb der Grenztemperatur der Temperaturklasse sein muss. In Sonderfällen können auch zwischen der Temperaturklasse liegende Temperaturwerte geprüft und bescheinigt werden.

Maximale Oberflächentemperatur	450 °C	300 °C	200 °C	135 °C	100 °C	85 °C
Temperaturklasse	T1	T2	T3	T4	T5	T6

Tab. 1.1: Temperaturklassen nach EN / IEC 60079-0

Neben der Temperatur sind elektrische Funken für elektrische Maschinen eine potentiell zu berücksichtigende Zündquelle. Festgelegt ist die Mindestzündenergie, die als Maß für eine sichere Entladung in Ex-Bereichen anzunehmen ist. Sie gilt definitionsgemäß als die in einem Kondensator gespeicherte Energie, die sich in einer Gasentladung (Funkenentladung) entlädt [12]. Die Mindestzündenergie variiert mit der Elektrodengeometrie und Schlagweite (Abstand der Elektroden) und ist von der Gemischzusammensetzung abhängig.

Lassen sich zündfähige Entladungen nicht vermeiden (z.B. bei Gleichstrommaschine) müssen geeignete Zündschutzarten gewählt werden, die eine Kapselung vorsehen. Neben den sichtbaren Entladungen (z.B. Funkenentladungen) können auch unterschiedliche Vor- und Teilentladungen auftreten, deren Energie und damit Zündfähigkeit von diversen Parametern abhängen. Prüfung des Zündrisikos von el. Entladungen sieht die Normung

konkret bei der Wicklung von Hochspannungsmaschinen der Zündschutzarten „e“ und „n“ vor sowie im Falle von so genannten Luftspaltfunken bei größeren Antrieben (Abs. 3.4.4).

Zusätzlich zu der Eingruppierung der explosionsgeschützten Betriebsmittel anhand der Temperaturklasse werden die Zünddurchschlagsicherheit und die Zündenergie verwendet. Die Kriterien für Einteilung der brennbaren Gase anhand der Zündenergie liegen in der Zündung durch elektrische Öffnungs- und Schließfunken. Zur Bestimmung der Zündenergie wird ein genormtes Funkenprüfgerät verwendet [13, 14]. Die Zünddurchschlagsicherheit der brennbaren Gase durch enge Spalte und Öffnungen wird mit dem MESG-Gerät bestimmt [15]. Die Kennzeichnung des Betriebsmittels anhand dieser Kriterien wird durch I, IIA, IIB oder IIC zum Ausdruck gebracht. Besonders kritische Gase sind Wasserstoff und Acetylen, die der Explosionsgruppe IIC zugeordnet werden. Für die Explosionsgruppe IIB wird Ethylen und für IIA Propan als repräsentatives Prüfgas verwendet. Methan wird für die Explosionsgruppe I herangezogen (Schlagwetterschutz im Kohlebergbau).

## 1.2 Zoneneinteilung und Zündschutzarten

In Europa werden die explosionsfähigen Bereiche entsprechend der Richtlinie 99/92/EG und deren Umsetzung in nationales Recht durch die Betriebssicherheitsverordnung [16] in jeweils 3 Zonen für Gas (Zonen 0, 1 und 2) und Staub (Zone 20, Zone 21, Zone 22) eingeteilt, wobei sich die Häufigkeit des Vorhandenseins von explosionsfähigen Atmosphären in der Einteilung in Zonen widerspiegelt (Tab.1.1). Sie werden durch den Betreiber vorgegeben und im Explosionsschutzdokument dokumentiert. Die Richtlinie sieht dabei nicht die Kombination von Gasen und Stäuben (hybriden Gemischen) vor.

Die Einordnung der Betriebsmittel erfolgt entsprechend der EU-Richtlinie 94/9/EG sowie deren nationale Umsetzung in der Explosionsschutzverordnung in die Kategorien 1, 2 und 3 [17]. Die Zuordnung der Kategorien zu den Zonen ist in Tab. 1.2 dargestellt. Wobei für die Zone geringerer Explosionsgefahr auch Gerätekategorien mit einer geringeren Zündgefahr eingesetzt werden dürfen (z.B. Kategorie 2 in Zone 2). Bei der Beurteilung der Geräte sind in Abhängigkeit der Kategorie die verschiedenen Betriebszustände zu bewerten.

Zone	Vorhandensein explosionsfähiger Atmosphäre (Explosionsgefahr)	Vermeiden wirksamer Zündquellen (Zündgefahr)	Maß an Sicherheit	Geräte-kategorie
0 20	Ständig, langfristig, häufig	Auch bei seltenen Betriebsstörungen	Sehr hoch	1
1 21	Gelegentlich	Auch bei üblichen Betriebsstörungen	Hoch	2
2 22	Selten und kurzzeitig	Im Normalbetrieb	Normal	3

Tab. 1.2: Gerätekategorien und Zonen

Vereinfachend betrachtet, ist das Produkt aus Anforderungen an die Zündschutzarten und der Wahrscheinlichkeit einer explosionsfähigen Atmosphäre als Maß für die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Explosion zu sehen. Auf jeden Fall muss sichergestellt sein, dass es zu keiner Gefahr kommt.

### 1.2.1 Elektrischer Explosionsschutz

Die wesentlichen Zündschutzarten für elektrische Betriebsmittel sind traditionell für die Zone 1 (Kategorie 2 Geräte) ausgelegt. In der EN 60079-0 / EN 50014 „Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche – Allgemeine Bestimmungen,“ sind die grundlegenden Anforderungen der verschiedenen Zündschutzarten aufgeführt. Die Normenreihe für den Explosionsschutz befinden sich im Umstellungsprozess, wobei die EN 50014 und ff durch die EN 60079-X ersetzt werden. Die Nummerierung ist dadurch der IEC Nomenklatur angepasst. Die hinsichtlich ihrer Bedeutung für elektrische Maschinen wichtigen Zündschutzarten soll kurz skizziert werden:

- Erhöhte Sicherheit „e“ nach EN 60079-7 / EN 50019 [18]: Vermeidung von hohen Temperaturen im Inneren und Äußeren der elektrischen Maschine sowie elektrischen Funken durch Konstruktionsanforderungen. In dieser Zündschutzart werden häufig Asynchronmaschinen ausgelegt, die über einen weiten Leistungsbereich (100 W ... 10 MW) ihre Anwendung finden.
- Druckfeste Kapselung „d“ nach EN 60079-1 / EN 50018 [19]: Vermeidung von hohen Temperaturen am Gehäuse der elektrischen Maschine sowie Verhinderung des Austretens einer potentiellen Explosion aus dem Gehäuse durch eine spezielle Konstruktion. Mit zunehmender Achshöhe stößt das Schutzprinzip durch die Fertigungstoleranzen an ihre Grenzen, so dass vorwiegend Maschinen kleiner und mittlerer Leistung in dieser Zündschutzart ausgeführt werden.
- Überdruckkapselung „p“ nach EN 60079-2 / EN 50016 [20]: Vermeidung von hohen Temperaturen am Gehäuse der elektrischen Maschine sowie durch Inertisieren des Inneren der Maschine verhindern einer explosionsfähigen Atmosphäre im Inneren. Maschinen dieser Ausführung werden vorzugsweise für sehr große Leistungen eingesetzt, welche durch die zuvor genannten Zündschutzarten kaum oder nur schwer realisierbar sind.

Die verbleibenden Zündschutzarten Eigensicherheit „i“, Ölkapselung „o“, Sandkapselung „q“ sowie Vergusskapselung „m“ finden für die elektrische Maschine direkt keine Anwendung sondern können für An- oder Zubehörbauteile für weitere Funktionen eingesetzt sein.

Die EN 60079-0 legt die grundsätzlichen Anforderungen fest, die auch für die verwiesenen Zündschutzarten gelten und beachtet werden müssen. So ist die Umgebungstemperatur zunächst auf -20 °C bis 40 °C für die Prüfung und Zertifizierung beschränkt und muss ansonsten gesondert betrachtet werden. Umgebungstemperaturen < -20 °C werden auch bescheinigt, obwohl es nicht in der Definition der atmosphärischen Bedingungen enthalten ist.

In der IEC 60079-26 (2002) [21] werden die Anforderungen an elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche der Zone 0 definiert. Die Definition der Kategorien ist im Bereich der IEC-Normung nicht geläufig, sollen aber zukünftig durch den „Equipment Protection Level (EPL)“ vergleichbar definiert werden. Entsprechend den Anforderungen der Norm sind auch elektrische Maschinen in der Zone 0 denkbar. Die elektrische Maschine muss dabei durch zwei unabhängige apparative Schutzmaßnahmen geschützt sein. Bei der Kombination von zwei von einander unabhängigen genormten Zündschutzarten für die Zone 1 darf keine Fehlerart auftreten, die zum gleichzeitigen Ausfall beider Zündschutzarten

führen kann. Beide Zündschutzarten müssen auch unabhängig voneinander geprüft werden können. Für die Asynchronmaschine wäre die Ausführung in der Erhöhten Sicherheit „e“ und in der Druckfesten Kapselung „d“ oder Überdruckkapselung „p“ denkbar. Alternativ kann ein entsprechendes Trennelement vorgesehen werden. Die speziellen Anforderungen an die Trennelemente sind in der oben zitierten Norm dargelegt.

Für die Zone 2 werden die elektrischen Betriebsmittel nach EN 60079-15 / EN 50021 [22] und EN 60079-2 ausgelegt, bei der für den normalen Betrieb und bestimmte abnormale Bedingungen eine umgebende Ex-Atmosphäre nicht entzündet wird. Dabei sind in einer Norm verschiedene Zündschutzarten zusammengefasst:

- nA nichtfunkende Betriebsmittel
- nC für funkende Betriebsmittel, in denen die Kontakte in geeigneter Weise geschützt sind, jedoch nicht durch schwadensichere Gehäuse, Energiebegrenzung oder Überdruckkapselung
- nR schwadensichere Gehäuse
- nL energiebegrenzte Betriebsmittel

Elektrische Maschinen lassen sich in den Zündschutzarten nA und pz ausführen.

### **1.2.2 Nicht-elektrischer Explosionsschutz**

Für die elektrische Auslegung von Betriebsmitteln für den Explosionsschutz gibt es eine sehr lange Tradition in der Normung. Dahingegen findet der „Nicht-elektrische (Mechanische) Explosionsschutz“ auf europäischer Ebene erst seit den 90-iger Jahren eine systematische Bedeutung in Form der Normungsgebung, die sich stark an die Struktur des elektrischen Explosionsschutzes anlehnt.

Elektrische Maschinen dienen häufig zur Beförderung von Gütern jeglicher Art durch Pumpen, Förderbänder usw., wobei auch häufig zur Drehzahlvariation Getriebe eingesetzt werden. Zum einen kombinieren Hersteller Motoren mit Getrieben oder Pumpen und bringen sie als Einheit in Verkehr, zum anderen kaufen Pumpenhersteller die Motoren und bringen den Zusammenbau in Verkehr. Die Trennung zwischen elektrischen und nichtelektrischen Anforderungen ist fließend (z.B. Lagerproblematik), so dass sich auch die Hersteller elektrischer Maschinen mit der Problematik beschäftigen sollten. Die unzähligen Kombinationsmöglichkeiten beinhalten eine Vielzahl von potentiellen Zündquellen und müssen daher infolge der Richtlinie 94/9/EG auch einer Risikobewertung unterzogen werden.

Vergleichbar mit der EN 60079-0 regelt die EN 13463-1 [23] die Grundlagen und Anforderungen. Sie bildet zusammen mit der EN 1127-1 die Grundlage für den Explosionsschutz nichtelektrischer Geräte. Ein wesentlicher Unterschied zur EN 60079-0 besteht in der formalisierten Zündgefahrenbewertung, die zur Ermittlung der Kategorien für die Geräte im Sinne der Richtlinie 94/9/EG führt. Daraus ergibt sich, dass grundsätzlich jede Kategorie bei entsprechender Konstruktion des Gerätes auch ohne zusätzliche Zündschutzmaßnahmen erreicht werden kann, wenn die Wahrscheinlichkeit des Wirksamwerdens einer Zündquelle ausreichend klein ist.

In der Norm EN 13463-1 werden die potentiellen Zündschutzarten genannt, die in weiteren Teilen der Norm spezifiziert werden. Im Gegensatz zum elektrischen Explosionsschutz sind oft Anforderungen für alle Kategorien innerhalb einer Norm erfasst. Die in Kombination mit elektrischen Maschinen wichtigen Normen sind:

- Konstruktive Sicherheit „c“: Abgestimmt auf die Belange der mechanischen Geräte (z.B. Getriebe) und beruht auf langjährige Erfahrung und Erkenntnisse über die konstruktiven Anforderungen an diese Geräte. Ein wesentlicher Aspekt hierbei ist, dass durch gute Konstruktion der Geräte die Wahrscheinlichkeit für potentielle Zündquellen bei Störungen klein gehalten wird.
- Zündquellenüberwachung „b“: Potentielle Zündquellen mit Hilfe von Mess- und Regeleinrichtungen überwachen, bevor sie wirksam werden (z.B. Temperatur-, Niveau-, Drehzahl- oder Schwingungswächter).
- Überdruckkapselung „p“: Lehnt sich weitgehend an die Norm EN 60079-2 für elektrische Betriebsmittel an.
- Druckfeste Kapselung „d“: Lehnt sich weitgehend an die Norm EN 60079-1 für elektrische Betriebsmittel an.
- Flüssigkeitskapselung „k“: Elektrische Maschine, die in Pumpen integriert und eingesetzt werden, und für deren Betrieb eine Überdeckung mit dem Fördermedium notwendig ist, können hinsichtlich der Norm qualifiziert werden.

Durch die Überschneidung der Kennzeichnung und die Einführung neuer Buchstaben kann es im Markt in der Anfangsphase zu Fehlinterpretationen kommen. Einige der zitierten Normen befinden sich zur Zeit in der Entwurfsphase. Darüber hinaus gibt es aber auch Normen zu spezifischen Geräten (z.B. Ventilatoren oder Flurförderzeuge), die gezielt Normenanforderungen hinsichtlich der Zündgefahren für die Geräte beinhalten.

### 1.2.3 Staubexplosionsschutz

Durch die Besonderheiten des Staubes im Gegensatz zu brennbaren Gasen werden für die elektrischen Geräte im Explosionsschutz eigene Normen verwendet. Die Anforderungen des Staub-Explosionsschutzes sind in der prEN 61241-0 / EN 50281-1-1 und ff. geregelt. Elektrische Maschinen lassen sich durch folgende Zündschutzarten ausführen [24]:

- Staubdicht „tD“ nach EN 61241-1 [25], das Gehäuse muss das Eindringen des Staubes verhindern und eine Begrenzung der Oberflächentemperatur verhindert das Glimmen oder Entflammen des Staubes. Die ältere Bezeichnung für „tD“ ist „IP6X oder IP5X“ [26].
- Überdruckkapselung pD“ nach EN 61241-4 [27], durch den Überdruck im Inneren des Gehäuses wird das Eindringen des Staubes verhindert. Wiederum ist die Oberflächentemperatur zu betrachten und durch das Ausströmen des inerten Gases aus dem Gehäuse sollte Aufwirbeln vom Staub vermieden werden.

Insbesondere die Zündschutzart „tD“ findet für elektrische Maschinen in der Praxis ihre Anwendung. Die Anforderungen für die verschiedenen Zonen sind innerhalb einer Zündschutzartnorm abgedeckt.



Nichtelektrische Betriebsmittel werden gemäß der EN 13463-1 einer Zündgefahrenbewertung unterzogen, die auch auf den Staubexplosionsschutz angewendet werden muss. Eine den elektrischen Betriebsmitteln vergleichbare Normenreihe ist nicht vorgesehen.

### 1.3 Potentielle Zündquellen elektrischer Antriebe

Bei der Begutachtung von elektrischen Antrieben sind als die wesentlichen Zündquellen die Temperatur und die elektrische Entladung anzusehen, die im folgenden diskutiert werden sollen. Darüber hinaus können Schlag- und Reibfunken bei drehenden Teilen zur Zündquelle werden, was durch entsprechende Abstände zwischen rotierenden Teilen verhindert wird.

#### 1.3.1 Elektrische Entladungen

Die elektrische Entladung als Zündquelle soll infolge einer hinreichenden Isolationskoordination verhindert werden, damit keine elektrischen Entladungen im Normalbetrieb und bei einfachen Störungen auftreten können, die eine explosionsfähige Atmosphäre entzünden können. Die Risikobewertung des Ständers und Rotors von elektrischen Maschinen der Zündschutzart „e“ und „n“ zielt auf die Vermeidung von elektrischen Entladungen ab (Kap. 3.4.4). Ebenso ist das Auftreten von hochfrequenten Überspannungen bei Umrichterantrieben hinsichtlich elektrischer Entladungen zu betrachten (Kap. 3.3) [28].

Der Begriff der elektrischen Entladungen ist sehr allgemein und da in der Elektrotechnik eine Vielzahl von Entladungsformen definiert werden, sollen sie zumindest im Überblick bezüglich ihrer Zündgefahren diskutiert werden.

In homogenen elektrischen Feldern kommt es zwischen einer Elektrodenanordnung zum Funken, wenn eine ausreichend hohe Spannung anliegt. Der Generationsmechanismus beschreibt für geringe Schlagweiten die Entstehung bis zum Durchschlag. Es kommt nicht zur Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre, wenn der Energieinhalt der speisenden Quelle oder die Funkendauer begrenzt ist. In der Zündschutzart „Eigensicherheit“ wird durch Begrenzung von Spannung und Strom die Zündenergie nicht überschritten [29]. Da ansonsten

der elektrische Funke eine explosionsfähige Atmosphäre entzünden kann, muss er durch ein geeignetes Isolationssystem verhindert werden. So fordert die EN 60079-7 für blanke spannungsführende Teile Mindestabstände, die eingehalten werden müssen, sowie die Gehäuseschutzart IP 54.

In stark inhomogenen Feldern treten im Vorfeld des Funkendurchschlags Vorentladungen auf, die abhängig von der Polarität unterschiedlich sind. Bei positiver Spitze gegenüber einer negativen Platte treten Streamerentladungen auf, die mit lichtverstärkenden Kameras gut sichtbar sind (Abb.1.1). Bei umgekehrter Polarität sind schwach leuchtende Entladungen an

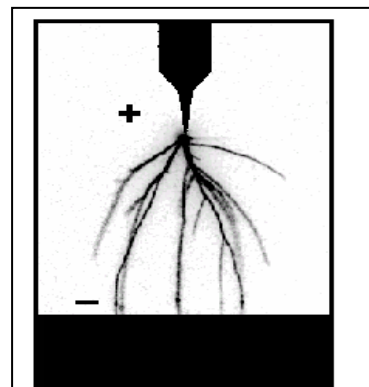


Abb. 1.1: Elektrische Entladung bei positiver Spitze

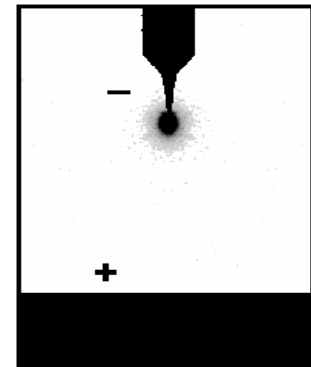
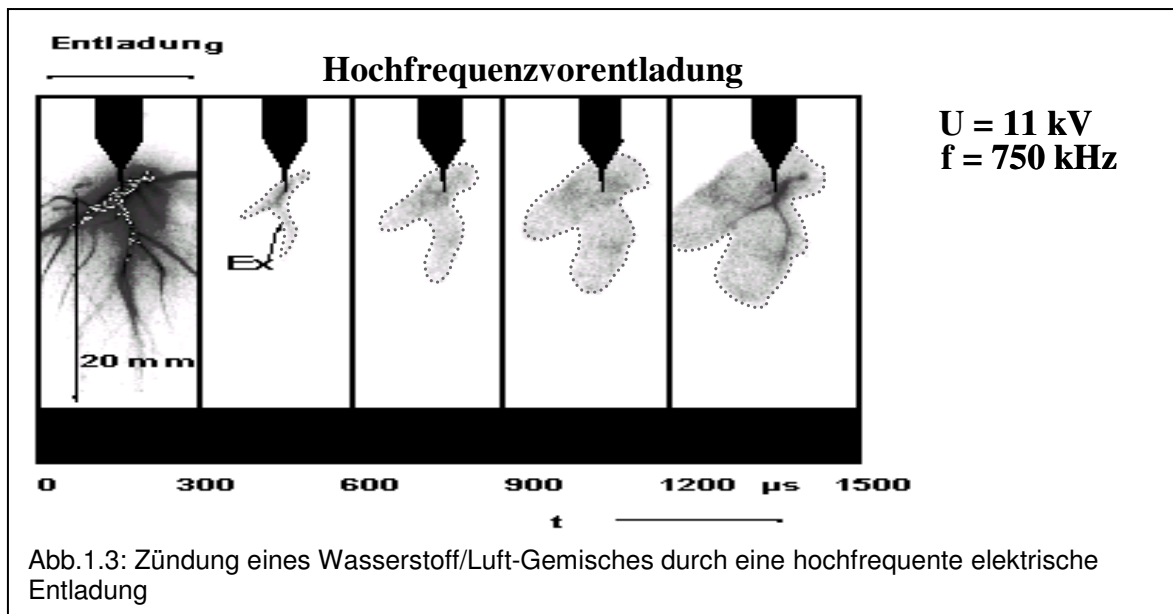


Abb. 1.2: Elektrische Entladung bei negativer Spitze



der negativen Spitze erkennbar (Abb1.2). Untersuchungen der oben beschriebenen Vorentladungen in brennbaren Gasen haben in der PTB bisher keine Zündfähigkeit gezeigt, wobei eine maximale Ladungsstärke von ca. 20nC vorhanden war.

Durch Schaltüberspannungen in Netzen oder durch Wanderwellenvorgänge auf langen Leitungen z.B. bei Umrichterantrieben mit schnell schaltenden Leistungstransistoren können hochfrequente Überspannungen auftreten, die das Isolationssystem durch Entladungen stark beanspruchen und auch ein Gefährdungspotential für den Explosionsschutz darstellen. Bei hochfrequenter Spannungsbeanspruchung in bestimmten Frequenzbereichen können sich Raumladungen ausbilden, deren Ursache in der unterschiedlichen Beweglichkeit der Ladungsträger gesehen wird. Untersuchungen in der PTB bezüglich der Zündfähigkeit hochfrequenter Überspannungen zeigen deutlich ein Gefahrenpotential. Zum einen zünden Vorentladungen explosionsfähige Atmosphären (Abb. 1.3) und zum anderen sinkt die Durchschlagsspannung in stark inhomogenen Feldern gegenüber der Netzfrequenz.

In Analogie zu den Raumladungen bei Hochfrequenz stellen auch sich akkumulierende Oberflächenentladungen ein vergleichbares Gefährdungspotential dar.

### 1.3.2 Heiße Oberflächen

Bei der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie durch elektrische Maschinen wird zwangsläufig auch thermische Energie entstehen. Die thermische Energie wird im wesentlichen durch die Stromwärmeverluste und Eisenverluste (Ummagnetisierungsverluste) bestimmt. Zusätzlich können durch Reibungsverluste der drehenden Maschine, z.B. der Lager, Erwärmungen auftreten.

Die EN 1127-1 legt einige Grundsätze für die Zündung durch heiße Oberflächen fest. Zum einen ist die Zeitdauer entscheidend, während der das brennbare Gas mit der Oberfläche in Kontakt kommen kann. Durch Zwangsbelüftungsmaßnahmen kann die Zeit reduziert werden. Zum anderen ist ein weiterer Parameter die Größe der Oberfläche, da es eine Abhängigkeit zwischen Temperatur und Fläche bezüglich der Zündung des brennbaren Gases gibt.

Bei Gasen soll für die Kategorie 1 die maximale Oberflächentemperatur 80 % in Grad Celsius der minimalen Zündtemperatur betragen, die auch bei seltenen Störfällen auftreten

kann. Für die Kategorie 2 soll die maximale Oberflächentemperatur ebenfalls auf 80 % in Grad Celsius reduziert werden, wenn die Oberfläche das Gas/Luftgemisch insgesamt auf die Oberflächentemperatur aufheizen kann.

Bei Stäuben soll die Oberflächentemperatur für alle Kategorien auf 2/3 der minimalen Zündtemperatur des Staub/Luft-Gemisches begrenzt werden. Abhängig von der Kategorie müssen dabei die Störfälle betrachtet werden. Dabei ist u.U. auch die Ablage von Staub auf dem Betriebsmittel zu berücksichtigen.

Die Bestimmung der Temperaturen von elektrischen Antrieben wird ausführlich im Kap. 3.2 beschrieben.

### 1.3.3 Elektrostatik

Eine spezielle Form von elektrischen Entladungen wird durch die Elektrostatik verursacht und wird häufig als Gefahr unterschätzt (Statische Elektrizität) [30]. Durch die Besonderheiten der Elektrostatik und die damit verbundenen Explosionsschutzmaßnahmen soll in diesem Kapitel auf die Eigenschaften eingegangen werden. Die Anforderungen gelten nicht nur ausschließlich für nicht leitende Teile sondern auch für nicht geerdete metallische Oberflächen, die eine Ladung aufbauen können.

Büschelentladungen von isolierenden Kunststoffoberflächen können Gase und Dämpfe entzünden, wenn die entladende Fläche groß genug ist. Zulässige Oberflächen sind in Tabelle 1.3 aufgeführt.

Kategorie	I (projiz. Fläche, bzw. Breite)	IIA (projiz. Fläche, bzw. Breite)	IIB (projiz. Fläche, bzw. Breite)	IIC (projiz. Fläche, bzw. Breite)
1	100 cm <sup>2</sup> 3,0 cm	50 cm <sup>2</sup> 0,3 cm	25 cm <sup>2</sup> 0,3 cm	4 cm <sup>2</sup> 0,1 cm
2		100 cm <sup>2</sup> 3 cm	100 cm <sup>2</sup> 3 cm	20 cm <sup>2</sup> 2 cm
3		100 cm <sup>2</sup> *) 3 cm	100 cm <sup>2</sup> *) 3 cm	20 cm <sup>2</sup> *) 2 cm

Tabelle 1.3: Zulässige projizierte Flächen für nicht leitende Teile von Geräten, die elektrostatisch geladen werden können.

\*) Kein Grenzwert, wenn zündfähige Entladungen unwahrscheinlich bei Normalbetrieb (einschließlich Wartung und Reinigung) sind.

Die projizierte Fläche kann bei allseitiger leitfähiger Umrahmung, die elektrostatisch geerdet ist, mit dem Faktor 4 multipliziert werden, bei zweiseitiger Umrahmung verdoppelt.

Wesentliche größere isolierte Flächen können durch die Lackierung entstehen und können trotz der Erdung des Metallteils eine Zündquelle darstellen. Ein Maß dafür ist die Schichtdicke der Lackierung. Es gilt eine maximale Schichtdicke von 2 mm für die Gruppen I, IIA und IIB sowie 0,2 mm für IIC als unkritisch. Erfahrungsgemäß sind flüssiglackierte Metallteile akzeptabel, da sie eine geringe Durchschlagsfestigkeit durch die Lackporen haben, so dass sich eine zündrelevante Ladung nicht aufbauen kann. Hingegen sind pulverlackierte Metallteile i.d.R. für IIC nicht akzeptabel, wenn die Schichtdicke > 0,2 mm beträgt. Lackierte Metallteile, die durch leitfähige Verbindungsteile (Metallschrauben, Metallunterlegscheiben etc.) geerdet sind, können als ausreichend geerdet betrachtet werden. Isolierende dünne Fettschichten sind hinsichtlich ihrer Ableitfähigkeit zu beurteilen.

Alternativ kann auch ein experimenteller Nachweis erbracht werden, dass keine übermäßigen Entladungen auftreten können. Dazu wird im Trockenklima (< 30% rel. Feuchte) das Prüfmuster möglichst hoch aufgeladen (EN 13463-1) und gemessen. Der Grenzwert von 60 nC für die Gruppe I und IIA, 30 nC für IIB sowie 10 nC für IIC darf nicht überschritten werden.

Durch betriebliche Maßnahmen lassen sich elektrostatische Entladungen verhindern, wenn durch den Einsatz keine Aufladung zu erwarten ist. Z.B werden Hinweise wie „Nur mit feuchtem Tuch reinigen“ verwendet.

Insbesondere für ungünstige Umgebungsbedingungen (z.B. Offshore-Anlagen) ist eine zusätzliche Lackschicht notwendig, um die Korrosion des Motors zu verhindern. Dies steht häufig im Gegensatz zu den Anforderungen für die Elektrostatik.

Durch die regelmäßige Wartung der Maschinen beim Betreiber wird häufig eine zusätzliche Lackschicht aufgetragen, deren Eigenschaften hinsichtlich der Eigenschaften für elektrostatische Entladungen relevant sein können.

Gleitstielbüschelentladungen entstehen durch schnell bewegte Teilchen entlang der Oberfläche. Sie haben einen größeren Energieinhalt und sind damit zündfähiger als Büschelentladungen und müssen besonders betrachtet werden. Entsprechende Ladungsmengen treten häufig in Rohrleitungen durch das Fördermedium (pneumatisch geförderter Staub oder strömende Flüssigkeiten) auf. Der Kühlluftstrom der elektrischen Maschine ist üblicherweise nicht ausreichend. Riemenantriebe sind hingegen zu betrachten und sollten leitfähig sein.

Als Maßnahme gilt ein ausreichender Abstand zwischen isolierender und leitfähiger Oberfläche, eine Durchschlagsfestigkeit von weniger als 4 kV oder die Ersetzung der isolierenden durch nicht isolierende Materialien, die jedoch geerdet sein müssen. Ein Erdungswiderstand gilt als ausreichend zwischen  $10^6$  (größere leitfähige Anlageteile) und  $10^8 \Omega$  (Fußboden).

Elektrostatisch erzeugte Funkenentladungen entzünden brennbare Gase, Dämpfe und Stäube, wenn die entladene Kapazität genügend groß und die Entladespannung genügend hoch ist (IIC > 1 kV, IIB > 4 kV und IIA > 7 kV). Die zulässigen Kapazitäten sind in Tabelle 1.4 festgelegt.

	<b>Staub</b>	<b>I</b>	<b>IIA</b>	<b>IIB</b>	<b>IIC</b>	<b>Zusatzbedingungen</b>
Zone 0	-	10 pF	< 3 pF	< 3 pF	< 3 pF	Keine hohen Aufladungsmechanismen
Zonen 1 / 2	-		10 pF	10 pF	< 3 pF	
Zonen 20, 21, 22	10 pF		-	-	-	
Gehäuse	50 pF	50 pF	50 pF	15 pF	5 pF	Handgehaltenes Betriebsmittel

Tabelle 1.4: Zulässige Kapazitäten für die verschiedenen Gase im Bezug zur Zoneneinteilung

## 2. EU-Richtlinien und deren nationale Umsetzung

Die europäischen Explosionsschutzrichtlinien richten sich zum einen durch die Richtlinie 94/9/EG an die Hersteller explosionsgeschützter elektrischer Betriebsmittel und zum anderen durch die Richtlinie 99/92/EG an die Betreiber überwachungsbedürftiger Anlagen im Ex-Schutz.

Die Richtlinie 94/9/EG regelt die Beschaffenheitsanforderungen für Geräte, Komponenten und Schutzsysteme. Sie gehört wie mehr als 20 weitere Richtlinien zu der Richtlinie des „New Approach“, der die allgemeinen Grundregeln für den freien Warenverkehr innerhalb der Europäischen Union regelt. Durch das Anbringen des CE-Zeichens und die Konformitätserklärung wird die Einhaltung der Richtlinie dokumentiert und das Gerät/Schutzsystem kann in Verkehr gebracht werden. Das Ziel ist die Harmonisierung der Beschaffenheitsanforderungen zum Abbau von Handelshemmnissen. Die Richtlinie fordert die Konformitätsbewertung und die Festlegung von Schutzniveaus. Die Umsetzung in nationales Recht durch die Explosionsschutzverordnung erfolgte am 12. Dezember 1996 mit dem 11. Gerätesicherheitsgesetz – Explosionsschutz-Verordnung ExVO.

Die Richtlinie 99/92/EG betrifft den Arbeitsschutz. Ein wesentlicher Bestandteil der Anforderungen ist die Erstellung des Explosionsschutzdokumentes, wobei die Zoneneinteilung festgelegt und die Gerätekategorien zugeordnet werden. Das Ziel der Richtlinie ist die Festlegung von Mindestvorschriften für das sichere Arbeiten und den sicheren Betrieb zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit. Die nationalen Umsetzungen der Mitgliedsstaaten können durchaus weitergehende Anforderungen beinhalten. In Deutschland erfolgte die nationale Umsetzung in das Arbeitsschutzgesetz am 27. September 2002 durch die Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV. Die ExV mit allen Verwaltungsvorschriften ist dadurch am 1. Januar 2003 außer Kraft gesetzt worden. In der BetrSichV sind neben dem Explosionsschutz auch die Druckgeräte- und Aufzügerichtlinien integriert worden, was das Verständnis über überwachungsbedürftige Anlagen nicht vereinfacht hat. Die BetrSichV definiert die Zuständigkeiten der zugelassenen Überwachungsstellen und der befähigten Personen für die Installation, wiederkehrende Prüfung oder Instandhaltung überwachungsbedürftiger Anlagen.

### 2.1 Zertifizierungsverfahren nach Richtlinie 94/9/EG

Die Änderung der gesetzlichen Grundlagen für den Explosionsschutz wirken sich auch auf die Physikalisch-Technische Bundesanstalt als benannte Stelle aus. Als Nachweis für die Eignung als „benannte Stelle“ wird eine Akkreditierung auf der Basis der Normenreihe EN 45000 / ISO 17025 verlangt [31, 32]. Nach dem Gerätesicherheitsgesetz ist dafür die Zentralstelle der Länder für Sicherheitstechnik (ZLS) in Deutschland zuständig. Der Akkreditierungsumfang der PTB erlaubt es, Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen zu zertifizieren und zu prüfen. Er umfasst zusätzlich das Zertifizieren der QS-Systeme für die Fertigung von Geräten zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen.

In anderen Mitgliedsländern der EU werden die benannten Stellen (Notified Body) durch ihre jeweiligen zuständigen Behörden benannt. Die Richtlinie verpflichtet alle benannten Stellen

an einem regelmäßigen Erfahrungsaustausch teilzunehmen. Ergebnisse der Diskussionen können unter <http://europa.eu.int/comm/enterprise/atex/nb/nblast.htm> abgerufen werden.

### 2.1.1 Begriffe und Definitionen der Richtlinie 94/9/EG

Die Richtlinie 94/9/EG findet Anwendung auf Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen. Dazu tragen auch Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen für den Einsatz außerhalb von explosionsgefährdeten Bereichen bei, die im Hinblick auf Explosionsgefahren jedoch für den sicheren Betrieb von Geräten und Schutzsystemen erforderlich sind oder dazu beitragen. Die ATEX-Leitlinie zur Richtlinie definiert z.B. den Überlastschalter für Elektromotoren der Zündschutzart EEx e „Erhöhte Sicherheit“ als Vorrichtung im Sinne der Richtlinie, so dass eine Zertifizierung dieser Geräte notwendig ist [33]. Überlastschalter für Elektromotoren anderer Zündschutzarten werden nicht explizit genannt.

Bezogen auf explosionsgeschützte elektrische Antriebe können der Antrieb und ein mögliches Anbaugerät (z.B. Pumpe) sowie deren Überwachung durch Überlastschalter auch zusammen als *Baugruppe* bezeichnet werden, welche in diesem Fall aus eigenständigen Geräten kombiniert ist. Dabei folgert die Definition „kombiniert“, dass man von Baugruppen spricht, wenn zwei oder mehr Geräte und Komponenten zusammengesetzt werden. Der Hersteller von Baugruppen kann die Konformität der Geräte unterstellen und seine eigene Risikobewertung auf die zusätzlichen Entzündungs- und andere relevante Gefahren beschränken.

Beispielhaft könnte eine (nichtelektrische) Pumpe, mit entsprechendem Konformitätsbewertungsverfahren beurteilt sein, die dann an einen bereits bewerteten elektrischen Motor angeschlossen wird. Das Antriebssystem muss einer erneuten Konformitätsbewertung unterzogen werden, wenn die Pumpe mit einem heißen Fördermedium den Motor über den Flansch über das übliche Maß hinaus erwärmt.

In Anlehnung an die Definition von Baugruppen sagt der ATEX-Leitfaden, wenn Geräte auf dem Gelände des Anwenders kombiniert und installiert werden, gilt dies nicht als Herstellung und es entsteht folglich kein Gerät. Das Ergebnis ist eine „*Installation*“ und liegt außerhalb des Geltungsbereichs der Richtlinie. Die Installationsanweisungen der Hersteller müssen durch den Betreiber beachtet werden.

Im Gegensatz zur Installation fällt die Herstellung für den *eigenen Gebrauch* unter die Richtlinie, so dass in den Fällen alle Anforderungen der Richtlinie (Kennzeichnung, evtl. Einbindung benannte Stelle, usw.) erfüllt werden müssen. Der Übergang zwischen Herstellung für den eigenen Gebrauch und Installation wird durchaus unterschiedlich in den verschiedenen Mitgliedsländern oder Branchen ausgelegt.

Im Hinblick auf die Übergangszeit bis zur Einführung der Richtlinie und die Regelung bei Ersatzteilen oder Ersatzbeschaffung, die noch unter das „alte“ Recht fallen, ist der Begriff für die Markteinführung gemäß 94/9/EG das erstmalige „Inverkehrbringen“. Das „Inverkehrbringen“ von ATEX-Produkten bedeutet, Produkte entgeltlich oder unentgeltlich „zum ersten Mal“ auf dem EU-Markt durch eine kaufmännische Transaktion unabhängig vom Rechtsinstrument verfügbar machen. Als Ausnahmen gelten alle Transaktionen für den Export in Nicht-EU-Länder. Das Ausstellen von Produkten bei Fachmessen oder – ausstellungen sowie das Anbieten in Katalogen gilt nicht als Inverkehrbringen, solange ein entsprechender Hinweis vorhanden ist.

Im Gegensatz zum erstmaligen Inverkehrbringen muss die Richtlinie bei Altprodukten, die z.B. repariert, rekonfiguriert oder Instand gesetzt wurden, nicht angewendet werden. Lediglich bei erheblichen Modifizierungen, die eine Integrität einer Schutzart berührt, findet die Richtlinie ihre Anwendung. Beispielhaft wären Änderungen, die sich auf die Erwärmung des Elektromotors, und damit relevant für die Temperaturklasse sind, oder auf den Zündschuttspalt einer Druckfest gekapselten Maschine auswirken.

Der Hersteller des Ersatzteils ist normalerweise nicht verpflichtet, die Anforderungen der Richtlinie 94/9/EG zu erfüllen, sofern das Ersatzteil kein Gerät oder keine Komponente gemäß der Definition der Richtlinie darstellt (z.B. Gehäuseteile wie Dichtungen oder Deckel). Auch hier ist eine klare Abgrenzung nicht möglich und obliegt daher häufig einer individuellen Einzelfallentscheidung.

Nach der Richtlinie hat der Hersteller ein Wahlrecht, ob er bei der Konstruktion und Herstellung direkt die Grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen einhalten oder sich nach harmonisierten Normen richten will. Der bisherige gesetzesähnliche Status der Normen (Anpassungsrichtlinien) ist abgeschafft; gleichwohl wird den Normen weiterhin ein hoher Stellenwert eingeräumt. Harmonisierte Normen haben die Vermutungswirkung der Einhaltung der Richtlinie und damit der grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen. Eine Reihe von Normen wurde bereits harmonisiert und im Amtsblatt der EG veröffentlicht ([http://publications.eu.int/index\\_de.html](http://publications.eu.int/index_de.html)). Wenn keine harmonisierten Normen vorhanden sind, können alternativ auch entsprechend eines Beschlusses von ExNB andere normative Dokumente bei Zertifizierungen herangezogen werden. Folgende Reihenfolge ist dabei zu beachten:

- (1) Zutreffende harmonisierte Norm
- (2) Offiziell veröffentlichte Normen CEN, CENELEC / 2. Ausgaben
- (3) Zutreffende harmonisierte EN-Normen 1. Ausgabe
- (4) Schluss-Entwurf EN 50014 pr.A1
- (5) EN-Normentwürfe
- (6) Nationale Normen (EU-Mitglieder)
- (7) CLC/CEN Anpassungsdokumente
- (8) Zutreffende IEC-Normen
- (9) Örtliche Prüfregeln benannter Stellen
- (10) Andere nationale Normen, z.B. USA, Japan, ...

Der Normungsprozess erfordert eine regelmäßige Aktualisierung, um technischen Anforderungen gerecht zu werden. Für die IEC-Normen ist ein „Review“ innerhalb von 5 Jahren vorgesehen. Daraus resultiert zwangsläufig, dass „neue“ Normen harmonisiert werden und die „alten“ Normen ihre Harmonisierung verlieren. Der Hersteller eines Produktes ist in Deutschland durch die Produkthaftung und europäisch durch die Grundideen des „New Approaches“ verpflichtet, sein Produkt sicherheitstechnisch dem Erkenntnisstand anzupassen und Maßnahmen zu ergreifen. Dazu ist eine Verfolgung des Normungsprozesses unabdingbar. In Deutschland können dazu entsprechende Arbeitskreise dienen, z.B. AK 311.08 „Explosionsgeschützte Antriebssysteme“ des VDE. Jedoch muss nicht zwangsläufig durch die Änderung eines Normenstandes auch sicherheitstechnisch eine Anpassung erfolgen oder womöglich eine erneute Beurteilung bereits in Verkehr gebrachter

Produkte. Üblicherweise wird durch die Interessenvertreter im Beraterkreis eine angemessene Vorgehensweise empfohlen.

Aber nicht für alle Ex-Geräte muss die Richtlinie angewendet werden. Wichtige Anwendungsbereiche, die nicht unter die Richtlinie fallen sind folgende:

- Geräte in häuslicher und nichtkommerzieller Umgebung.
- Seeschiffe und bewegliche Off-Shore-Anlagen. Geräte für die Binnenschifffahrt müssen der Richtlinie genügen.
- Beförderungsmittel auf öffentlichen Verkehrswegen (Straße, Schiene, Luft und Wasser). Nicht ausgenommen sind solche, die in explosionsfähigen Bereichen eingesetzt werden.
- Einfache Betriebsmittel, elektrisch und nicht-elektrisch, die keine eigene Zündquelle haben und von denen daher keine Zündgefahr ausgeht. Der Leitfaden führt hierfür exemplarisch Beispiele auf.

### **2.1.2 Konformitätsbewertung**

Durch die Festlegung der Gerätekategorie beim Konformitätsbewertungsverfahren entstehen dem Hersteller weitere Pflichten, bevor er sein Produkt gemäß RL 94/9/EG in den Markt bringen kann. Neben der Entwurfsphase mit der Typprüfung wird die Produktion oder das Produkt direkt einer Bewertung hinsichtlich der Fertigung unterzogen. Durch das Anbringen des CE-Zeichens auf dem Produkt und ggf. gefolgt von der Kennnummer der auditierenden Stelle werden die Anforderungen des freien Warenverkehrs dokumentiert.

Die Richtlinie sieht im entsprechenden Anhang verschiedene Möglichkeiten für die Anerkennung des QS-Systems vor (Abb. 2.1). In den Fällen, wo die Richtlinie eine Baumusterprüfbescheinigung fordert, ist auch ergänzend ein QS-Modul notwendig, abgestuft nach Kategorien, d.h. Gefährdungspotential des Produktes. Für Geräte der Kategorie 1 (Zone 0) und für Schutzsysteme ist zwingend das Modul „QS-Produktion“ (Anhang IV) oder QS-Produkte (Anhang V) erforderlich, alternativ ist eine Einzelprüfung des Produktes (Anhang IX) möglich.

Für elektrische Geräte der Kategorie 2 (Zone 1) ist entweder das Modul „QS-Produkte“ (Anhang VII) oder „Konformität mit der Bauart“ (Anhang VI) vorgesehen, welches insbesondere bei Umschreibungen von Firma A auf Firma B oder für Einzelabnahmen geeignet ist. Alternativ ist eine Einzelprüfung des Produktes (Anhang IX) möglich.

Für das nichtelektrische Gerät der Kategorie 2 ist der Anhang VIII „Interne Fertigungskontrolle“ zuständig, der die alleinige Verantwortung beim Hersteller vorsieht. Entsprechendes gilt für Geräte der Kategorie 3.



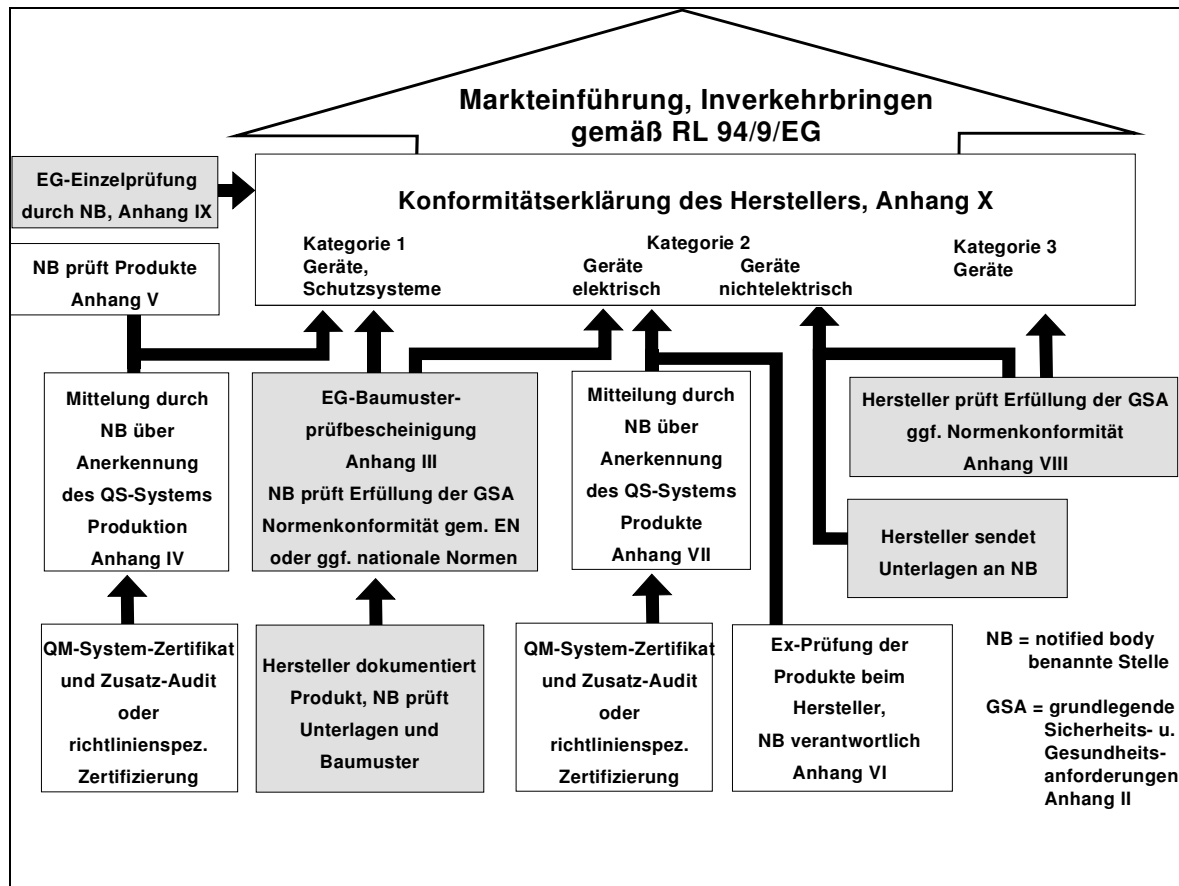


Abb. 2.1 Anforderungen der Richtlinie 94/9/EG bezüglich des Inverkehrbringens

Zur Umsetzung der Ex-Anforderungen an das QM-System bestimmt der Hersteller einen Ex-Beauftragten. Der Ex-Beauftragte koordiniert alle Tätigkeiten, die die Übereinstimmung der Produkte mit den grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen sicherstellen oder beeinflussen. Er fungiert als Ansprechpartner für die benannte Stelle und ist für die Umsetzung der Konstruktions- und Prüfanforderungen in den Fertigungsablauf verantwortlich. Ihm obliegt die Freigabe von Änderungen oder ggf. die Sperrung von fehlerhaften Geräten.

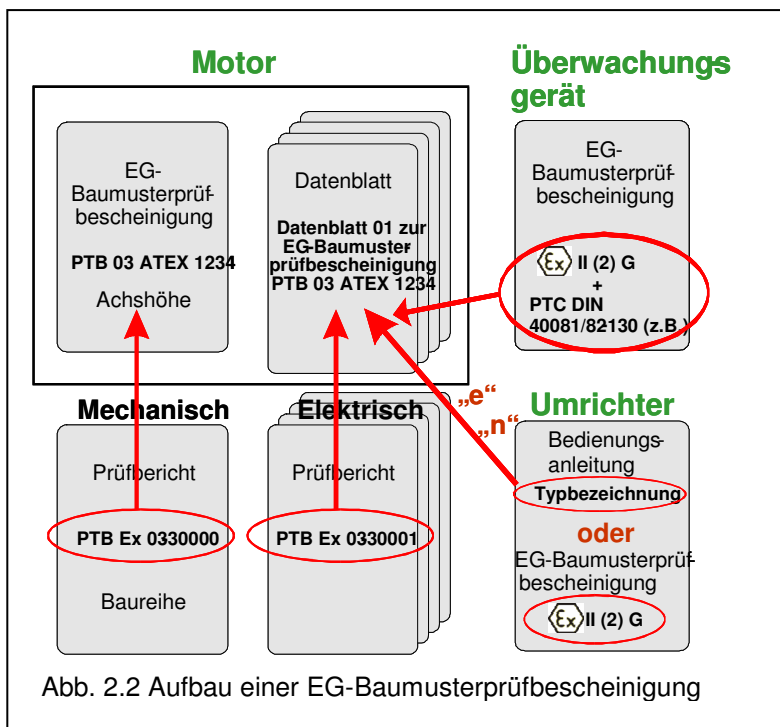
Nach dem Durchlaufen der entsprechenden Verfahren der Konformitätsbewertung, die die grundlegenden Sicherheitsanforderungen der Richtlinie sicherstellen, obliegt es dem Hersteller die CE-Kennzeichnung anzubringen und eine schriftliche EG-Konformitätserklärung auszustellen.

Der in der PTB am häufigsten praktizierte Prozess ist ein Zusatzaudit, welches auf ein bereits vorhandenes ISO 900x Zertifikat aufbaut. Beim „Ex-Audit“ wird insbesondere auf die Produktion des Betriebsmittels hinsichtlich der Anforderungen durch die Normen Wert gelegt. So ist z.B. für die Beurteilung der Zündschutzart der „Druckfesten Kapselung“ eine exakte Bestimmung der Zündspalte unabdingbar. Hierbei ist sowohl die messtechnische Ausstattung als auch die richtige Handhabung von Wichtigkeit. Ebenso wird in der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ auf die in der Bescheinigung festgelegten Konstruktionsmerkmale geachtet (richtige Verwendung der Bauteile und Komponenten).

### 2.1.3 Zulassungsverfahren der PTB

Im Hinblick auf die Normenreihe ISO 17025 / EN 45000 ist eine Trennung zwischen Prüflaboratorium und Zertifizierungsstelle notwendig und sinnvoll, um dem „Vier-Augen-Prinzip“ gerecht zu werden. Die Trennung spiegelt sich deutlich erkennbar in der Bearbeitung der Anträge wider. Zunächst wird durch den Prüfer das Produkt entsprechend den Normenanforderungen geprüft und anschließend in einem Prüfbericht bewertet. Basierend auf Prüfberichten können von Mitarbeitern der Zertifizierungsstelle die EG-Baumusterprüfbescheinigungen ausgestellt werden.

In der Zulassungspraxis für elektrische Maschinen teilt sich die Prüfung in einen mechanischen und einen elektrischen Part auf (Abb. 2.2). Der mechanische Part umfasst den gesamten konstruktiven Aufbau einer Maschine oder Maschinenbaureihe. Dabei werden z.B. für Maschinen der Erhöhten Sicherheit „e“ neben einer allgemeinen Beschreibung die Anforderungen der EN 60079-0 und -7 in einem PTB-Prüfprotokoll verifiziert. Darüber hinaus dokumentieren weitere Prüfprotokolle die Eignung von Dichtungen, Kunststoffen oder anderen Bestandteilen einer elektrischen Maschine. Die Zündgefahrenbewertung nach EN 13463-1 ist nicht Bestandteil der Prüfung und Zulassung. Das Ergebnis wird in einem Prüfbericht zusammengefasst. Darauf aufbauend bezieht sich die EG-Baumusterprüfbescheinigung auf eine Achshöhe, wenn durch den Prüfbericht eine Baureihe beschrieben wird.



Die Klassifizierung der elektrischen Leistung und die Spezifizierung der elektrischen Maschine erfolgt in einem zur EG-Baumusterprüfbescheinigung gehörenden Datenblatt. Es ist das Resultat der elektrisch/ thermischen Messungen für die jeweilige elektrische Auslegung. Der zugehörige Prüfbericht fasst die Prüfprotokolle z.B. des Dauerlaufs zusammen.

In Sonderfällen kann die elektrische Maschine durch in die Wicklung integrierte Temperaturfühler geschützt

werden. Für Maschinen der Erhöhten Sicherheit schreibt der ATEX-Leitfaden die Verwendung von eigens bescheinigten Überwachungsgeräten vor, deren Kennzeichnung im Datenblatt vorgeschrieben ist. Verlangt die Norm bei umrichtergespeisten Maschinen die gemeinsame Prüfung, so wird der Umrichter durch seine Typbezeichnung oder Charaktereigenschaften sowie wichtiger Einstellparameter direkt spezifiziert. Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit den Umrichter im Hinblick auf die Richtlinie 94/9/EG als Sicherheits-, Kontroll und Regelvorrichtung bescheinigen zu lassen.

Die produktspezifischen Anforderungen für elektrische Antriebe der unterschiedlichen Zündschutzarten werden in den folgenden Kapiteln detaillierter erörtert.

#### 2.1.4 Kennzeichnung und Betriebsanleitung

Die Mindestanforderungen für die Kennzeichnung regeln die Richtlinie 94/9/EG und die harmonisierten Normen. Ein Teil des Konformitätsbewertungsverfahrens sind die Bestimmungen zur Anbringung der CE-Kennzeichnung. Die CE-Kennzeichnung ist verbindlich und anzubringen bevor ein Gerät oder Schutzsystem in Verkehr gebracht wird. Komponenten sind von dieser Vorschrift ausgenommen. Um den Anforderungen der Lesbarkeit nachzukommen, ist eine Buchstabenhöhe von mindestens 5 mm notwendig. Bei kleinen Produkten kann davon abgewichen werden. An das CE-Kennzeichen anschließend befindet sich die Kennnummer der benannten Stelle, die für die Produktionsüberwachungsphase tätig war. Bei Komponenten wird die Kennnummer der benannten Stelle auch ohne das CE-Kennzeichen angebracht. Im Falle der PTB lautet die Kennnummer 0102 (Abb. 2.3).

Darüber hinaus tragen die Geräte, Schutzsysteme und Komponenten die spezifische Explosionsschutzkennzeichnung mit folgenden Punkten:

- das „**Ex**“ in einem Sechseck
- Gerätegruppe/Gerätekategorie : M1 oder M2 für Gerätegruppe I und 1, 2 oder 3 für Gerätegruppe II
- G für Gas oder D für Staub

Alle Produkte müssen mit dem Namen und der Anschrift des Herstellers, der Bezeichnung der Serie oder Bauart, der Seriennummer (soweit vorhanden) und dem Baujahr gekennzeichnet sein.

Über die spezifische Kennzeichnung hinaus fordert die Richtlinie 94/9/EG eine zusätzliche Kennzeichnung entsprechend der europäischen Normenreihe EN 60079-0. Zwingend notwendig für die Klassifizierung ist:

- das Symbol Ex als Kennzeichen für die Übereinstimmung des Produktes mit der Normenreihe (Die Anwendung der EN 50014 sah die Kennzeichnung EEx vor. Zur Vereinheitlichung gemäß der IEC-Anforderungen wurde auch in Europa auf das zweite „E“ verzichtet),
- das Symbol für die verwendeten Zündschutzarten (z.B. e, d, p, etc.),
- die Explosionsgruppe I, II sowie IIA, IIB oder IIC für die Zündschutzart i, d, oder q,
- das Symbol zur Bezeichnung der Temperaturklasse oder der maximalen Oberflächentemperatur.

Exemplarisch zeigt Abb. 2.3 eine Musterkennzeichnung für eine elektrische Maschine in der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“, wobei der Temperaturschutz über in die Wicklung eingebettete Kaltleiter erfolgt. Neben den oben beschriebenen Notwendigkeiten der Kennzeichnung verlangt die EN 60079-7 weitere Informationen für die elektrische Maschine, die sich auf die elektrischen Größen wie Spannung und Strom beziehen.

<b>Mustermann GmbH &amp; Co. KG</b>		D-1234 Musterhausen	CE 0102
3 ~ Motor Typ	K79BL47-Z	Nr.: 558.6MGH.47	IEC 60 034
IP	44	S	1
kW	18,5	min <sup>-1</sup>	988
Hz	50	V	Y 750
A	23	cosφ	0,89
Th.cl.	F	PTB	00
ATEX	1234 / 01	Baujahr	2000
II 2 G Ex eib II	C	T3	
I <sub>A</sub> /I <sub>N</sub>		t <sub>E</sub>	, , , s
TMS, bei Angabe der t <sub>A</sub> -Zeit, nur mit funktionsgeprüften PTC -Auslösegerät mit der Schutzartkennzeichnung			
II (2) G	t <sub>A</sub>	35	s PTC DIN 44081/82
			130

**Audit**

**Zulassung**

**Sicherheits-, Kontroll- und  
Regelvorrichtung (Außerhalb)**

Abb. 2.3 Beispiel eines Typenschildes für eine elektrische Maschine

Eine häufige Anwendung für elektrische Maschinen ist der Antrieb von Pumpen. Die Pumpe wiederum kann im Ex-Bereich aufgestellt sein oder sogar zum Pumpen von Ex-Atmosphären im Ex-Bereich verwendet werden. Im Gegensatz zu den elektrischen Betriebsmitteln fehlt das Ex in der Kennzeichnung nicht-elektrischer Geräte (siehe EN 13463-1 Abs. 14.3). Demnach wäre eine Bezeichnung

„Ex“ II 2 G Ex e c II T3

für einen Pumpenmotor als Einheit denkbar, der als Einheit dem Konformitätsbewertungsverfahren unterzogen wurde. Der Motor wäre in der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ und die Pumpe in der Zündschutzart „Konstruktive Sicherheit“ jeweils für die Kategorie 2 ausgeführt. Entsprechenden Sachverhalt muss die Betriebsanleitung erläutern. Um die Lesbarkeit zu erhöhen, werden die Bezeichnungen zwischen elektrischen und nicht-elektrischen Betriebsmitteln häufig getrennt vorgenommen. Des Weiteren könnte für die Pumpe eine abweichende Zone im Inneren vorhanden sein. Dies ist ebenfalls in der Bezeichnung zu berücksichtigen, z.B.

„Ex“ II 2 G Ex e c II T3 / 1 G c T2

Ein Bestandteil für das Inverkehrbringen von ATEX-Produkten ist die Betriebsanleitung. Neben der Richtlinie 94/9/EG fordert auch die EN 60079-7 eine Betriebsanleitung, die bei der Prüfung und Zulassung seitens der benannten Stelle verifiziert werden muss.

Die Richtlinie fordert, dass jedem Gerät oder Schutzsystem neben der Originalbetriebsanleitung auch eine Übersetzung in der jeweiligen Landessprache des Einsatzgebietes beigelegt wird. Zu den wesentlichen Mindestangaben für elektrische Maschinen gehören :

- die Wiederholung der oben beschriebenen Kennzeichnung
- Angaben zur oder zum sicheren:
  - o Inbetriebnahme
  - o Verwendung
  - o Montage und Demontage

- Instandhaltung (Wartung- und Störungsbeseitigung)
- Installation
- Rüsten
- Elektrische Kenngrößen und höchste Oberflächentemperaturen sowie andere Grenzwerte
- Erforderlichenfalls besondere Bedingungen für die Verwendung, einschließlich der Hinweise auf sachwidrige Verwendung, die erfahrungsgemäß vorkommen kann (vorhersehbarer Missbrauch)

Über diese Anforderungen hinaus gilt für elektrische Maschinen die Maschinenrichtlinie 98/37/EG. Die grundlegenden Anforderungen für beide Richtlinien sind gleich. Die Maschinenrichtlinie fordert neben dem Explosionsschutz aber auch weitere Angaben wie z.B. Lärmbestimmungen, die bei der Bewertung seitens der benannten Stelle nicht herangezogen werden. Sie obliegen der Verantwortung des Herstellers.

## **2.2 Richtlinie 99/92/EG und Betriebssicherheitsverordnung**

Im Gegensatz zur Richtlinie 94/9/EG richtet sich die Richtlinie 99/92/EG und deren nationale Umsetzung in der Betriebssicherheitsverordnung an den Betreiber von überwachungsbedürftigen Anlagen. Dennoch sollte der Hersteller explosionsgeschützter Betriebsmittel die grundsätzlichen Gedankengänge der Richtlinie 99/92/EG kennen, um die Auswirkungen auf die Produkte nach 94/9/EG zu überprüfen und sie für die Entwicklung seiner Produkte nutzen zu können.

Die Richtlinie 99/92/EG verpflichtet den Arbeitgeber die Arbeitnehmer vor Explosionen zu schützen oder solche zu verhindern, in dem er die Explosionsrisiken beurteilt. Er verpflichtet sich, Bereiche mit explosionsfähigen Atmosphären zu definieren und ein Explosionsdokument zu erstellen.

Die Betriebssicherheitsverordnung setzt die Anforderungen der Richtlinie um und ist unterteilt in die Arbeitgeberpflichten für Arbeitsmittel und die Verpflichtung für Betreiber überwachungsbedürftiger Anlagen, wobei Anlagen auch als Arbeitsmittel zu sehen sind. Sie gliedert sich in folgende vier Abschnitte:

- 1. Allgemeine Vorschriften
- 2. Gemeinsame Vorschriften für Arbeitsmittel
- 3. Besondere Vorschriften für überwachungsbedürftige Anlagen
- 4. Gemeinsame Vorschriften, Schlussvorschriften sowie Anhänge 1 - 5

Im zweiten Abschnitt wird der Betreiber verpflichtet, eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Er teilt die explosionsgefährdeten Bereiche ein und dokumentiert die Maßnahmen im Explosionsschutzdokument. Der Beurteilungsvorgang ist für jeden Arbeits- bzw. Produktionsprozess sowie für jeden Betriebszustand einer Anlage und dessen Änderungen durchzuführen. Bei der Beurteilung neuer oder bestehender Anlagen sind insbesondere folgende Betriebszustände zugrunde zu legen:

- die normalen Betriebsbedingungen einschließlich Instandhaltungsarbeiten,
- die In- und Außerbetriebnahme,
- Betriebsstörungen und voraussehbare Fehlzustände,

- der vernünftigerweise vorhersehbare Fehlgebrauch.

Im dritten Abschnitt folgen Regelungen zum Betrieb, wie Prüfung vor Inbetriebnahme sowie wiederkehrende Prüfungen.

Die wesentlichste Änderung ist das „außer Kraft setzen“ der ElexV zum 1. Januar 2003 und damit der Wegfall der „Sachverständigen“ beim Hersteller mit den vielfach ausgestellten Sachverständigenbescheinigungen durch den Hersteller. Die Betriebssicherheitsverordnung definiert für die überwachungsbedürftigen Anlagen die befähigte Person allgemein (§14, 15), die amtlich anerkannte befähigte Person (§14 (6)) und die zugelassene Überwachungsstelle sowie deren Festlegungen der Kompetenzen. Die Qualifikation an eine amtlich anerkannte befähigte Person ist in der technischen Regel für Betriebssicherheit TRBS 1203 festgelegt.

Der Arbeitgeber wird verpflichtet nach §9 Abs.(1) Nr.2 soweit erforderlich, dem Arbeitnehmer Betriebsanweisungen für die bei der Arbeit benutzten Arbeitsmittel in verständlicher Form und Sprache zur Verfügung zu stellen. Die Betriebsanweisungen müssen mindestens Angaben über die Einsatzbedingungen, über absehbare Betriebsstörungen und über die bezüglich der Benutzung des Arbeitsmittels vorliegenden Erfahrungen enthalten. Durch die Umsetzung der Richtlinie 99/92/EG in das nationale Recht könnten daher zusätzliche Anforderungen an die Betriebsanleitung entstehen.

Dem Hersteller explosionsgeschützter Geräte gestattet die Betriebssicherheitsverordnung in § 14 Abs. (6) die Prüfung der Instandsetzung der Geräte. Der Hersteller muss bestätigen, dass die überwachungsbedürftige Anlage in den für den Explosionsschutz wesentlichen Merkmalen den Anforderungen der Verordnung entspricht. Uneindeutig ist jedoch die Möglichkeit des Herstellers auch markenfremde Produkte instandzusetzen, obwohl die Kompetenz beim Hersteller vorhanden ist. Alternativ können instandgesetzte Teile einer Anlage wieder in Betrieb genommen werden, wenn dies durch eine amtlich anerkannte befähigte Person eines Unternehmens erfolgte. Die amtliche Anerkennung erfolgt durch die Bundesländer, wobei die Interpretation und die Umsetzung sich unterscheiden könnten. Weiterhin besteht die Notwendigkeit der amtlichen Anerkennung für jedes Bundesland, in dem ein instandgesetztes Gerät eingesetzt wird, unabhängig vom Sitz des Unternehmens (Herstellers). Die Regeln für das Instandsetzen von Geräten durch den Hersteller sind in den anderen Mitgliedsstaaten durchaus unterschiedlich, so dass im Vorfeld darüber Informationen eingeholt werden sollten.

Die Übergangsregelung der Betriebssicherheitsverordnung § 27 macht auch deutlich klar, dass es keine Pflicht zur Nachrüstung oder Veränderung bestehender Ex-Geräte oder Ex-Anlagen gibt, die die Beschaffenheit betreffen. Die Beschaffenheitsanforderungen, die zum Zeitpunkt der damaligen Inbetriebnahme galten, bleiben weiterhin gültig. Der Betreiber hat jedoch die Pflicht das Explosionsschutzdokument zu erstellen.

### 3. Prüfung explosionsgeschützter Antriebe

Elektrische Maschinen werden in unterschiedlichsten Ausführungen mit Leistungen von einigen Watt bis Megawatt auch im Explosionsschutz eingesetzt. Durch die Vielzahl der Varianten ergeben sich bei der Prüfung und Zulassung verschiedenste Anforderungen für den Explosionsschutz. Die grundlegenden Anforderungen an elektrische Maschinen sind durch die Normenreihe EN 60034-1 „Drehende elektrische Maschinen“ und folgende vorgegeben [34]. In den Normenanforderungen der EN 60079-0 und folgende wird stets Bezug darauf genommen.

Die Unterteilung der Prüfung in einen mechanischen und elektrisch/thermischen Teil hat sich insbesondere für die Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ in der Vergangenheit bewährt.

#### 3.1 Die mechanische Ausführung explosionsgeschützter Antriebe

Basis für die Zulassung explosionsgeschützter Antriebe ist die mechanische Ausführung der Maschine. Zunächst wurde in der Vergangenheit die mechanische Ausführung in einer *Rahmenbescheinigung* festgelegt, wie es noch in der „alten“ Prüffregel beschrieben wurde. Die Rahmenbescheinigung wurde mit dem Inkrafttreten der Richtlinie 76/117EWG von der *Teilbescheinigung* abgelöst, wobei die Teilbescheinigung kein offizielles Dokument darstellt, sondern lediglich aus Vereinfachungsgründen durch HOTL (heutzutage ExNB) eingeführt wurde. Nach der zur Zeit geltenden Richtlinie 94/9/EG wird die mechanische Ausführung der elektrischen Maschine für eine Baugröße oder einer Baureihe zumindest in der PTB in einem Prüfbericht dokumentiert. Der Prüfbericht hat keinen offiziellen Status sondern dient lediglich für die internen Zwecke innerhalb einer benannten Stelle.

Prinzipiell besteht die Möglichkeit, den Anschlusskasten in dem mechanischen Prüfbericht für die elektrische Maschine zu integrieren. Dies ist insbesondere von Vorteil, wenn der Anschlusskasten ein elementarer Bestandteil des Motors ist. Ansonsten sollte der Anschlusskasten zur besseren Übersicht in einem eigenen Prüfbericht zusammengefasst werden. In diesen Fällen kann der Anschlusskasten durch eine eigene Kennzeichnung leicht identifiziert werden.

Die EN 60079-0:2004 ist die Grundlage für die mechanische Ausführung aller elektrischen Maschinen für die Zone 1, wobei in einigen Fällen besondere Bedingungen zu berücksichtigen sind, die zu einer X-Kennzeichnung führen. Die fünf Möglichkeiten der besonderen Bedingungen, die im Zusammenhang mit elektrischen Maschinen stehen können, sollen kurz dargestellt werden:

- Die Auslegung für einen anderen Temperaturbereich, der außerhalb des Normbereiches liegt, erfordert die X-Kennzeichnung, wenn nicht gesondert auf dem Typenschild darauf hingewiesen wird.
- Abweichungen bei Anforderungen an Leichtmetallische Gehäuse (Zündgefahr durch Aufschlag oder Reibung).
- Elektrisches Betriebsmittel hat einen niedrigen Grad bezüglich der mechanischen Gefahr.
- Temperaturklasse kann nur für bestimmte Gebrauchslagen eingehalten werden

- Die Zugentlastung der Kabel- und Leitungseinführung erfüllt nicht die 100%-Anforderungen

Die Prüfungsschwerpunkte für die mechanische Ausführung sind abhängig von der Zündschutzart. In der Zündschutzart Druckfeste Kapselung „d“ müssen an die Konstruktion der Spaltgeometrien hohe Anforderungen gestellt werden, damit der obligatorische Zünddurchschlagsversuch erfolgreich absolviert werden kann. Innerhalb der Druckfesten Kapselung der Maschine werden dagegen keine weiteren Anforderungen gestellt, die über die EN 60034 hinausgehen.

Die Überdruckkapselung „p“ muss sicherstellen, dass keine explosionsfähige Atmosphäre während des Betriebes innerhalb der Maschine auftreten kann. Daher muss durch ausführliche Messungen des Gasaustausches in der Maschine ein geeignetes Spül- sowie Überdruckverfahren für eine Typenreihe nachgewiesen werden. Wie für die Zündschutzarten „d“ und „p“ ist die mechanische Auslegung in der Zündschutzart „e“ aber auch in „n“ von Wichtigkeit für das Schutzziel.

In der praktischen Umsetzung werden elektrische Maschinen durch die Kombination von verschiedenen Zündschutzarten konstruiert, wobei insbesondere die Anschluss technik häufig in der Zündschutzart „e“ ausgeführt wird. Weitere Anbauteile wie z.B. Heizungen in „d“ oder Nutzenwiderstandsthermometer in „i“ sind denkbar. Die Zukaufteile sind mit einer eigenen Zulassung als Gerät oder Komponente im Sinne der Richtlinie „in Verkehr gebracht“.

### **3.1.1 Explosionsgeschützte Antriebe in „e“**

Die mechanischen Anforderungen an elektrische Maschinen der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ beruhen auf den Normen EN 60079-0 und EN 60079-7. Für die Zulassung sind eine Reihe von Unterlagen zu erstellen und Prüfungen durchzuführen. Die Prüfungsunterlagen in Form einer Beschreibung der Konstruktionseinzelheiten ergänzt durch entsprechende Zeichnungen sollen ein genaues Bild über die mechanische Ausführung ergeben. Sie müssen mit rechtsverbindlicher Unterschrift, Datum und Firmenstempel in doppelter Ausführung eingereicht werden. Nach der erfolgreichen Prüfung werden die Unterlagen zur Festlegung der Bauart und Ausführung der Maschine mit dem Dienstsiegel der PTB versehen. Zur Verifizierung der Normanforderungen hat die PTB ein Protokoll erarbeitet, in dem die relevanten Normenpunkte aufgeführt sind und durch ankreuzen abgehandelt werden.

Wesentliche Anforderungsbestandteile und Erfahrungen bei Prüfung der Beschreibung sollen folgend kurz erläutert werden:

#### **1. Schutz gegen äußere Einflüsse**

Entsprechend der EN 60034-5 erfolgt die Einteilung der Schutzart für das Gehäuse. Als Mindestschutzart für Maschinen der Erhöhten Sicherheit gilt IP 44. Blanke spannungsführende Teile innerhalb der Maschine sind für IP 44 nicht gestattet.

#### **2. Ständergehäuse**

Für die Zusammenfassung von Maschinentypen in einem Prüfbericht eignen sich Varianten gleicher Kühlart (IC-Code nach EN 60034-6).



### 3. *Wicklung*

Die Wicklung und deren Aufbau wird in einer ausführlichen Isolationsbeschreibung dokumentiert, wobei die Ausführungsmerkmale der EN 60079-7 Abs. 4.72 gewährleistet sein müssen. Niederspannungswicklungen müssen mit einem Mindestnennendurchmesser des Drahtes von 0,25 mm ausgeführt sein.

Auch die Wicklungsenden müssen sorgfältig isoliert sein und dürfen nicht über scharfe Kanten zum Anschlusskasten geführt werden. Im Hinblick auf die (teilweise hohen) Anzugsströme sind die Querschnitte der Wicklungsableitungen im Allgemeinen mindestens querschnittsgleich der Ständerwicklung auszulegen.

Zur Verbindung des Wicklungsendes mit der Wicklungszuleitung (oder Anschlussleitung) eignen sich Stossverbinder mit Schrumpfschläuchen, die einer speziellen Prüfung nach DIN VDE 0278-3 und HD 603-S1 im Wasserbad unterliegen, wenn sie nicht im Wickelkopf entsprechend integriert sind. Geeignete Prüfmuster für die möglichen Ausführungen sind notwendig.

Werden die Motoren besonderen Beanspruchungen ausgesetzt (z.B. Vibrationsmotor), sind die Zuleitungen zum Anschlusskasten geeignet zu verlegen und zu befestigen (z.B. elastische Knickschutztülle), um einen Leitungsbruch mit Körperschluss zu vermeiden. Für die Eignung von Hochspannungswicklungen ist ein Nachweis auf Zündfähigkeit bei Belastung mit Wechsel- bzw. Stoßspannung notwendig, der in einem getrennten Prüfbericht dokumentiert wird (Abs. 3.4.4).

### 4. *Ständer- und Läuferblechpaket*

Das Ständerblechpaket muss ausreichend gegen Verdrehen und Verschieben im Ständergehäuse gesichert sein, sowie das Läuferblechpaket gegenüber der Welle.

### 5. *Lagerschilde*

Offene Maschinen müssen mindestens in der Schutzart IP 20 ausgeführt sein, Öffnungen über 12 mm in Höhe und Breite sind nicht zulässig. Befestigungsschrauben oder – muttern sollten, obwohl nicht ausdrücklich in der Norm vorgeschrieben, gegen Selbstlockern gesichert sein.

### 6. *Lager*

Die EN 13463-5 „Schutz durch sichere Bauweise“ legt für die Auswahl der Lager verschiedene Kriterien fest, die prinzipiell auch für elektrische Betriebsmittel herangezogen werden können [35]. Zur Vermeidung von Lagerschäden ist für eine ausreichende Schmierung unter Berücksichtigung der empfohlenen Wartungsintervalle zu sorgen sowie auf einen weitgehend staub- und wasserdichten Einbau zu achten. Eine Nachschmiervorrichtung muss so konstruiert sein, dass überschüssiges Fett abgeführt wird und nicht mit der Wicklung in Berührung kommt.

Bei Wälzlagern darf der radiale oder axiale Mindestabstand zwischen festen und sich drehenden Teilen einer Dichtung oder eines Labyrinth nicht kleiner als 0,05 mm sein, für Gleitlager 0,1 mm.

Durch einen asymmetrischen Aufbau einer elektrischen Maschine entsteht neben dem eigentlich symmetrischen Magnetfeld auch ein asymmetrisches. Das asymmetrische Magnetfeld induziert längs der Welle eine Spannung (10...500 mV) und als Folge einen Strom, wenn sich der Kreis über die Lager schließen kann. Ein Lagerschaden ist die Konsequenz. Dieser Fehlerfall ist insbesondere bei größeren Antrieben zu beachten. Unter Berücksichtigung der erhöhten Sicherheit von explosionsgeschützten Maschinen

können Wellenspannungen < 200 mV als nicht kritisch angesehen werden und haben einen hinreichenden Sicherheitsabstand zur Standardausführung. Bei höheren Wellenspannungen ist der Einsatz eines isolierten Lagers auf der nicht angetriebenen Seite notwendig.

Um jederzeit im montierten Zustand die Funktion der Lagerisolation überprüfen zu können, ist eine beidseitige Lagerisolation notwendig (keine Bedingung für den Ex-Schutz). Der Läufer befindet sich dabei auf einem undefinierten Potential oder ist über die Belastungsmaschine geerdet. Dies ist bei explosionsgeschützten Maschinen zu unsicher. Der sichere Betrieb im explosionsgefährdeten Bereich kann durch eine Erdungsbrücke, üblicherweise der AS-Lagerisolation, erfolgen. Die Erdungsbrücke darf im Betrieb nicht geöffnet werden, worauf der Hersteller mit einem Warnschild in unmittelbarer Nähe hinweisen muss. Dieser Sicherheitshinweis muss auch in die Betriebsanleitung aufgenommen werden.

#### 7. *Läuferkäfig*

Bei Maschinen der Erhöhten Sicherheit „e“ muss zur Vermeidung von „Läuferfunken“ der Käfig an sich und mit dem Blechpaket eine feste Einheit bilden. Die Käfigstäbe und Kurzschlussringe werden durch Hartlöten oder Schweißen miteinander verbunden oder bestehen aus einem Druckgussteil. Zur Fixierung des Käfigs im Blechpaket können z.B. die Stäbe schwer verstemmt werden.

#### 8. *Luftspalt*

Zur Vermeidung des Schleifens von Läufer- und Ständerpaket müssen Mindestluftspalte nach EN 60079-7 eingehalten werden. Für Maschinen, die nur in Verbindung mit der Belastungsmaschine mit dem zweiten Lager verbunden werden, muss der einwandfreie Lauf und die Gleichmäßigkeit des Luftspaltes nachgewiesen und protokolliert werden, bevor die Maschine in Betrieb geht. Ein entsprechender Hinweis in der Betriebsanleitung ist notwendig.

#### 9. *Lüfter*

Der Lüfter muss auf der Welle gegen Verschieben und Verdrehen gesichert werden. Insbesondere bei Kunststofflüftern ist eine formschlüssige Verbindung zu empfehlen. Werden Kunststofflüfter mit einem Oberflächenwiderstand > 10<sup>9</sup> Ohm bei Umfangsgeschwindigkeiten > 50 m/s verwendet, sind Maßnahmen gegen elektrostatische Aufladungen zu treffen, wie z.B. durch Verwenden von leitfähigem Anstrich, dessen Eignung durch EN ISO 2409, EN 24624 und ISO 4624 nachgewiesen werden kann. Der maximale Lüfterdurchmesser bei Umfangsgeschwindigkeit von 50 m/s berechnet sich nach

$$d = \frac{50 * 1000 * p}{\pi * f} \quad \text{in mm (p: Polpaare, f: Frequenz).}$$

Die gebräuchliche Grenzfrequenz ist bei Standardantrieben 50/60 Hz, sie kann aber bei Umrichterantrieben deutlich höher liegen (z.B. 87 Hz im Feldschwäcbereich). Der sichere Sitz wird bei Kunststofflüftern durch eine Prüfung im Reversierbetrieb (Max. 20 000 Drehrichtungswechseln) nachgewiesen. Für die Prüfung werden drei Lüfter je Variante der Befestigungsart und des Materials benötigt (inklusive zweier Adapter).

#### 10. *Lüfterschutzhauben*

Die Lufteintrittsöffnungen müssen entsprechend IP 20 nach EN 60034-5 ausgeführt

werden, z.B. durch ein entsprechendes Gitter. Bei Vertikalmotoren mit nach unten stehendem Wellenende muss gegen das Hineinfallen von kleinen festen Körpern eine Abdeckhaube vorgesehen werden. Bei nach oben angeordnetem Wellenende dürfen ebenfalls keine Gegenstände hineinfliegen können (Mindestens IP 10).

Lüfterschutzhäuben oder Verkleidungsteile von Belüftungsöffnungen müssen mechanisch hinreichend stabil sein. Im Zweifelsfall ist eine Prüfung der Haltbarkeit durch die Stoßprüfung nach EN 60079-0 vorzunehmen. Die Abstände zwischen den umlaufenden und ruhenden Teilen müssen auch nach der Schlagprüfung eingehalten werden. Bezüglich der Materialpaarungen ist die VDMA 24169-1 zu beachten.

#### 11. *Erdungs- und Schutzleiteranschluss*

Zum Anschluss empfehlen sich Mantel-, Laschen-, Bügel- oder Schlitzklemmen mit einer Kennzeichnung nach DIN 40011, die hinreichend verdrehsicher sind. Bügelklemmen sind nach DIN 46282 für eindrätige Leiter mit Querschnitten bis 10 mm<sup>2</sup> geeignet. Für größere Querschnitte und feindrätige Leiter werden Laschen- oder Schlitzklemmen empfohlen. Der Anschlussquerschnitt ist nach EN 60079-7 festgelegt.

Bei Gehäusen aus Leichtmetall-Legierungen müssen Maßnahmen gegen Kontaktkorrosion der Anschlussstellen getroffen werden (Kupferleiter dürfen nicht auf Aluminium geklemmt werden). Die Auflageflächen müssen metallisch blank sein und gegen Korrosion durch leichtes Fetten geschützt werden.

#### 12. *Potentialverbindungen von Maschinengehäuseteilen*

Der unsymmetrische Aufbau einer elektrischen Maschine kann zu Streufeldern führen, die Ströme im Gehäuse hervorrufen. Damit es zwischen Gehäuseteilen, die durch elastische Dichtungen voneinander getrennt sind, nicht zu Funkenentladungen kommt, werden Potentialverbindungen (Bondings) eingesetzt. Zur Auslegung und Überprüfung dienen folgende Hinweise:

- Querschnitt der Verbindungen  $\geq 35 \text{ mm}^2$  und Verbindung so kurz wie möglich
- Verbindungsleitungen möglichst in den Ecken montieren
- maximaler Strom unter den unten genannten Prüfbedingungen in den Verbindungsleitungen  $< 100 \text{ A}$ , bei größeren Strömen sind weitere Verbindungsleitungen in angemessenen Abständen notwendig
- die mit einem hochohmigen Voltmeter gemessene Spannung zwischen den möglichen Berührungspunkten der Gehäuseteile muss kleiner oder gleich dem Spannungsabfall an der nächsten Potentialverbindung sein (für Strom  $> 20 \text{ A}$  bei Prüfbedingungen)
- Prüfbedingungen:    Leerlauf         $\Rightarrow U = 1,1 \cdot U_N$   
                                  Dauerbetrieb  $\Rightarrow U = U_N, I = I_N$   
                                  Anlauf             $\Rightarrow U = U_N$

Die Werte können ggf. durch Extrapolation aus entsprechenden Kennlinien ermittelt werden.

#### 13. *Kennzeichnung*

Motoren müssen an sichtbarer Stelle eine gut les- und sichtbare Aufschrift gemäß der Richtlinie 94/9/EG und den Normen enthalten. Kann die gut sichtbare Kennzeichnung nur auf einer vertauschbaren Abdeckung oder ähnlichem angebracht werden, so muss ein zweites Schild an das Maschinengehäuse angebracht werden. Für die Kennzeichnung des Motors kann das Beispiel aus Kap. 2.1.4 herangezogen werden.

#### 14. *Umgebungstemperaturen unter - 20 °C*

Die Festigkeit der verwendeten Metalle darf bei gleichen Abmessungen nicht geringer werden, oder die Abmessungen sind der verminderten Festigkeit anzupassen (Wellen, Schrauben, Gehäuse). Bei Schrauben können z.B. bei gleichem Gewinde Schrauben der nächst höheren Klasse aber mindestens 8.8 verwendet werden (keine Einschränkungen sind bei nichtrostenden austenitischen Stählen zu erwarten). Die Stoßprüfung sollte bei der zu erwartenden niedrigsten Temperatur an vermutlich schwachen Stellen durchgeführt werden (Lüfterhauben, Anschlusskästen).

Bei Gehäuseteilen aus Kunststoff muss bei der niedrigsten Temperatur die Stoßprüfung bestanden werden. Lüfter müssen ebenfalls für die Temperatur geeignet sein, d.h., das Material darf bei Reversiersversuchen nicht springen. Isolierteile müssen vergleichbaren mechanischen Belastungen standhalten, z.B. können Drehmomentprüfungen an den Anschlussteilen durchgeführt werden.

Die Isolierfähigkeit der Wicklung muss auch für die niedrigsten Temperaturen nachgewiesen werden, sie darf nicht geringer sein als bei - 20 °C. Der Nachweis kann an fertigen Motoren dadurch erbracht werden, dass im Kälteschrank eine Zahl von mindestens 20 Zyklen durchfahren wird, wobei die Wicklungen jeweils auf die niedrigste und - der Isolierstoffklasse entsprechend - maximale Temperatur gebracht werden. Nach Erreichen der jeweiligen Endtemperatur sollte dabei der Isolationswiderstand bei Niederspannungswicklungen mit einer Spannung von mindestens 500 V gemessen werden. Der Isolationswiderstand darf dabei nicht kleiner werden, als vorher für - 20 °C festgestellt.

#### 15. *Kabel- und Leitungsverlegung außerhalb der Maschine.*

Kabel und Leitungen außerhalb der Maschine müssen entsprechend montiert werden, dass sie einen ausreichenden Schutz gegen mechanische Beschädigung und Korrosion oder chemischer Einwirkung und Beeinträchtigung durch Wärme haben. Zum Schutz der Installation können Schächte, Kanäle, Rohre oder Gräben zur Verlegung von Kabel oder Leitungen verwendet werden. Hierbei müssen Vorkehrungen getroffen werden, um das Ansammeln von brennbaren Gasen, Dämpfen und Flüssigkeiten oder Verbinden von Gehäusen zu vermeiden. Durchqueren die Stromkreise unterschiedliche explosionsgefährdete Bereiche, muss die Verlegung den Anforderungen der betreffenden Zonen entsprechen.

Eine Möglichkeit ist die Verlegung der Kabel und Leitungen innerhalb eines an beiden Enden nicht verschlossenen Rohres oder Schutzschlauches. Die Öffnungen des Rohres oder Schutzschlauches müssen von Innen nach Außen zum Schutz mit einer flachen Fase oder vergleichbarem versehen werden. Bei der Befestigung des Rohres oder Metallschutzschlauches an der Maschine ist darauf zu achten, dass der Potentialausgleich gewährleistet wird. Bei der Verwendung von Kunststoffmaterialien muss der Oberflächenwiderstand gemäß EN 60079-0 eingehalten werden.

Eingeschraubte Rohrleitungen, die zwei Gehäuse direkt miteinander verbinden, müssen auch entsprechend der Gehäuseschutzart gemäß EN 60034-5 bzw. EN 60529 verifiziert werden. Die „höhere“ Gehäuseschutzart ist maßgeblich. Kunststoffrohre oder flexible Kunststoffschutzschläuche werden vorab zusätzlich künstlich gealtert sowie einer Stoßprüfung unterzogen.

Flexible Schutzschläuche in Kombination mit einer Kabel- und Leitungseinführung (KLE) sind entsprechend EN 60079-0 bzw. EN 60079-7 zu prüfen, bei denen die KLE den

Abschluss des Gehäuseschutzes darstellen soll. Durchzuführen und nachzuweisen sind die Zugentlastung, der IP-Schutz und die Elastomerprüfung. Entsprechende Anzugsdrehmomente sind in den Unterlagen zur mechanischen Ausführung und in der Betriebsanleitung aufzuführen.

Zur mechanischen Festigkeit sollte der Befestigungsabstand zwischen Rohrleitungs- oder Schutzschlauchende und Einführung in das Gehäuse 100 mm nicht überschreiten. Der Abstand der Befestigungen untereinander darf bis zu 200 mm bei flexiblen Systemen bzw. > 200 mm bei starren betragen.

#### 16. *Lackierung der Metalloberflächen, Elektrostatische Entladungen*

Zur Vermeidung des Zündrisikos durch elektrische Entladungen in Form von Gleitstielbüschel- oder Büschelentladungen müssen u.U. die Anforderungen - siehe Abschnitt 1.3.3 Elektrostatik eingehalten werden.

Zur Vereinfachung der Erstellung der notwendigen Unterlagen kann seitens der PTB als Leitfaden eine Musterbeschreibung zur Verfügung gestellt werden.

Über die besonderen Bedingungen der EN 60079-0 hinaus gibt es auch in der EN 60079-7 Anforderungen an die Maschine, die zur X-Kennzeichnung führen. Dazu zählt:

- die Reduzierung der Schutzart durch Öffnungen zur Entwässerung oder Durchlüftung, Angaben dazu müssen vom Hersteller in den beschreibenden Unterlagen festgelegt werden und die Kennzeichnung zusätzlich zur X-Kennzeichnung die entsprechenden Schutzarten des Gehäuses enthalten.
- die ausschließliche Verwendung in sauberen Räumen.

### **3.1.2 Anschluss- und Verbindungskästen in „e“**

Entsprechend der mechanischen Ausführung des Motors dokumentiert die Beschreibung in Kombination mit Zeichnungen die Konstruktion des Anschlusskastens. Zur Verifizierung der Normanforderungen hat die PTB ein Protokoll erarbeitet, in dem die relevanten Normenpunkte aufgeführt sind und durch ankreuzen abgehandelt werden.

Die Zulassung von Anschlusskästen nach EN 60079-7 fordert die Einhaltung von IP 54 gemäß EN 60529 für blanke spannungsführende Teile. Parallel dazu regelt die EN 60034-5 den IP-Schutz von elektrischen Maschinen. Dabei sind insbesondere leitfähige Stäube als kritisch einzustufen, die bei der Definition der kritischen Menge häufig zu Diskrepanzen führt. Im Sinne der Erhöhten Sicherheit „e“ können bei der sicherheitstechnischen Auslegung keine Abstriche gemacht werden und evtl. Auslegungen gemäß EN 60034-5 leitfähige Stäube nicht speziell zu betrachten, sollten nicht toleriert werden.

Zur Einhaltung der Mindestschutzart IP 54 werden Dichtungen eingesetzt, die „unverlierbar“ angebracht sein müssen. Das Dichtungsmaterial (Elastomer) sollte möglichst aus einem geschlossenen Ring bestehen; bei Flachdichtungen wird für die Auflagefläche der Dichtung ein Mindestmaß von 10 mm gefordert. Die Dichtungsmaterialien werden auf Härtezunahme geprüft, wobei die Änderung nach der Klimalagerung < 20 % sein muss.

Der Anbau des Anschlusskastens an das Ständergehäuse erfordert eine Abdichtung, wenn das Ständergehäuse nach IP 44 ausgelegt ist. Dabei kann Rücksicht die Gebrauchslage der Maschine genommen werden. Anschlusskästen für offene durchzugsbelüftete Maschinen

(IP 20) sind auf der Rückseite zum Ständergehäuse gemäß IP 54 abzudichten. Ebenso sind die rückwärtigen Anschlusssteile von Isolatoren als nicht isolierte, spannungsführende Teile zu betrachten und nach IP 54 abzudichten oder zu isolieren.

Bei Niederspannungsanschlusskästen werden gesondert bescheinigte Kabel- und Leitungseinführungen verwendet. Die Dimensionierung und Ausführung soll sicherstellen, dass bei Bemessungsbetrieb des Motors an der Einführungsstelle möglichst wenig Wärme vom Maschinengehäuse oder der Leitung übertragen wird, damit keine höhere Temperatur als 70 °C an der Kabeleinführung oder 80 °C an der Aderverzweigung auftreten kann. Nicht benutzte Einführungsöffnungen müssen durch eigens bescheinigte Verschlussstopfen oder metallische Verschlussstopfen mit geprüftem Elastomer verschlossen sein. Diese sind gegen Selbstlockern zu sichern. Bei der Auswahl von Kabeln und Leitungen für den Netzanschluss ist EN 60079-14 „Elektrische Anlagen in gasexplosionsgefährdeten Bereichen“ zu berücksichtigen. Für die Stromtragfähigkeit gilt VDE 0100 bzw. VDE 0298-4. Bei der Bemessung ist die jeweilige Umgebungstemperatur (i.d.R. 40 °C) zu berücksichtigen.

Ortsveränderbare Maschinen sollen Leitungseinführungen verwenden, die gegen Zug- und Biegebeanspruchung entlastet sind (EN 60079-0 und EN 60079-14). Als Anschlussleitungen eignen sich starke Gummischlauchleitungen NSHU, H07RN-f oder Leitungen gleicher Ausführung. Der Schutzleiter muss isoliert in der Leitung mitgeführt und im Innern des Betriebsmittels gesichert angeschlossen sein. Dies gilt auch für Maschinen mit direkt herausgeführten Leitungen, die über Kabel- und Leitungseinführungen mit einer Zugentlastungsschelle eingeführt sind.

Als Anschlussklemmen für Niederspannungsmotoren werden gesondert bescheinigte Klemmenbretter verwendet. Für Leiterquerschnitte über 35 mm<sup>2</sup> stellen Niederspannungsklemmen nach DIN 46260 oder Hochspannungsklemmen nach DIN 46265 mit Rundklemmen nach DIN 46223 geeignete Anschlussmöglichkeiten dar. Neben der mechanischen Belastbarkeit der anzuschließenden Leiterquerschnitte ist auch DIN 46200 für die stromführenden Anschlussbolzen zu berücksichtigen. Leitungen ab 70 mm<sup>2</sup> benötigen aufgrund der Biegesteifigkeit des Leiters keinen zusätzlichen Verdrehenschutz.

Die Mindestluft- und Kriechstrecken sind nach EN 60079-7 festgelegt. Um eine übersichtliche Leitungsführung und einen sicheren Anschluss der Leitungen an die Klemmen zu gewährleisten, ist zwischen der Gehäuseinnenwand und den Klemmen bzw. Klemmensockeln ein genügend großer Abstand einzuhalten (Tab.3.1).

Die Abstände gelten für Klemmen, deren Einführungsöffnungen bis etwa 30 mm unter der Kasten-Oberkante liegen. Bei tiefer liegenden Klemmen sind die Abstände entsprechend größer zu wählen. Liegen beim Einbau von Reihenklemmen zwei oder mehrere Klemmenreihen parallel, dann ist ein Mindestabstand von 1,5 \* b zwischen den Klemmenreihen einzuhalten. Bei Klemmenreihen, deren Tragschienen hindurchgeführt werden können, ist ein Mindestabstand von 2 \* b einzuhalten.

Leiterquerschnitt mm <sup>2</sup>	Anzahl der eingeführten Leitungen		
	1 Leitung, z.B. vieradrig (Motoranschluss)	2 Leitungen	3 und mehr Leitungen oder nebeneinander
2,5	20 mm	20 mm	20 mm
4	20 mm	20 mm	25 mm
6	20 mm	25 mm	30 mm
10	25 mm	30 mm	40 mm
16	30 mm	40 mm	50 mm
25	40 mm	50 mm	60 mm
35	50 mm	60 mm	75 mm
50	60 mm	75 mm	100 mm
70	75 mm	100 mm	125 mm
95	100 mm	125 mm	140 mm
120	125 mm	140 mm	150 mm
150	140 mm	150 mm	160 mm
185	150 mm	160 mm	170 mm
240	160 mm	170 mm	180 mm

Tab.: 3.1 Mindestabstände (b) zwischen Klemmen und Gehäuseinnenwand

Bei Niederspannungsanschlusskästen können weitere Stromkreise, neben dem Netzanschluss, integriert werden. Dabei ist beachten, dass auch der Messstromkreis für die Bemessungsspannung der Maschine zu isolieren ist. Der Abstand zwischen Netzanschluss und Messstromkreis ist ebenfalls für die Bemessungsspannung vorzusehen. Handelt es sich beim Messstromkreis um einen eigensicheren Stromkreis, so muss ein Mindestabstand von 50 mm eingehalten oder eine Trennwand angebracht werden. In Hochspannungsanschlusskästen dürfen verschiedene Stromkreise nicht integriert werden. Die Ausnahme ist der integrierte Stromwandler in einem Sternpunktasten. Messstromkreise werden in einem getrennt bescheinigten Anschlusskasten untergebracht, dessen Bemessungsspannung üblicherweise 500 V beträgt.

Bei kleineren bis mittleren Maschinen werden auch Kunststoffanschlusskästen eingesetzt, dessen Festigkeit des Gehäuses durch die Klimalagerung, Stoßprüfung mit anschließender IP-Schutzartprüfung nachgewiesen werden muss. Für den Erdungs- und Schutzleiteranschluss sind entsprechende Maßnahmen zu treffen.

Anschlusskästen werden gemäß Richtlinie 94/9/EG als Komponente definiert, so dass die CE-Kennzeichnung hierfür entfällt. Die Kennnummer der benannten Stelle, die das Audit durchgeführt hat, wird hingegen auf dem Typenschild angebracht.

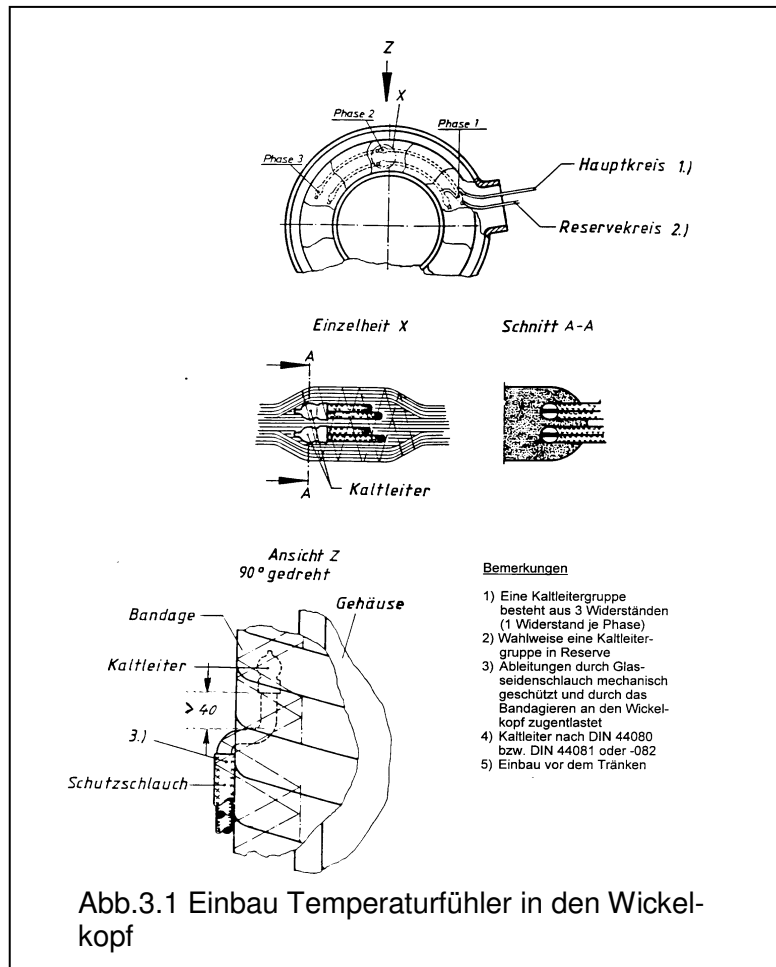
### 3.1.3 Zubehörteile

Durch die Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten entsteht die Notwendigkeit diverse Zubehörteile auch für den Explosionsschutz zu realisieren. Prinzipiell muss unterschieden werden zwischen eigenständig bescheinigten Geräten und Komponenten, die auf die Umgebungsbedingungen der Maschine angepasst werden, und Zubehörteilen, die nur in Kombination mit Normenanforderungen an die elektrische Maschine realisierbar sind. Die häufig angebotenen Zubehörteile sollen kurz beschrieben werden.

- **Kaltleiter**

Zur Überwachung von elektrischen Maschinen kann ein thermischer Motorschutz (TMS) eingesetzt werden. Um die Funktion sicherzustellen, ist der Einbau der Temperaturfühler in die Maschinenwicklung von besonderer Bedeutung.

Die Temperaturfühler müssen einen guten Wärmekontakt mit der Wicklung haben, um auch große Temperaturgradienten mit geringer Zeitverzögerung erfassen zu können. Um die höchste Wicklungstemperatur zu erfassen, werden sie auf der Abluftseite montiert. Die Temperaturfühler werden in die Mitte des Wickelkopfes



eingebettet, so dass sie allseitig von den Wickeldrähten umgeben und in direktem Kontakt sind. Die Anschlussleitung der Temperaturfühler soll in der Mitte des Wickelstranges mindestens 40 mm lang parallel zu den Wicklungsdrähten verlegt werden (Abb.3.1). Anschließend werden die Wickelköpfe bandagiert und die Wicklung getränkt. Durch das Einbetten in die Wicklung vor dem Tränken ist der Temperaturfühler ein Bestandteil der Wicklung und erfüllt ohne weitere Anforderungen die Zündschutzart „e“. Ein übermäßiges Nachformen durch heftige Schläge oder Pressen ist zu vermeiden.

Bei Wicklungen mit dickeren Drähten betten sich die Temperaturfühler unter Umständen nicht ausreichend ein. Die entstehenden Hohlräume verhindern ein hinreichendes Temperaturbild der Wicklung bei großen Temperaturgradienten. Zur Vermeidung sollten zur Umhüllung der Temperaturfühler ein gut wärmeleitendes, weiches Gießharz (auch in Verbindung mit gut wärmeleitendem Quarzmehl) verwendet werden, das eine der Isolierstoffklasse ausreichende Temperaturbeständigkeit vorweisen kann.

- **Nutenwiderstandsthermometer**

Zur Messung der Wicklungstemperatur werden insbesondere bei Maschinen großer Leistung Nutenwiderstandsthermometer eingesetzt, die jedoch keine Überwachungsfunktion im Sinne der Richtlinie 94/9/EG Art. 1 Abs. (2) ausüben sollen. Realisiert werden Nutenwiderstandsthermometer in den Zündschutzarten „e“ oder „i“ mit getrennter Bescheinigung.

Bei Maschinen der Zündschutzarten „n“ und Erhöhte Sicherheit „e“ sind die



Messleitungen zum Schutz vor Beschädigungen innerhalb sowie außerhalb vom Maschinengehäuse in Schutzschläuchen zu verlegen.

Bei Verwendung von eigensicheren „i“-Nutenwiderstandsthermometern ist der Schirm des Thermometers innerhalb der Maschine bzw. des Hilfsklemmenkastens zu erden. Mehrfach-Erdung ist nicht zulässig. In der Betriebsanleitung der Maschine muss auf die erforderliche Erdung gesondert hingewiesen werden. Weitere Informationen zur Erdung von eigensicheren Kreisen kann der EN 60079-11 entnommen werden.

Bei Maschinen der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ ist die thermische Ausnutzung der Wicklung entsprechend EN 60079-7 reduziert. Da die Nutenwiderstandsthermometer in den Zündschutzarten „e“ und „i“ in der Regel nicht für die Bemessungsspannung der Ständerwicklung isoliert sind, sollte aus sicherheitstechnischen Gründen eine Reduzierung der thermischen Ausnutzung um 10 K auch bei Maschinen der Zündschutzarten Überdruckkapselung „p“ und Druckfeste Kapselung „d“ angewendet werden.

Bei überdruckgekapselten oder druckfesten Maschinen mit Hilfsklemmenkästen der gleichen Zündschutzart wird der Einbau der Nutenwiderstandsthermometer mit in die Überprüfung einbezogen, wenn die Zündschutzart des Thermometers Bestandteil der Ex-Kennzeichnung der Maschine ist. Wenn bei Maschinen in der Zündschutzart Überdruckkapselung „p“ die Schutzart aufgehoben ist, darf ein unbescheinigtes Thermometer nicht weiter betrieben werden

Niederspannungsmaschinen:  $U \leq 1000 \text{ V}$

Es werden üblicherweise mindestens drei Nutenwiderstandsthermometer (eins je Phase) gleichmäßig am Umfang verteilt zwischen der Oberlage und der Unterlage bei 25 % - 50 % der Paketlänge eingebaut. Die Leitungen sind so zu verlegen und zu fixieren bzw. zu befestigen, dass sie ausreichend von drehenden und unter Spannung stehenden Teilen distanziert sind .

Hochspannungsmaschinen:  $U > 1000 \text{ V}$

Für den Einbau von Nutenwiderstandsthermometern in Hochspannungsmaschinen gelten die gleichen Bedingungen wie bei Niederspannungsmaschinen. Da die Anschlussleitungen der Nutenwiderstandsthermometer üblicherweise durch das Maschinengehäuse geführt werden, besteht bei höheren Spannungen in der Wicklung die Gefahr der Potentialverschleppung. Deshalb müssen die Widerstandsthermometer in einer geerdeten Umgebung eingebaut werden. Dies kann z.B. durch Verwendung von Außenglimmschutz der betreffenden Spulenteile oder durch Einbettung in ein leitfähiges, geerdetes Vlies sichergestellt werden. Bei Hochspannungsmaschinen ist bei der Verlegung der Leitungen besonders auf ausreichende Abstände zu spannungsführenden Teilen zu achten. Das Isolationssystem muss die Anforderungen der EN 60034-15 erfüllen. Dies muss in geeigneter Weise dokumentiert sein.

Die Anforderungen gelten auch für den Nuteneinbau von Kaltleitern oder Thermoelementen in Ständerwicklungen.

#### - *Stillstandsheizung*

Für klimatisch ungünstige Umgebungsbedingungen sind Stillstandsheizungen zu empfehlen, die den Innenraum der Maschine insbesondere die Wicklung auf ein höheres

Temperaturniveau halten, um sie vor Frost zu schützen. Zur Realisierung eignen sich separate Heizkörper, selbstregulierende Heizbänder oder die Bestromung eines Teils der Wicklung. Betriebsmäßig muss sichergestellt werden, dass die Stillstandsheizung nur bei ausgeschalteter Maschine eingeschaltet wird. Ansonsten ist ein thermischer Nachweis notwendig.

Separate Heizkörper ragen mit dem heizenden Teil in das Innere der Maschine und sind häufig in der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ ausgeführt und eigenständig bescheinigt. Die Innenlufttemperatur ist in aller Regel an dem montierten Ort des Heizkörpers höher als die Umgebungstemperatur. Daher muss die Stillstandsheizung für die tatsächliche Innenlufttemperatur als Umgebungstemperatur in der Bescheinigung zugelassen sein oder es muss sichergestellt werden, dass es beim Übergang nicht zu einer unzulässigen Erwärmung des Heizkörpers kommt.

Selbstregulierende Heizbänder, die häufig als Rohrbegleitheizbänder eingesetzt werden, können ebenso als Stillstandsheizung für elektrische Maschinen verwendet werden. Die Heizbänder sind auf dem Wickelkopf von Niederspannungsmaschinen montiert. Werden die Heizbänder vor dem Tränken eingebaut, können sie als Bestandteil der Wicklung angesehen werden. Bei der Auswahl der Heizbänder sollte die thermische Verträglichkeit mit der Wärmeklasse der Wicklung sichergestellt sein. Für die Montage und Konfiguration der Heizbänder müssen die Spezifikationen der Zulassung beachtet werden. Davon abweichende Modifikationen können nur in Abstimmung mit der Zulassungsstelle vereinbart werden.

Bei Hochspannungsmaschinen ist eine Montage auf dem Wickelkopf aus Isolationstechnischen Gründen nicht zu empfehlen. Das Heizband wird daher an geeigneter Stelle auf eine metallische Oberfläche montiert.

Eine weitere Möglichkeit zur Beheizung der Maschine im Stillstand ist die Bestromung eines Teils der Wicklung. Bei ausgeschalteter Maschine kann mit einem definierten Gleichstrom bei niedriger Spannung die Wicklung durch die ohmschen Verluste beheizt werden. Die elektrischen Daten müssen bei der Typprüfung verifiziert werden und sind Bestandteil der Zulassung.

- *Stromwandler*

Zur Messung der Phasenströme können im Sternpunktkasten Stromwandler eingesetzt werden, die einer Zündschutzart genügen müssen, wenn sie nicht in einem Druckfestgekapselten oder Überdruckgekapselten Anschlussraum eingesetzt werden. Für die Zulassung sind die einschlägigen Kapitel der EN 60079-7 zu beachten. Wenn der Sekundärkreis des Stromwandlers aus dem Betriebsmittel herausgeführt wird, ist dieses mit dem Zeichen „X“ zu kennzeichnen, und in den beschreibenden Unterlagen muss darauf hingewiesen werden, dass der Sekundärkreis gegen unbeabsichtigtes Öffnen im Betrieb zu schützen ist.

- *Bremsen, Erdungsbürsten*

Die Zündschutzarten „e“ und „n“ setzen voraus, dass elektrische Entladungen in Form von Funken konstruktiv und hohe Temperaturen durch Begrenzung der Leistung verhindert werden müssen. Daher lässt es sich nicht vereinbaren, schleifende Verbindungen in den Zündschutzarten „e“ und „n“ zu realisieren.

Elektromagnetische Bremsen und Erdungsbürsten werden aus dem Grunde nahezu

ausschließlich in der Zündschutzart Druckfeste Kapselung „d“ ausgeführt. Eine weitere Möglichkeit ist die Unterbringung im Innenraum einer „Überdruckgekapselten“ Maschine.

### **3.1.4 Weitere Zündschutzarten „d“, „p“, „nA“, „tD“**

Die mechanischen Anforderungen an elektrische Maschinen können abhängig von der Zündschutzart variieren. Die zusätzlichen und abweichenden Normenanforderungen sollen folgend kurz erläutert werden.

#### **Druckfeste Kapselung „d“**

Das Schutzprinzip der Druckfesten Kapselung basiert darauf, dass potentielle Zündquellen in einem Gehäuse eingeschlossen werden, so dass eine Zündung nur innerhalb des Gehäuses Auswirkungen hat. Bei gleicher mechanischer Ausführung der elektrischen Maschine hat im Vergleich zur Erhöhten Sicherheit die Druckfeste Kapselung eine größere Leistungsdichte. Die hohen Anforderungen an die Konstruktion der Maschine hinsichtlich der Spaltweiten beschränken allerdings die realisierbare Achshöhe und damit die Leistung. Die Maschine der Druckfesten Kapselung wird zunächst einer Zünddurchschlagsprüfung unterzogen, auf die lediglich kurz eingegangen werden soll.

Als Prüfungsunterlagen dient auch hier eine ausführliche Beschreibung über die mechanische Ausführung der Betriebsmittel über die zündschutzartrelevanten Anforderungen der EN 60079-0 und EN 60079-1. Darüber hinaus wird über entsprechende Zeichnungen diese Beschreibung untermauert. Eine Tabelle über die Auflistung aller zünddurchschlagssicheren Spalte, konstruktiv als auch am Referenzmuster ermittelt, und die erforderliche Berechnung der k- und m- Werte (Spalte von Wellendurchführungen) vervollständigen die Unterlagen.

Für die jeweilige Gasgruppe abhängig vom freien Volumen muss das erforderliche Prüfmuster für die Zünddurchschlagsprüfung entsprechend von dem Hersteller präpariert werden. Konstruktiv bedingte Spalte müssen mit mindestens 90% des für die Fertigung vorgesehenen Spaltes am Prüfmuster geprüft werden, um die Zünddurchschlagsicherheit auch für den Extremfall der vollen Toleranzausnutzung nachzuweisen. Bei Bauteilen mit Gewindespalten, welche mit Bohrern bzw. Schneideisen geschnitten wurden (z.B.: Kabeldurchführungen, Bolzendurchführungen, Aderleitungsdurchführungen, NPT-Conduits, etc), muss nicht in jedem Fall auf der 90%-Forderung bestanden werden. Als obere Grenze sollte ein Nenndurchmesser von 50 mm eingehalten werden.

Größere Deckel müssen dagegen die 90%-Forderung erfüllen. Diese Maßnahme ist zusätzlich zu der ggf. nach EN 60079-1 vorgesehenen Reduzierung der Länge des Gewindespaltes bei der Prüfung auf Zünddurchschlagsicherheit zu erfüllen.

Für die Demontage des Prüfmusters sind die Durchführungen (Leitungsdurchführungen, Kabel- und Leitungseinführungen) nicht einzukleben, Spaltflächen und Kugellager sind ungefettet einzubauen, der Kugellagersitz ist leichtgängig auszuführen und die Spaltflächen dürfen keine Lackschicht aufweisen. Vorgesehene O-Ringe oder andere Dichtungen sind separat beizulegen.

Zur Durchführung der Prüfung muss das Prüfmuster mit weiteren Gewindebohrungen für die Druckaufnehmer und zum Anschluss der Gasversorgung versehen werden. Die notwendigen Maße müssen vorab erfragt werden. Spezielle Gewindeformen und –größen können durch entsprechende Adapter berücksichtigt werden.

Bei Gehäusen für die statische Überdruckprüfung der Gasgruppe IIB, wo nur Flachauflagen (Deckel) vorhanden sind, muss ein Zweitdeckel mit O-Ringnut und O-Ring bereitgestellt werden.

In der Zulassungspraxis werden die mechanischen Anforderungen in der EG-Baumusterprüfbescheinigung und dem mechanischen Prüfbericht spezifiziert sowie die elektrischen Auslegungsvarianten in den dazugehörigen Datenblättern dokumentiert. Generell müssen die Maschinen die Anforderungen der EN 60034 sowie bei Verwendung von Anschlusskästen in Erhöhter Sicherheit die EN 60079-7 erfüllen.

### **Überdruckkapselung „p“**

In der Zündschutzart Überdruckkapselung „p“ wird das Innere des Gehäuses mit inertem Gas gespült, bevor das elektrische Betriebsmittel eingeschaltet werden darf. Weiterhin muss ein Überdruck aufrecht erhalten werden. Beides wird durch eine geeignete Überwachungseinrichtung sichergestellt, die im Fehlerfall die Maschine abschaltet. Dadurch wird verhindert, dass sich im Inneren des Gehäuses eine explosionsfähige Atmosphäre ausbilden kann. Durch den hohen Aufwand für das Spül- und Überwachungssystem werden elektrische Antriebe in Überdruckkapselung üblicherweise nur für größere Leistungen ausgeführt. Die Überdruckkapselung wird der Prüfung gemäß EN 60079-2 unterzogen, worauf im Folgenden kurz eingegangen wird.

Die Sicherstellung der Effektivität des Spülprozesses vor Beginn des Einschaltens der Maschine wird in einer Typprüfung durch die Prüfstelle über die Konzentrationsmessung gewährleistet. Dafür werden die Testgase Helium und Kohlenstoffdioxid verwendet. Die vom Hersteller festgelegten Parameter Volumenstrom und Spülzeit werden herangezogen. Die Überwachungseinrichtung muss dann im Betrieb die verifizierten Parameter sicherstellen.

Um auch während des Betriebes das Eindringen von explosionsfähigen Atmosphären zu verhindern, wird das Innere des Betriebsmittels auf Überdruck gehalten. Druckunterschiede innerhalb der Maschine aufgrund eines Innenluftkühlkreises müssen berücksichtigt werden. Zusätzlich muss das Spülssystem die Leckagemenge des Gehäuses ausgleichen. Die Ermittlung der Parameter Mindestdruck, Maximaldruck und Leckagemenge hat als Stückprüfung durch den Hersteller zu erfolgen.

Die Dokumentation in Form von Beschreibung und Zeichnungen soll die Funktion und Geometrie der Maschine darlegen.

Die Überwachungseinrichtung ist mit einer eigenen Zulassung ausgestattet, wenn sie sich ebenfalls im explosionsgefährdeten Bereich befindet. Zusätzlich dazu ist eine Funktionsprüfung gemäß EN 954-1 notwendig.

## **Motor der Zone 2 „nA“**

Die mechanischen Anforderungen an elektrische Maschinen für die Zone 2 in der Zündschutzart „nA“ gleichen im wesentlichen den Anforderungen an die Erhöhte Sicherheit „e“, deren mechanischer Prüfbericht als Grundlage dienen kann. Zur Verifizierung der Normenanforderungen kann ein PTB-Prüfprotokoll verwendet werden. Eine Beschreibung der Maschine, ergänzt durch Übersichtszeichnungen, müssen in doppelter Ausführung und rechtsverbindlich unterschrieben eingereicht werden, wenn eine Konformitätsaussage beantragt wird.

## **Staub „tD“**

Die Beschreibung und der mechanische Aufbau der elektrischen Maschine können weitestgehend analog den Anforderungen der Erhöhten Sicherheit erfolgen, da IEC 61241-0 mit den grundlegenden Anforderungen an Materialien und Ausführungen der EN 60079-0 nahezu übereinstimmt und auch zukünftig vereint werden. Als Prüfungen für den Gehäuseschutz ist IP 6X für die Zone 21 und Zone 22 bei leitfähigem Staub sowie IP 5X für die Zone 22 vorgesehen. Zur Dimensionierung der Luft- und Kriechstrecken werden die üblichen Abstände der VDE 110 (IEC 664) herangezogen. Alle Durchführungen müssen den Anforderungen der Drehmomentprüfung entsprechen. Anschlussteile müssen vergleichbar der Erhöhten Sicherheit gegen Verdrehen gesichert sein.

Im Staubexplosionsschutz wird brennbarer Staub mit Korngrößen von 20 µm – 400 µm als kritisch definiert. Die Normspaltweite in der Druckfesten Kapselung kann im Vergleich zur Korngröße des Staubes deutlich größer sein. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein druckfest gekapseltes Gehäuse auch staubdicht ist.

Vergleichbar der Druckfesten Kapselung werden an die Ausführung innerhalb der Maschine keine besonderen Anforderungen gelegt. Basierend auf einer mechanischen Ausführung in der Zündschutzart „e“ ist lediglich die IP-Schutzartprüfung notwendig.

Die Überdruckkapselung „pD“ gemäß EN 61241-2 stützt sich im wesentlichen auf die Anforderungen der EN 60079-2 ab. Die Vorspülung ist beim Staubexplosionsschutz nicht gestattet, da durch die Vorspülung eine explosionsfähige Atmosphäre entstehen würde.

### 3.2 Elektrisch-thermische Prüfung explosionsgeschützter Antriebe

Die Voraussetzung für die elektrische Prüfung eines Antriebes ist ein mechanischer Prüfbericht, damit die mechanische Auslegung festgelegt ist. Darauf aufbauend wird für die elektrisch-thermischen Messungen ein eigenständiger Prüfbericht erstellt. Die Bemessungsdaten der jeweiligen elektrischen Auslegung oder die Grenzdaten für die elektrische Auslegung von Motorentypen werden in einem Datenblatt zur EG-Baumusterprüfbescheinigung spezifiziert. Die Spezifikationen und Auslegungsumfänge variieren für die verschiedenen Zündschutzarten und Antriebsmöglichkeiten. Durch die Anforderungen und Sicherheitskonzepte der verschiedenen Zündschutzarten ergeben sich unterschiedliche Prüfungen zur Bestimmung der Temperaturklasse für den elektrischen Antrieb.

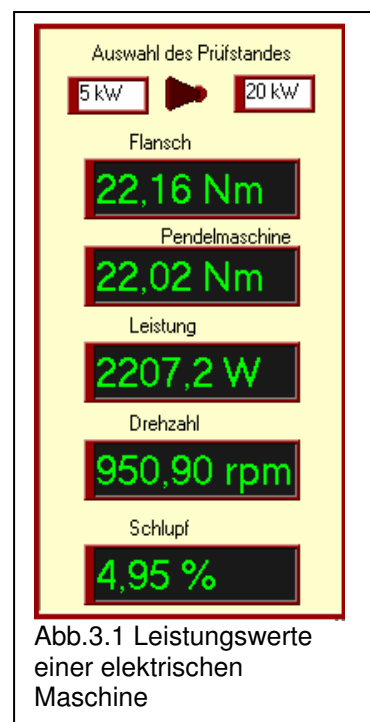
Die thermischen Prüfungen von elektrischen Betriebsmitteln im Bereich des Explosionsschutzes regelt die EN 60079-0. Die Prüfungen müssen mit den *ungünstigsten Bedingungen* und der ungünstigsten Versorgungsspannung im Bereich von 90 % bis 110 % der Bemessungsspannung durchgeführt werden, wenn der Hersteller nicht nachweisen kann, dass andere Europäische Normen oder CENELEC-Harmonisierungsdokumente andere Toleranzen vorschreiben.

Für drehende elektrische Maschinen gilt die EN 60034-1. Die häufigste Variante im Explosionsschutz ist die Drehstrom-Asynchronmaschine, auf die sich zunächst die Ausführungen beschränken sollen. Weitere Ausführungsvarianten werden darauf aufbauend diskutiert (Kap. 3. 23). Der Einsatzbereich elektrischer Maschinen wird durch die Bereiche A und B definiert. Während der Bereich A eine Spannungsschwankung von  $\pm 5\%$  zulässt, sieht der Bereich B eine Spannungsschwankung von  $\pm 10\%$  vor. Zusätzlich zu den Spannungsschwankungen werden für die Bereiche Frequenzgrenzen festgelegt. Ebenso sind die Kurvenform und Symmetrie von Spannung und Strom definiert. Die Prüfung mit den hierfür ungünstigsten Konstellationen von Spannung und Strom, wie es die EN 60079-0 fordert, sind dagegen unrealistisch, da für die notwendigen Leistungen von elektrischen Maschinen die Prüffeldbedingungen nicht zwangsläufig vorhanden sind.

Als Bemessungsgrundlage für die Prüfung von Drehstrom-asynchronmaschinen im Spannungsbereich ist das Drehmoment anzunehmen und nicht die elektrische Leistung. Bei Überspannung (z.B.  $U_N + 5\%$ ) wird üblicherweise der Bemessungsstrom berücksichtigt. Anforderungen an den Drehmomentenverlauf werden auch für „e“ Maschinen in der EN 60034-12 gestellt.

Die Bemessungsleistung ist die mechanische Leistung an der Welle. Die mechanische Leistung einer Maschine („indirekte“ Wirkungsgradbestimmung nach EN 60034-2) wird üblicherweise durch das Einzelverlustverfahren ermittelt. Die Eisen- und Reibungsverluste werden in einem zusätzlichen Leerlaufversuch ermittelt.

Wenn es die Prüffeldausrüstung ermöglicht, auch mittels Drehmoment und Drehzahl die mechanische Leistung „direkt“



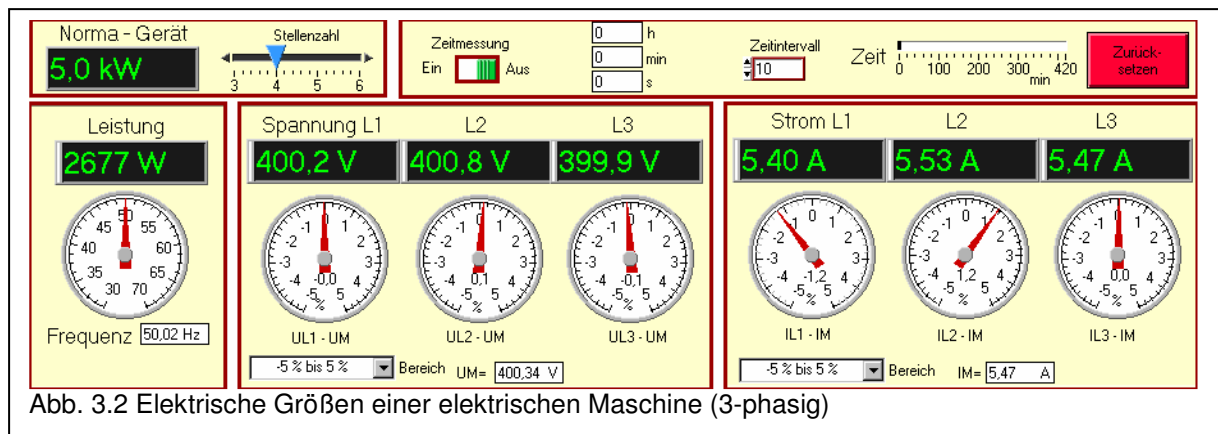


Abb. 3.2 Elektrische Größen einer elektrischen Maschine (3-phasig)

zu bestimmen, so sollte das Verfahren mit der höheren Genauigkeit gewählt werden. Dies soll im Vorfeld vereinbart werden und nachvollziehbar dokumentiert sein.

Entgegen der EN 60079-0 begrenzt die EN 60034-1 die Umgebungstemperatur auf  $-15\text{ °C}$  bis  $40\text{ °C}$  und fordert bei Abweichungen geeignete Verfahren bei der elektrisch-thermischen Prüfung zu verwenden, insbesondere für höhere Umgebungstemperaturen relevant (siehe Kap. 3.4.1). Eine weitere Einschränkungsmöglichkeit bezieht sich auf den Einsatz von Gleitlagern mit  $-5\text{ °C}$ . Die mechanische Auslegung ist im mechanischen Prüfbericht bereits spezifiziert.

Zur thermischen Überwachung der elektrischen Maschine eignet sich der Strom (indirekte Temperaturüberwachung) oder es werden in die Wicklung Temperaturfühler eingebettet, die die Temperatur direkt überwachen. Beide Methoden berücksichtigen die Erwärmung des Rotors nicht direkt. Daher muss die Erwärmung des Rotors sowie die Einhaltung der Temperaturklasse durch einen thermischen Nachweis erbracht werden.

Elektrische Maschinen, die hinsichtlich ihrer Leistung nicht bei Bemessungsdaten geprüft werden können, werden durch Berechnungs- oder Ersatzverfahren für den Bemessungspunkt ausgewertet. Können durch die Konstruktion bestimmte kritische Stellen der Maschine messtechnisch nicht erfasst werden, können auch alternative Methoden herangezogen werden. Entsprechende Verfahren und Möglichkeiten werden unter Kap. 3.4 diskutiert.

### 3.2.1 Anforderungen an das Prüffeld

Zur Messung von elektrischen Maschinen steht der PTB ein Prüffeld zur Verfügung, das auf 7 Belastungsprüfstände für Leistungen bis 200 kW geeignet ist. Zur Messung der elektrischen Leistung werden 3-phasige Poweranalyser eingesetzt. Die Drehzahl kann über Tachometer oder Schlupfspulen bestimmt werden. Zur Drehmomentenmessung gibt es 2 Alternativen. Zum einen kann durch eine Druckmessdose mit definiertem Hebelarm und zum anderen über Drehmomentenmessflansche in der Antriebswelle das Drehmoment bestimmt werden.

Die EN 60034-2 legt für Messgeräte und deren Zusatzeinrichtungen wie Messwandler, Nebenschlusswiderstände und Messbrücken eine Genauigkeitsklasse von 0,5 oder besser fest. Dreiphasige Leistungsmessgeräte sowie Leistungsmessgeräte für niedrige Leistungsfaktoren dürfen einer Genauigkeitsklasse von 1,0 oder besser genügen. Da die

EN 60079-0 keine Anforderungen an die Messgeräte stellt, werden oben genannte auch für den Explosionsschutz als hinreichend angesehen.

Die Messdaten werden über Schnittstellen in den Computer eingelesen (Abb. 3.3). Die Software ermöglicht eine erste Auswertung, bereitet die Messdaten auf und überträgt sie in die Protokollblätter.

Zur Vermeidung von Fehlmessungen muss die Prüfung bei ruhender Umgebungsluft durchgeführt werden. Es sollte keine Sonneneinstrahlung den Prüfling aufheizen können. Maschinen kleiner Leistung müssen möglichst thermisch isoliert auf dem Montagetisch befestigt werden, damit keine ungewünschte Kühlung der Maschine die Messung verfälscht.

Die Messunsicherheitsbetrachtung der zu messenden Größen zeigt die Zuverlässigkeitsgrenzen, die Reproduzierbarkeit und die messtechnischen Schwachstellen auf. Der GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) ist der international angewendete Leitfaden zur Angabe der Messunsicherheit und diskutiert die Bedeutung für die Qualität in der Messtechnik [36]. Anhand eines mathematischen Modells kann die mechanische Leistung hinsichtlich der Messunsicherheit unter Berücksichtigung der Genauigkeitsklasse der Messgeräte bestimmt werden.

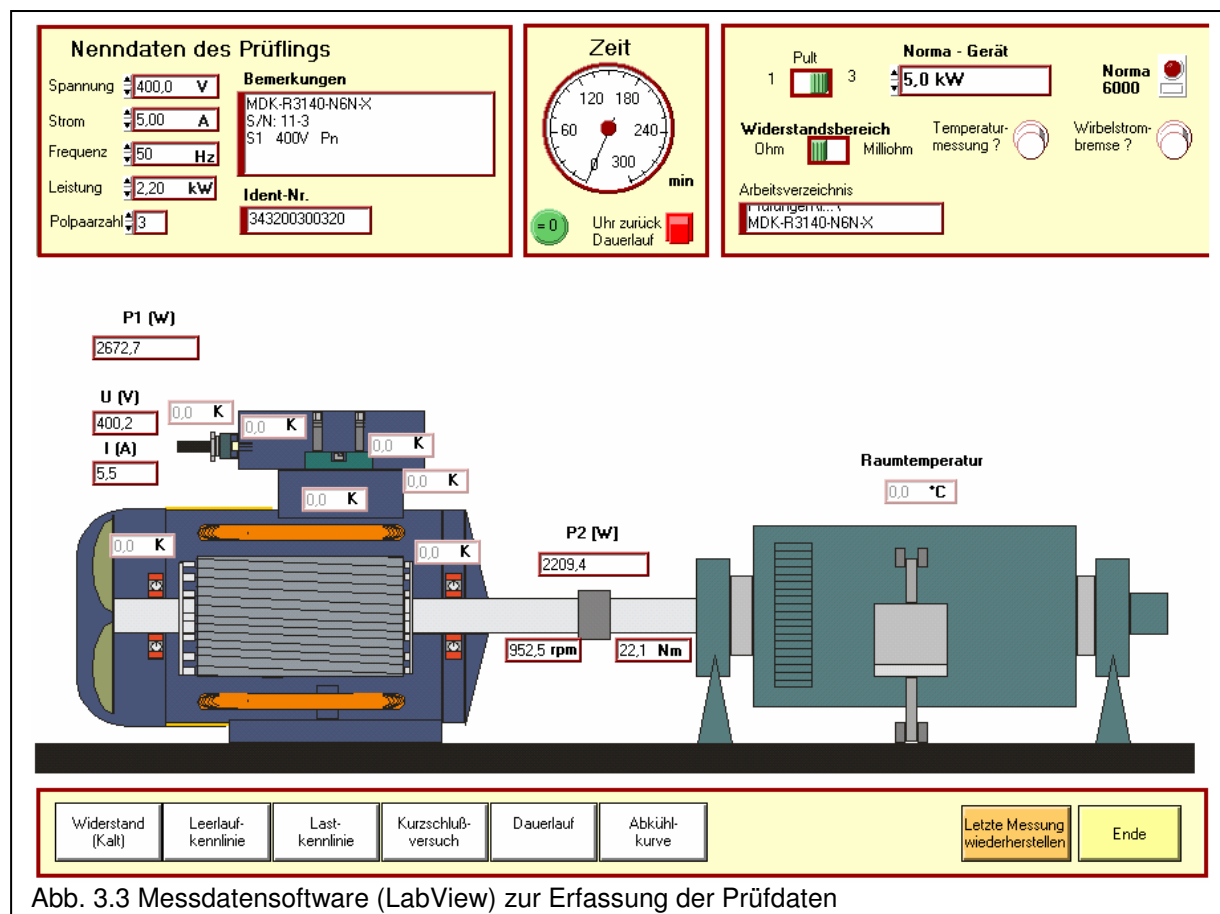


Abb. 3.3 Messdatensoftware (LabView) zur Erfassung der Prüfdaten



### 3.2.2 Typenprüfung elektrischer Maschinen in der Zündschutzart „e“

Für die Typenprüfung wird die elektrische Auslegung der Maschine dokumentiert. Dabei sind die Ständerdaten der Wicklungsausführung, die Läuferdaten inklusive des Luftspaltes sowie die Stromdichten im Ständer und Rotor anzugeben. Die Daten sind ergänzend zur detaillierten Isolationsbeschreibung, die im Vorfeld für die Baureihe dokumentiert wird.

Elektrische Maschinen in der Zündschutzart „e“ sind für den Einsatz in der Zone 1 geeignet und damit der Kategorie 2 zugeordnet. Die Kategorie 2 sieht vor, auch bei üblichen Betriebsstörungen einen Schutz zu liefern. Als übliche Betriebsstörung gilt der blockierte Rotor und damit auch indirekt der Anlauf der Maschine. Zur indirekten Temperaturüberwachung werden Überstromschutzeinrichtungen eingesetzt, die getrennt nach Richtlinie 94/9/EG Art. 1 Abs. 2 innerhalb der Europäischen Union zu bescheinigen sind. Durch die Anforderungen der Kategorie 2 wird zunächst bei den Erwärmungsmessungen im Dauerlauf geprüft, ob die zulässigen Erwärmungen im Bemessungsbetrieb eingehalten werden. Anschließend wird bei festgebremstem Rotor die Erwärmungszeit  $t_E$  bestimmt. In Verbindung mit dem Verhältnis Anzugsstrom zu Nennstrom  $I_A/I_N$  ergeben sich die Auslösebedingungen für die indirekte Temperaturüberwachung durch die Überstromschutzeinrichtung.

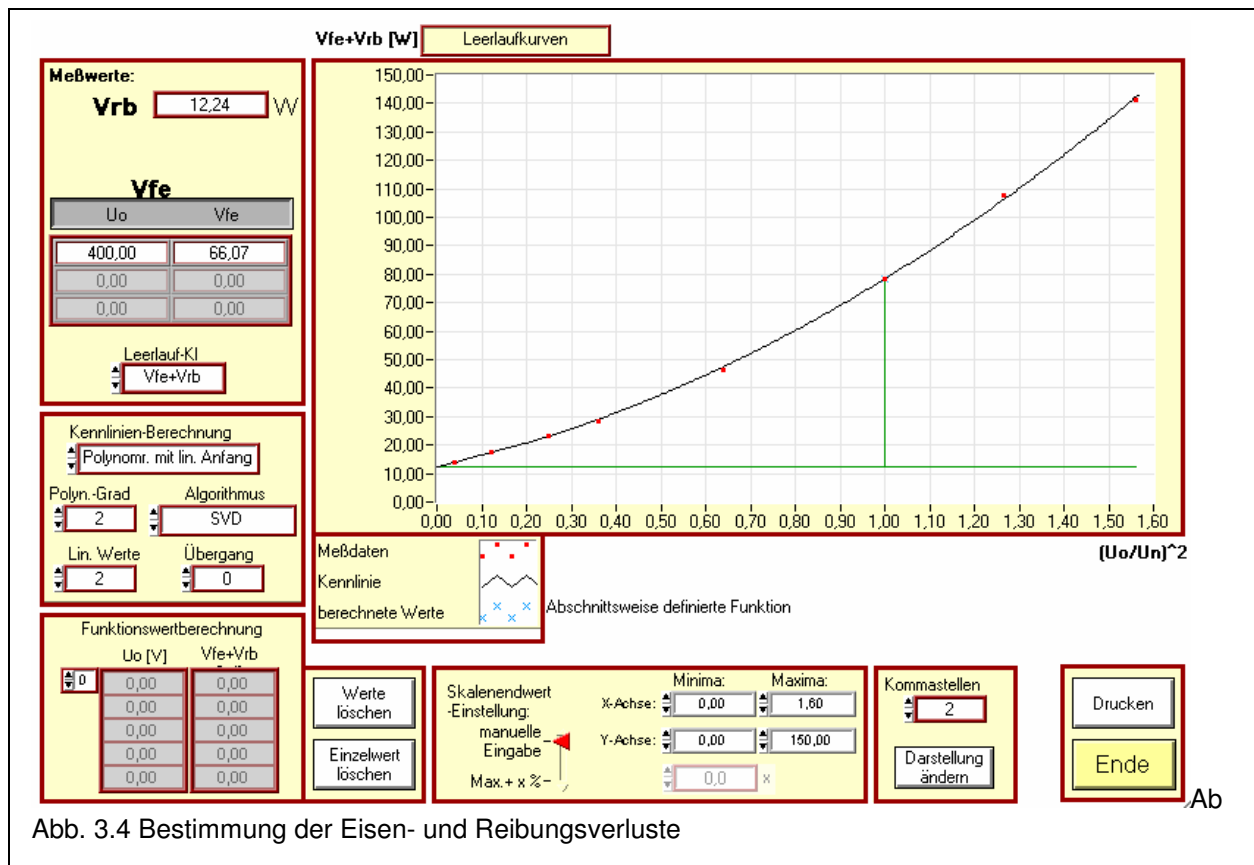
Für die direkte Temperaturüberwachung durch Temperaturfühler in der Wicklung in Verbindung mit einem nach Richtlinie 94/9/EG Art. 1 Abs. 2 bescheinigten Auslösegerät entfällt die Angabe des Anzugsstromes zum Bemessungsstrom und die Erwärmungszeit  $t_E$ .

#### 3.2.2.1 Dauerbetriebserwärmungen

Für die Messung der Dauerbetriebserwärmungen steht das bereits erwähnte Prüffeld in der PTB zur Verfügung. Die Typprüfung sollte möglichst nahe der zu bescheinigenden mechanischen Leistung durchgeführt werden. Die mechanische Leistung kann über das Einzelverlustverfahren bestimmt werden. Die Bezugstemperatur zur Bestimmung der Stromwärmeverluste ergibt sich aus der Dauerbetriebserwärmung.

Zur Bestimmung der Eisen- und Reibungsverluste werden die Leerlaufverluste bei betriebswarmer Maschine gemessen. Die Eisen- und Reibungsverluste abzüglich der Stromwärmeverluste werden über dem Quadrat der Spannung bezogen auf die Bemessungsspannung aufgetragen (Abb. 3.4) und können direkt abgelesen werden.

Für die Prüfung werden üblicherweise die nach EN 60034-1 definierten Bereiche A oder B zu Grunde gelegt. Daher muss zunächst geklärt werden in welchem Spannungsbereich die elektrische Maschine eingesetzt werden soll. Maschinen für den Spannungsbereich A ( $\pm 5\%$ ) werden im Dauerlauf bei der Bemessungsspannung und Bemessungsdrehmoment geprüft. Der resultierende Strom  $I_N$  ist die Basis für die Überstromschutzeinrichtung. Mögliche Temperaturanstiege an den Grenzen des Spannungsbereiches werden nicht berücksichtigt. Die vereinfachende Annahme ist möglich, da in Verbindung mit dem bescheinigten Auslösegerät ungünstige Bedingungen praktisch abgedeckt werden.



Soll die Maschine im Spannungsbereich B ( $\pm 10\%$ ) eingesetzt werden, wird zunächst bei Bemessungsspannung das Bemessungsdrehmoment eingestellt. Mit dem konstant zu haltenden Bemessungsdrehmoment wird im Spannungsbereich von  $\pm 5\%$  der maximale Strom  $I_{Max}$  ermittelt. Der maximale Strom wird als Bemessungsstrom definiert, der auf dem Typenschild gestempelt und mit dem die Dauerläufe bei ungünstigsten Bedingungen durchgeführt werden. Durch die Abweichungen der Anforderungen der EN 60034-1 zur EN 60079-0 und die Konsequenz für die Überwachungseinrichtung ergeben sich Unterschiede in der Prüfpraxis insbesondere auf internationaler Ebene. Eine Gegenüberstellung der Prüfpraxen und der daraus resultierenden Konsequenzen erfolgt in Kap. 5.4.

Der Prüfung im Dauerlauf geht üblicherweise die Bestimmung der Kaltwiderstände voraus, wobei die Temperatur der Wicklung bekannt sein muss. Die Voraussetzung ist gegeben, wenn die Wicklung die Umgebungstemperatur angenommen hat.

Die Prüfung im Dauerlauf kann als abgeschlossen betrachtet werden, wenn der Zustand der thermischen Beharrung erreicht ist. Davon kann ausgegangen werden, wenn die Temperaturzunahme  $2\text{ K/h}$  an der wärmsten Stelle unterschreitet. Üblicherweise ist die Ständer- oder Läufer-temperatur maßgebend. Sind die Ständer- oder Läufer-temperaturen während des Betriebes nicht verfügbar, so ist der Temperaturgradient der Messstelle entsprechend den zu erwartenden Temperaturen anzupassen, d.h. die Temperaturzunahme am Gehäuse ist im Verhältnis der Temperatur von z.B. Ständer zu Gehäuse herunterzurechnen. Unmittelbar im Anschluss an die Messung werden die Übertemperaturen von Ständer und Läufer ermittelt. Um das Messergebnis nicht zu verfälschen, muss die Maschine möglichst schnell durch die Belastungslastmaschine abgebremst werden.

Wird zunächst die Belastung langsam heruntergefahren, kühlt sich die Maschine ab und die Temperaturmessung ergibt zu niedrige Werte. Dies gilt vor allem für den Wickelkopf. Die Erfahrung aus verschiedenen Prüffeldern zeigt, dass ein Herunterfahren innerhalb weniger Sekunden möglich ist.

Zur Bestimmung der Übertemperatur der Ständerwicklung ist das Widerstandsverfahren heranzuziehen. Andere Messverfahren sind vorab zu vereinbaren. Der Prüfstrom muss eine ausreichende Größe haben, so dass die zu messende Spannung deutlich über der Thermospannung der Messstelle liegt. Die Zeit zur Festlegung der Nennbetriebserwärmung für alle Maschinenteile variiert mit der Bemessungsleistung (EN 60034-1).

Wenn die Temperatur nach dem Abschalten zunächst ansteigend ist und erst dann eine Abkühlung eintritt, gilt der höchste gemessene Wert aus der Abkühlungskurve als Übertemperatur im Dauerbetrieb. Dies tritt insbesondere am Gehäuse und am Anschlusskasten auf.

Die Umrechnung der Widerstandswerte auf die Temperatur erfolgt nach (für Kupferwicklungen)

$$\Theta_1 = \frac{R_W - R_K}{R_K} \cdot (235 + v_K) + (v_K - v_{Kü})$$

- mit  $\Theta_1$  = mittlere Wicklungstemperatur in °C  
 $R_K$  = Wicklungswiderstand bei kalter Wicklung in  $\Omega$   
 $v_K$  = Temperatur der kalten Wicklung in °C  
 $R_W$  = Wicklungswiderstand bei betriebswarmer Wicklung in  $\Omega$   
 $v_{Kü}$  = Temperatur des Kühlmittels am Ende der Erwärmungsprüfung in °C

Für Maschinen mit Kreislaufkühlung gilt als Kühlmitteltemperatur die rückgekühlte Innenluft, die als Eingangstemperatur der Maschine zur Verfügung steht. Bei Luft/Luftkühlern kann eine Hochrechnung auf die maximale Umgebungstemperatur linear erfolgen. Bei Wasser/Luftkühlern ist die maximale Umgebungstemperatur nicht ausschlaggebend, da für die Kühlung der Maschine die Wassertemperatur und die Fördermenge bestimmend sind. Bei der Umrechnung auf die gewünschte Wassertemperatur ist die Kühleigenschaft des Kühlers zu berücksichtigen.

Mit Rücksicht auf die Lebensdauer und Betriebssicherheit der Wicklung sind die dauernd zulässigen Temperaturen bei Maschinen der Erhöhten Sicherheit gegenüber der Standardausführung reduziert. Die EN 60079-7 stellt für die verschiedenen Wärmeklassen die maximal möglichen Grenztemperaturen in °C gegenüber (Tab. 3.2). Die Grenztemperatur der Wärmeklasse darf die Grenztemperatur der Temperaturklasse nicht überschreiten.

Parallel der Messung der Ständertemperatur muss die Rotortemperatur erfasst werden. Da die Messtechnik zur Temperaturbestimmung bei rotierender Maschine nur sehr aufwendig realisiert werden kann, wird üblicherweise auch die Dauerbetriebserwärmung des Kurzschlussläufers nach dem Stillsetzen der Maschine ermittelt. Dazu müssen im Vorfeld geeignete Maßnahmen ergriffen worden sein.

		Temperatur-Messverfahren (siehe Anmerkung 1)	Wärmeklasse von Isolierstoffen nach IEC 60085 (siehe Anmerkung 2)				
			A	E	B	F	H
1	Grenztemperatur bei Bemessungsbetrieb		°C	°C	°C	°C	°C
	a) einlagige isolierte Wicklungen	Widerstand oder Temperatur	95	110	120	130	155
	(b) andere isolierte Wicklungen	Widerstand	90	105	110	130	155
Temperatur		80	95	100	115	135	
2	Grenztemperatur am Ende der Zeit $t_E$ (siehe Anmerkung 3)	Widerstand	160	175	185	210	235

ANMERKUNG 1 Messung mit Thermometer ist nur zulässig, wenn die Messung durch Änderung des Widerstandes nicht möglich ist. In diesem Zusammenhang hat „Thermometer“ dieselbe Bedeutung wie in IEC 60034-1 (zum Beispiel ein Kugelthermometer, ein nicht eingebettetes Thermoelement oder ein Widerstandstemperturgeber (RTD), die an den Punkten angewendet werden, die für ein übliches Kugelthermometer zugänglich sind).

ANMERKUNG 2 Gilt als ein vorläufiges Maß bis Werte vorgeschrieben wurden, die in IEC 60085 durch Zahlen bezeichneten höheren Wärmeklassen von Isolierstoff werden als gültig für die in Klasse H angegebenen Grenztemperaturen angesehen.

ANMERKUNG 3 Diese Werte setzen sich zusammen aus der Umgebungstemperatur, der Übertemperatur der Wicklung bei Bemessungsbetrieb und der Temperaturzunahme während der Zeit  $t_E$ .

Tab. 3.2 Grenztemperaturen gemäß 60079-7 für isolierte Wicklungen

Für die Messung der Rotortemperatur kann insbesondere bei Maschinen kleiner Leistung vorab am Kurzschlussring ein Thermoelement eingesetzt werden, dessen Zuleitung durch eine Bohrung in der Welle nach außen geführt werden kann. Das Thermoelement und die Zuleitung müssen hinreichend befestigt sein und dürfen sich nicht während des Dauerversuchs lösen. Am Ende des Erwärmungslaufes wird das Thermoelement unverzüglich an einen Temperaturschreiber angeschlossen.

Alternativ, insbesondere bei größeren Maschinen, kann eine Bohrung im Lagerschild vorgesehen werden, durch das mit einem Temperaturfühler die Ringtemperatur ermittelt werden kann. Aufgrund der großen Wärmekapazität kühlt der Läufer langsam ab; die Ausgleichsvorgänge bezüglich des Temperaturfühlers können daher vernachlässigt werden. Häufig hat der Kurzschlussring auf der dem Lüfter abgewandten Seite die höhere Temperatur und muss gemessen werden. Insbesondere bei durchzugsbelüfteten Maschinen ist darauf zu achten. Im Zweifelsfall ist für beide Kurzschlussringe die Temperatur zu ermitteln. Die Gehäusetemperatur ist an der thermisch ungünstigsten Stelle zu bestimmen, d.h. möglichst außerhalb des Kühlluftstromes des Ventilators.

Zusätzlich zur Ständer- und Rotortemperatur werden im Dauerlauf die folgenden Temperaturen erfasst:

- Gehäuse
- A-Lager
- B-Lager (wenn thermisch maßgebend)
- Kabeleinführung (1)
- Aderverzweigung (2)
- Dichtung (Klemmenkasten, 3)
- Klemmbrett (4)

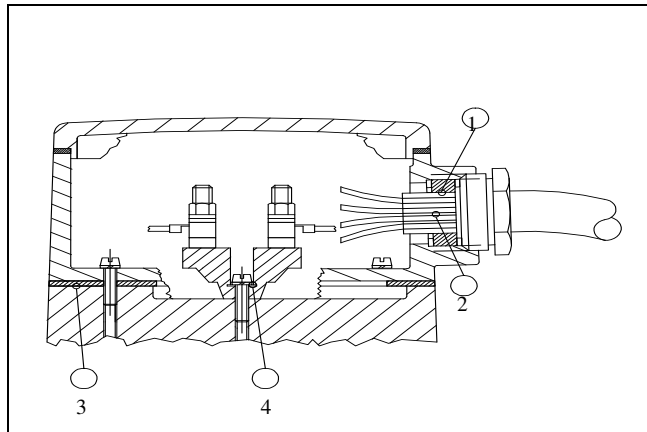


Abb. 3.5 Temperaturmessung am Anschlusskasten

Im Gegensatz zur indirekten Temperaturüberwachung durch den Bemessungsstrom wird bei der direkten Temperaturüberwachung die tatsächliche Temperatur herangezogen. Da die Temperaturfühler, üblicherweise in Form von Kaltleitern, vorwiegend im Wickelkopf angebracht sind, ist mit einem Temperaturunterschied zum Blechpaket und damit zur mittleren Wicklungstemperatur zu rechnen. Bei oberflächengekühlten Maschinen ist – im Gegensatz zu innengekühlten Maschinen – der Wickelkopf stets wärmer als die festgestellte mittlere Wicklungstemperatur.

Erfolgt die Temperaturbestimmung durch in die Nut eingelegte (Nuten-)Widerstandsthermometer können sich die Temperaturverhältnisse umkehren (Hochspannungsmaschinen). Insbesondere bei umrichter gespeisten Antrieben und niedriger Drehzahl können sich erhöhte Wickelkopftemperaturen ergeben. Durch die Trägheit der Nutenwiderstandsthermometer ist ein Schutz auch bei blockierter Maschine direkt kaum möglich.

Bei der Dauerbetriebserwärmung muss sichergestellt werden, dass bei Bemessungsbetrieb die Kaltleiter nicht auslösen und alle Grenztemperaturen (Temperaturklasse, Wärmeklasse, Dichtung, KLE, ...) nicht überschritten werden. Durch den Betrieb bei Überlast wird der Kaltleiter gezielt zur Auslösung gebracht, wobei die Belastung langsam gesteigert werden soll. Die gemessenen Erwärmungen für den Auslösezeitpunkt müssen immer unterhalb der Grenztemperaturen der Temperaturklassen liegen.

Für die richtige Auswahl der Kaltleiter sollte sichergestellt werden, dass die Auslösetemperatur nicht zu niedrig ist, damit unnötige Betriebsstörungen vermieden werden. Mit Rücksicht auf die Lebensdauer der Wicklung darf die Auslösetemperatur aber auch nicht zu hoch gewählt werden. Die Gleichwertigkeit zu den Überstromauslösegeräten ist gegeben, wenn bei 1,2-facher Überlast die Kaltleiter innerhalb von 2 Stunden auslösen. Erfahrungsgemäß ist die Bedingung erfüllt, wenn die Wicklungstemperatur  $\Theta_{\dot{U}}$  beim Abschalten durch die Kaltleiter in den folgenden Grenzen liegt:

$$(\Theta_{U_{\max}} + \Theta_{Nenn} - 5K) < \Theta_{\dot{U}} < (\Theta_{U_{\max}} + \Theta_{Nenn} + 20K)$$

mit  $\Theta_{U_{\max}}$  = Maximale Umgebungstemperatur in °C

$\Theta_{Nenn}$  = Übertemperatur Ständer in K

Damit steht für die Toleranzen und den definierten Nennwerten der Ansprechtemperaturen eine ausreichende Spanne (25 K) zur Verfügung. Kommt bei der Auswertung die Erwärmung der Grenze für die Temperaturklasse nahe, sind Abschätzungen nicht zulässig.

### **3.2.2.2 Kurzschluss Erwärmung bei festgebremstem Läufer**

Der blockierte Läufer gilt als ein anzunehmender Störfall für Maschinen der Erhöhten Sicherheit „e“. Die Messungen werden, ausgehend von der kalten Maschine, möglichst bei Bemessungsspannung und -frequenz durchgeführt. Der etwa 5 s nach dem Einschalten der Wechselspannung gemessene Strom bei Bemessungsspannung wird als Anzugsstrom  $I_A$  festgelegt und daraus das Verhältnis für  $I_A/I_N$  berechnet. Das Prüffeld muss hinreichend Leistung zur Verfügung stellen können und der Strom muss deutlich unter 5 s eingeschwungen sein, um das Netz auch nachbilden zu können. Der Anzugsstrom wird sowohl für den Bereich A als auch für den Bereich B ausschließlich für den Bemessungspunkt definiert.

Abhängig von den zu erwartenden Erwärmungen werden die Versuche mit festgebremstem Läufer mit einer Dauer von 10 – 30 s (in Ausnahmefällen bis 60 s) durchgeführt. Zur Bestimmung der Erwärmungszeiten  $t_E$  für die verschiedenen Temperaturklassen muss der zeitliche Verlauf der Erwärmungen für die Ständer- und Läuferwicklung bekannt sein. Insbesondere bei Maschinen, die bezüglich der Ständererwärmung kritisch sind, darf die Dauer der Prüfung mit festgebremstem Läufer nicht merklich länger sein als die Erwärmungszeit bis zur höchsten Temperaturklasse. Überschlägig kann für den zeitlichen Verlauf der Ständererwärmung die Kurvenform der Rotorerwärmung herangezogen werden.

Ebenso wie beim Dauerlauf werden die Erwärmungen der Ständerwicklung bei der Messung im festgebremsten Zustand des Rotors erst nach dem Abschalten ermittelt. In diesem Fall müssen jedoch die Messwerte für die Ständererwärmung auf den Abschaltzeitpunkt extrapoliert werden, da die Maschinen nach dem Versuch relativ schnell wieder abkühlen (Abb. 3.6). Eine Extrapolation mit einem zweifachen exponentiellen Verlauf spiegelt den tatsächlichen Verlauf nahezu wider. Die zwei Zeitkonstanten unterscheiden sich dahingegen, dass die kürzere innerhalb von einigen Sekunden bis wenigen Minuten liegen sollte und die längere sich über mehrere Minuten erstreckt. Beides ist von der Größe der Maschine abhängig.

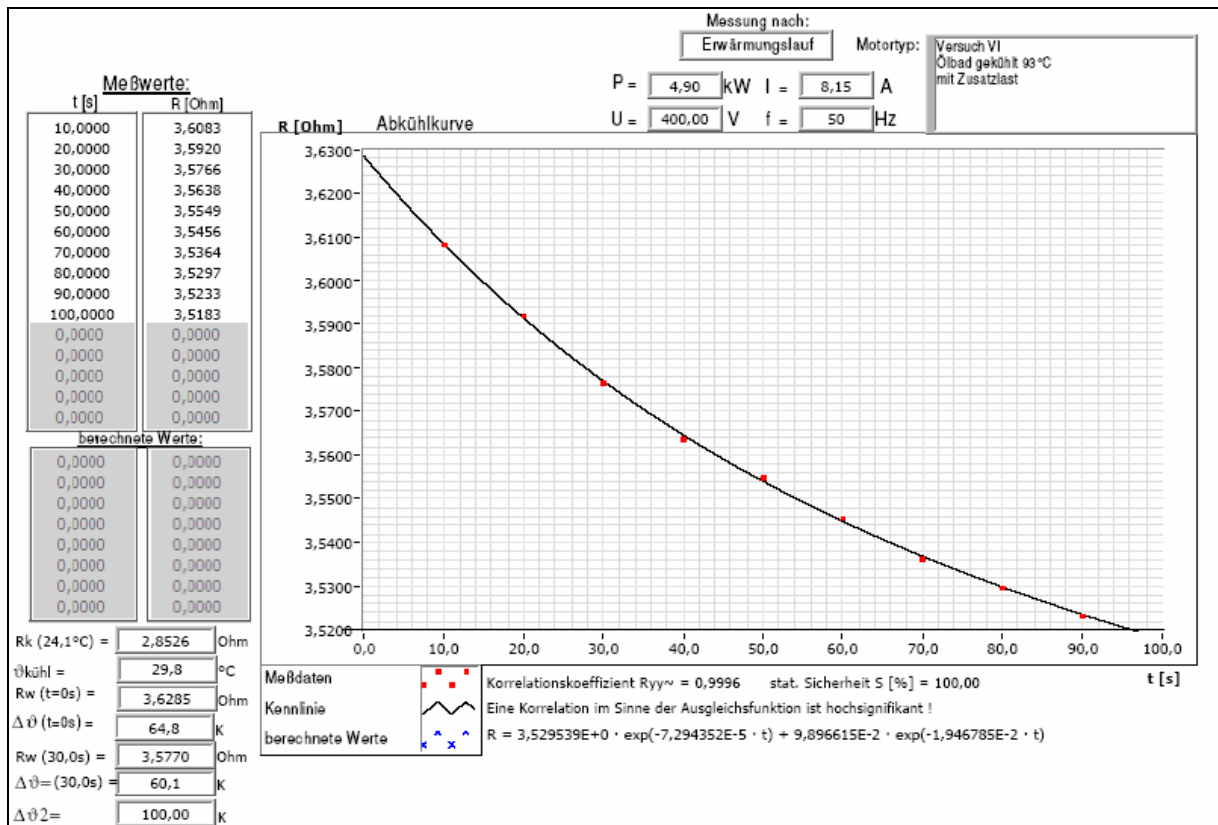


Abb. 3.6 Abkühlkurve einer Ständerwicklung

Zur Vereinfachung und wegen der kurzen Dauer des Versuches kann angenommen werden, dass die Erwärmung der Ständerwicklung ab einer gewissen Sättigung annähernd linear mit der Zeit anwächst. Zur Bestimmung der Temperaturklasse kann daher ein konstanter Gradient berücksichtigt werden.

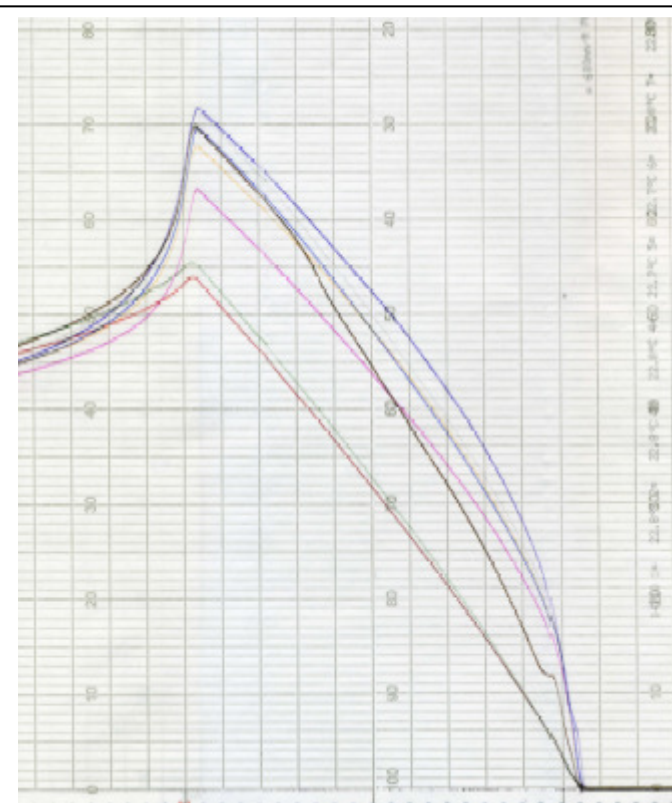


Abb. 3.7 Rotorerwärmung bei blockiertem Rotor am Netz

Die Prüfdauer sollte innerhalb der zu erwartenden Zeit  $t_E$  sein oder geringer.

Die Stab und Ring-erwärmungen des Käfigläufers weisen beim Kurzschlussversuch infolge der Wärmeabgabe an das Eisen teilweise erhebliche Abweichungen von einem linearen Verlauf der Erwärmung auf. Ihre Erwärmungskurven sind je nach den vorhandenen Wärmeströmungen im Läufer mehr oder weniger stark gekrümmt (Abb. 3.7). In der Abbildung ist deutlich erkennbar, dass für die jeweiligen Messstellen (platziert am Rotor siehe Abb. 3.9) unterschiedlich

starke Erwärmungen auftreten. Der Erwärmungsverlauf im Kurzschlussring hingegen verläuft nahezu linear ansteigend.

Zur Messung der Käfigerwärmung im Stillstand werden Thermoelemente in die Stäbe und Ringe eingesetzt. Um ein thermisch verwertbares Abbild des Läufers zu erhalten, muss an den Stellen gemessen werden, die die höchsten Erwärmungen erwarten lassen. Vor allem in den Fällen, in denen die Staberwärmungen größer sind als die der Ringe, ist es erforderlich, gleichzeitig an mehreren Stäben zu messen. Aufgrund der Stromverdrängung führen die außen liegenden Stabteile die höchste Stromdichte. Dadurch treten an der Oberkante der Stäbe die höchsten Erwärmungen auf. Die Thermoelemente dürfen daher nicht zu tief in die Stäbe eingelassen werden. Die Drähte selbst dürfen nicht zu dick sein, damit die Messstelle lediglich wenig Wärme abführt. Ein Drahtdurchmesser der Thermoelemente von 0,5 mm hat sich bewährt. Die Thermoelemente werden mit ihren abisolierten Enden in eine kleine Bohrung (1,1 mm) ohne vorheriges Verlöten oder Verdrillen verstemmt.

Ein weiterer Einfluss auf die Erwärmung entsteht durch die Stellung des Läufers während des Versuches (Abb. 3.8). Abweichungen von über 10 K sind üblich. Die gezielte Präparation und Positionierung der Nuten zueinander ist nur mit erheblichem Aufwand möglich. Um eine hinreichende Aussage über den Temperaturanstieg im Läufer zu erlangen, sollten 2 Versuche gefahren werden, wobei die Drehrichtung des Feldes gewechselt wird. Die Normenforderung (EN 60079-7) mit zwei um 90° versetzten Thermoelementen am Rotor gibt die maximale Übertemperatur nur unzureichend wieder.

Außerdem sind die Lage der Messstelle und die Montage der Thermoelemente von elementarer Bedeutung. Beispielhaft zeigt die Abb. 3.9 zwei mögliche Ausführungen für die Einbauorte von Thermoelementen. Der Läufer hat jeweils offene Nuten. Ist nicht ausreichend Platz im Luftspalt der Maschine für die Verlegung zweier Thermoelemente in einem Stab, sollten die Thermoelemente in verschiedenen Stäben mit unterschiedlichen Abständen vom Ring montiert werden (a). Üblicherweise steigt die Temperatur zur Paketmitte hin an.

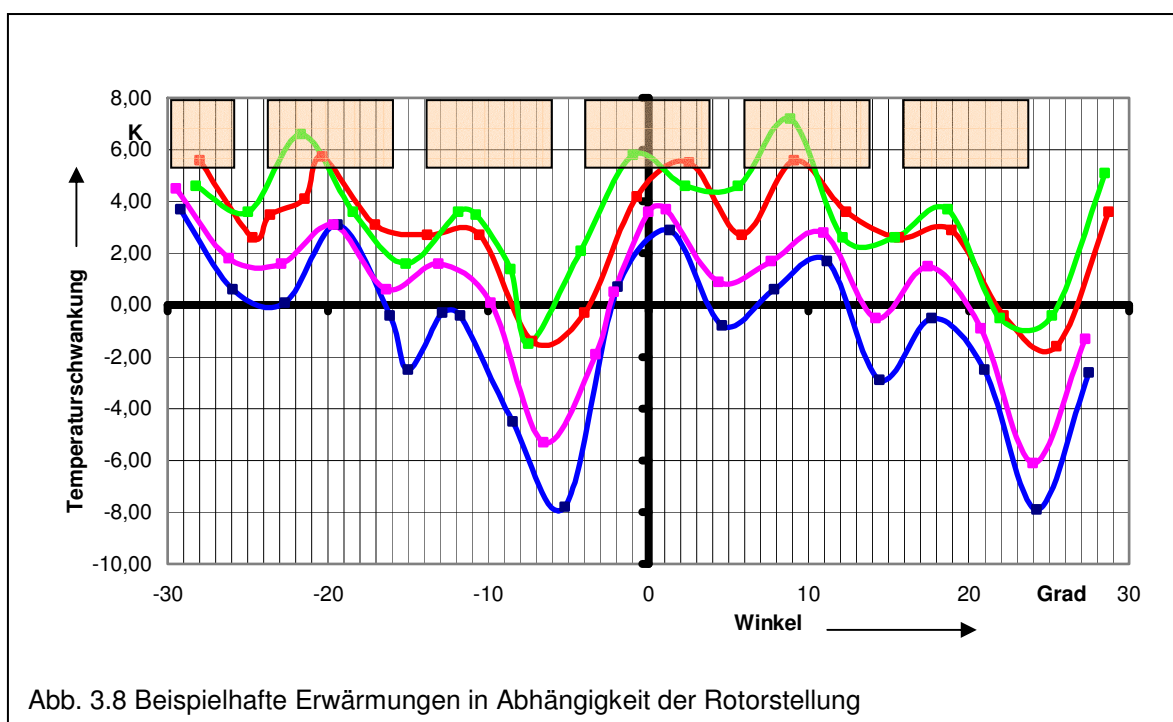
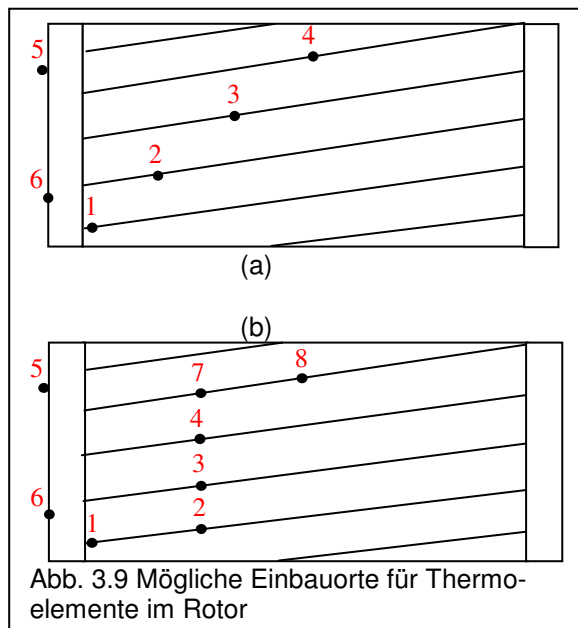


Abb. 3.8 Beispielhafte Erwärmungen in Abhängigkeit der Rotorstellung





Bietet der Luftspalt ausreichend Platz für die Montage der Thermoelemente, ist eine Verteilung nach (b) zu wählen. Durch das Verhältnis der Temperaturläufe kann unter gegebenen Umständen die Temperatur an nicht gemessenen Stellen berechnet werden. Befinden sich Kühlschlitze im Blechpaket sollte dies bei der Platzierung berücksichtigt werden.

Bei Läuferkonstruktionen mit geschlossen Nuten kann auf eine Montage im Luftspalt verzichtet werden. Die Thermoelemente werden am Ende des Blechpaketes beim Übergang vom Stab zum Ring montiert. Die Definition einer geschlossenen Nut sollte vorab festgelegt werden.

Die Temperaturmessungen am Kurzschlussring sind an der außen liegenden Ringkante durchzuführen, da dort durch die Stromverdrängung die höchste Temperatur zu erwarten ist. Wenn die Kurzschlussringe unterschiedliche Geometrien haben, sind an den Außenkanten beider Kurzschlussringe Thermoelemente erforderlich. Wird der Kurzschlussring durch Kappen gestützt, so muss ein nicht magnetisches Material verwendet werden. Auch bei einer Befestigung durch Nieten ist auf ein geeignetes Material zu achten.

Weitere Konstruktionsteile aus magnetischen Materialien sind hinsichtlich einer möglichen Erwärmung zu messen. So können Teile der Lüfterkonstruktion (Innen) auch wie ein Kurzschlussring wirken.

Elektrische Antriebe, die durch eine „direkte“ Temperaturüberwachung in Form von Kaltleitern geschützt werden, sind bis zum Ansprechen der Kaltleiter bei Bemessungsspannung zu prüfen. Der Temperaturgradient in der Ständerwicklung ist abhängig von der Auslegung der Maschine. Je größer der Temperaturgradient ist desto wichtiger ist die thermische Ankopplung der Kaltleiter an die Wicklung. Das rechtzeitige Ansprechen der Temperaturüberwachung auch im Kurzschluss ist das wesentliche Kriterium für die volle Wirksamkeit des Motorschutzes.

Die dabei ermittelte Auslösezeit  $t_A$  (im Allgemeinen basierend auf 20 °C) wird in die Bescheinigung aufgenommen und als Teil der Maschinendaten auf dem Typenschild gestempelt. Die Auslösezeit dient auch zur serienmäßigen Überprüfung der thermischen Anbindung des Fühlers an die Wicklung der Maschine.

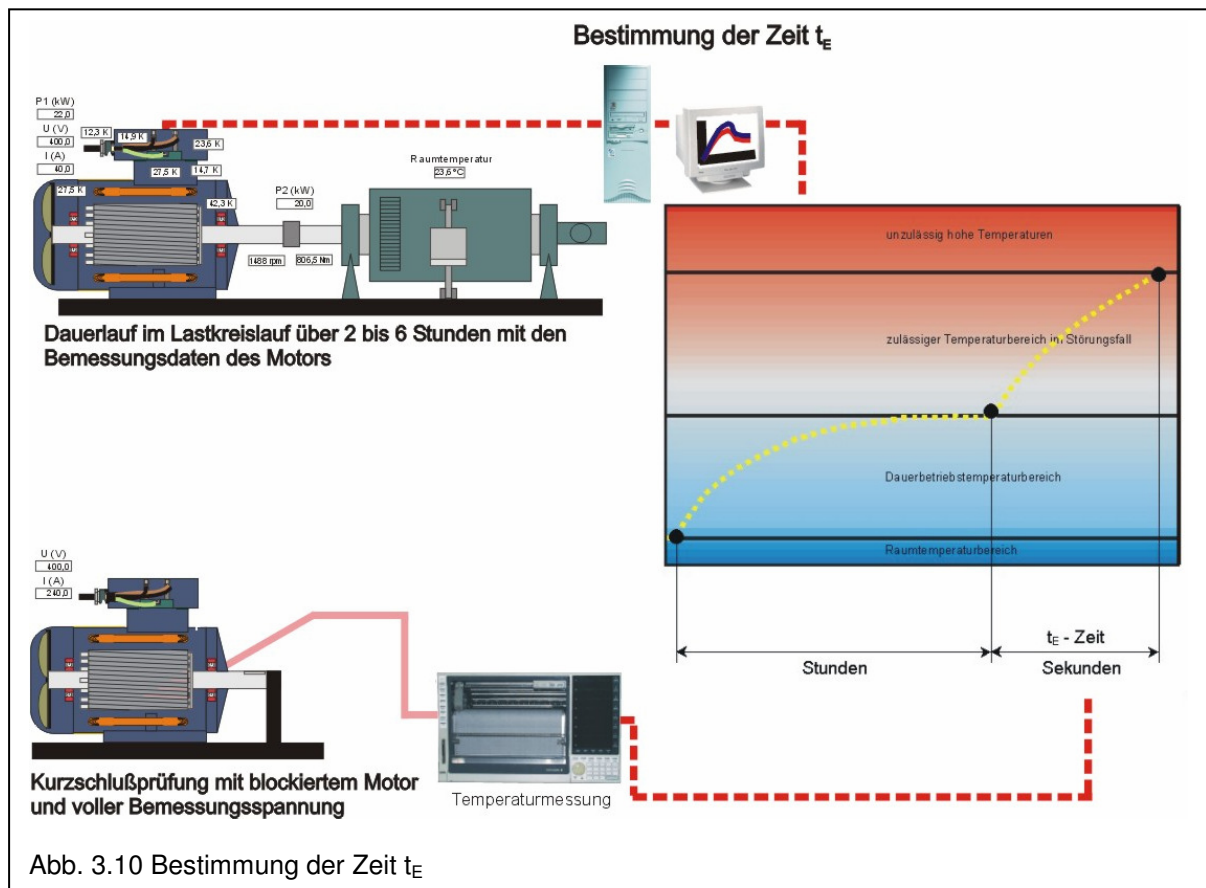
Durch die Kopplungszeitkonstante des Fühlers tritt ein Unterschied der Fühlertemperatur gegenüber der Wicklungstemperatur auf. Dieser ist insbesondere als kritisch anzusehen, wenn im kalten Zustand der Maschine der Läufer blockiert. In jedem Fall muss auch hierbei die Einhaltung der Temperaturklasse sichergestellt sein.

Durch den Schutz mit eingebauten Temperaturfühlern werden die Umgebungs- und Kühlverhältnisse automatisch mit berücksichtigt.

### 3.2.2.3 Bestimmung der Auslösezeit $t_E$ , „indirekte“ Temperaturüberwachung

Die Temperaturüberwachung muss sicherstellen, dass die Temperaturklasse innerhalb des Bemessungsbetriebes eingehalten wird. Für die Explosionssicherheit als kritischer Störfall wird angenommen, dass die Maschine bei ungünstigsten Kühlbedingungen nach mehrstündigem Bemessungsbetrieb ihre Dauerbetriebserwärmung erreicht hat und nun der Läufer infolge einer Störung blockiert. Dahingehend werden die Ergebnisse des Dauerbetriebes und der Kurzschlussenerwärmung ausgewertet (Abb.3.10). Zur Auswahl und Anpassung des Überstromauslösers muss der Anlaufstrom ins Verhältnis zum Bemessungsstrom  $I_A/I_N$  gesetzt sowie die Auslösezeit  $t_E$  bestimmt werden.

Basis für die Auswertung ist die angestrebte Temperaturklasse oder auch durch die Anpassung der  $t_E$ -Zeit mehrerer Temperaturklassen, die bescheinigt werden sollen. Die maximale Temperatur der Temperaturklasse muss gemäß EN 60079-0 um 10 K für T1 oder T2 ansonsten um 5 K reduziert werden, wenn die Typenprüfung auf die Serie ausgedehnt werden soll. Dadurch sollen Abweichungen in der Produktion berücksichtigt werden. Von den maximalen Temperaturen wird zunächst die maximale Umgebungstemperatur abgezogen. Der verbleibende Temperaturbereich wird danach um die Dauerbetriebserwärmung reduziert.



Dazu müssen zunächst die Messergebnisse der Dauerbetriebserwärmung häufig auf die Bemessungsdaten umgerechnet werden. Bei etwaigen angemessenen Abweichungen von der Bemessungsleistung sind die elektrischen Daten (Spannung und Strom) proportional

umzurechnen bzw. aus den Belastungskennlinien zu entnehmen. Für die Umrechnung der Ständer- und Läufererwärmungen können innerhalb geringer Leistungsbereiche ( $\pm 10\%$ ) folgende Gleichungen herangezogen:

$$I_N = I_{mess} \cdot \frac{P_N}{P_{mess}} \cdot \frac{U_{mess}}{U_N} \quad (x)$$

$$s_N = s_{mess} \cdot \frac{P_N}{P_{mess}} \cdot \left( \frac{U_{mess}}{U_N} \right)^2 \quad (x)$$

$$\Theta_{St\_N} = \Theta_{St\_mess} \cdot \frac{\frac{I_N}{I_{mess}} + \left( \frac{I_N}{I_{mess}} \right)^2}{2} \quad (x)$$

$$\Theta_{L\_N} = \Theta_{L\_mess} \cdot \frac{\frac{s_N}{s_{mess}} + \left( \frac{s_N}{s_{mess}} \right)^2}{2} \quad (x)$$

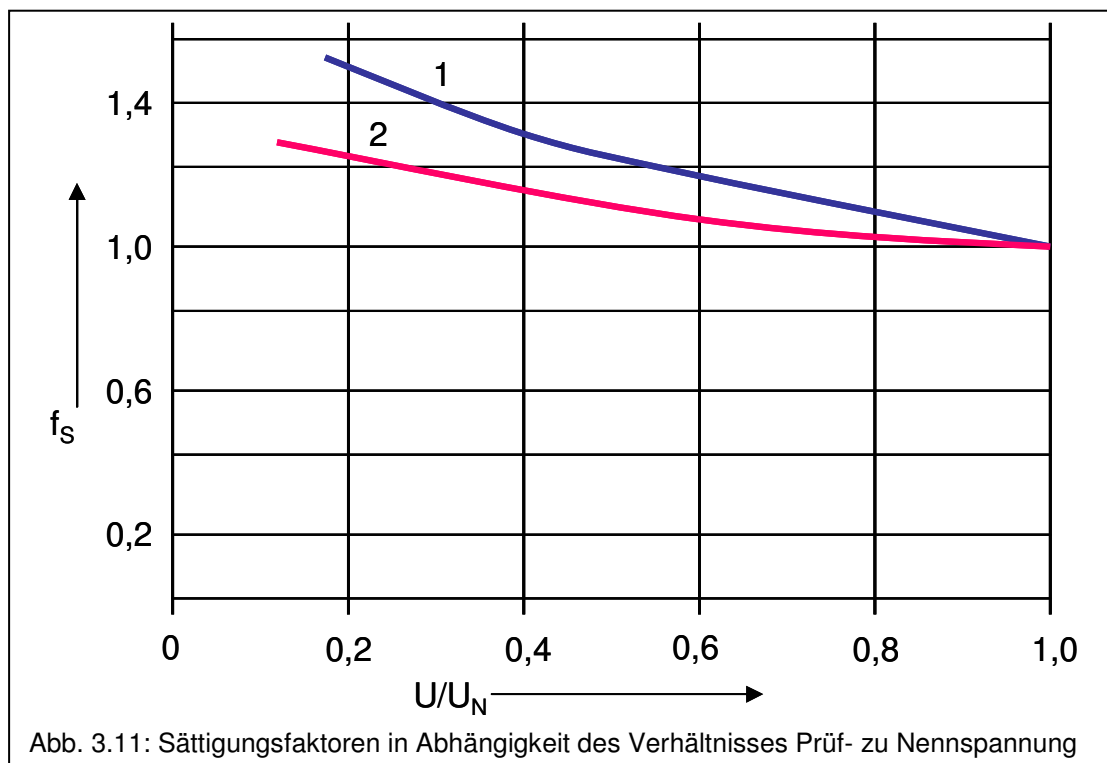
mit  $N \Rightarrow$  Werte für den Bemessungsbetrieb (Nennbetrieb)  
 $mess \Rightarrow$  Messergebnisse  
 $St \Rightarrow$  Ständer  
 $L \Rightarrow$  Läufer

Alternative Berechnungsmethoden sind möglich (z.B. äquivalente Verlustumrechnung), solange deren Gültigkeit nachgewiesen wird. Bei der Auswertung der Dauerbetriebserwärmung sind des Weiteren folgende Punkte zu beachten:

- Temperaturen an der Kabel- und Einführungsstelle (siehe Kap. 3.5)
- Grenztemperaturen für die Ständerwicklung (Tab. 3.2) und des evtl. imprägnierten Läufers
- Gehäusetemperaturen sind kleiner als die zugelassenen Dichtungstemperaturen oder sonstiger Kunststoffteile
- Bezug zur gewünschten Umgebungs- oder Kühlmediumstemperatur bei Kühlern

Nach dem Abzug der Dauerbetriebserwärmungen verbleibt ein Temperaturbereich der für den Störfall des blockierten Läufers zur Verfügung steht. Da auch die Kurzschlussenerwärmungen nicht zwangsläufig bei Bemessungsspannung durchgeführt wurden, muss auch hier eine Umrechnung vorgenommen werden. Ist die maximale Anschlussleistung eines Prüffeldes begrenzt, wird der Versuch für Maschinen großer Leistung bei verminderter Spannung durchgeführt und der Anlaufstrom für Bemessungsspannung muss hochgerechnet werden. Prinzipiell sollte mit maximal möglicher Spannung geprüft werden. Theoretisch kann ein S-förmiger Verlauf des Kurzschlussstromes in Abhängigkeit der Spannung unterstellt werden. Um den Verlauf extrapolieren und abschätzen zu können, muss eine Kurzschlussreihe gefahren werden. Für die Extrapolation oder Abschätzung auf den Bemessungswert haben sich verschiedene Verfahren etabliert (siehe auch 3.5.2), die kurz skizziert werden sollen:

- Sättigungsfaktoren  $f_s$ : Im Verhältnis der Prüfspannung zur Bemessungsspannung können Sättigungsfaktoren bestimmt werden, mit denen der Anzugsstrom berechnet werden kann. Die Sättigungsfaktoren müssen durch den Hersteller nachgewiesen werden. Richtwerte hierfür können Abb. 3.11 entnommen werden.
- Polynom 2. oder 3. Grades: Die Ergebnisse der Kurzschlussreihe können auf den Bemessungswert extrapoliert werden. Entsprechend des Sättigungsverlaufes durch die Auslegung der Maschine kann ein Polynom 2. oder 3. Grades angesetzt werden. Größere Messunsicherheiten verursachen unter Umständen sehr große Messabweichungen.
- Doppellogarithmisch-linear, linear: Die Extrapolation der Ergebnisse der Kurzschlussreihe mittels doppellogarithmisch-linearem Ansatzes liefert den Anlaufstrom für die Bemessungsspannung. Jedoch sind dafür Prüfspannungen notwendig, die im Verhältnis zur Bemessungsspannung größer 0,7 sein sollten.



Alle Erwärmungen müssen dabei im quadratischen Verhältnis der Ströme umgerechnet werden. Die getrennte Auswertung von Ständer und Läufer führt zu zwei Zeitwerten, wovon der kürzere Zeitwert als Zeit  $t_E$  festgelegt wird. Ist die Versuchsdauer der Läufererwärmung bei blockiertem Läufer im Vergleich zu der Zeit  $t_E$  zu kurz und damit die Erwärmung nicht bestimmt, so wird mittels einer Tangente die Erwärmung mit der Zeit linear extrapoliert.

Um nicht jede Ausführung eines bestimmten Motortyps zu prüfen, wenn lediglich eine andere Bemessungsspannung notwendig ist, wird die Erwärmungszeit  $t_E$  um 10 % gekürzt, da in manchen Fällen eine Abweichung vom Typmuster nicht ganz vermeidbar ist. Für den Normalfall sollten die Beträge der auf den Sollwert von Induktion und Stromdichte bezogenen Abweichungen in der Summe den Wert von 5 % nicht überschreiten.

Abschließend wird die Zeit  $t_E$  abgerundet unter Einhaltung folgender Rundungsregeln. Für Zeiten  $t_E \leq 30$  s gelten volle Sekunden,  $t_E \leq 60$  s auf 5 Sekunden und für  $t_E > 60$  s auf

10 Sekunden, um die Einstellung am Überstromauslösegerät (mechanisch) zu ermöglichen. Zusammen mit dem Verhältnis von  $I_A/I_N$  wird im Diagramm für die Auslösekennlinie überprüft, ob die ermittelte Zeit  $t_E$  oberhalb der festgelegten Kennlinie nach EN 60079-7 liegt. Abbildung 3.12 zeigt das von der PTB verwendete Prüfprotokoll zur Auswertung der Zeit  $t_E$ .

Nur im Zusammenspiel mit dem Auslösegerät ist der sichere Betrieb des Motors möglich. Das Überstromauslösegerät befindet sich im Stromkreis der elektrischen Maschinen und überwacht neben dem Kurzschluss auch den normalen Bemessungsbetrieb. Ein zusätzlicher Schutz des Motors resultiert dadurch, dass ein Überstromauslösegerät thermisch schon vorbelastet ist, wenn der Motor bei Betriebstemperatur blockiert würde. Die Kennlinie des Auslösegerätes bezieht sich aber auf die Umgebungstemperatur.

Ein weiterer Sicherheitsaspekt bei der Auswertung liegt darin, dass der Kurzschlussversuch bei kalter Maschine durchgeführt wird. Da der Anzugsstrom bei kalter Maschine größer ist als bei Betriebstemperatur, würde sich auch eine größere Mindestauslösezeit ergeben.

**Erwärmungsprüfungen im Dauerbetrieb:**

**Umrechnung auf Bemessungswerte:**

Messung bei	<b>U<sub>L</sub></b>			
Leistung (P <sub>2</sub> )	: 3,635	kW	3,6	kW
Spannung / Schaltung	: 413	V	413	V
Strom	: 7,38	A	7,3	A
Leistungsfaktor	: 0,809		0,81	
Drehzahl	: 1437	min <sup>-1</sup>	1440	min <sup>-1</sup>
Ständerwicklung	: 53,03	K	52,3	K
Läuferkäfig	: 76,5	K	75,4	K
Gehäuse	: 33,5	K	33	K
Dichtung	: 30,5	K	30	K
Lager AS / NS	: 27,5	K	27	K
Klemme / Durchführung	: 31,5	K	31	K
Kabeleinführung	: 7,5	K	7	K
Aderverzweigung	: 10	K	10	K

**Bestimmung der Erwärmungszeiten** bezogen auf die Kühlmitteltemperatur RT **40 °C**

Temp.-klasse	Grenzübertemperaturen für 1) Ständer, 2) Läufer				Zeiten aus Stillstands-messung für	
	$\Delta\theta_{st}$	RT	$\Delta\theta_{1/2}$	$\Delta\theta_s$	$\Delta\theta_s$	$t_E$
T1/ T2	1) 185	- 40	- 52,5	= 92,5 K	10,2 s	9 s
	2) 290	- 40	- 75,5	= 174,5 K	37,0 s	
T 3	1) 185	- 40	- 52,5	= 92,5 K	10,2 s	9 s
	2) 195	- 40	- 75,5	= 79,5 K	14,8 s	
T 4	1)	- 40	-	= K	s	s
	2)	- 40	-	= K	s	s

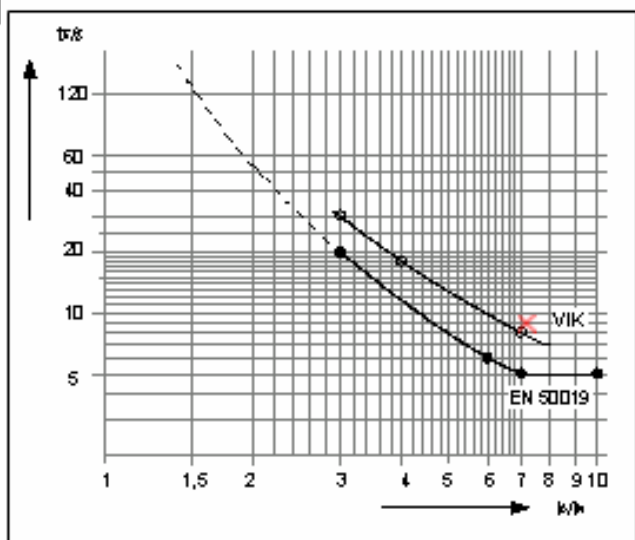
Einblenden T5+T6      Ausblenden T5+T6

Grenztemperaturen  $\Delta\theta_{st}$   
gemäß Temperaturklassen  
T1/T2 : 290 °C  
T3 : 195 °C

gemäß Wärmeklassen  
E : 175 °C  
B : 185 °C  
F : 210 °C  
H : 235 °C

$I_n / I_N$  :

Schweranlauf liegt nicht vor.



$I_n / I_N = 7,2$

Abb. 3.12 Prüfprotokoll zur Bestimmung der Zeit  $t_E$

### 3.2.2.4 Schutz durch „direkte“ Temperaturüberwachung (TMS)

Durch die Verwendung von Temperaturfühlern entfällt die Ermittlung der Zeit  $t_E$ , da die Temperatur des Motors für den Schutz herangezogen wird. Für die Bewertung und Einhaltung der Temperaturklasse sind die Ergebnisse der Dauerbetriebserwärmung und des Kurzschlussversuches notwendig. Da sich die direkte Temperaturüberwachung auf die Messung im Ständer bezieht muss für die Auswertung hinsichtlich der Läufererwärmung zwischen 4 Fällen unterschieden werden:

Fall A: Der einfachste Fall liegt vor, wenn sowohl im Dauerlaufbetrieb als auch beim Kurzschlussversuch die Erwärmung des Läufers stets niedriger ist als die der Ständerwicklung. Die Maschine ist für alle Betriebsbedingungen durch den Temperaturfühler geschützt, wenn nach der Dauerbetriebserwärmung und der Kurzschlussenerwärmung die Temperaturklasse eingehalten wurde.

Fall B: Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die Übertemperatur bei Bemessungsbetrieb im Läufer wesentlich höher als die des Ständers ist. Der Temperaturgradient beim Kurzschluss ist jedoch im Ständer größer als im Läufer, so dass beim Kurzschluss aus dem kalten Zustand der Maschine keine unzulässige Temperaturüberhöhung auftreten kann. Kritisch zu betrachten ist hingegen der Kurzschluss bei betriebswarmer Maschine. Hierbei muss sichergestellt werden, dass die Auslösezeit bei betriebswarmer Maschine so gering ist, dass die Temperaturerhöhung im Läufer die Temperaturklasse einhält. Dies kann durch die Ermittlung der Auslösezeit bei betriebswarmer Maschine und eine Parallelverschiebung der Läufererwärmungskurve im Kurzschlussfall bestimmt werden.

Fall C: Entgegengesetzt zu Fall B kann die Übertemperatur bei Bemessungsbetrieb im Ständer größer als im Läufer sein, aber der Temperaturgradient im Läufer ist deutlich größer als im Ständer im Kurzschlussfall. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass im Kurzschlussfall am Ende der Auslösezeit die Läufererwärmung größer als der zulässige Wert der Temperaturklasse ist. Insbesondere bei niedrigster Umgebungstemperatur ist die Wirksamkeit der Temperaturüberwachung auch für den Läufer zu überprüfen.

Fall D: Abschließend besteht die Möglichkeit, dass die Dauerbetriebserwärmung und der Temperaturgradient des Läufers größer als des Ständers sind. Bei entsprechender Überprüfung ist auch hierfür ein sicherer Betrieb möglich.

Abbildung 3.13 zeigt das von der PTB verwendete Protokoll, welches eine Auswertung für die kritisch zu betrachtenden Fälle ermöglicht.

Die bestimmte Auslösezeit  $t_A$  wird in der Bescheinigung für eine Ausgangstemperatur von 20 °C angegeben. Mit den auf dem Motor angegebenen Daten ist jederzeit eine Kontrolle der Funktion des TMS möglich. Dazu wird zunächst die Umgebungstemperatur  $v_k$  der kalten Wicklung bestimmt und der blockierte Motor an Bemessungsspannung gelegt, wobei der Anzugsstrom nach etwa 5 s des Einschaltens bestimmt wird. Die festgestellte Auslösezeit  $t'_A$  darf von der am Motor angegebenen Auslösezeit um nicht mehr als  $\pm 20\%$  abweichen. Sofern die Umgebungstemperatur oder der Anzugsstrom hiervon abweicht, weil z.B. nicht bei Bemessungsspannung geprüft wird, muss die Auslösezeit wie folgt umgerechnet werden:

$$t_A = (\hat{t}_A - T_k) * \frac{v_A - 20^\circ\text{C}}{v_A - v_k} * \left( \frac{I''_A}{I_A} \right)^2 + T_k$$

Darin ist  $v_A$  die Nennansprechtemperatur der TMS und  $T_k$  die Kopplungszeitkonstante (Berechnung siehe Protokoll Abb. 3.13). Zum Zweck einer einfachen Umrechnung kann ein mittlerer Wert von  $T_k = 8$  s eingesetzt werden. Weicht der festgestellte Wert  $t_A$  um mehr als + 20 % von dem angegebenen Bemessungswert ab, dann ist entweder die Ansprechtemperatur des Temperaturfühlers zu hoch oder der Wärmekontakt zwischen Fühlern und Wicklung ist nicht ausreichend. Abweichungen von mehr als – 20 % wären praktisch nur möglich, wenn die Ansprechtemperatur des Temperaturfühlers zu niedrig ist. Der Explosionsschutz ist dadurch nicht beeinträchtigt.



Typ: MDA-R2035-N4N-X Masch.-Nr.: 2--7 (05/02)  
 Temperaturfühler (Typ) PTC - 01D459 NAT = 90 °C (      )°C  
 Dauerbetriebserwärmung des Ständers .....  $\Delta\vartheta_1 =$  22,1 K (      )K  
 Dauerbetriebserwärmung des Läufers .....  $\Delta\vartheta_2 =$  30 K (      )K  
 Stillstandserwärmung des Läufers nach  $t_A$  98,3 s .....  $\Delta\vartheta_{K2} =$  79,5 K (      )K  
 Nach  $t_A =$  98,3 ( 0 ) s gemessene Wicklungsübertemperatur .....  $\Delta\vartheta_{K1} =$  72,2 K (      )K  
 Ausgangstemperatur (i.a. RT) .....  $\vartheta_K =$  20,6 °C (      )°C

1.) Ständerwicklung: Höchste erreichte Wicklungstemperatur  $\vartheta_{K1} =$  92,8 °C (      )°C

Temperaturklasse		T1/T2	T3	T4	T5	T6	
zulässig für Wärmeklasse	H	235	195	130	95	80	°C
	F	210	195	130	95	80	°C
	B	185	185	130	95	80	°C
	E	175	175	130	95	80	°C

2.) Läuferkäfig:  $\Delta\vartheta_1 - \Delta\vartheta_2 =$  22,1 K - 30 K = -7,9 K  
 $\Delta\vartheta_{K1} - \Delta\vartheta_{K2} =$  72,2 K - 79,5 K = -7,3 K

**Wenn beide Differenzen ein positives Ergebnis haben, sind die Fälle C und D ausgeschlossen.**

B) DB- Erwärmung bei max. Kühlmitteltemperatur $\vartheta_{K211} =$ <u>50</u> °C $f_{(A_B)} = \frac{\vartheta_{K1} - \vartheta_{K211} - \Delta\vartheta_1}{\Delta\vartheta_{K1}} \cdot t_A$ $t_{(A_B)} =$ <u>28,18</u> s ( <u>    </u> )s	C) Kalte Maschine bei min. Kühlmitteltemperatur $\vartheta_{K211} =$ <u>-40</u> °C $f_{(A_C)} = \frac{\vartheta_{K1} - \vartheta_{K211}}{\Delta\vartheta_{K1}} \cdot t_A$ $t_{(A_C)} =$ <u>180,81</u> s ( <u>    </u> )s	D) DB- Erwärmung bei min. Kühlmitteltemperatur $\vartheta_{K211} =$ <u>-40</u> °C $f_{(A_D)} = \frac{\vartheta_{K1} - \vartheta_{K211} - \Delta\vartheta_1}{\Delta\vartheta_{K1}} \cdot t_A$ $t_{(A_D)} =$ <u>150,72</u> s ( <u>    </u> )s
$\Delta\vartheta_{K21(A_B)} =$ <u>33,5</u> K ( <u>    </u> )K $\Delta\vartheta_2 =$ <u>30</u> K ( <u>    </u> )K RT <sub>min.</sub> = <u>50</u> °C ( <u>50</u> )°C $\vartheta_{K2_B} =$ <u>113,5</u> °C ( <u>    </u> )°C	$\Delta\vartheta_{K21(A_C)} =$ <u>119</u> K ( <u>    </u> )K RT <sub>min.</sub> = <u>-40</u> °C ( <u>-40</u> )°C $\vartheta_{K2_C} =$ <u>79</u> °C ( <u>    </u> )°C	$\Delta\vartheta_{K21(A_D)} =$ <u>105</u> K ( <u>    </u> )K $\Delta\vartheta_2 =$ <u>30</u> K ( <u>    </u> )K RT <sub>min.</sub> = <u>-40</u> °C ( <u>-40</u> )°C $\vartheta_{K2_D} =$ <u>95</u> °C ( <u>    </u> )°C

Temperaturklasse	T1/T2	T3	T4	T5	T6	
zulässige Läufertemp.	290	195	130	95	80	°C

3.) Berechnung der Kopplungskonstante  $T_K$ :

$$T_K = \frac{\vartheta_{K1} - \vartheta_A}{\Delta\vartheta_{K1}} \cdot t_A$$
 NAT = 90 °C  $T_K =$  2,178 s  
 Auslösetemperatur aus der Überlastprüfung  
 gemäß Blatt 9:  $\vartheta_A =$  91,2 °C

Abb. 3.13 Prüfprotokoll zur Bestimmung der Auslösezeit  $t_A$

### 3.2.3 Typenprüfung in den Zündschutzarten „d“, „p“, „n“ und „tD“

Im Gegensatz zur Maschine der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ werden für die Druckfeste Kapselung, die Überdruckkapselung und den Staubschutz direkt keine Anforderungen an die Temperatur im Inneren der Maschine gestellt, die über die üblichen Produktanforderungen hinausgehen. Bei der Beurteilung der Grenztemperaturen für die Temperaturklassen muss die innere Erwärmung in ihrer Auswirkung auf die Erwärmung am Gehäuse gesehen werden. Ausnahmen sind möglich, wenn die Maschine aus einer Kombinationen mit Zubehörteilen der Erhöhten Sicherheit „e“ besteht.

#### 3.2.3.1 Druckfeste Kapselung „d“

Die Dauerbetriebserwärmungen der Oberfläche der Motoren sind mit den Bemessungswerten (bei Pumpen mit den max. Förderdaten bzw. Pumpendaten) und mit der ungünstigsten Spannung durchzuführen (bei Unterspannung mit Bemessungsdrehmoment und bei Überspannung mit Bemessungsstrom). Bei gleicher Ausführung (Achsgroße) hat im Vergleich zur Erhöhten Sicherheit die Druckfeste Kapselung eine größere Leistungsdichte.

Die zulässigen und üblicherweise verwendeten Toleranzbereiche der Spannung/Frequenz sind entsprechend EN 60034-1 die Bereiche "A" oder "B". Die Grenztemperaturen sind in der EN 60034-1 Tabelle 6 angegeben und dürfen bei max. Kühlmitteltemperatur nicht überschritten werden. Ein etwaiger Temperaturanstieg nach dem Abschalten des Motors ist ebenfalls zu berücksichtigen. Maßgebend ist die maximal auftretende Oberflächentemperatur an der wärmsten Stelle. Die Position der wärmsten Stelle ist wiederum konstruktionsabhängig.

Auf die Prüfung der Maschine bei Toleranzgrenzwerten kann verzichtet werden, wenn die angegebenen Grenztemperaturen entsprechend reduziert werden. In der Tabelle 3.3 sind die aus Sicht der PTB hinreichenden Grenztemperaturen für den geforderten Toleranzbereich angegeben.

Messstelle	normaler ungestörter Betrieb			Überlast/Störfall
	Typprüfung ungünstigster Betrieb	Typprüfung bei Bemessungsbetrieb U-Bereich "A" U-Bereich "B"		
Oberflächen- T1/T2	< 290 °C	< 265 °C	< 240 °C	< 290 °C
temp. Gehäuse T3	< 195 °C	< 180 °C	< 165 °C	< 195 °C
T4	< 130 °C	< 120 °C	< 110 °C	< 130 °C
T5	< 95 °C	< 90 °C	< 85 °C	< 95 °C
T6	< 80 °C	< 75 °C	< 70 °C	< 80 °C
Kabeleinführung b]	70 °C (> 70 °C a])			80 °C (>80 °C a])
Aderverzweig. b]	80 °C (> 80 °C a])			95 °C (>95 °C a])
Dichtungen	entsprechend mechanischem Prüfbericht			

- a] mit Hinweisschild nach EN 60079-0 auf wärmebeständiges Kabel / Einführung mit Temperaturangabe
- b] Bei Verwendung von Kabel / Einführungen reduzierter Temperaturbeständigkeit sind die Grenzwerte der Tabelle entsprechend zu reduzieren.

Tab. 3.3 Maximale Oberflächentemperaturen für Motoren der Zündschutzart „d“

Druckfeste Motoren, die durch direkte Temperaturüberwachung in Form von Temperaturfühlern geschützt werden, müssen bei Bemessungsbetrieb auch innerhalb der Spannungsbereiche betrieben werden können, ohne dass ein Überwachungsgerät auslöst.

Zur Überprüfung der Funktion wird in einem Überlastversuch die Überwachungseinrichtung mit den Temperaturfühlern zum Ansprechen gebracht. Die hierbei ermittelten maximalen Oberflächentemperaturen dürfen die Grenze der Temperaturklasse nicht überschreiten. Eine ausgelöste Überwachungseinrichtung darf nicht selbständig wieder einschalten. Ausnahmen sind in der EN 60079-14 festgelegt.

Zur Beurteilung der Einbauqualität der Temperaturfühler wird das Ansprechverhalten der Temperaturfühler bestimmt. Dazu wird üblicherweise bei blockiertem Läufer das Prüfmuster im kalten Zustand an ein definiertes Netz geschaltet. Der Strom soll mindestens dem dreifachen Bemessungsstrom entsprechen. Die Zeit vom Einschalten des Prüfmusters bis zum Ansprechen der Temperaturfühler entspricht dem Kennwert "Auslösezeit".

Ist für die Motoren ein alleiniger Schutz durch eine Überwachungseinrichtung vorgesehen, sollten nur Auslösegeräte verwendet werden, die entsprechend der Richtlinie 94/9/EG von einer benannten Stelle auf Funktion geprüft wurden und entsprechend gekennzeichnet sind.

Bei der Auswahl von druckfesten Durchführungen ist zu beachten, dass die maximal zulässigen Werte für Bemessungsspannung und Stromstärke nicht überschritten werden dürfen (siehe Festlegung im Prüfbericht der druckfesten Durchführung). Bei der Festlegung der maximalen Strombelastbarkeit der druckfesten Durchführung sind ggf. die Temperatur an der Einbaustelle und die geringere Belastbarkeit von Anschlussleitungen (Vergrößerung des Anschlussquerschnittes) bei erhöhter Umgebungstemperatur zu berücksichtigen.

Bei Motoren der Betriebsart S1 ist gemäß EN 60079-14 Abs. 7 als alleiniger Schutz vor Überlastung (Temperaturüberwachung) ein Motorschutzschalter oder eine Kombination aus eingebetteten Temperaturfühlern z.B. Kaltleiter (PTC-Widerstand) und Auslösegerät zulässig. Bei Motoren der Betriebsart abweichend von S1 ist als alleiniger Überlastschutz die Überwachung durch Kombination von Temperaturfühlern z.B. Kaltleiter (PTC-Widerstand) mit Auslösegerät erforderlich.

Entgegen der Auslegung der EN 60079-1 muss auch der blockierte Rotor und die damit verbundene Erwärmung der Maschine verifiziert werden, damit der Forderung der Richtlinie 94/9/EG entsprochen werden kann. Ist die Maschine durch den Überstrom oder Temperaturfühler überwacht und es kommt bei kalter Maschine zum blockieren des Rotors, wird die Überwachungseinrichtung die Maschine vom Netz trennen bevor eine Schädigung der Maschine auftritt. Die maximal zulässige Temperatur der Wärme Klasse darf nicht überschritten werden. Durch eine Abschätzung der eingespeisten Leistung im Verhältnis zu den Massen ist mit einem geringen Anstieg der Gehäusetemperatur zu rechnen. Bezogen auf die maximale Umgebungstemperatur ist eine Gefährdung auszuschließen. Würde die Maschine bei Bemessungsbetrieb und –temperatur blockieren, reduziert sich die Kurzschlusszeit durch die Überwachungseinrichtungen entsprechend. Ein sehr geringer Anstieg der Gehäusetemperatur wäre die Konsequenz. In der Regel kann so abgeschätzt werden, dass die Kurzschlussenergie nicht zu einer Gefährdung führt. Sicherlich kann es Grenzfälle - insbesondere bei den Temperaturklassen T5 oder T6 - geben, bei denen eine Abschätzung nicht eindeutig ist. Hierbei sollte eine messtechnische Überprüfung stattfinden.

### **3.2.3.2 Überdruckkapselung „p“**

Zur Bestimmung der Temperaturklasse für Maschinen in der Zündschutzart Überdruckkapselung „p“ werden die Ergebnisse der Dauerläufererwärmungen herangezogen.

Primär bestimmt die Temperatur außen am Gehäuse die Eingruppierung in die Temperaturklasse. Zusätzlich muss die Wärmeklasse der jeweiligen Wicklungsisolation, die Grenztemperaturen der Dichtungen sowie weiterer Anbauteile sichergestellt sein.

Sekundär muss von dem Fehlerfall ausgegangen werden, dass die Überdruckkapselung ausfallen kann. In diesem Fall wird der Motor zwar unverzüglich abgeschaltet, jedoch kann eine explosionsfähige Atmosphäre im weiteren zeitlichen Verlauf auch in die Maschine eindringen. Daher erfolgt eine Abschätzung über die mögliche Dauer bis zum Erreichen einer explosionsfähigen Atmosphäre und nach dieser Zeitspanne muss die Grenztemperatur der Temperaturklasse innerhalb der Kapselung unterschritten sein. Die Ermittlung der Innentemperatur der Maschine (insbesondere der Rotortemperatur) während und nach dem Dauerlaufversuch ist dafür notwendig.

Die Verifizierung der Übertemperaturen bei blockiertem Läufer kann analog der Druckfesten Kapselung erfolgen.

### **3.2.3.3 Zündschutzart „nA“**

Elektrische Maschinen der Zündschutzart „nA“ gehören der Kategorie 3 an und werden in der Zone 2 eingesetzt. Im Sinne der europäischen Richtlinie werden die Motoren nicht durch eine benannte Stelle zertifiziert sondern in Eigenverantwortung des Herstellers in Verkehr gebracht. Der mechanische Aufbau der Maschine lehnt sich häufig an die Ausführungen der Erhöhten Sicherheit an oder kann davon abgeleitet werden.

Entsprechend der Gefährdungsbeurteilung für Kategorie 3 dürfen bei betriebsgemäßem Gebrauch im Normalbetrieb keine Zündquellen vorhanden sein. Als potentielle Zündquellen müssen elektrische Entladungen und die Temperatur angenommen werden. Durch die Definition des Normalbetriebes wird der Fehlerfall des blockierten Rotors nicht für die Festlegung der Temperaturklasse herangezogen. Für die Dauerbetriebserwärmung muss die Temperatur im Ständer und Rotor bestimmt werden. Die Vorgehensweise gleicht der der Erhöhten Sicherheit auch hinsichtlich der Berücksichtigung der Spannungsbereiche.

Der Hochlauf der elektrischen Maschine kann ebenfalls vernachlässigt werden, wenn der Hochlauf im Verhältnis zum Auftreten einer explosionsfähigen Atmosphäre vernachlässigt werden kann.

Da die Richtlinie 94/9/EG keine Zertifizierung vorsieht, können für Motoren der Kategorie 3 keine EG – Baumusterprüfbescheinigungen ausgestellt werden. Eine Drittzertifizierung kann durch eine Konformitätsaussage dokumentiert sein. Dabei umfasst die Dokumentation der mechanischen Ausführung den Umfang der Erhöhten Sicherheit und kann analog bearbeitet werden. Entsprechende Vorlagen werden durch die PTB zur Verfügung gestellt. Die Protokolle der Erwärmungsmessungen des Herstellers sind die Grundlage für die Datenblätter. Ggf. kann der Hersteller einen Leistungsbereich pauschal angeben, der in dem Datenblatt aufgeführt wird. Der Hersteller verpflichtet sich auf Nachfrage die Unterlagen der Typenprüfung der PTB zur Verfügung zu stellen.

#### **3.2.3.4 Staubschutz „tD“**

Die Anforderungen für den Staubschutz sind in der EN 50281-1-1 / EN 61241-1 festgelegt. Elektrische Maschinen werden in der Zündschutzart „tD“ ausgeführt, deren Ex- Philosophie wesentlich im Gehäuseschutz nach IP und der Einhaltung der Oberflächentemperatur liegt. Entsprechend der europäischen Richtlinie müssen Motoren für die Zone 21 durch eine benannte Stelle zugelassen werden. Dies trifft analog dem Gasexplosionsschutz für die Zone 22 nicht zu.

Die Dauerbetriebserwärmung zur Einhaltung der Grenztemperatur der Temperaturklasse bezieht sich nur auf die Oberfläche der Maschine und Teile, die nicht durch den IP-Schutz gekapselt sind. Die elektrisch thermischen Untersuchungen bei Staubschichtdicken kleiner 50 mm werden ohne Staubauflage durchgeführt.

Neben der Zündtemperatur der brennbaren Stäube sollte deren Glimmtemperatur berücksichtigt werden, die unterhalb der Zündtemperatur liegt. So kann ein Glimmnest über einen sehr langen Zeitraum eine Explosionsgefahr darstellen. Kommt es zur Verwirbelung entzündet sich die Staubwolke möglicherweise.

Die Bestimmung der Oberflächentemperatur erfolgt analog der Prüfung für die Zündschutzart Druckfeste Kapselung. Die oben beschriebenen Richtwerte können ebenfalls herangezogen werden. Die Zertifizierung der elektrischen Ausführung kann als pauschaler Ansatz erfolgen.

Für die Zone 20 müssen bei den ungünstigen Bedingungen zwei unabhängige Fehler oder seltene Fehlfunktionen berücksichtigt werden, für Zone 21 sind vorhersehbare Fehlfunktionen und für Zone 22 Normalbetrieb vorzusehen. Ein vorhersehbarer Fehler wäre das Blockieren des Läufers, der mit bisher beschriebenen Sicherheitsmaßnahmen kontrolliert werden kann. Die Definition von „Zwei unabhängigen Fehlern“ wäre sicherlich zum vorhersehbaren Fehler der Ausfall der Überwachungseinrichtung. Es bleibt dem Entwickler überlassen, wie er durch entsprechende Maßnahmen das Schutzziel erreichen kann.

#### **3.2.4 Messunsicherheitsbetrachtung und Toleranzen**

Die Prüfung von elektrischen Maschinen wird durch die EN 60034 ff geregelt. Die EN 60034 -1 gibt für die Bemessungsdaten Grenztoleranzen an, um konstruktions- und messtechnisch bedingte Toleranzen abzudecken. Der Hintergrund der Angaben ist auch in den kaufmännischen Transaktionen zu sehen, wobei Bemessungsdaten z.T. im Vorfeld festgelegt werden. Bezüglich der Mindestanforderungen an die Messgeräte werden keine Aussagen gemacht. Einige toleranzbehaftete Bemessungsdaten wirken sich unmittelbar auf die Erwärmung der Maschine aus.

Die Anforderungen an elektrische Geräte für den Explosionsschutz sind in der EN 60079-0 festgelegt, ohne dass konkrete Aussagen über die Messunsicherheit an Verfahren oder Geräte gestellt werden. Um Toleranzen in der Serie abzudecken wird für die Temperaturklassen T1 und T2 pauschal 10 K und für die restlichen Temperaturklassen 5 K abgezogen. Ob sich für elektrische Maschinen die Toleranzen der EN 60034 mit den Angaben der EN 60079-0 decken, soll anhand der Dauerbetriebserwärmungen diskutiert werden.

Bei der Betrachtung der Messunsicherheit wurde der „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ herangezogen. Die Messunsicherheitsbetrachtung kann die Zuverlässigkeitsgrenzen, die Reproduzierbarkeit und die messtechnischen Schwachstellen bei der Bestimmung der Messgrößen von elektrischen Maschinen deutlich machen. Der GUM ist der international angewendete Leitfaden zur Angabe der Messunsicherheit und diskutiert die Bedeutung für die Qualität in der Messtechnik [36].

Die Grenzen für die Temperaturklassen sind absolut und haben keine Unsicherheiten nach oben, da sie sichertechnisch betrachtet werden müssen. Voraussetzung für die thermische Erwärmung ist die abgegebene mechanische Leistung, da sich die Prüfung darauf bezieht und in der Bescheinigung ausgeführt wird. Zur Bestimmung der mechanischen Leistung muss der Wirkungsgrad der Maschine bestimmt werden, was üblicherweise entsprechend der EN 60034-2 durchgeführt wird. Die Messunsicherheitsbetrachtung hierfür ist in [7] ausführlich beschrieben.

Die Auswertung zeigt einen unmittelbaren Einfluss hinsichtlich der Genauigkeit der Messgeräte. Werden die Anforderungen an die Messgeräte gemäß EN 60034-2 angewendet und die Drehzahl direkt bestimmt, beträgt die Messunsicherheit der Beispielmachine ca.  $\pm 1,6\%$  bei einem Wirkungsgrad von  $91,1\%$ . Die Übertragung auf den Strom und die Umrechnung auf die Erwärmung (halblinear/halbquadratisch) lassen eine zusätzliche Dauerbetriebserwärmung der untersuchten Maschine im ungünstigsten Fall von ca.  $\pm 2,5\%$  erwarten. Durch eine sorgfältige Durchführung der Messungen mit entsprechenden Messgeräten können die Unsicherheiten deutlich vermindert werden.

Bei der Messung der Erwärmung sind zusätzlich zu den elektrischen Größen weitere Messunsicherheiten zu berücksichtigen, die sich auf die Ermittlung der Temperaturen direkt beziehen. Die Messunsicherheit für die Ermittlung der Ständererwärmung wird durch das Widerstandsmessgerät bestimmt. Die Messunsicherheit des Widerstandes inklusive der Umrechnungsbeiträge beträgt ca.  $\pm 0,1\%$  und bedingt eine potentielle Unsicherheit in der Erwärmung in derselben Größenordnung. Bei der Bestimmung der Messunsicherheit für die Rotortemperatur ist die Messkette von Thermoelement und Messschreiber zu betrachten. Die in der PTB verwendete Messeinrichtung kann mit einer Messunsicherheit von  $\pm 2\text{ K}$  angegeben werden.

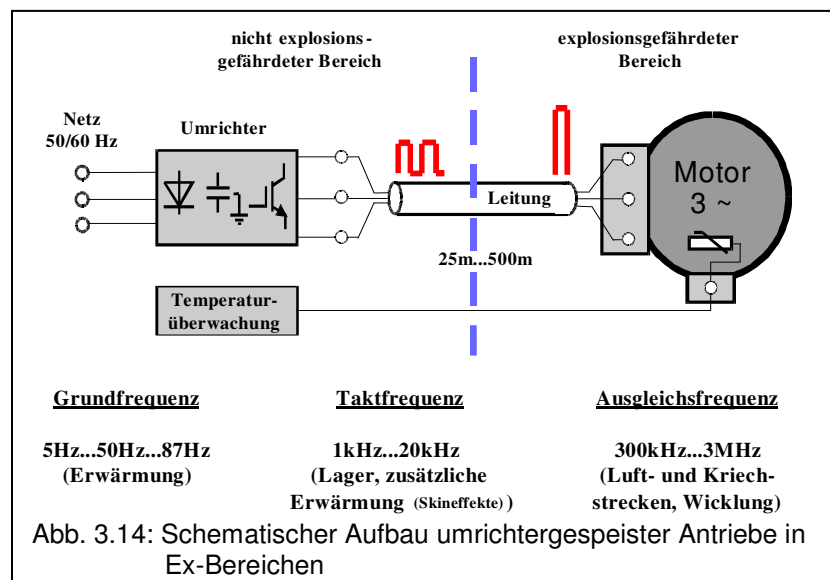
Neben den Messunsicherheiten in der Temperaturmesskette an sich ist bei der Präparation der Maschine und dem Aufbau der Messkette besondere Sorgfalt notwendig (Kap. 3.2.2.1 und 3.2.2.2). Gravierende Auswirkungen auf das Ergebnis hat die Definition der Bezugspunkte (z.B. Widerstandsmesswert nach X-Sekunden oder auf  $t = 0\text{ s}$  extrapolieren). Die Temperaturmessfehler und die Abweichungen durch die Bezugspunkte können dabei deutlich größer als alle Messunsicherheiten sein.

Alle Einflüsse der Toleranzen in der Spannungsversorgung können darüber hinaus zu einer zusätzlichen Erwärmung führen.

### 3.3 Prüfung und Zulassung umrichter gespeister Antriebe

Die Konstellation drehzahl geregelter Asynchronmaschinen in Ex-Bereichen setzt sich aus drei Betriebsmitteln zusammen (Umrichter, Motor und Überwachungseinrichtung, Abb. 3.14) die getrennt errichtet werden können, aber im Zusammenspiel den Explosionsschutz sicherstellen müssen. Zur Speisung des Motors werden häufig Frequenzumrichter mit Zwischenkreisspannung angewendet. Dabei wird die netzbedingte 50/60 Hz Wechselspannung zunächst in eine Gleichspannung umgewandelt. Die Zwischenkreisspannung wird durch Kondensatoren geglättet. Schnellschaltende Leistungstransistoren (z.B. IGBT) wandeln die Gleichspannung durch entsprechend modulierte Schaltkombinationen in die gewünschte Wechselspannung um. Der Umrichter befindet sich in der Regel außerhalb des Ex-Bereiches und wird daher nicht in einer Zündschutzart der Zone 1 ausgelegt. Ausnahme ist der innerhalb des Ex-Bereiches in einem Anschlusskasten der Zündschutzarten Druckfeste Kapselung „d“ oder Überdruckkapselung „p“ integrierte Umrichter. Bei derartigen Auslegungen ist die Verlustleistung des Umrichters auf einige Kilowatt begrenzt. Der Umrichter oder Bestandteile des Umrichters können nach Richtlinie 94/9/EG auch für den Explosionsschutz zugelassen werden.

Der eigentliche Antrieb befindet sich im explosionsgefährdeten Bereich und wird in einer Zündschutzart ausgeführt. Die mechanische Ausführung kann sich gegenüber dem herkömmlichen Netzbetrieb durchaus unterscheiden (z.B. isoliertes Lager).



Die Bedingungen der Versorgungsnetze sind eindeutig spezifiziert und können durch den Motorschutzschalter beherrscht werden. Bei Umrichterspeisung müssen weitere Fehlerfälle berücksichtigt werden. Denkbar ist eine Phasenverschiebung oder die Möglichkeit unterschiedlicher Spannungsamplituden. Die Mess- und Regeleinrichtung des Umrichters kann in der Hard- und Software Fehler aufweisen, die bislang nicht bei der sicherheitstechnischen Betrachtung des Antriebes berücksichtigt werden. Daher und aus Gründen der einfachen Handhabung wird zum Teil eine vom Umrichter unabhängige Temperaturüberwachung verwendet. Die Einhaltung der Temperaturklasse der elektrischen Maschinen erfolgt in der Regel über in den Wickelkopf eingebettete Temperaturfühler in Verbindung mit einem funktionsgeprüften Auslösegerät. Im Sinne der Richtlinie 94/9/EG können die Auslösegeräte mit einer EG-Baumusterprüfbescheinigung in Verkehr gebracht werden.

Im Gegensatz zum Betrieb am herkömmlichen starren Netz bei einer Frequenz von 50 Hz oder 60 Hz muss bei der Auslegung von umrichtergespeisten Antrieben mit weiteren Frequenzspektren gerechnet werden [37, 38, 39]. Mit der Grundfrequenz wird die

Einstellmöglichkeit des gewünschten Drehzahlbereichs festgelegt. Insbesondere die Erwärmung der elektrischen Maschine in dem Drehzahlbereich muss bestimmt werden und daran die Temperaturüberwachung angepasst werden.

Die Taktfrequenz herkömmlicher Umrichter liegt zwischen 1 kHz...20 kHz. Hohe Taktfrequenzen reduzieren die Welligkeit des Stromverlaufes, vermindern die akustische Umweltbelastung und bieten auch dynamisch Vorteile.

Zum Anschluss der Asynchronmaschine im Ex-Bereich an den Umrichter müssen z.T. längere Distanzen überbrückt werden. Auf den langen Leitungen in Verbindung mit schnell schaltenden Leistungstransistoren entstehen Wanderwellenvorgänge, die zu Spannungsüberhöhungen am Ende der Leitung führen und die das Isolationssystem der elektrischen Maschine belasten. Die Ausgleichsvorgänge durch Wanderwellen liegen in einem Frequenzbereich von 300 kHz...3 MHz. Die Frequenz ist abhängig von der Leitungslänge und vom Wellenwiderstand der Leitung.

### 3.3.1 Unterschiede in den Normenanforderungen

Die Anforderungen an umrichtergespeiste Antriebe unterscheiden sich zwischen den jeweiligen Zündschutzarten z.T. erheblich. In den Zündschutzarten „e“ und „n“ wird die Kombination aus Motor und Umrichter bei der Prüfung vorgeschrieben, so dass der Umrichtertyp in der Bescheinigung oder die Ausgangsparameter des Umrichters detailliert spezifiziert werden müssen. Änderungen der Parameter oder Austausch des Umrichters durch einen neueren Typ sind daher ohne erneute Verifizierung nicht möglich. In Absprache zwischen Hersteller und Betreiber kann für die Zone 2 eine davon abweichende Maßnahme vereinbart werden.

In den Zündschutzarten „d“ und „p“ können unterschiedliche Umrichtertypen mit dem Motor kombiniert werden. Der Umrichtertyp wird in der Bescheinigung von der Prüfstelle nicht zwingend festgelegt. Die Einhaltung der Temperaturklasse wird durch den Hersteller oder Betreiber gewährleistet. Änderungen an den Umrichterparametern oder der Austausch des Umrichters durch einen anderen sind möglich. Die Druckfeste Kapselung fordert die Verwendung von in die Wicklung eingebetteten Temperaturfühlern in Verbindung mit einem funktionsgeprüften Auslösegerät (EN 60079-14), oder die Prüfung Motor und Umrichter.

	Überdruckkapselung „p“ EN 60 079-2	Druckfeste Kapselung „d“ EN 60 079-1	Erhöhte Sicherheit „e“ EN 60 079-7	„n“ EN 60 079-15
<b>Kombination Umrichter- Motor</b>	keine	getrennt bei Kaltleitern	Einheit	i.d.R. Einheit
<b>Dauerlauf (Temperatur)</b>	Gehäuse Stator Rotor	Gehäuse	Gehäuse Stator Rotor	Gehäuse Stator Rotor
<b>Zündschutz</b>	Überdruck	Zünddurchschlag	Nicht funkend	Nicht funkend

Abb. 3.15: Gegenüberstellung von Zündschutzarten für elektrische Antriebe



### 3.3.2 Allgemeines zur Prüfung umrichter gespeister Antriebe

Die Temperaturklasse eines elektrischen Betriebsmittels für den Ex-Schutz bezieht sich auf die in der Bescheinigung aufgeführten Bemessungsdaten innerhalb der definierten Spannungs- und Frequenzschwankungen des Versorgungsnetzes. Die direkt am Netz betriebene elektrische Maschine wird zusätzlich über die an der Welle abgegebene Leistung bei entsprechender Drehzahl in der Bescheinigung spezifiziert. Unter der Verwendung des Umrichters ändern sich für die elektrische Maschine die definierten Netzbedingungen gravierend. Der Drehmomentenverlauf in Abhängigkeit der Drehzahl ist insbesondere für das Erwärmungsverhalten des Antriebes verantwortlich. Die Anlauf- und Überlastbedingungen werden ebenfalls durch den Umrichter festgelegt und müssen bei der Prüfung berücksichtigt werden. Die Temperaturklasse des Antriebes wird durch Dauerlaufversuche innerhalb des Nennbetriebsbereiches festgelegt, wobei an den relevanten Stellen die Temperaturen bestimmt werden. Die Dauerbetriebserwärmungen bei maximaler Leistung sind häufig maßgeblich. Insbesondere können auch die maximalen Temperaturen an der Kabeleinführung und der Aderverzweigung (EN 60079-0 Abs. 16.7) bei Umrichterantrieben kritische Werte erreichen.

Durch die Variation der Drehzahl verändert sich die Kühlung der Maschine, wenn die Maschine nicht über einen Fremdlüfter gekühlt wird. In solchen Fällen ist bei der niedrigsten Drehzahl des Antriebes häufig ein Erwärmungslauf notwendig [40, 41].

Die Analyse der Leerlaufkennlinie zeigt eine Abhängigkeit der Reibungsverluste von der Drehzahl. Insbesondere bei der maximalen Drehzahl ( $> 50$  Hz) sind die erhöhten Reibungsverluste und damit die Erwärmung des Lager zu berücksichtigen. Ebenso nehmen die Eisenverluste aufgrund der Oberschwingungen zu, die jedoch nicht von der Drehzahl abhängig sind sondern im Wesentlichen von der Höhe der Zwischenkreisspannung.

Umrichter werden in vielen Varianten mit verschiedenem Setup angeboten, die unterschiedliche Auswirkungen auf das Erwärmungsverhalten zeigen können. Sinusfilter z.B. am Ausgang des Umrichters vermindern die Spannung an den Klemmen der Maschine. Um weiterhin die gewünschte Leistung abgeben zu können, muss der Motorstrom erhöht

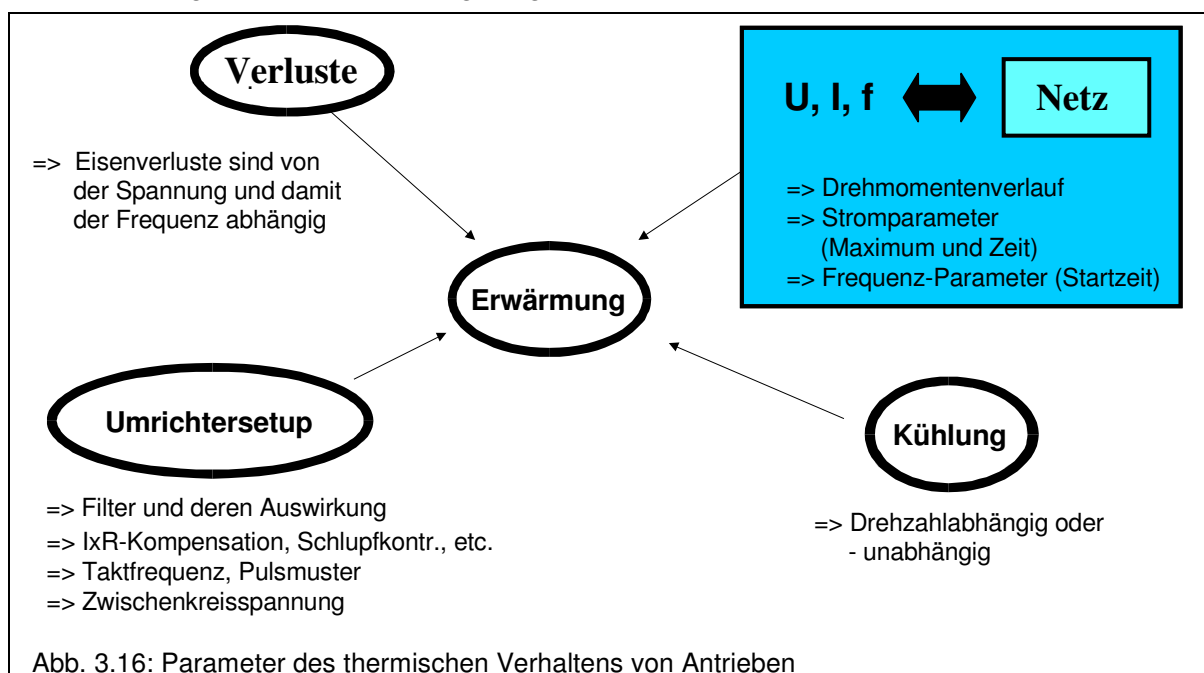


Abb. 3.16: Parameter des thermischen Verhaltens von Antrieben

werden, was zu einer höheren Erwärmung führt (Abb. 3.16). Alle Parameter des Umrichters, die einen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten zeigen, müssen bei der Prüfung berücksichtigt werden. Wird z.B. bei Minimalfrequenz eine IxR-Kompensation verwendet, d.h. die Spannung wird angehoben, damit der Motor hochlaufen kann, werden entsprechend die Eisenverluste zunehmen.

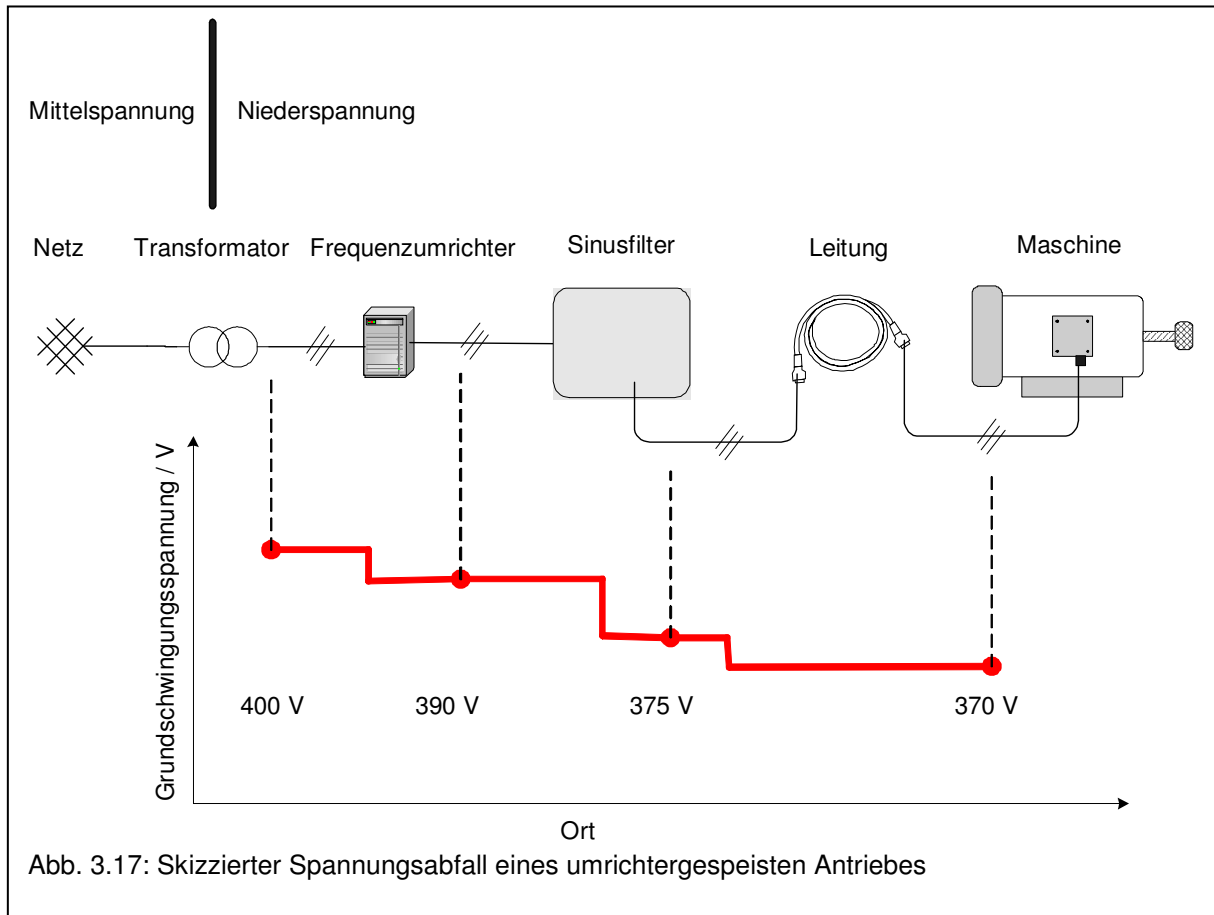


Abb. 3.17: Skizzierter Spannungsabfall eines umrichter gespeisten Antriebes

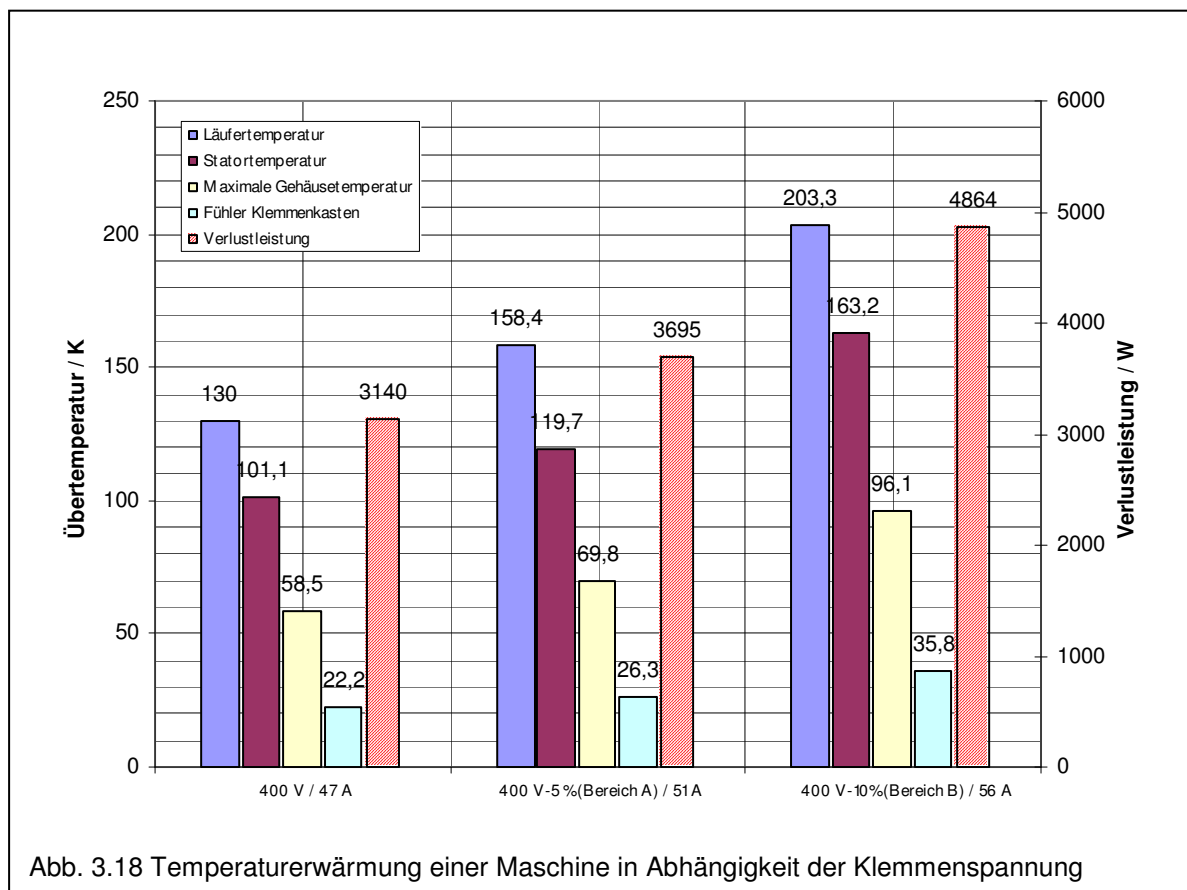
Im Gegensatz zum Netzbetrieb kann es bei umrichter gespeisten Antrieben zu weiteren Spannungsabfällen kommen. In Abb. 3.17 ist ein möglicher Spannungsabfall von 30 V skizziert, der zusätzlich zu den üblichen Netzschwankungen vom Motor verarbeitet werden muss. Abbildung 3.18 zeigt die Temperaturerhöhung beim Umrichterbetrieb verursacht durch die reduzierte Spannung an den Klemmen der Maschine. Für den Betrieb des Motors ist es unerheblich, ob der Spannungsfall durch die Verwendung einer langen Leitung bedingt ist oder durch den Einsatz an der Grenze des Bereiches B (-10 %).

In einem Überlastversuch wird die Temperaturüberwachung (üblicherweise Kaltleiter in der Wicklung) bis zum Ansprechen gebracht. Am Ende des Erwärmungsversuches darf die Grenztemperatur nicht überschritten werden (vergl. Kap. 3.2.2.1).

Für die Zündschutzarten „e“ und „nA“ werden die Umrichterparameter in die Bescheinigung aufgenommen, so dass der Betreiber die richtige Parametrierung des Antriebes sicherstellen kann. Legt die Norm keine verbindliche gemeinsame Prüfung von Umrichter und Motor fest, müssen seitens des Herstellers verbindliche Festlegungen (z.B. in der Betriebsanleitung) für den Betrieb am Umrichter getroffen werden, so dass die Temperaturklasse eingehalten wird.

In der Zündschutzart „d“ darf die Zusammenschaltung von Motor und Umrichter vom Betreiber vorgenommen werden, wenn eingebettete Kaltleiter verwendet werden. Hierbei ist insbesondere die Messtoleranz der Kaltleiter zu beachten, die für Kaltleiter < 100 °C groß sein kann. Zunächst sollte jedoch der Hersteller der Maschine die Eignung zum Umrichterbetrieb bestätigen. Für den Hersteller nicht absehbar ist jedoch die abschließende Konfiguration seitens des Betreibers. Maßgeblich für das Erwärmungsverhalten ist die an den Klemmen der Maschine tatsächlich anliegende Spannung und nicht ausschließlich die Netzspannung. Der Betreiber sollte daher die ungünstigste Klemmenspannung der Maschine bei der Projektierung annehmen und sich die Funktion der Abschaltvorrichtung dafür durch den Hersteller bestätigen lassen.

Ein kritischer Punkt sind die Lager, wenn die maximale Drehzahl weit in dem Feldschwäcbereich (>> 50 Hz) liegt. Durch die Reibung können sich die Lager stärker erwärmen. Insbesondere der Betrieb mit keinem oder wenig Fett bei Wälzlagern führt zu einem enormen Temperaturanstieg, so dass auf hinreichende Schmierung geachtet werden muss. Bei elektrischen Maschinen in der Zündschutzart Druckfesten Kapselung „d“ werden ab einer Achshöhe von ca. 132 die Lager häufig außerhalb der Druckfesten Kapselung angebracht, so dass oben genannte Problematik ebenfalls vorhanden ist.



### 3.33 Prüfalgorithmus für umrichtergespeiste Antriebe „e“ und „nA“

Die Norm von umrichtergespeisten Antrieben für die Zündschutzarten „e“ und „nA“ sieht die gemeinsame Prüfung von Umrichter und Motor vor. Ein möglicher Prüfalgorithmus ist in Abb. 3.19 dargestellt und soll erläutert werden. Für den sicheren Betrieb müssen die

ungünstigsten Betriebszustände bestimmt werden und hinsichtlich ihrer Erwärmung verifiziert werden.

Für den umrichter gespeisten Motor sind üblicherweise drei Betriebsfälle zu untersuchen: Dies sind der Betrieb bei minimaler Drehzahl (schlechte Kühlung, nur bei eigenbelüfteten Maschinen von Bedeutung), bei Bemessungsdrehzahl und -leistung sowie der Betrieb bei maximaler Drehzahl im Feldschwächbereich (großer Schlupf und somit eine starke Rotorerwärmung).

Grundlage für die Untersuchungen ist die Erwärmungsmessung bei Bemessungsdrehzahl und sollte als erstes durchgeführt werden. Für die Bestimmung der Erwärmung bei Bemessungsdrehzahl kann unter Umständen auf eine bereits erfolgte Dauerbetriebserwärmung bei Netzfrequenz zurückgegriffen werden, wenn ausreichende Sicherheitsabstände vorhanden sind. Im Flussdiagramm ist eine Temperaturdifferenz von 20 K genannt, die sich sowohl auf die Temperaturklasse als auch die Wärmeklasse bezieht. Bei geringeren Sicherheitsabständen insbesondere für die Wärmeklasse kann unter Umständen eine Umrechnung erfolgen. Dazu sind die Ausgangsspektren des Umrichters und ihre Auswirkung auf den Motor notwendig.

Liegt die Minimaldrehzahl des Antriebes unter der Drehzahlgrenze, ab der erst eine wirksame Kühlung erfolgt, so muss die Kühlung als ausgefallen betrachtet werden. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit des thermischen Nachweises. Bei konstantem Belastungsmoment und ohne Fremdbelüftung sollte der thermische Nachweis ebenfalls erbracht werden. Hingegen kann bei quadratischem Belastungsmoment in Abhängigkeit von der Drehzahl auf einen thermischen Nachweis verzichtet werden (Auswirkung einer IxR-Kompensation beachten). Für die übrigen Belastungsarten muss durch Messung oder Rechnung der Nachweis erbracht werden, dass die zulässige Maschinentemperatur nicht überschritten wird. Die Vorgehensweise sollte im Vorfeld mit der Prüfstelle abgestimmt werden. Die elektrischen Daten ergeben sich aus der Belastungskennlinie der Maschine. Abschließend kann der Betrieb im Feldschwächbereich betrachtet werden. Wenn sich die Leistung erhöht (keine ausreichende Drehmomentverringerng), wird der Maschinenstrom und Schlupf zunehmen. Es kommt hierbei zu einer starken Temperaturzunahme im Rotor. Dieser Betriebsfall muss messtechnisch bestimmt werden. Bei ausreichender Verringerung des Drehmomentes bei Feldschwächung ist mit keiner kritischen Temperaturzunahme zu rechnen.

Elektrische Geräte der Kategorie 2 dürfen auch im anzunehmenden Fehlerfall im Sinne der Richtlinie keine Zündquellen aufweisen. Bei umrichter gespeisten Antrieben wird der Überlastfall betrachtet und das Ansprechen sowie Auslösen der Überwachungseinrichtung muss in einem entsprechenden Versuch nachgewiesen werden. Kann der Umrichter die notwendige Leistung nicht zur Verfügung stellen, kann die Kühlung des Antriebes beeinträchtigt werden. Beim Auslösen der Überwachungseinrichtung muss in jedem Fall die Temperaturklasse eingehalten werden. Die Anforderung an Geräte der Kategorie 3 sieht dagegen lediglich den bestimmungsgemäßen Betrieb vor, so dass die Überlastprüfung nicht obligatorisch ist.

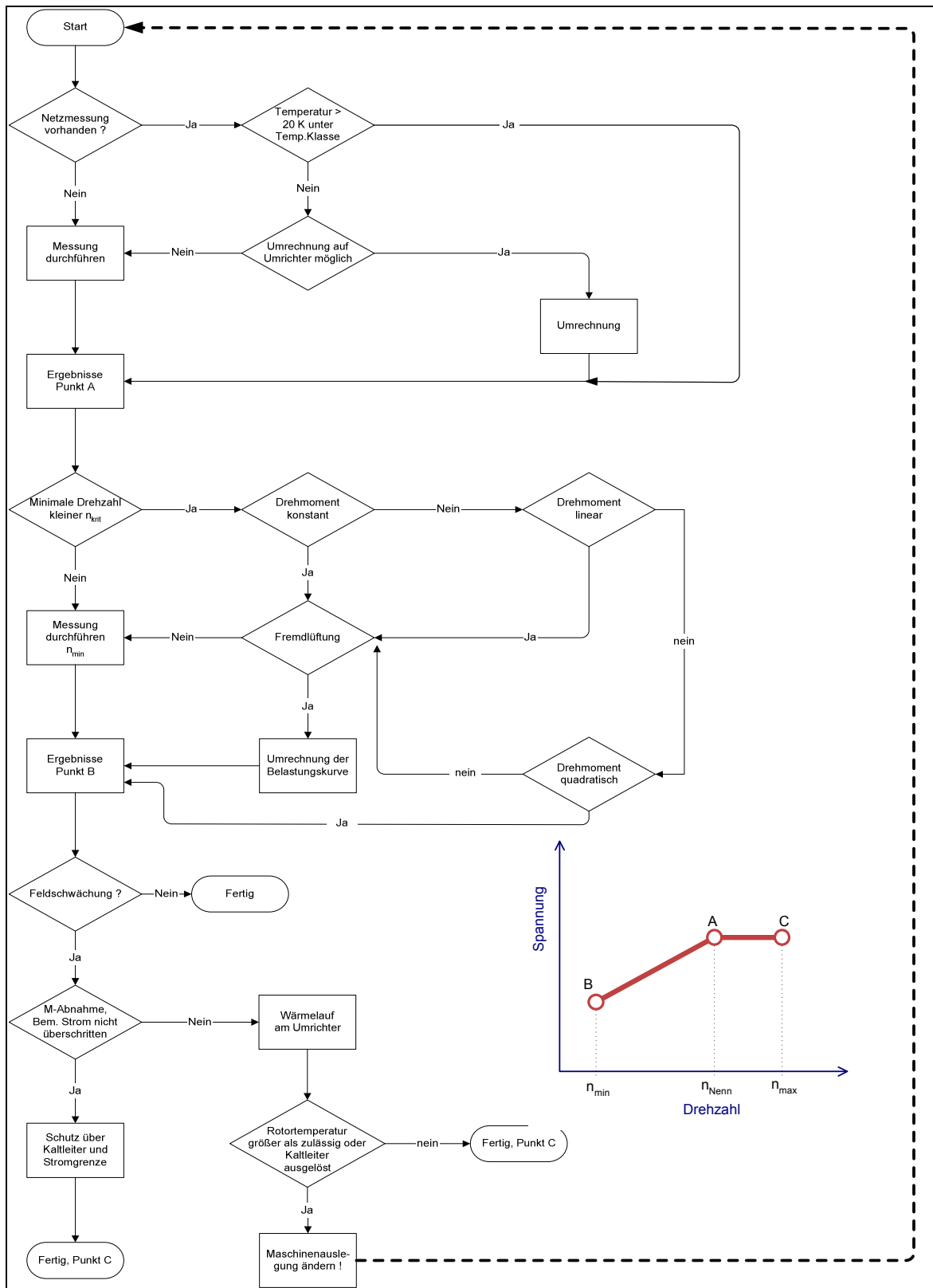


Abb. 3.19: Prüfalgorithmus für umrichter gespeiste Antriebe

Für die Zulassung des umrichter gespeisten Antriebes werden die üblichen Angaben für die elektrische Maschine (nahezu identisch dem Zertifikat der Zulassung für Netzbetrieb) in der EGB angegeben.. Die Daten sind im Wesentlichen:

- mechanische Leistung (inkl. Umgebungstemperatur für > 40 °C)
- Grundsicherungsspannung

- Effektivwert der Spannung
- Strom (Effektiv)
- Frequenzbereich
- Drehzahlbereich
- Schaltungsart
- Wärmeklasse

Für die Umrichtereingangsspannung wird der Bereich festgelegt (nach IEC 60034 meistens Bereich A). Die umrichterspezifischen Daten sind:

- Drehmomentenverlauf
- Drehzahlbereich
- Stromgrenze dauernd und kurzzeitig
- Zeitgrenze für den Hochlauf und für den kurzzeitigen Überstrom

Der Umrichtertyp wird über seine Kennzeichnung im Abschnitt der „Besonderen Bedingungen“ spezifiziert und dadurch an den Motor gebunden. Wird der Umrichter in der EG-Baumusterprüfbescheinigung nicht direkt spezifiziert, so muss die Definition der Schnittstelle zwischen Umrichter und Motor erfolgen. Hierzu sind folgende Daten notwendig:

- der Bemessungsstrom des Frequenzumrichters muss im Verhältnis zum Motorbemessungsstrom begrenzt sein (z.B. < 2 fache)
- die Stromüberwachung des Frequenzumrichters muss den Effektivwert des Maschinenstromes mit einer Toleranz von  $\pm 5\%$  vom tatsächlichen Wert erfassen können
- das Steuerverfahren sollte festgelegt sein
- Gruppenbetrieb muss ausgeschlossen sein
- die Umrichtereingangsspannung muss begrenzt werden
- ein minimale Taktfrequenz sollte vorgegeben werden
- der Scheitelwert der umrichterbedingten Überspannungen an den Klemmen des Motors muss begrenzt werden.

Üblicherweise werden die umrichtergespeisten Antriebe mit in die Wicklung eingebetteten Kaltleitern geschützt, deren Auslösetemperatur und -zeit in der Zulassung aufgeführt sind.

### **3.3.4 Zusätzliche Anforderungen an umrichtergespeiste Antriebe**

#### **Ausgleichsvorgänge auf langen Leitungen**

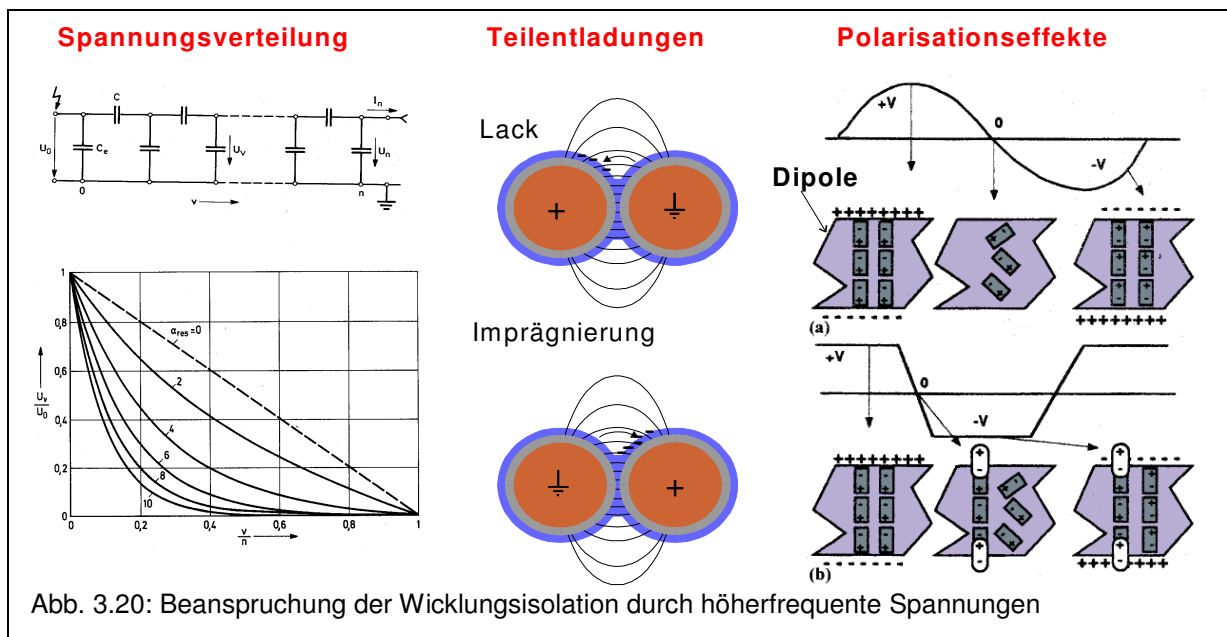
Schnellschaltende Leistungstransistoren in Verbindung mit "langen Leitungen" (z.T. > 10 m) können Wanderwellenvorgänge auf der Leitung hervorrufen. Aufgrund der unterschiedlichen Wellenwiderstände von Leitung und Ständerwicklung kommt es zu einer positiven Reflexion an den Klemmen der Maschine. Der anschließende Ausgleichsvorgang erfolgt mit einer Frequenz zwischen 300 kHz...3 MHz und ist abhängig von den Leitungsparametern. Der maximale Spannungswert ist bedingt durch die Art der Ausgleichsvorgänge. Die Wanderwelle eines Einschaltvorgangs des Transistors führt maximal zu der doppelten Zwischenkreisspannung am Ende der Leitung. Durch die ungünstige Überlagerung von Aus- und Einschaltvorgängen treten Spannungsspitzen vom Dreifachen der Zwischenkreisspannung auf. Zur Vermeidung muss zunächst jeder Schaltvorgang

ausgeklungen sein, bevor der nächste Schaltzustand möglich ist. In Abhängigkeit der Dämpfung klingt der Wanderwellenvorgang in der Regel innerhalb von 20 Laufzeiten auf der Leitung ab. Bei "sehr langen" Leitungen führt dies zu langen Schaltpausen, was nur bei geringen Taktfrequenzen realisierbar ist. Der maximal zu erwartende Spannungswert ist in der Phase der Projektierung kaum vorhersehbar. Dennoch sollte vom Hersteller ein Maximalwert für die Leitungslänge angegeben werden.

Umrichter für Mittelspannung können auch mehrstufig ausgeführt werden. Hierbei ist die Zwischenkreisspannung reduziert, so dass durch Schaltvorgänge eine geringere Überspannung auftreten wird.

### Isolationssystem

Die Wicklung einer elektrischen Maschine wirkt bei hohen Frequenzen wie eine Kondensatorkette, so dass ein rechteckförmiger Spannungspuls mit hochfrequenten Anteilen zu einem erhöhten Spannungsabfall an den ersten Windungen der Maschine führt. Berühren sich zwei Windungen innerhalb einer Spule bei ausreichender Spannungsdifferenz, so zerstören Teilentladungen in den Zwickeln die Isolation. Windungsschlüsse führen zum Totalausfall der Maschine. Eine zusätzliche Beanspruchung der Isolation entsteht, wenn bei hohen Frequenzen Dipole innerhalb der Isolationsschicht zu einer weiteren Felderhöhung beitragen [42, 43]. Daher ist insbesondere bei umrichtergespeisten Antrieben auf eine saubere Wicklungsausführung zu achten, die auch durch die EN 60079-7 gefordert wird.



Die maximal zulässige Anstiegsgeschwindigkeit an den Klemmen der Maschine ist in der EN 60034-17 durch eine entsprechende Grenzkurve festgelegt. Untersuchungen haben belegt, dass Wicklungssysteme mit guter industrieller Qualität bei entsprechenden Überspannungen keine Verminderung der Lebensdauer zeigen. Die maximale Überspannung beträgt 1350 V bei einer Anstiegszeit größer 0,8  $\mu$ s. Bei einer Netzeingangsspannung des Umrichters von 400 V und unter Berücksichtigung einer doppelten Überspannung kann die Grenzkurve eingehalten werden. Weitere Grenzkurven für Isolationssysteme der Maschinen werden in der EN 60079-25 angegeben. Hierbei handelt es sich in der Regel, um speziell für Umrichterbetrieb geeignete Isolationssysteme. Die Grenzkurve X mit einer maximalen

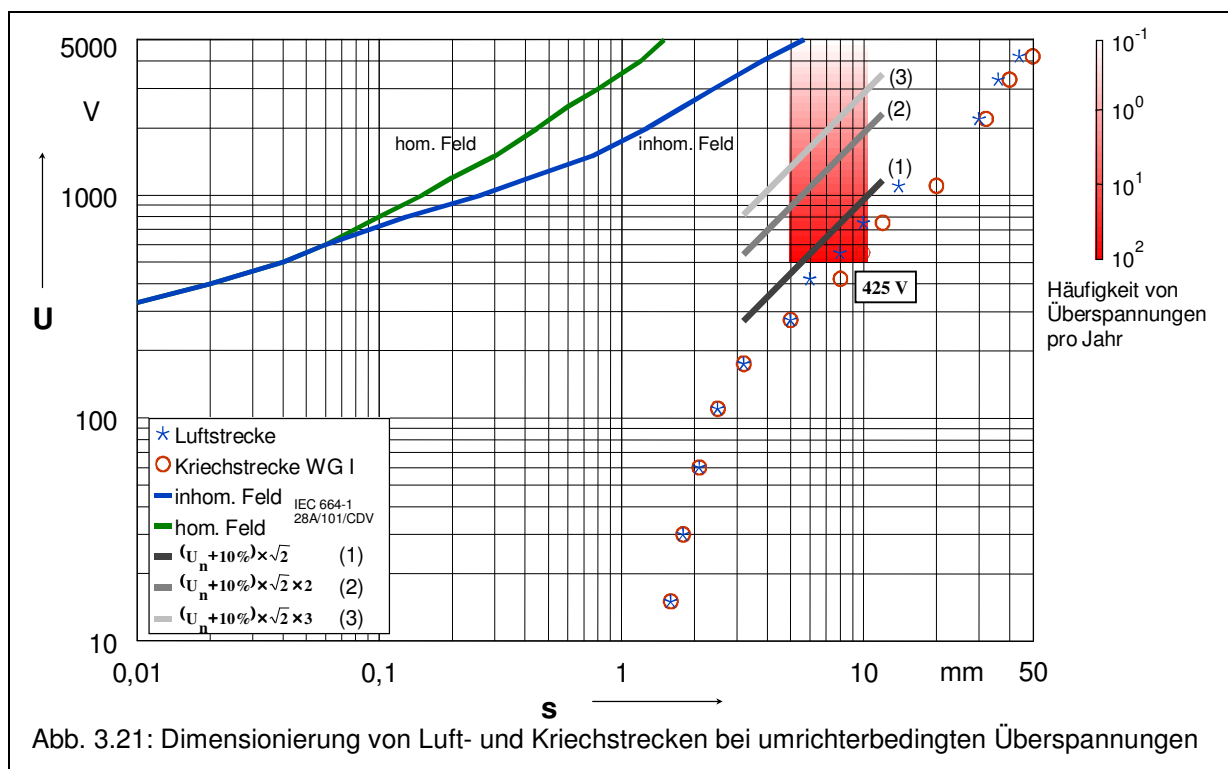
Spannungsamplitude von 1560 V kann unter den bereits formulierten Bedingungen für Netzeingangsspannungen von 500 V eingehalten werden, die Grenzkurve Y mit einer Amplitude von 2150 V für Netzeingangsspannung von 690 V.

Für Isolationssysteme von druckfest gekapselten Motoren geben die Grenzkurven ausreichende Auslegungshinweise. Zu bedenken ist sicherlich die Grundphilosophie der „Erhöhten Sicherheit“ nach einer zusätzlichen Anforderung an Isolationssysteme.

Die Grenzkennlinien geben neben der maximalen Spannungsamplitude die Abhängigkeit vom Spannungsanstieg an. Die Leitung filtert die hochfrequenten Anteile der Spannung mit zunehmender Länge heraus, so dass auch das  $du/dt$  von der Leitungslänge abhängig ist. Aufgrund der Unkenntnis der Leitungslänge im Vorfeld der Installation und der Schwierigkeit der messtechnischen Erfassung des Spannungsverlaufes vor Ort ist die Einhaltung der Normenanforderung in der Praxis sehr aufwendig. Da neueste Leistungstransistoren Anstiegsgeschwindigkeiten von 50 V/ns erlauben, wird die Grenzkennlinie insbesondere bei direktem Anschluss von Motor und Umrichter leicht überschritten, während eine "lange" Leitung trotz der Reflexionen und hohem Scheitelwert der Spannung die Grenzkennlinie einhalten kann.

### Luft- und Kriechstrecken

Die Dimensionierung der Luft- und Kriechstrecken für den Explosionsschutz in der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ nach EN 60079-7 gilt für netzbedingte Spannungen 50/60 Hz. Transiente Überspannungen werden nicht berücksichtigt. Da dauerhafte Überspannungen, wie sie bei Umrichterantrieben in Verbindungen mit langen Leitungen auftreten, nicht speziell betrachtet werden, ist die Auslegung der Normanforderungen nicht eindeutig und führt häufig zu Diskussionen. Untersuchungen zur Durchschlagsfestigkeit in Abhängigkeit der Frequenz zeigen eine eindeutige Reduzierung ab einer kritischen Frequenz





[44, 45]. Die Höhe der Reduzierung wird durch die Homogenität des Feldes bestimmt und kann in stark inhomogenen Feldern zu einer Halbierung der Durchschlagsfestigkeit führen. Untersuchungen über die Kriechstromfestigkeit von umrichterbedingten Überspannungen haben gezeigt, dass lediglich der Effektivwert ausschlaggebend ist.

Wird die Auslegung der Normanforderung auf Niederspannungsmaschinen ( $< 1000\text{ V}$ ) beschränkt, ist jedoch ein hinreichender Sicherheitsabstand vorhanden, wenn im Falle der doppelten Zwischenkreisspannung an den Klemmen der für Netzbetrieb übliche Bemessungswert verwendet wird. Höhere Überspannungen bis zum Dreifachen der Zwischenkreisspannung lassen sich durch den nächsten Bemessungswert aus der Tabelle EN 60079-7 abdecken. Auf umrichtergespeiste Hochspannungsmaschinen ist die oben aufgeführte Auslegung nicht übertragbar.

Wanderwellenvorgänge lassen sich durch sogenannte  $du/dt$ -Filter vermeiden. Diese Filter müssen jedoch an die Leitungsparameter angepasst werden, um nicht bei Resonanzfrequenz Überspannungen zu erzeugen. Praktisch kann eine maximale Leitungslänge vorgeschrieben werden. Ebenso ist auf die kapazitive Kopplung zum Zwischenkreis zu achten.

### **Wellen- und Lagerspannungen**

Die Lager von elektrischen Maschinen können bei Umrichterbetrieb durch systembedingte Lagerströme geschädigt werden. Zusätzlich zu der netzbedingten Wellenspannung (Kap. 3.1) überlagert sich eine umrichterbedingte Lagerspannung, die durch eine Nullkomponente der Ständerströme hervorgerufen wird, deren Höhe vom Erdungssystem des Motors abhängt.

Die Lagerspannung ist definiert durch eine kapazitiv eingekoppelte Spannung am Radialspalt des Lagers. Die Lagerspannung hat die primäre Ursache in einer Wechselspannung zwischen dem mittleren Potenzial (Sternpunkt) der Ständerwicklung und dem geerdeten Ständerblechpaket (sog. Common mode Spannung). Spannungsscheitelwerte von 50 % der Zwischenkreisspannung sind möglich. Die Scheitelwerte der Lagerspannung sind abhängig von den Kapazitäten zwischen Ständerwicklung und Läufer, zwischen Läufer und Gehäuse sowie der Kapazität des Lagers selbst (IEC/TS 60034-17). Messungen haben Lagerspannungen mit Scheitelwerten von 10 - 30 V ergeben.

Die Schädigung des Lagers tritt ein, wenn der Schmierfilm durchschlägt. Die dafür notwendige Spannungshöhe hängt von diversen Parametern ab; u.a. hat die Drehzahl einen Einfluss.

Generell ist festzuhalten, dass die Belastung der Lager mit zunehmender Pulsfrequenz und Zwischenkreisspannung größer wird. Zur Minimierung der Belastung des Lagers rät der Leitfaden IEC/TS 60034-17 bei Gehäusekennzahlen (Baugröße) oberhalb von 315 zu:

- Einsatz von Filtern, die das Nullsystem der Strangspannungen verkleinern;
- oder den Spannungsanstieg ( $du/dt$ ) reduzieren
- oder ein (beide) Motorlager zu isolieren

Für die Beurteilung von Lagern an explosionsgeschützten umrichtergespeisten Antrieben gibt es keine normenspezifischen Vorgaben. Lediglich die Bewertung der Lager aus mechanischer Sicht ist Bestandteil der EN 13463-5 (Konstruktive Sicherheit „C“).

### **Installation (Anschluss und Erdung)**

Um hochfrequente Lagerströme zu reduzieren oder zu vermeiden, werden insbesondere geschirmte Leitungen mit geringer Impedanz auch für hohe Frequenzen empfohlen. Die Adern der drei Phasen sollten symmetrisch zum PE aufgebaut sein. Die Schutzleitung ist an beiden Enden an PE anzuschließen. Auf eine gut leitende Verbindung zwischen dem Anschlusskasten und dem Maschinengehäuse ist zu achten (der Kontakt über die Befestigungsschrauben des Anschlusskastens ist üblicherweise nicht ausreichend). Darüber hinaus muss auch die Erdung des gesamten Systems eine geringe Impedanz aufweisen, damit die hochfrequenten Ströme zurückfließen können. Hinweise für die Projektierung werden in der EN 60034-17 und IEC 60034-25 gegeben.

Die EN 60079-14 stellt Anforderungen an die Gefährdung durch Körper elektrische Betriebsmittel und fremde leitfähige Teile. Hierbei wird insbesondere auf die unterschiedlichen Netz-Verteilungssysteme hingewiesen, so dass z.B. in IT-Netzen eine Isolationsüberwachungseinrichtung zur Anzeige eines Erdschlusses vorzusehen ist. Umrichterantriebe, die galvanisch vom Netz getrennt sind, müssen hinsichtlich der Anforderung verifiziert werden.

### **3.4 Zusätzliche Anforderungen und Besonderheiten bei der Typenprüfung**

Die Prüfung und Zulassung explosionsgeschützter Antriebe kann von dem bislang ausgeführten Verfahren noch durch weitere Anforderungen abweichen, die im Folgenden erläutert werden sollen. Dabei können nicht alle denkbaren Varianten diskutiert werden. Die Prüfung und Zulassung von Sonderausführungen sollten im Vorfeld mit der Prüfstelle geklärt werden.

#### **3.4.1 Besondere Umgebungsbedingungen**

Die Umgebungsbedingungen für den Einsatz elektrischer Maschinen gemäß Richtlinie sind auf atmosphärische Bedingungen beschränkt. Das schließt die Umgebungstemperaturen von -20 °C bis 60 °C ein und gilt für Umgebungsdrücke von 0,8 bis 1,1 bar. Nach EN 60079-0 sollen elektrische Betriebsmittel auf Umgebungstemperaturen von -20 °C bis 40 °C beschränkt werden. Insbesondere Umgebungstemperaturen von -20 °C können in vielen Gegenden, in denen Erdöl und Erdgas gefördert werden, auftreten, so dass der Wunsch besteht, auch Umgebungstemperaturen bis zu -40 °C zu bescheinigen. Voraussetzung ist, dass alle Materialien für diese Temperaturen auch geeignet sind. In der Druckfesten Kapselung „d“ muss bei der Ermittlung des Bezugsdruckes die niedrige Temperatur herangezogen werden, da bei niedrigen Temperaturen mehr brennbares Gas auch einen höheren Druck zur Folge hat. Insbesondere Kunststoffe und Dichtungen müssen entsprechend geprüft werden. Dabei sollte auch nicht übersehen werden, dass nicht unmittelbar zu bescheinigende Bestandteile beurteilt werden müssen (Wicklungsmaterialien, Schmierstoffe,...). Durch die Verwendung von Stillstandsheizungen können die extremen Minustemperaturen für die Maschine zumindest teilweise verhindert werden.

Üblicherweise werden die elektrischen Maschinen für Umgebungstemperaturen bis 40 °C ausgelegt. Soll die Umgebungstemperatur erhöht werden muss die Auswertung der Dauerbetriebserwärmungen an die erhöhte Temperatur angepasst werden, damit die Grenztemperaturen der Temperaturklasse aber auch die der Wärmeklasse eingehalten werden.

Üblicherweise werden die Prüfungen der elektrischen Maschinen bei Raumtemperaturen von 15 °C bis 25 °C durchgeführt und dann auf die maximale Umgebungstemperatur linear hochgerechnet. Bei näherer Betrachtung der physikalischen Vorgänge wird jedoch der Widerstand der Ständerwicklung zunehmen und damit auch die Stromwärmeverluste der Ständerwicklung. Dadurch wird sich der Spannungsabfall über der Wicklung erhöhen, so dass sich die innere Spannung (EMK) reduziert. Dies führt wiederum zur Vergrößerung des Schlupfes und damit zur Erhöhung der Verluste im Rotor. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Kühlwirkung der Maschine mit steigender Umgebungstemperatur abnehmen wird.

Eine Möglichkeit die erhöhte Umgebungstemperatur abzuschätzen, ist die Umrechnung der Temperatur auf einen geringeren Umgebungsdruck, um dadurch entsprechend der EN 60034 einen Abschlag für die Grenztemperatur zu bestimmen. Eine Hochrechnung der Temperatur um z.B. 50 K (Differenz zwischen Temperatur während der Messung und maximaler Umgebungstemperatur) entspricht in etwa einer Aufstellungshöhe von 1400 m im Vergleich zu Normalnull.

Die Temperaturzunahme im Ständer und Rotor wird bei Umgebungstemperaturen bis 40 °C nicht betrachtet, da die tatsächliche Temperatur bei der Messung nur ca. 20 K beträgt. Für

zunehmende Differenzen zwischen Raumtemperatur während der Messung und der maximalen Umgebungstemperatur sollte eine nähere Betrachtung durchgeführt werden.

Die Eingrenzung des Umgebungsdruckes auf 0,8 bar entspricht in etwa einer Aufstellungshöhe von 2000 m über NN. Die EN 60034 lässt eine Aufstellungshöhe von 1000 m zu. Darüber hinaus muss pro 100 m ein Abschlag der Grenztemperaturen von 1 % berücksichtigt werden, aufgrund der geringeren Kühlung der Maschine durch die dünnere Luft in großen Höhen. Die Anforderung wird auf explosionsgeschützte Antriebe z.B. bei der Zündschutzart „e“ wie folgt übertragen:

Die Dauerbetriebserwärmungen im Ständer und Läufer sowie am Gehäuse und Anschlusskasten werden wie üblich ermittelt (siehe Kap. 3.2.2.1). Danach erfolgt ein Zuschlag von 1 % je 100 m Höhenzunahme ab 1000 m zu den gemessenen Übertemperaturen. Diese Werte gelten als Grundlage für die weitere Auswertung. Die maximale Aufstellungshöhe wird in der Bescheinigung vermerkt und das Leistungsschild muss darauf hinweisen.

Entsprechende Überlegungen gelten auch für alle weiteren Bestandteile und Anbauteile, die thermisch beeinflusst werden (Dichtungen, Kunststoffteile). Dabei kann die Wärmebeständigkeit der Anschlussleitungen als zusätzliches Problem auftreten. Bei Bemessungsbetrieb dürfen folgende Temperaturen nicht überschritten werden:

- 70 °C an der Einführungsstelle
- 80 °C an der Aderverzweigung

Können die Grenztemperaturen nicht eingehalten werden, so ist durch ein Zusatzschild mit dem Hinweis der Verwendung von wärmebeständigen Kabeln und Leitungen darauf hinzuweisen. Entsprechendes ist in der Zulassung dokumentiert.

Motoren mit Kreislaufkühlung können auch durch Wasser gekühlt werden, so dass sie von der maximalen Umgebungstemperatur nur indirekt betroffen sind. Für die maximale Wassertemperatur ist eine Temperatur von 25 °C üblich und sie darf 5 °C nicht unterschreiten. Darüber hinaus wird die Wassermenge angegeben. Zur Sicherstellung der Kühlung ist die Kühlwassermenge im Rücklauf oder die Innenkühllufttemperatur zu überwachen.

Besonders Motoren die für Pumpen eingesetzt werden, können weitergehende Beschränkungen der Betriebsbedingungen unterliegen. Zum einen ist es möglich, dass die Pumpe als Tauchpumpe betrieben wird, so dass die maximale Temperatur des Fördermediums ausschlaggebend sein kann. Ferner ist das thermische Verhalten der Maschine zu bestimmen, wenn das Medium und damit die Kühlung fehlt, oder es muss sichergestellt sein, dass der Antrieb ausschließlich eingetaucht betrieben wird. Zum anderen kann eine Pumpe ein Medium mit hoher Temperatur fördern. Ist der Motor von der Pumpe thermisch nicht ausreichend isoliert, so entsteht ein Wärmefluss über die Welle zum Motor hin, wenn die Pumpe wärmer ist als der Motor. In diesem Fall ist eine maximale Temperatur des Fördermediums festzulegen.

### 3.4.2 Betrieb mit besonderen Anlaufverhältnissen

#### Schweranlauf

Die Anlaufzeit der elektrischen Antriebe hängt von der Schwungmasse des gesamten Antriebes (z.B. Rotor, Getriebe, Kompressor) ab und ist in der Regel bei der Typprüfung nicht bekannt. Von einem Schweranlauf wird gesprochen, wenn eine für normale Bedingungen passend ausgewählte Überstromschutzeinrichtung bereits während der Hochlaufzeit  $t_H$  den Motor abschaltet. Dies ist bei Maschinen der Zündschutzart „e“ im Allgemeinen der Fall, wenn

$$t_H > 1,7 t_E$$

ist. Zunächst sollte durch die Auslegung des Motors der Schweranlauf vermieden werden. Ist dies nicht möglich, erscheint der Mehraufwand für die Schutzeinrichtung, die den Schweranlauf integriert, gerechtfertigt. Dabei kann noch prinzipiell unterschieden werden, ob der Hochlauf bei kalter oder betriebswarmer Maschine vorgesehen ist. Grundlage für die Zulassung des Schweranlaufs ist weiterhin die Grenztemperatur der Temperaturklasse.

Wenn die Überstromschutzeinrichtung den Motor während des Hochlaufs bereits abschaltet, muss sie für den Zeitraum überbrückt werden. Um weiterhin den Explosionsschutz sicherstellen zu können, muss eine andere Maßnahme getroffen werden. Dazu eignet sich wiederum der Anlaufstrom oder die Drehzahl. Es muss zu der Zeit  $t_E$  eine dem ungestörten Hochlauf entsprechende Drehzahl erreicht bzw. der Anzugsstrom auf einen entsprechenden Wert abgeklungen sein. Ansonsten muss sofort abgeschaltet werden.

Damit die Maschine für den Schweranlauf ausgelegt werden kann, müssen die thermischen Verhältnisse während des Anlaufes bestimmt werden und für die Zulassung dokumentiert sein. Für eine Berechnung eignen sich folgende Ansätze für den Ständer und den Rotor. Die Hochlaufzeit ergibt sich nach

$$t_H = 10,5 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot \frac{J}{M_M - M_L}$$

mit  $J$  = Gesamtes Massenträgheitsmoment in  $\text{kg cm}^2$

$M_M$  = Anzugsmoment des Motors in  $\text{Nm}$

$M_L$  = Gegenmoment der Last in  $\text{Nm}$

$n$  = Enddrehzahl des Motors in  $1/\text{min}^{-1}$ .

Für die Berechnung der Erwärmung der Ständerwicklung wird zur Vereinfachung der Anzugsstrom zugrunde gelegt:

$$\Theta_{ST} = 0,0065 \cdot S^2 \cdot t_H \cdot b$$

mit  $S$  = Stromdichte in  $\text{A}/\text{mm}^2$ . Je nach Drahtquerschnitt und Isolationsaufbau variiert die Wärmeabgabe. Untersuchungen haben eine Reduzierung von mindestens 15 % ergeben. Entsprechend ergibt sich ein Faktor  $b = 0,85$ .

Beim Anlauf ohne wesentliches Gegenmoment ist die im Rotorkäfig entwickelte Wärmemenge gleich der kinetischen Energie der rotierenden Massen am Ende des Hochlaufs. Die Energie berechnet sich nach

$$W_{Kin} = W_{Th} = 548,3 \cdot 10^{-9} \cdot J \cdot n^2$$

Aus der thermischen Energie  $W_{Th}$  (in Ws) folgt die Hochlauferwärmung des Rotors nach

$$\Theta_R = \frac{W_{Th}}{m \cdot c}$$

mit  $m$  = Gewicht des Käfigs in kg

$c$  = spezifische Wärmekapazität in Ws/(kg\*K).

Bei der Auswertung der Erwärmungen ist stets zu bedenken, dass auch während des Hochlaufes der Rotor blockieren kann. In Ausnahmefällen sind mehrere Überwachungskontrollen für z.B. verschiedene Drehzahlen vorzusehen, damit der Antrieb auch sicher anlaufen kann.

Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen ist es zu vertreten, dass beim Schweranlauf die normalen Dauerbetriebserwärmungen überschritten werden dürfen. Sie sollten jedoch mit Rücksicht auf die Lebensdauer der Maschine nicht zu hoch sein und nicht an die Grenztemperaturen für den blockierten Läufer heranreichen. Ebenso sollten auch die Grenztemperaturen für den Rotor aus mechanischen Gründen maximal auf die Temperaturklasse T2 beschränkt werden.

### **Umschaltbare Motoren (Polumschaltbar, Stern/Dreieck)**

Zur Verbesserung des Anlaufverhaltens oder um gezielt unterschiedliche Drehzahlen zu erzeugen, können Asynchronmaschinen umschaltbar ausgeführt werden oder sind mit entsprechenden Anzapfungen versehen. Die Variationsmöglichkeit kann sich auch auf die Erwärmung der Maschine und damit auf den Explosionsschutz auswirken und muss verifiziert werden.

Für polumschaltbare Motoren der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ muss auch bei einem Störfall die Auswirkung der unterschiedlichen Erwärmungen berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass angenommen werden muss, der Motor hätte in einer Drehzahlstufe seine Enderwärmung erreicht, wird auf eine andere Drehzahlstufe umgeschaltet und blockiert unmittelbar. Der ungünstigste Fall tritt auf, wenn im Augenblick einer Störung sowohl in der Ständerwicklung als auch im Läufer die höchstmöglichen Erwärmungen vorhanden sind. Für die Auswertung der Zeiten  $t_E$  werden daher die höchsten Erwärmungen herangezogen. Nach der Ermittlung der Zeiten  $t_E$  muss die Eignung des Überwachungsgerätes geklärt werden. Weichen die bestimmten Parameter nur geringfügig voneinander ab, kann die Überwachung durch ein Gerät sichergestellt werden. Ansonsten muss für jede Polpaarzahl ein eigenes Überwachungsgerät verwendet werden.

Gleichbedeutend der polumschaltbaren Maschine kann bei Stern/Dreieck-Umschaltung verfahren werden. Beim Stern/Dreieck-Anlauf muss das Schutzrelais in die Wicklungsstränge geschaltet werden und ist auf den 0,58-fachen Bemessungsstrom vom Motor einzustellen.

Sofern bei der Spannungsumschaltung die Induktionen und Querschnittsbelastungen gleich bleiben, ist eine neue Typenprüfung nicht erforderlich.

## **Sanftanlasser**

Im Gegensatz zu umrichter gespeisten Antrieben werden Sanftanlasser ausschließlich zum Anfahren des Antriebes verwendet und beim Erreichen der Bemessungsdrehzahl überbrückt. Explosionsgeschützte Antriebe können auch durch Sanftanlasser gestartet werden. Dazu muss jedoch der Nachweis erbracht werden, dass keine unzulässig hohe Erwärmung auftreten kann. Bei der Beurteilung ist das Verhältnis der Zeit  $t_E$  und der Hochlaufzeit des Motors von Bedeutung. Muss der Sanftanlasser Sicherheitsfunktion eines Überstromauslösegerätes übernehmen, gelten die Bestimmungen der Richtlinie für Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen.

Elektrische Maschinen der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“, deren thermische Überwachung durch den Überstrom sichergestellt ist, müssen bei Verwendung von Sanftanlasser auch für den Fehlerfall des blockierten Läufers verifiziert werden.

### **3.4.3 Verschiedene Maschinentypen**

#### **3.4.3.1 Motoren mit angebaute Arbeitsmaschine**

Die Zulassung von explosionsgeschützten Maschinen schränkt üblicherweise den Einsatzgebrauch für verschiedenste Arbeitsmaschinen nicht ein. Häufig steht die explizite Anwendung bei der Typprüfung nicht fest, so dass entsprechende Anforderungen nicht betrachtet werden können. Des Weiteren ist der Hersteller von elektrischen Maschinen in der Regel nicht auch der Hersteller der Arbeitsmaschine. Die Ausnahmen bilden die Hersteller von Getriebemotoren, Lüftermotoren sowie von Pumpenaggregaten. Bei der gemeinsamen elektrisch-thermischen Prüfung muss der Wärmezufluss zwischen Motor und Arbeitsmaschine betrachtet werden (Beispiel Motor und Pumpe siehe Abs. 3.4.5).

## **Getriebemotor**

Bei Getriebemotoren ist das Getriebe ein unmittelbarer Bestandteil des Motors und es wäre nicht zweckmäßig, die Einheit für die Prüfung zu trennen. Die Getriebeverluste gehen dabei sowohl in die thermischen als auch in die elektrischen Messergebnisse ein. Auf dem Leistungsschild werden die Leistung an der Arbeitswelle und die Abtriebsdrehzahl angegeben. Das Getriebe muss entsprechend der Richtlinie 94/9/EG hinsichtlich der Zündgefahren bewertet werden. Diese Bewertung ist vollständig separat vom Hersteller durchzuführen (für die Kategorie 2) und ist nicht Bestandteil der eigentlichen Zulassung durch die benannte Stelle. Demnach erhält das Getriebe auch eine eigene Kennzeichnung [8]. Bei der Dauerbetriebserwärmung wird die Temperatur des Getriebes zur Vervollständigung trotzdem erfasst.

Getriebemotoren, die durch Auswechseln des Getriebes modular einsetzbar sein sollen, können hierfür bescheinigt werden. Ein entsprechender Hinweis für die Verwendung ist in der Zulassung aufzuführen. Die Verlustleistung des Getriebes muss entsprechend festgelegt werden, um einen Wärmefluss in den Motor zu verhindern.

## **Lüftermotor**

Der Lüftermotor wird durch den Luftstrom gekühlt, der durch das Lüfterrad hervorgerufen wird, welcher als Arbeitsmaschine anzusehen ist. Bei Lüftermotoren wird die elektrische Leistungsaufnahme in der Zulassung spezifiziert, da die mechanische Leistung an der Welle nicht direkt bestimmt wird. Die mechanische Leistung ist vom Drehzahl-Drehmomentverlauf abhängig.

Die mechanische Ausführung des Lüfterrades muss getrennt durch den Hersteller hinsichtlich der Zündgefahren bewertet werden. So müssen z.B. Reib- und Schlagfunken verhindert werden, die durch das Eindringen von Fremdkörpern entstehen können. Weitere Anhaltspunkte können dem Bericht W-15 der PTB (Explosionsschutz an Ventilatoren) oder der EN 14986 entnommen werden [46, 47].

Zur Bestimmung der maximalen Dauerbetriebserwärmung des Motors muss zunächst die Ausführungsvariante und der Stellbereich betrachtet werden. Axiallüfter haben z.B. die maximale Leistungsaufnahme und Erwärmung bei teilweiser oder vollständiger Verschließung des Abluftkanals. Die gehemmte Lüftströmung vermindert auch die Kühlung des Motors. Hierdurch wird auch der Störfall des Verstopfens des Zuluft- oder Abluftkanals berücksichtigt. Bei der Verwendung von Radiallüftern wird die max. Leistungsaufnahme des Motors bei größtem Luftdurchtritt erreicht. Es ist auf jeden Fall der Nachweis zu erbringen, unter welchen Betriebsbedingungen die niedrigste Drehzahl und damit der höchste Strom sowie die schlechteste Kühlung zur höchsten Erwärmung des Lüfters führen.

Um die Luftmenge zu steuern, werden für die Lüfterantriebe Steller oder regelbare Transformatoren verwendet. Zur Bestimmung der maximalen Temperaturen ist zunächst die Abhängigkeit der Bemessungsgrößen von der Stellspannung zu bestimmen, die sich bei der grundsätzlich ungünstigsten Belastungsart ergibt, wie bereits zuvor erläutert. Die höchste Erwärmung ergibt sich beim Strommaximum.

Zum Nachweis einer erforderlichen Strömung sind Strömungswächter oder Druckwächter geeignet, die auch Bestandteil der Auslegung und Zulassung sein können. Ansonsten wird der Lüftermotor im herkömmlichen Sinne durch Überstromschutzeinrichtungen oder Kaltleiter geschützt.

Wird der Lüftermotor durch die eigentliche Förderluft gekühlt, gilt die Temperatur der Förderluft als Umgebungstemperatur für den Motor. Für solche Ausführungen sind die Eintrittstemperaturen potentieller Abgase mit hohen Temperaturen zu beschränken.

## **Pumpenmotor**

Ist der Motor mit der Pumpe als Einheit zu sehen, so ist die elektrisch-thermische Prüfung praktischerweise auch in Kombination vorzunehmen. Wiederum ist die Zündgefahrenbewertung des mechanischen Teils nicht Bestandteil der eigentlichen Zulassung. Sie muss getrennt vom Hersteller durchgeführt werden (für Kategorie 2).

Häufig wird der Pumpenantrieb durch das Fördermedium gekühlt. Daher ist bei Messung der Dauerbetriebserwärmungen zu berücksichtigen, ob der Pumpenantrieb im Fördermedium steht oder nur das Medium fördert. Die Eignung des Leerlaufens (d.h. ohne Fördermedium) muss nachgewiesen werden. Ebenso ist die maximale Fördermediumstemperatur



anzugeben, damit kein ungewollter Wärmefluss von der Pumpe zum Motor möglich ist (siehe auch 3.4.5).

In der Zulassung wird die maximale Leistungsaufnahme des Motors festgelegt. Bei der Typprüfung ist die Pumpe mit dem vorgesehenen Fördermedium so zu belasten, dass die Bemessungsdaten des Motors erreicht werden. Die Überprüfung der Einhaltung der vom Hersteller angegebenen Betriebsdaten der Pumpe ist für die Zulassung nicht vorgesehen.

Ist der Pumpenantrieb für die Kühlung auf das Medium angewiesen, kann dies durch eine entsprechende Füllstandsüberwachung sichergestellt werden. Ein entsprechender Vermerk in der Bescheinigung weist darauf hin.

### **3.4.3.2 Synchronmotoren und -generatoren**

Synchronmaschinen finden auch in explosionsgefährdeten Bereichen ihre Anwendung, z.B. als Verdichter oder Extruderantriebe in der chemischen Industrie. Die Ausführung der Synchronmaschine und somit auch die Erregungsart hängt sehr stark vom Verwendungszweck ab.

Direkterregte Synchronmaschinen werden vorwiegend als Generatoren verwendet und benötigen zwei Schleifringe, die als funkende Teile im explosionsgefährdeten Bereich der Zone 1 in einem Gehäuse in den Zündschutzarten Überdruckkapselung „p“ oder Druckfeste Kapselung „d“ ausgeführt werden können.

Permanenterregte Synchronmaschinen werden häufig als Servomotor oder Schrittmotor bei kleiner Baugröße für Positionierantriebe verwendet. Sie werden üblicherweise über Steuergeräte oder Umrichter im gesamten Stellbereich mit konstantem Moment betrieben. Durch den großen Drehzahlbereich (auch mit der Drehzahl 0, halten) erfolgt die Kühlung durch Konvektion an der Oberfläche und ist damit von der Drehzahl nahezu unabhängig. Der anzunehmende Fehlerfall des blockierten Läufers kann hierbei zum normalen Betriebszustand werden, ohne dass die Überwachungseinrichtung auslöst. Der Strom wird durch das Steuergerät begrenzt. Entsprechend dem Grenzstrom des Steuergerätes muss ein sicheres Abschalten durch die Überwachungseinrichtung gewährleistet sein.

Bürstenlos-fremderregte Synchronmaschinen werden als Motor und als Generator eingesetzt. Hierbei wird die Erregerenergie induktiv vom Erregerständer auf die rotierende Erregerläuferwicklung übertragen. Durch mitdrehende Dioden wird die Erregerspannung für die Läuferwicklung gleichgerichtet. Bei der Verwendung von Halbleitern in der Kategorie 2 muss auch der Ausfall der Diode berücksichtigt werden. Da die Einhaltung der Temperaturklasse nur mit zusätzlicher Überwachung sichergestellt werden kann, sind die Dioden nicht in der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ ausgeführt. Alternativ befinden sich die Dioden innerhalb eines Gehäuses einer anderen Zündschutzart, häufig der Druckfesten Kapselung „d“. Die Anforderungen für die Kategorie 3 reduzieren sich auf den sicheren Betrieb. Daher ist der elektrisch-thermische Nachweis für den Dauerbetrieb zu erbringen.

Zur Ermittlung der Dauerbetriebserwärmungen bei Synchronmaschinen großer Leistung stehen verschiedene erprobte Verfahren zur Verfügung, die entsprechend der EN 61986 Abs. 7 durchgeführt werden [48]. Für die Bestimmung der Temperaturklassen ist die Erwärmung und Auswertung sämtlicher Wicklungen zu bestimmen und vorzunehmen. Die

benötigte Antriebsleistung für das Überlagerungsverfahren beträgt nur wenige Prozent der Bemessungsleistung.

Bei direkterregten und fremderregten Maschinen ist auch ein Betrieb als Phasenschieber am Netz möglich, wobei der Prüfling ungekuppelt und übererregt betrieben wird, EN 61986 Abs. 11.

Synchronmaschinen mit asynchronem Hochlauf durch einen Anlaufkäfig oder zur Dämpfung von Schwankungen müssen analog einer Asynchronmaschine betrachtet werden (d.h. Bestimmung der Kurzschlusswärme bei blockiertem Läufer). Nach dem „in Tritt fallen“ des Läufers wird im Anlauf- oder Dämpferkäfig nur noch ein kleiner Strom durch dynamische Lastwechsel oder Unsymmetrien induziert. Zur Begrenzung der Übertemperaturen kann auch eine Drehzahlüberwachung verwendet werden.

Für Synchronmaschinen gelten prinzipiell die identischen sicherheitstechnischen Anforderungen wie bei Asynchronmaschinen. Für Geräte der Kategorie 2 muss auch der erste Fehlerfall berücksichtigt werden. Bei Synchronmotoren besteht z.B. die Gefahr, dass der Läufer bei dynamischer Überlastung „außer Tritt“ fällt, ohne dass eine Überstromüberwachung bei Teillast zwangsläufig ansprechen würde. Bei der Festlegung der Schutzprinzipien ist das Betriebsverhalten bezüglich der Betriebsweise und Erregungsart zu berücksichtigen. So ist zu unterscheiden, ob die Maschine am Netz oder Umrichter läuft, ob als Motor oder Generator, ob im Inselbetrieb oder Parallelbetrieb und wie ein möglicher Reglerfehler in die Erregung eingreifen würde. Für einen Generator im Inselbetrieb mit Regler könnte als Fehlerquelle eine Drehzahlabenkung des Antriebes und damit eine Frequenzabsenkung oder eine Unterbrechung der Spannungserfassung einer Übererregung des Läufers mit einer Überspannung im Ständer auftreten. Bei einem Generator im Inselbetrieb kann ein in die Zuleitung geschalteter Überstromschutz einen möglichen Klemmenkurzschluss am Generator nicht erkennen. Entsprechende zusätzliche Schutzmaßnahmen sind zu ergreifen.

Um undefinierte elektrische Potenziale zu verhindern, ist die Läuferwicklung oder evt. der Sternpunkt der Erregerläuferwicklung zu erden.

### **3.4.3.3 Klein- und Kleinstmotoren, Einphasenmotoren**

Kleinmotoren mit Leistungen bis zu einigen Kilowatt weisen in elektrisch/thermischer Hinsicht oft ein abweichendes Verhalten gegenüber Motoren mit mittlerer und großer Leistung auf. Bezüglich der thermischen Überwachung durch Überstrommotorschutzschalter ist als kritisch einzustufen, wenn der Leerlaufstrom nur geringfügig kleiner als der Bemessungsstrom ist ( $I_0/I_N > 0,7$ ). Solche Motoren können einen fast waagerechten Verlauf der Belastungskennlinie  $I = f(P_2)$  aufweisen. Das bedeutet, dass ein solcher Motor bei Überlast eine lediglich geringfügige Erhöhung des Stromes aufnimmt. Gleichzeitig steigt aber durch den zunehmenden Schlupf die Rotortemperatur. Die zunehmende Rotortemperatur zeigt auch eine Rückwirkung auf die Erwärmung des Ständers. Durch die Verwendung von Kaltleitern in der Ständerwicklung ist das Problem eingrenzbar.

Um den Anforderungen des Explosionsschutzes genüge zu tun, muss neben der Dauerbetriebstemperatur und der Stillstandserwärmung bei Maschinen der Zündschutzart „e“ auch ein Überlastversuch bis zum Ansprechen der Stromüberwachungseinrichtung gefahren werden. Entsprechendes ist auch bei Kaltleitern zu empfehlen, wenn keine

eindeutige Aussage getroffen werden kann. Als praxisnah hat sich ein Überlastlauf bei 1,15-fachem Bemessungsstrom etabliert. Die Grenztemperaturen der Temperaturklasse dürfen nicht überschritten werden.

Als spezielle Ausführung eines Antriebes kann auch der Einphasenmotor im Explosionsschutz verwendet werden. Der für die Beschaltung notwendige Kondensator muss mit einer eigenen Bescheinigung versehen werden oder entsprechend gekapselt sein. Neben der üblichen Dauerbetriebserwärmung ist eine Überprüfung der Erwärmung bei Leerlauf notwendig, da hierbei in der Hilfsphase und evt. im Läuferkäfig die höchsten Erwärmungen zu erwarten sind. Die Grenztemperatur der Isolierstoffklasse darf auch im Leerlauf nicht überschritten werden. Falls wiederum  $I_0/I_N > 0,7$  gegeben ist, sind die oben aufgeführten Anforderungen einzuhalten. Mit Rücksicht auf den Strom in der Hilfsphase und die damit zusammenhängende Erwärmung darf die Toleranz der Kapazität nicht mehr als 5 % betragen. Weitergehende Toleranzen müssen ansonsten bei der Typprüfung berücksichtigt werden.

#### **3.4.4 Risikobewertung der Ständer- und Rotorzündgefahren**

Basierend auf Explosionen insbesondere in der petrochemischen Industrie in den 80-er Jahren, für die als wahrscheinlichste Zündquelle die elektrische Maschine herangezogen wurde, entstand ein Bewertungskonzept, um die Zündgefahren durch elektrische Entladungen der Ständerwicklung und im Rotorkäfig zu bewerten. Die Ergebnisse wurden in die ENV 50269:1997 eingearbeitet und als Vornorm ohne Rechtsverbindlichkeit veröffentlicht. Die Vornorm galt für alle Arten von Hochspannungsmaschinen in explosionsgefährdeten Bereichen [49].

Zunächst bestand der Wunsch, dass entsprechende Erfahrungen gesammelt werden können, bevor die Anforderungen Bestandteil der harmonisierten Normen der Richtlinie 94/9/EG werden. Verbindliche Anforderungen an die Bewertung und Prüfung sind erstmalig in der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ durch die IEC 60079-7 3rd Edition gestellt worden, die jedoch in einigen Punkten abweichend von den Anforderungen der ENV 50269 sind. Durch das „Parallel Voting“ ist diese Norm inhaltlich gleich in die EN 60079-7 überführt worden. In der folgenden Ausführung wird Bezug genommen auf die EN 60079-7:2003.

Die Anforderungen unterteilen sich in eine Bewertung der Zündgefahren des Isolationssystems der Ständerwicklung und der Funkenbildung im Luftspalt bei Käfigläufern. Als Typprüfung ist vorgesehen, die Maschine oder ein geeignetes Modell unter explosionsfähigem Gasgemisch ( $21 \pm 5$  % Wasserstoff in Luft Volumenprozent) zu prüfen.

Für die Ständerwicklung wird ab einer Bemessungsspannung von 6 kV eine Typprüfung unter brennbarem Gas durchgeführt. Die Prüfung erfolgt an einem vollständigen Ständer oder an einem teilweise bewickelten, bestehend aus einer Gruppe von Spulen. Die Nachbildung der Ständerwicklung muss auf jeden Fall repräsentativ sein und die tatsächlichen Feldverhältnisse (Phase-Phase, Phase-Erde) widerspiegeln. Dies beinhaltet auch die Zuführung vom Anschlusskasten zum Wickelkopf. Die geprüfte Ausführung gilt als Mindestauslegung für das elektrische Feld, es dürfen keine höheren Feldstärken verwendet werden. Die Prüfung der Ständerwicklung erfolgt zunächst für eine sinusförmige Spannung bis zum 1,5-fachen Effektivwert der jeweiligen Netzspannung für eine Dauer von 3 min.

Zur Nachbildung von schaltungstechnisch bedingten Überspannungen (z.B. durch GIS oder Vakuumschalter) wird die Ständerwicklung anschließend 10-mal mit einem Spannungsschoss

beaufschlagt ( $0,2 \mu\text{s}$  -  $0,5 \mu\text{s}$  Spannungsanstiegszeit und einer Halbwertszeit von  $20 \mu\text{s}$  –  $30 \mu\text{s}$ ). Insbesondere die hochfrequenten Anteile des Spannungspulses können die Zündung des explosionsfähigen Gasgemisches hervorrufen.

Zusätzlich zur Typprüfung des Ständers im explosionsfähigen Gasgemisch wird das Zündrisiko anhand von Faktoren bewertet. Gilt das Zündrisiko als hoch muss für den elektrischen Motor eine Stillstands- oder Antikondensationsheizung sowie ein Vorspülsystem oder Gasdetektoren angebracht werden, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu minimieren und zu verhindern, dass während des Anlaufs brennbares Gas im Inneren der Maschine ist. Das Ergebnis der Zündrisikobewertung und die damit einhergehende Festlegung muss Bestandteil der Dokumentation (Betriebsanleitung) der Maschine sein. Mit der nächsten Ausgabe der EN 60079-7 4th Edition wird eine Prüfung verbindlich ab einer Bemessungsspannung  $> 1 \text{ kV}$  sein und die Bewertungstabelle wird nicht mehr relevant sein.

Die Risikobewertung des Rotors erfolgt hinsichtlich möglicher Funkenbildung im Luftspalt bei Käfigläufern. Gilt das Zündrisiko als hoch, muss die Maschine oder ein repräsentatives Muster im explosionsfähigen Gasgemisch geprüft werden. Dazu wird der Prüfling zunächst einem Alterungsprozess unterzogen, der wenigstens 5 Einschaltungen bei blockiertem Läufer umfasst. Die höchste Temperatur des Käfigs muss dabei zwischen der höchsten Temperatur (üblicherweise  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  für T2) und einer Temperatur unter  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  pendeln. Die Rotorstäbe müssen fest in den Nuten sitzen, um Funkenbildung im Luftspalt zu vermeiden. Dies kann durch Verstemmen der Stäbe erreicht werden. Der Alterungsprozess soll ein mögliches Lösen nachbilden, bedingt durch die unterschiedliche Wärmeausdehnung zwischen dem Kupferstab und Blechpaket. Nach dem Alterungsprozess werden 10 Direkteinschaltungen im nicht gekuppelten Zustand oder mit blockiertem Läufer der Maschine im explosionsfähigen Gasgemisch durchgeführt. Die Mindestdauer pro Einschaltung beträgt 1 s bei einem maximalen Absinken der Prüfspannung auf 90 % der Bemessungsspannung, was den prüfbaren Leistungsbereich in vielen Fällen einschränken kann. Verschiedene Messungen haben gezeigt, dass insbesondere der Hochlauf der Maschine als sehr kritisch einzuschätzen ist.

Alternativ zur Typprüfung können Maßnahmen ergriffen werden, die ein Anlaufen der Maschine bei Vorhandensein von explosionsfähigem Gasgemisch ausschließt.

In der Zündschutzart „n“ nach EN 60079-15:2003 verweist eine Anmerkung auf die ENV 50269, wobei die Anforderungen erfüllt werden sollten. In der folgenden IEC-Ausgabe sind die Anforderungen integriert und können somit als „Stand der Technik“ bezeichnet werden.

### **3.4.5 Kombination (Zusammenbau) von Motor und Pumpe**

Die Richtlinie 94/9/EG sieht für die Kategorie 2 vor, den Motor einer Konformitätsbewertung unter der Verantwortung einer benannten Stelle zu unterziehen. Mechanische Geräte wie Pumpen oder Getriebe werden hingegen in Verantwortung des Herstellers der Konformitätsbewertung unterzogen. Der Anbau des Motors an ein entsprechendes mechanisches Gerät muss unter Umständen mittels einer weiteren Konformitätsbewertung hinsichtlich weiterer Zündgefahren durch den Inverkehrbringer der Baugruppe oder den Betreiber beurteilt werden. Der Leitfaden zur Richtlinie stellt hierfür als Beispiel die Kombination eines Motors mit einer Pumpe zur Verfügung. Folgende Anwendungsbeispiele werden aufgeführt:

- 1) Motor und Pumpe können nicht separat beurteilt werden: Die Kombination wird dem Konformitätsbewertungsverfahren elektrischer Betriebsmittel unterzogen. Üblicherweise stellt der Hersteller beide Geräte der Baugruppe her (siehe 3.4.3.1)
- 2a) Motor und Pumpe können separat beurteilt werden: Entstehen keine weiteren Zündgefahren, fällt die Einheit nicht unter den Scope der Richtlinie; es entsteht eine Einheit aus zwei individuellen Geräten, die eine getrennte Konformitätserklärung vorweisen
- 2b) Hersteller der Baugruppe möchte im Gegensatz zu 2a) eine zusammenfassende Konformitätserklärung abgeben: Verpflichtung, eine Zündgefahrenbewertung hinsichtlich der ESHR (Grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen) durchzuführen;
  - => Erstellung der Dokumentation, CE-Kennzeichnung und Konformitätserklärung
  - Hersteller trägt die volle Verantwortung, Drittzertifizierung nicht notwendig
- 2c) Zusätzliche Zündgefahren durch Kombination oder ein Bauteil ist nicht in voller Übereinstimmung mit der Richtlinie: die Kombination muss dem vollständigen Konformitätsbewertungsverfahren unterzogen werden

In Abbildung 3.22 ist die Kombination von Motoren und Pumpen, die durch ihren jeweiligen Flansch verbunden sind, skizziert. Der Motor für sich gibt die Temperatur an die Umgebung, dem Aufstellungsuntergrund und über den Flansch sowie der Welle ab. Bei der Typprüfung wird davon ausgegangen, dass dem Motor keine Temperatur von Außen zugeführt wird, sondern dass der Motor seine Wärme abführen kann.

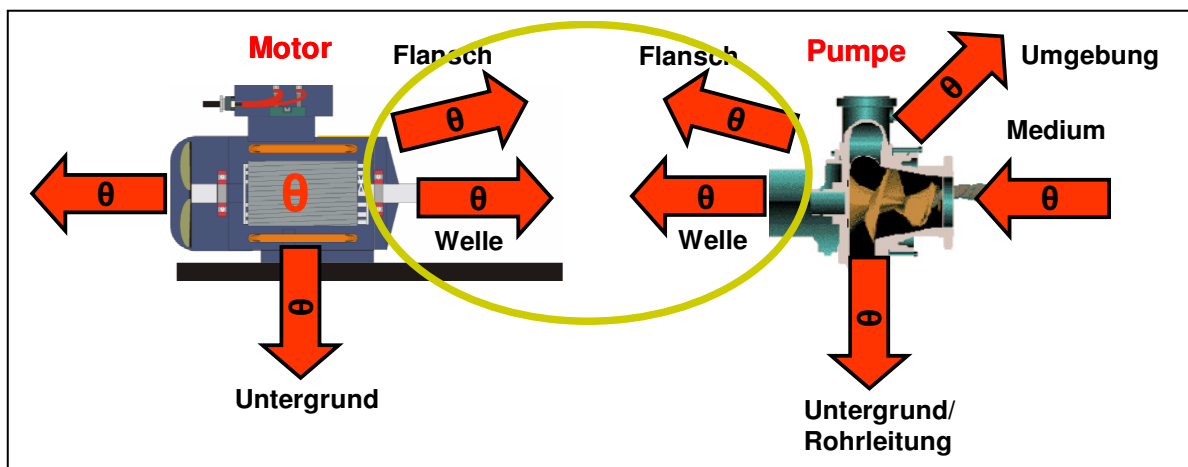


Abb. 3.22 Kombination eines elektrischen Motors mit einer Pumpe

Die Konformitätsbewertung der Pumpe hinsichtlich der Betriebstemperatur berücksichtigt, die Wärmeverluste der Pumpe an sich sowie die Temperatur des zu pumpenden Mediums. Hierbei kann die Pumpe durch das Medium gekühlt oder aufgeheizt werden. Die Wärmeabgabe erfolgt des Weiteren an die Umgebung, den Aufstellungsuntergrund, das Rohrleitungssystem und über den Flansch sowie die Welle.

Der Flansch und die Welle sind die Schnittstelle, die bei der Konformitätsbewertung berücksichtigt werden müssen. Hierbei stellt sich die Frage, inwieweit ein Wärmetransport von einem Gerät in das andere stattfinden darf. Um dem Hersteller der Pumpen und dem Betreiber die Konformitätsbewertung zu erleichtern, wurden generelle Grenzwerte zwischen den Interessengruppen vereinbart (siehe folgende Tabellen):

### **Maschinen in der Zündschutzart Druckfeste Kapselung „d“**

Temperaturklasse:	T3	T4	T5	T6
Max. Wellentemperatur:	100 °C	100 °C	85 °C	70 °C
Max. Flanschttemperatur:	100 °C	100 °C	85 °C	70 °C

- kein Umrichterbetrieb
- eigenbelüftet
- Baugröße 63 bis 200
- Motoren gemäß EN 50347
- Gilt für Umgebungstemperaturen von – 20 °C bis + 60 °C
- 2- und 4-polige Motoren

### **Maschinen in der Zündschutzart Druckfeste Kapselung „d“ bei Umrichterbetrieb**

Temperaturklasse:	T3	T4	T5	T6
Max. Wellentemperatur:	100 °C	100 °C	-*	-*
Max. Flanschttemperatur:	100 °C	100 °C	-*	-*

- Stellbereich von 10 Hz bis  $f_N$  ( $\leq 60$  Hz)
- eigenbelüftet
- Baugröße 63 bis 200
- Motoren gemäß EN 50347
- Gilt für Umgebungstemperaturen von – 20 °C bis + 60 °C
- 2- und 4-polige Motoren
- \* Einzelprüfung notwendig

### **Maschinen in der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ für Temperaturklasse T3**

Polpaarzahl:	2-polig	4-polig
Max. Wellentemperatur:	60 °C	75 °C
Max. Flanschttemperatur:	60 °C	75 °C

- kein Umrichterbetrieb
- eigenbelüftet
- Baugröße 63 bis 200
- Motoren gemäß EN 50347
- Gilt für Umgebungstemperaturen von – 20 °C bis + 40 °C

Der Wärmetransport zwischen Geräten kann durch eine thermische Isolierung unterbunden werden.

## 3.5 Berechnung elektrischer Maschinen

Für die Bewertung der Maschine sollten zunächst grundsätzlich Messergebnisse der elektrisch-thermischen Prüfung zugrunde gelegt werden, die den zu bescheinigenden Bemessungswerten entsprechen. Ist die Prüfung der Maschine mit Bemessungswerten nicht möglich, weil z.B. das Prüffeld nicht die notwendige Einspeisemöglichkeit hat, müssen entsprechende Berechnungsverfahren angewandt werden. Die Erfahrung bei der Prüfung von elektrischen Maschinen zeigt auch, dass bei geringfügigen Abweichungen der Bemessungsdaten von den Prüfdaten eine Umrechnung möglich ist.

### 3.5.1 Berechnung der Dauerbetriebserwärmung

#### Umrechnung auf Bemessungsleistung

Für die Berechnung der Dauerbetriebserwärmung sind verschiedene Ansätze möglich. Bei Maschinen kleinerer und mittlerer Leistung ist die Kapazität des Prüffeldes üblicherweise ausreichend, so dass die Abweichung von der zu bescheinigenden Bemessungsleistung gering ist (einige Prozent). Der Bemessungsstrom kann proportional umgerechnet werden oder ergibt sich aus der Belastungskurve der Maschine. Weiterhin besteht auch die Möglichkeit der Ergänzung auf eine abweichende Bemessungsleistung bei gleich bleibender Induktion. Die Grenzen für die Umrechnung auf Bemessungswerte sollten  $\pm 25\%$  der eigentlichen Prüfung nicht überschreiten und es müssen die Grenzen des Verhältnisses  $I_A/I_N$  mit der Auslösekennlinie eingehalten werden. Die Bemessungsdaten sind der Belastungskurve zu entnehmen. In Absatz 3.2.2.3 ist die Umrechnung der Dauerbetriebserwärmungen auf Bemessungswerte dargestellt, wie sie in der PTB üblicherweise verwendet werden. Bei der Umrechnung einer größeren Abweichung ( $> 15\%$ ) oberhalb der Prüfleistung sollte die Verlustaufteilung innerhalb der Maschine berücksichtigt werden. Sicherheitstechnisch unbedenklich ist eine quadratische Hochrechnung der Dauerbetriebstemperaturen.

Für Maschinen größerer Leistung reicht die Prüffeldkapazität häufig nicht aus. In diesen Fällen können Ersatzverfahren (Überlagerungsverfahren) angewendet werden, die in der EN 61986 beschrieben sind. Für Induktionsmaschinen wird z.B. die Genauigkeit der Übertemperaturen für das Überlagerungsverfahren Abs. 6 auf  $\pm 3\%$  geschätzt und sollte bei der Auswertung im Sinne des Explosionsschutzes berücksichtigt werden. Spezielle Berechnungsprogramme der Hersteller können verwendet werden, wenn deren Richtigkeit gegenüber der Prüfstelle dargestellt werden kann.

#### Frequenzumrechnungen 50 / 60 Hz

Basierend auf den Prüfergebnissen von 50 Hz kann eine elektrische Maschine ohne weitere experimentelle Typprüfung auf 60 Hz bei gleicher Leistung umgerechnet werden, da sowohl im Ständer als auch im Läufer mit geringeren Dauerbetriebserwärmungen bei 60 Hz zu rechnen ist. Damit weiterhin die gleichen Abschaltbedingungen gelten, müssen die Kurzschlussenergie und die Stromdichte konstant bleiben. Das wird durch die Anpassung der Spannung oder Windungszahl erreicht. Wird die Spannung angehoben ist zu

verifizieren, ob die ansteigenden Eisenverluste und damit einhergehenden Erwärmungen größer sind als die Summe aus abnehmender Stromwärme und verbesserter Kühlleistung.

Für die Umrechnung der Spannung bei gleicher Windungszahl gilt

$$\frac{U_{60}}{U_{50}} = \sqrt{\left(\frac{60}{50}\right)^2 - \left[\left(\frac{60}{50}\right)^2 - 1\right] \cdot \cos \varphi_{K50}} \approx \sqrt{60/50}$$

oder bei konstanter Spannung für die Windungszahl

$$\frac{w_{50}}{w_{60}} = \sqrt{\left(\frac{60}{50}\right)^2 - \left[\left(\frac{60}{50}\right)^2 - 1\right] \cdot \cos \varphi_{K50}} \approx \sqrt{60/50}$$

wobei der Nutzfüllfaktor konstant bleiben muss. Die überschlägige Vereinfachung gilt unter der Annahme, dass der  $\cos \varphi_{K50} = 0,7071$  ist. Voraussetzung für die Umrechnungen ist weiterhin, dass die Läuferstabformen keine wesentlichen Stromverdrängungsfaktoren erwarten lassen. Insbesondere bei läuferkritischen Maschinen ist dann eine Verifizierung notwendig.

Der Bemessungsschlupf ergibt sich aus dem Verhältnis

$$\frac{s_{60}}{s_{50}} \approx \frac{50}{60}$$

und das Anzugsverhältnis zu Bemessungsstrom aus

$$\frac{(I_A/I_N)_{60}}{(I_A/I_N)_{50}} \approx \sqrt{60/50}$$

Alle weiteren Bemessungsdaten lassen keine wesentliche Änderung erwarten. Sie werden ebenso wie die Erwärmungszeiten  $t_E$  übernommen. Stehen die 60 Hz Bemessungsdaten durch Messung zur Verfügung, sollten nur sie für die Bescheinigung herangezogen werden. Der Alleinschutz durch Kaltleiter kann auf dem beschriebenen Wege nicht übertragen werden.

Bei Motoren der Zündschutzart Druckfeste Kapselung sind lediglich die Dauerbetriebs-erwärmung und die Temperatur an der Gehäuseoberfläche relevant. Dadurch kann bei der Umrechnung auf einen konstanten Strom bezogen werden. Daraus folgt für die Umrechnung der 50 Hz Messung auf 60 Hz:

$$U_{60} = 1,1 \cdot U_{50}$$

$$P_{60} = 1,1 \cdot P_{50}$$

### 3.5.2 Berechnung der Kurzschluss erwärmung

#### Umrechnung auf Bemessungsspannung

Für Maschinen kleiner und mittlerer Leistung reichen die notwendigen Prüffeldkapazitäten üblicherweise aus, so dass eine Umrechnung auf die Bemessungsspannung nur innerhalb geringer Grenzen notwendig ist, weil z.B. nicht exakt die Bemessungsspannung für die Prüfung eingestellt werden konnte. Der Kurzschlussstrom kann proportional umgerechnet werden.



Die Kurzschlusswärmerung von Maschinen mit größerer Leistung kann häufig nur mit verminderter Prüfspannung durchgeführt werden. Für die Ermittlung der Erwärmung bei Bemessungsspannung muss der Kurzschlussstrom hochgerechnet werden. Der theoretische Verlauf des Kurzschlussstromes in Abhängigkeit der Spannung ist „S-förmig“. D.h. der Stromanstieg ist zunächst linear, steigt dann überproportional an und flacht im weiteren Verlauf wieder ab. Abhängig von der Auslegung der Maschine befindet sich der Bemessungspunkt im mittleren oder hinteren Teil des oben beschriebenen Verlaufs. Für die Berechnung ist es maßgeblich, bei welchen Teilspannungen die Messungen durchgeführt wurden und welcher Auslegung die Maschine genügt. Zur Berechnung sollen unterschiedliche Ansätze kurz erläutert werden (siehe auch Abs. 3.2.2):

- *Sättigungsfaktoren:* Der Anzugstrom kann im Verhältnis der Prüfspannung zur Bemessungsspannung durch Sättigungsfaktoren umgerechnet werden. Die Sättigungsfaktoren sind von der mechanischen und elektrischen Ausführung (z.B. offene oder geschlossene Läufernuten) der Maschine abhängig. Um verlässliche Faktoren heranziehen zu können, muss der Hersteller anhand eigener Untersuchungen den Nachweis für eine Typenreihe erbringen.
- *Polynom 2. oder 3. Grades:* Bei entsprechender Auslegung der Maschine kann der „S-förmige“ Verlauf durch eine quadratische Funktion approximiert werden. Für die Approximation und die Extrapolation auf Bemessungsspannung müssen ausreichend Kurzschlussdaten (> 5) aufgezeichnet werden.
- *Doppelt logarithmisch linear / linear:* Voraussetzung für die Extrapolation mit dem doppelt logarithmisch linearem Ansatz oder dem Mittelwert aus doppelt logarithmisch linear ist, dass zumindest 3 Messpunkte ermittelt werden und die Prüfspannungen hinreichend auseinander liegen (~ 10 %). In jedem Fall sollte die höchstmögliche Prüfspannung mit herangezogen werden. Mit geringer werdender maximaler Prüfspannung (< 70 %) ist auch im zunehmenden Maße mit einem zu niedrigen extrapoliertem Anzugstrom zu rechnen.

Bei der Bestimmung der Messreihen sollte stets mit der höchsten Prüfspannung begonnen werden. Bei „kalter“ Maschine ist der Kurzschlussstrom größer und bedingt dadurch einen sicherheitstechnischen Zuschlag.

Die Erwärmung wird sowohl für den Ständer als auch für den Rotor im quadratischen Verhältnis des Stromes umgerechnet. Zur Bestimmung der Erwärmungszeiten für die verschiedenen Temperaturklassen muss der zeitliche Verlauf der Erwärmung der Ständer- und Läuferwicklung bekannt sein. Zur Vereinfachung kann angenommen werden, dass der Verlauf der Ständer- und Läufererwärmungen übereinstimmen.

### **Adiabatische Erwärmung**

Die EN 60079-7 beschreibt im Anhang A die Berechnung der Übertemperatur  $\Delta\Theta/t$  der Ständerwicklung im festgebremsten Zustand durch die Gleichung

$$\frac{\Delta\Theta}{t} = a \cdot j^2 \cdot b$$

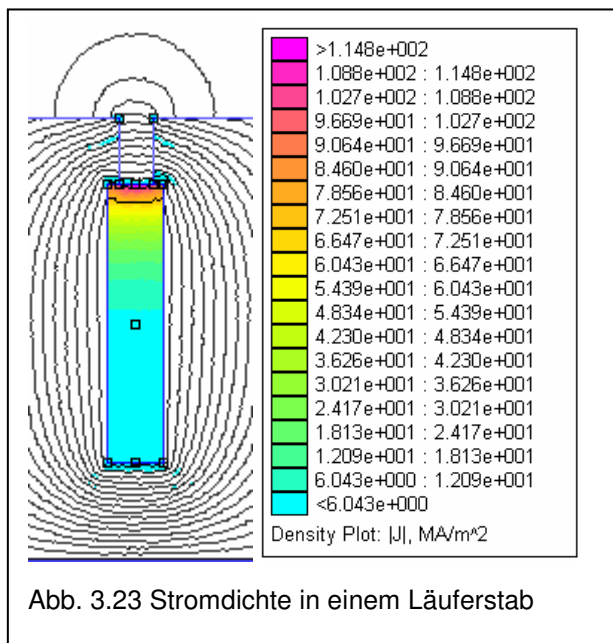
mit  $j$  = Stromdichte des Anzugstroms in  $A/mm^2$

$a$  = Koeffizient in  $K/[A/mm^2]^2s$  (für Kupfer  $a = 0,0065$ , für Aluminium  $a = 0,01513$ )

$b$  = Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung der Wärmeableitung bei getränkten Wicklungen ( $b = 0,85$ )

Für die Erwärmungsberechnung des Läufers im Kurzschluss nach Norm wird darauf verwiesen, dass für die Berechnung die Joulesche Wärme unter Berücksichtigung der Wärmeentwicklung in den Stäben und Ringen sowie die entsprechende Wärmekapazität berücksichtigt werden sollen. Der Einfluss der Stromverdrängung auf die Wärmeverteilung in

den Läuferstäben muss, die Wärmeableitung zum Eisen darf berücksichtigt werden.



Die Stromverdrängung kann für Rechteck-Hochstäbe aus Kupfer und einer Frequenz von 50 Hz abgeschätzt werden. Die Erhöhung des Läuferwiderstandes ist nahezu proportional der Stabhöhe angegeben in cm. Demnach besitzt ein Hochstabläufer mit 4 cm Stabhöhe im Stillstand einen vierfach höheren wirksamen Läuferwiderstand als im Bemessungsbetrieb [50]. Die Widerstandserhöhung durch die Stromverdrängung an der Staboberkante kann noch deutlich größer sein und ist von der Stabform abhängig (Abb. 3.23). Ein weiterer zu

berücksichtigender Punkt ist die Wärmeableitung des Stabes an das Eisen, der ohne messtechnische Erfassung durch vergleichbare Auslegungen von Maschinen nicht bestimmbar ist.

Für die Zündschutzarten der Druckfesten Kapselung und den Staubschutz ist im Wesentlichen die Oberflächentemperatur des Gehäuses für die Bestimmung der Temperaturklasse maßgeblich. Bei vereinfachter Annahme wird im Fehlerfall des blockierten Läufers die elektrische Leistung ausschließlich zur Erwärmung des Motors führen. Die Gehäusetemperatur kann abgeschätzt werden, in dem die während der Zeit des blockierten Läufers auftretende elektrische Leistung zur Erwärmung der wesentlichen Massen des Motors herangezogen wird. Demnach könnte sich beispielhaft ein  $P = 10$  kW Motor während einer Blockierzeit von  $t = 10$  s das Gehäuse um ca. 5 K erwärmen. Die Erwärmung tritt jedoch mit einer größeren Zeitkonstante an der Oberfläche auf, da der Wärmefluss von der Wicklung und dem Rotor entsteht.

### Frequenzumrechnungen 50 / 60 Hz

Für Maschinen höherer Leistung ist aus Gründen der Stromversorgung der Kurzschlussversuch bei 60 Hz und voller Nennspannung häufig nicht durchführbar. Eine Berechnung der 60 Hz Kurzschlussenergie basierend auf den 50 Hz Ergebnissen kann

über den Kurzschlussstrom erfolgen, wenn auch der Leistungsfaktor  $\cos\varphi_{k50}$  gemessen wurde:

$$\frac{I_{A60}}{I_{A50}} = \frac{Z_{50}}{Z_{60}} = \frac{U_{k50}}{U_{k60}} = 1 / \sqrt{\left(\frac{60}{50}\right)^2 - \left[\left(\frac{60}{50}\right)^2 - 1\right] \cos^2 \varphi_{k50}}$$

Die Kurzschluss Erwärmung des Ständers und Läufers erfolgt über das Quadrat der Anzugströme. Bei Läuferstäben mit Stromverdrängung erhöht sich der Stabwiderstand und damit die Erwärmung bei 60 Hz etwa um den Faktor 1,1.

#### **4. Errichtung, Betrieb, Instandhaltung und Reparatur explosionsgeschützter Betriebsmittel**

Die über 20 Richtlinien des „New Approach“ legen für den Montage- und Installationsbetrieb fest, dass sie für ein auf dem Markt befindliches Produkt die notwendigen Maßnahmen ergreifen müssen, um sicherzustellen, dass das Produkt zum Zeitpunkt der erstmaligen Nutzung noch den wesentlichen Anforderungen entspricht. Dies gilt für Produkte, bei denen die betreffende Richtlinie die Inbetriebnahme umfasst und sich derartige Tätigkeiten auf die Konformität des Produkts auswirken können. Die relevanten Richtlinien für elektrische Maschinen sind sicherlich auch die Maschinen- und Niederspannungsrichtlinie. Einige Produkte können erst nach einer Montage, einem Einbau oder einer anderen Behandlung benutzt werden [3].

Das erstmalige „Inverkehrbringen“ eines explosionsgeschützten elektrischen Betriebsmittels bedingt die Einhaltung der Richtlinie 94/9/EG. Nach dem Inverkehrbringen erfolgen üblicherweise die Errichtung und danach der Betrieb, was durch die Richtlinie 99/92/EG geregelt wird. Um die grundlegenden Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen einhalten zu können, ist die Überwachung der Anlage durch entsprechende Wartung und Reparatur notwendig. Der Betrieb der überwachungsbedürftigen Anlage ist innerhalb Deutschland durch die Betriebssicherheitsverordnung festgelegt.

Umfasst die betreffende Richtlinie die Inbetriebnahme und können sich Montage, Einbau oder andere Handlungen auf die Aufrechterhaltung der Konformität des Produkts auswirken, muss die für solche Tätigkeiten verantwortliche Person gewährleisten, dass sich keine Abweichung von den wesentlichen Anforderungen ergibt, damit das Produkt bei der erstmaligen Benutzung in der Gemeinschaft die Bestimmungen der anwendbaren Richtlinien erfüllt. Die Betriebssicherheitsverordnung definiert daher die „zugelassene Überwachungsstelle“ und die „befähigte Person“ um der Richtlinienforderung nachzukommen.

Generell gilt, dass die Mitgliedstaaten die Inbetriebnahme von Produkten nicht untersagen, einschränken oder behindern dürfen. Jedoch können die Mitgliedstaaten in Übereinstimmung mit dem EG-Vertrag (insbesondere Artikel 28 und Artikel 30 EG-Vertrag) zusätzliche einzelstaatliche Bestimmungen für die Inbetriebnahme, den Einbau oder die Benutzung beibehalten und erlassen, die auf den Schutz von Arbeitnehmern bzw. anderen Benutzern oder auf den Schutz anderer Produkte abzielen. Solche einzelstaatlichen Bestimmungen dürfen keine Veränderungen an einem entsprechend den Bestimmungen der anwendbaren Richtlinien hergestellten Produkt verlangen.

Neben den generellen Aussagen der Richtlinientexte werden für die praktische Umsetzung im Komitee K 235 „Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen“ Normen erarbeitet. Die EN 60079-14 „Elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen“ ergänzt die Anforderungen für Installation von elektrischen Anlagen um die Anforderungen für den Explosionsschutz [51, 52].

In Deutschland regelt die Betriebssicherheitsverordnung den Betrieb (und die Installation) von elektrischen Geräten für den Explosionsschutz. Daher ist es auch möglich, dass es zu Überschneidungen kommen kann. Formal juristisch gilt in jedem Fall die Betriebssicherheitsverordnung. Sie wird ergänzt durch die Technischen Regeln, an der zum

Zeitpunkt der Entstehung der Prüfregel gearbeitet wurde. Die Anforderungen der Technischen Regeln werden bei Veröffentlichung nur innerhalb Deutschlands bindend sein und haben gesetzlichen Vorrang vor den im Weiteren zu diskutierenden Normen der EN oder IEC.

#### **4.1 Installation elektrischer Maschinen**

Für die Installation elektrischer Anlagen gelten neben den Anforderungen an den Explosionsschutz eine Vielzahl weiterer Richtlinien und die dazugehörigen Normen, die nicht diskutiert werden sollen.

Die für den Einsatz von elektrischen Maschinen wichtigen Anforderungen der EN 60079-14 sollen erläutert werden, wobei insbesondere auf Abweichungen und zusätzliche Anforderungen gegenüber den Produkthanforderungen hingewiesen wird.

In Abs. 5.2.3 für Zone 2 Betriebsmittel wird festgelegt, dass bei drehenden elektrischen Maschinen zündfähige Funken während der Anlaufphase nicht auftreten dürfen, es sei denn, es sind Maßnahmen getroffen worden, um sicherzustellen, dass zu diesem Zeitpunkt keine explosionsfähige Atmosphäre vorhanden ist (Vergleich Kap. 3.4.4). Die Aussage steht im Widerspruch zu Anforderungen an elektrische Geräte der Kategorie 3 nach EN 60079-15. Die Forderung nach funkenfreiem Anlauf müsste konsequenter Weise auch die Einhaltung der Temperaturklasse einschließen. Die IEC 60079-15 greift das Problem auf und legt Anforderungen für die Häufigkeit der Startvorgänge fest. Entsprechend der Interpretation werden mehr als ein Startvorgang pro Woche als kritisch für die Zone 2 angesehen. Zukünftig wird durch den Prozess des „Parallel Voting“ die Interpretation auch in die europäischen Normen übernommen.

Bei drehenden elektrischen Maschinen in senkrechter Anordnung unabhängig der Zündschutzart müssen Vorkehrungen getroffen werden, die das senkrechte Hineinfallen von Fremdkörpern in die Lüftungsöffnungen verhindern (Abs. 5.5.).

Alle explosionsgeschützten elektrischen Maschinen müssen zusätzlich gegen Überlast geschützt werden, ausgenommen Motoren, die den Anlaufstrom bei Bemessungsspannung und Bemessungsfrequenz, oder Generatoren, die den Kurzschlussstrom ohne unzulässige Erwärmung dauernd führen können. Als Überlast-Schutzeinrichtungen müssen eingesetzt werden (Abs. 7):

- a) eine stromabhängige, zeitverzögerte Schutzeinrichtung für die Überwachung aller drei Phasen, nicht höher eingestellt als auf den Bemessungsstrom der Maschine, die bei 1,2-fachem Einstellstrom innerhalb von 2 h ansprechen muss und bei 1,05-fachem Einstellstrom innerhalb von 2 h noch nicht ansprechen darf, oder
- b) eine Einrichtung zur direkten Temperaturüberwachung durch eingebettete Temperaturfühler, oder
- c) eine andere gleichwertige Einrichtung.

Es müssen Vorkehrungen getroffen werden, die den Betrieb eines Drehstrommotors bei Ausfall einer Phase verhindern.

Die Vorkehrungen für den Ausfall einer Phase beziehen sich üblicherweise nicht auf die elektrische Auslegung des Motors. Beim Einsatz von Überstromauslösern sollten Geräte

angewendet werden, die eine integrierte Überwachung des Phasenausfalls haben. Bei Dreieckschaltung ist ein Schutz durch Überstromauslöser, die in der Netzzuleitung liegen, nur bedingt wirksam. Motorwicklungen in Dreieckschaltung sind daher so zu schützen, dass die Auslöser des Überwachungsgerätes in Reihe mit den Wicklungssträngen geschaltet werden. Für die Auswahl und die Einstellung der Schutzeinrichtung ist dabei der Nennwert des Strangstromes, d.h. der 0,58-fache Motorbemessungsstrom, zugrunde zu legen. Ist eine solche Schaltung nicht möglich, so sind neben den in den Netzzuleitungen liegenden Schutzeinrichtungen besondere Maßnahmen vorzusehen, um einen ausreichenden Motorschutz auch bei Ausfall eines Außenleiters zu gewährleisten.

Bei der Verwendung von eingebetteten Kaltleitern wird der Anforderung in der Regel entsprochen, wenn ein Kaltleiter pro Phase verwendet wird.

Für Motoren in der Zündschutzart Druckfeste Kapselung „d“ sieht die EN 60079-1 keine direkten Anforderungen an die Überwachungseinrichtung vor, so dass die oben aufgeführten Anforderungen bei der Bewertung der Einhaltung der Temperaturklasse herangezogen werden sollten.

Motoren der Zündschutzart Druckfeste Kapselung „d“, die mit veränderlicher Frequenz und Spannung gespeist werden, erfordern (Abs. 10.4):

- a) entweder Mittel (oder Ausrüstung) für die direkte Temperaturüberwachung durch eingebettete Temperaturfühler, welche in der Motor-Dokumentation beschrieben sind, oder andere wirksame Methoden zur Begrenzung der Motorgehäuse-Oberflächentemperatur. Durch die Schutzeinrichtung muss der Motor abgeschaltet werden. Die Kombination von Motor und Umrichter braucht nicht zusammen geprüft zu werden, oder
- b) der Motor muss für diese Betriebsart mit der vorgesehenen Schutzeinrichtung und in Verbindung mit dem Umrichter, der in den nach EN 60079-0 geforderten Beschreibungen festgelegt ist, als Ganzes einer Baumusterprüfung unterzogen worden sein.

Die Zulassung von druckfest gekapselten Motoren erfolgt häufig durch pauschale EG-Konformitätsbescheinigungen, die keinen direkten Bezug auf die Erwärmung einer einzelnen Maschine nehmen. Die elektrischen Werte werden dabei zunächst eher pauschal angesetzt. Im konkreten Fall ist dann vom Hersteller ein thermischer Nachweis zu erbringen, dass der Motor die Grenztemperaturen einhält. Insbesondere bei umrichtergespeisten Antrieben ist der thermische Nachweis des Herstellers für die sichere Einhaltung der Grenztemperatur für den spezifizierten Drehzahlbereich notwendig. Für den thermischen Nachweis verlangt die PTB die Einhaltung entsprechender Anforderungen (Kap. 3.2.3.1).

Motoren (Käfigläufer Induktionsmotoren) in der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ müssen zusätzlich zur Überlast auch bei festgebremstem Läufer innerhalb der Zeit  $t_E$  abschalten (Abs. 11.2). Das Anzugstromverhältnis ( $I_A/I_N$ ) muss im Bereich von 3...8 liegen und ist damit geringer als die Anforderung der EN 60079-7 von maximal 10. Die Schutzeinrichtungen müssen die angegebenen Auslösezeiten mit einer zulässigen Abweichung von  $\pm 20\%$  einhalten. Bei Wicklungen in Dreieckschaltung ist die Auslösezeit bei festgebremstem Motor und bei Phasenausfall mit dem 0,87-fachen Motoranzugstrom zu überprüfen.

Der Überlastschutz von Motoren mit Sanftanlassern muss durch den Betreiber mit einer speziellen Beurteilung der Einsatzbedingungen durchgeführt werden. Die Anforderungen an umrichter gespeiste Antriebe sind denen der EN 60079-7 identisch.

Die Anforderungen an den Staubexplosionsschutz sind in der IEC/EN 60079-14 geregelt [53]. Bei der Auswahl des Betriebsmittels ist zu beachten, dass die zu bescheinigende Oberflächentemperatur  $2/3$  der Zündtemperatur in °C des jeweiligen Staub-Luft-Gemisches nicht überschreiten darf. An Flächen, auf denen eine gefährliche Ablagerung eines glimmfähigen Staubes nicht wirksam verhindert werden kann, darf die Oberflächentemperatur, die Glimmtemperatur vermindert um 75 K, nicht überschreiten. Bei Schichtdicken  $> 5$  mm ist die Oberflächentemperatur gemäß einer Tabelle zu reduzieren.

## 4.2 Prüfung elektrischer Maschinen

Generell ist die Überwachung der elektrischen Anlage für explosionsgefährdete Bereiche durch die Richtlinie 99/92/EG und in Deutschland darüber hinaus durch die BetrSichV geregelt. Die ordnungsgemäße Durchführung wird durch die zugelassene Überwachungsstelle und die befähigte Person sichergestellt. Die Betriebssicherheitsverordnung sieht weiterhin die wiederkehrende Prüfung vor.

Die IEC 60079-17 / IEC 61241-17 regeln die Prüfung und Instandhaltung von elektrischen Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (Gas / Staub) und sind für die praktische Umsetzung der BetrSichV unterstützend [54, 55]. Im Gegensatz zur Betriebssicherheitsverordnung definiert die IEC 60079-17 zusätzlich die ständige Überwachung der Anlage durch eine Fachkraft. Durch den Vorrang der BetrSichV ist dies in Deutschland nur noch eingeschränkt möglich. Der Zeitraum der wiederkehrenden Prüfung ist auf 3 Jahre beschränkt.

Die IEC 60079-17 unterscheidet zwischen Detail-, Nah- und Sichtprüfung, wobei die Prüftiefe maßgeblich ist. In entsprechenden Tabellen werden bezüglich der Zündschutzarten Anhaltspunkte definiert, welche Prüfungen durchzuführen sind. Die Norm baut in vielen Punkten auf die EN / IEC 60079-14 auf und verweist daher an vielen Stellen auf sie.

Bei Abschluss der Montage muss eine Erstprüfung der Betriebsmittel und der Installation auf Übereinstimmung durchgeführt werden. Für elektrische Maschinen ist dem entsprechend für die thermische Überwachungseinrichtung allgemein zu überprüfen, ob:

- die Schutzeinrichtung auf den Bemessungsstrom  $I_N$  eingestellt ist (bei Erst- und Detailprüfungen);
- die Kennwerte der Schutzeinrichtung so ausgelegt sind, dass diese innerhalb von 2 h bei dem 1,2-fachen des eingestellten Stroms (Bemessungsstroms) anspricht, und innerhalb von 2 h bei dem 1,05-fachen des eingestellten Stroms (Bemessungsstroms) nicht anspricht (bei der Erstprüfung).

Zusätzlich ist es für elektrische Maschinen der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ erforderlich zu überprüfen, ob die Auslösezeit der Schutzeinrichtung entsprechend den Anforderungen die Maschine innerhalb der vorgesehenen Zeit  $\pm 20$  % aus dem kalten Zustand abschalten kann. Für Motoren mit Überstromschutzeinrichtungen gilt die Zeit  $t_E$ , für Motoren mit eingebautem Kaltleiter die Auslösezeit  $t_A$ . Die Normenanforderung stößt insbesondere bei Maschinen größerer Leistung an das Machbare, da das Blockieren des Läufers in der Anlage

nicht generell möglich ist. Bei der Speisung durch einen Frequenzumrichter kann ebenfalls die notwendige Leistung durch den Umrichter nicht aufgebracht werden. Weiterhin kann eine unsachgemäße Durchführung der Prüfung den Motor ungewollt schädigen.

Maschinen in der Zündschutzart Druckfeste Kapselung „d“ sind hinsichtlich ihrer Spaltflächen zu überprüfen. Verschleiß, Korrosion oder andere offensichtliche Schäden sind zu bestimmen. Die Spaltgeometrien können nur überprüft werden, wenn sie durch den Hersteller vorgegeben werden. Da dazu prinzipiell keine Verpflichtung besteht, wird häufig auf die Mindestanforderungen der Spaltgeometrien der EN 60079-1 zurückgegriffen. Die Annahme ist jedoch höchst zweifelhaft, da häufig für die Einhaltung der Zünddurchschlagsprüfungen geringere Spaltmaße oder längere Spalte notwendig waren.

Einrichtungen zur Verhinderung von Kondensation, wie Atmungs-, Trocknungs- oder Heizelemente, müssen überprüft werden, um die richtige Funktion sicherzustellen.

Der Hersteller explosionsgeschützter Betriebsmittel ist üblicherweise nicht in die Überprüfung seiner Geräte durch entsprechende Wartungsverträge involviert. Rechtlich stünde dem nichts entgegen. Ausnahmen bilden Leasingverträge von z.B. Flurförderzeugen. Durch die Betriebsanleitung schreibt der Hersteller eines Gerätes dem Nutzer die notwendigen Maßnahmen vor.

#### **4.3 Instandhaltung und Reparatur elektrischer Maschinen**

Die Instandhaltung oder Reparatur der elektrischen Betriebsmittel erfolgt gemäß der BetrSichV unter der Aufsicht der zugelassen Überwachungsstelle oder der amtlich anerkannten befähigten Person. Die Benennung der amtlich anerkannten befähigten Person obliegt den Bundesländern, die hinsichtlich der Qualifikation sich möglicherweise unterscheidende Anforderungen stellen (s. TRBS 1203 Teil 1). Weiterhin obliegt dem Hersteller explosionsgeschützter Geräte die Prüfung der Instandsetzung seiner Geräte gemäß §14 BetrSichV. Der Hersteller muss bestätigen, dass die überwachungsbedürftige Anlage in den für den Explosionsschutz wesentlichen Merkmalen den Anforderungen der Verordnung entspricht. Neben der für Deutschland gesetzlich geregelten klaren Zuständigkeit gibt es oder entstehen auf internationaler Ebene Normen, die sich mit dem Thema der Instandhaltung und Reparatur beschäftigen.

Die IEC TS 60034-23 ist ein Leitfaden für die Überholung drehender elektrischer Maschinen [56]. Die aus der Sicht des Explosionsschutzes wichtigen Aussagen sollen diskutiert werden. In Abs. 4.2 wird darauf hingewiesen, dass der thermische Maschinenschutz und die eingebauten Temperaturfühler von derselben Art und an denselben Einbauorten sein muss wie vorher. Das ist insbesondere für den Explosionsschutz von elementarer Bedeutung. Abs. 4.3.5 weist bei Auslegungsänderung an Maschinen zum Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären auf eine neue Zertifizierung oder eine Rückweisung an den Ursprungshersteller hin. Die Aussage ist wenig konkret und daher sollten in jedem Fall die Anforderungen der Richtlinie 94/9/EG beachtet werden. Demnach gilt, dass ein Gerät an dem erhebliche Modifikationen durchgeführt wurden, die die Integrität der Zündschutzart betreffen, unter die Richtlinie 94/9/EG fallen und damit u.U. einer neuen Zulassung bedürfen.

Der Abs. 6 fordert ein zusätzliches Leistungsschild, welches die wesentlichen Daten der Überholung sowie die zur Überholung beauftragte Firma enthält. Eine umfassende



Dokumentation für explosionsgeschützte Geräte sowie deren Wartung und Instandhaltung fordert die BetrSichV. Die zusätzliche Kennzeichnung am Motor ist empfehlenswert.

Die IEC TS 60034-23 schlägt im Anhang B ein Bewertungsverfahren und Kennwerte für die Überholung vor, welches die Systematik beschreibt. Zunächst wird vorgeschlagen, vor dem Abschalten die Maschine hinsichtlich ihrer Eigenschaften zu dokumentieren. Für den Explosionsschutz sollten soweit möglich alle thermischen Daten erfasst werden (z.B. Lager- und Wicklungstemperaturen). Vor der Demontage wird u.a. die Messung des Luftspaltes genannt (insbesondere für die Zündschutzarten „e“ und „n“ entsprechend der Normenanforderung). Nach der Demontage können Schleifspuren an Ständer/Läufer sowie Anzeichen von Glimmerscheinungen und Kriechwegbildung auf potenzielle Zündquellen hinweisen. Nach der Überholung ist wiederum die Messung des Luftspaltes erforderlich sowie die Bestimmung der thermischen Daten, die für den Explosionsschutz aussagekräftig sind. Die Funktionsprüfung der Überwachungseinrichtung wird auch genannt. Über den Leitfaden hinaus sind insbesondere für Maschinen der Zündschutzart Druckfeste Kapselung „d“ weitere Aspekte wichtig, die insbesondere Einfluss auf die Einhaltung des Zündspaltes haben.

Zur Zeit wird an der IEC 60079-19 “Electrical apparatus for explosive atmospheres Part 19: Repair and overhaul for apparatus used in explosive atmospheres” gearbeitet, deren wesentlichen Aussagen dargestellt werden sollen, obwohl zum Zeitpunkt der Erstellung der Prüfregel lediglich der FDIS-Entwurf vorliegt [57]. Parallel dazu entsteht innerhalb des IEC-Ex Schemas ein inhaltlich gleich lautender Entwurf mit der Bezeichnung „Technical Requirements for IECEx Service Facilities involved in repairs, overhauls and modifications of Ex equipment“ als Ex OD015. Die Entwürfe sollen zukünftig als Handlungsanweisung für die praktischen Tätigkeiten bei der Reparatur dienen, so dass eine Diskussion über die Vorschläge Sinn macht.

Zunächst werden die grundsätzlichen Zuständigkeiten des Herstellers, Betreibers und des Reparierenden erläutert. Die Vorschläge sind als Empfehlung zu deuten und sind als Leitfaden für eine individuelle Vertragsgestaltung hilfreich. Die Anforderungen an die Qualifikation des Reparierenden werden spezifiziert.

Zur generellen Erläuterung werden die unterschiedlichen mechanischen Aufarbeitsverfahren diskutiert, die entsprechend weiterer Vorgaben der Zündschutzarten angewendet werden können. Dazu zählen

- Metallspritzverfahren: Wird für Spalte der Druckfesten Kapselung nicht empfohlen
- Galvanischer Überzug (Elektroplattieren)
- Ausbuchsungen (z.B. von Lagerstellen)
- Hartlöten und Schweißen
- Metallheften
- Gewindebohrungen
- Spanabhebende Bearbeitung

Die maschinelle Bearbeitung der Ständer- und Läuferblechpakete sollte nur unter Verwendung der Toleranzen des Herstellers für den Luftspalt durchgeführt werden. In der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ darf die Veränderung zu keiner unzulässigen Veränderung der Oberflächentemperatur (insbesondere des Rotors) führen. Der thermische Nachweis ist hierfür sehr aufwendig.

Zur Entfernung der beschädigten Wicklung gilt das Verfahren des Erweichens mit Lösungsmitteln als annehmbar. Bei der Verwendung von thermischen Verfahren wird auf die Brisanz der Überhitzung und damit der Zerstörung der Blechisolierung hingewiesen. Die Wickeldaten der Maschinen sollten vom Hersteller erfragt werden. Falls dies nicht möglich ist wird das Kopieren des Wicklungssystems empfohlen, mit der Ausnahme der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“. Für den Wicklungswiderstand der einzelnen Stränge wird eine Toleranz von  $\pm 5\%$  vorgeschlagen. Dabei wird vollends übersehen, dass der bisherige Wert des Wicklungswiderstandes ausschlaggebend ist. Nimmt man eine Abweichung von  $\pm 5\%$  zum alten Widerstandswert an, ist die Einhaltung der Toleranz in der Praxis schwierig, wenn das Wicklungssystem durch Kopieren bestimmt werden muss. Der Drahtdurchmesser wird mit einer Toleranz von  $1\%$  angegeben, wobei der daraus resultierende Temperaturunterschied durchaus  $2\text{ K}$  betragen kann. Um unter den Umständen die Toleranz von  $5\%$  einhalten zu können, muss die Spulengeometrie mit einer Toleranz kleiner  $2\%$  durchgeführt werden. Die Erhöhung des Wicklungswiderstandes führt zu einer zusätzlichen Stromerwärmung im Ständer, die ungefähr eine entsprechende prozentuale Erwärmung nach sich ziehen wird. Streuungen in der Serienfertigung werden durch einen pauschalen Abzug von der Grenztemperatur der Temperaturklasse berücksichtigt (EN 60079-0 Abs. 26.5.1) und innerhalb dieser Toleranz muss auch die neue Wicklung sein. Handelt es sich bei der Zulassung um eine Einzelprüfung unter Ausnutzung aller Temperaturreserve ist eine Neuwicklung ohne erneute Prüfung der thermischen Eigenschaften zu hinterfragen.

Zusätzlich zum Wicklungswiderstand werden für den Kurzschluss- und den Bemessungsstrom eine Symmetrie von  $5\%$  gefordert, deren Bestimmung in der Praxis insbesondere für größere Leistungen schwierig umsetzbar ist und ein entsprechendes Prüffeld erfordert. Darüber hinaus ist der Vergleich zu den Herstellerwerten wichtig. Die alte Prüfregel schlug vor, den Leerlaufstrom in allen drei Strängen zu messen und eine Toleranz von  $\pm 15\%$  des Herstellerwertes einzuhalten. Das Anzugstromverhältnis  $I_A/I_N$  sollte mit einer Toleranz von  $\pm 10\%$  gegenüber dem auf dem Typenschild und in dem Zertifikat angegebenen Wert eingehalten werden.

Generell wird eine Umwicklung auf eine andere Bemessungsspannung als möglich erachtet, wobei Induktion, Stromdichten und Verluste nicht erhöht werden dürfen. Für die Umwicklung auf eine andere Drehzahl wird die Konsolidierung des Herstellers empfohlen. Der Hinweis auf die Einhaltung der Vorgaben durch die EG-Baumusterprüfbescheinigung sollte auf jeden Fall berücksichtigt werden. Für die Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ sollten Umwicklungen nur unter Anleitung des Herstellers erfolgen. Eine Umwicklung auf eine andere Drehzahl verletzt sicherlich die Integrität der Zündschutzart und würde damit als Neugerät unter die Richtlinie 94/9EG fallen.

Für die elektrischen Maschinen der Zone 2 werden keine Toleranzen für den Wicklungswiderstand und den Bemessungsstrom angegeben.

Als Kennzeichnung für die Reparatur werden zwei mögliche Varianten vorgeschlagen, die dokumentieren sollen, ob die Reparatur hinsichtlich der Norm aber nicht dem Zertifikat oder hinsichtlich der Norm und dem Zertifikat durchgeführt wurden (Anhang 2). Reparaturen, die hinsichtlich der Norm aber entgegen dem Zertifikat durchgeführt wurden, sind innerhalb der Europäischen Union unter dem Gesichtspunkt der Anforderungen der Richtlinie 94/9/EG zu bewerten.

Der Anhang B listet Anforderungen an das durchführende Personal auf, um die Kompetenz nachweisen zu können. In Deutschland stehen dem die Anforderungen an die befähigte Person gegenüber, die in den Technischen Regeln der Betriebssicherheitsverordnung aufgeführt werden.

Anforderungen an die Wartung und Reparatur von Staubexplosionsgeschützten Geräten sind in der IEC 61241-19 festgelegt [59]. Die wesentlichen Anforderungen für elektrische Maschinen beziehen sich auf die Zündschutzart „tD“ und damit an die Einhaltung der Schutzart (IP).

Die Betrachtung der Ausfallursachen in verschiedenen Studien zeigt eindeutig, dass Lagerschäden in ca. 75 % aller Fälle die häufigste Schadensursache sind. In den Normen zur Instandhaltung und Reparatur wird nicht entsprechend auf die Lager eingegangen. Wobei ein heiß gelaufenes Lager direkte Auswirkungen auf die Einhaltung der Geometrie des zünddurchschlagsicheren Spaltes haben kann und der zünddurchschlagsichere Spalt von den geometrischen Toleranzen des Lagers und dem Einbau direkt betroffen sein kann.

## 5. Explosionsschutz aus internationaler Sicht

Die zunehmende Globalisierung wirkt sich auch auf dem Markt der explosionsgeschützten Betriebsmittel aus. Die global agierenden Betreiber von explosionsgeschützten Anlagen fordern einen einheitlichen Standard für die Ausführung ihrer Anlagen, um Kosten bei der Entwicklung und Projektierung der Anlagen zu sparen. Dem entgegen stehen die unterschiedlichen regulierten Märkte, wobei insbesondere der europäische und nordamerikanische Markt zu nennen ist. In Europa ist der Markt für den Explosionsschutz durch die bereits genannten Richtlinien bestimmt (Kap. 2). In Nordamerika bestimmt die OSHA (Occupational Safety and Health Administration) mit ihren Regeln den Markt. Dabei wird stets zwischen den Anforderungen an die Produkte und die Anforderungen an eine Anlage unterschieden.

Weltweit unterteilt sich der Markt anhand der Einteilung in Division oder Zonen, was sich auch auf die Produkte stark auswirken kann. Traditionell wurde in Amerika und den stark amerikanisch geprägten Ländern in Division eingeteilt und die restlichen überwiegenden Länder unterteilen in Zonen. Die Tendenz der letzten Jahre zeigt auch in den amerikanisch dominierten Märkten eine Hinwendung zum Zonenkonzept, wie es in Europa gebräuchlich ist.

Neben dem europäischen und nordamerikanischen Markt gelten in vielen anderen Ländern eigene Regelungen, die im Einzelnen nicht alle diskutiert werden. Durch die globale Ausrichtung des Explosionsschutzes der PTB und die Vereinbarungen der PTB mit vielen weltweiten Zulassungsstellen (Abb. 5.1) kann in der Regel aufgrund einer existierenden

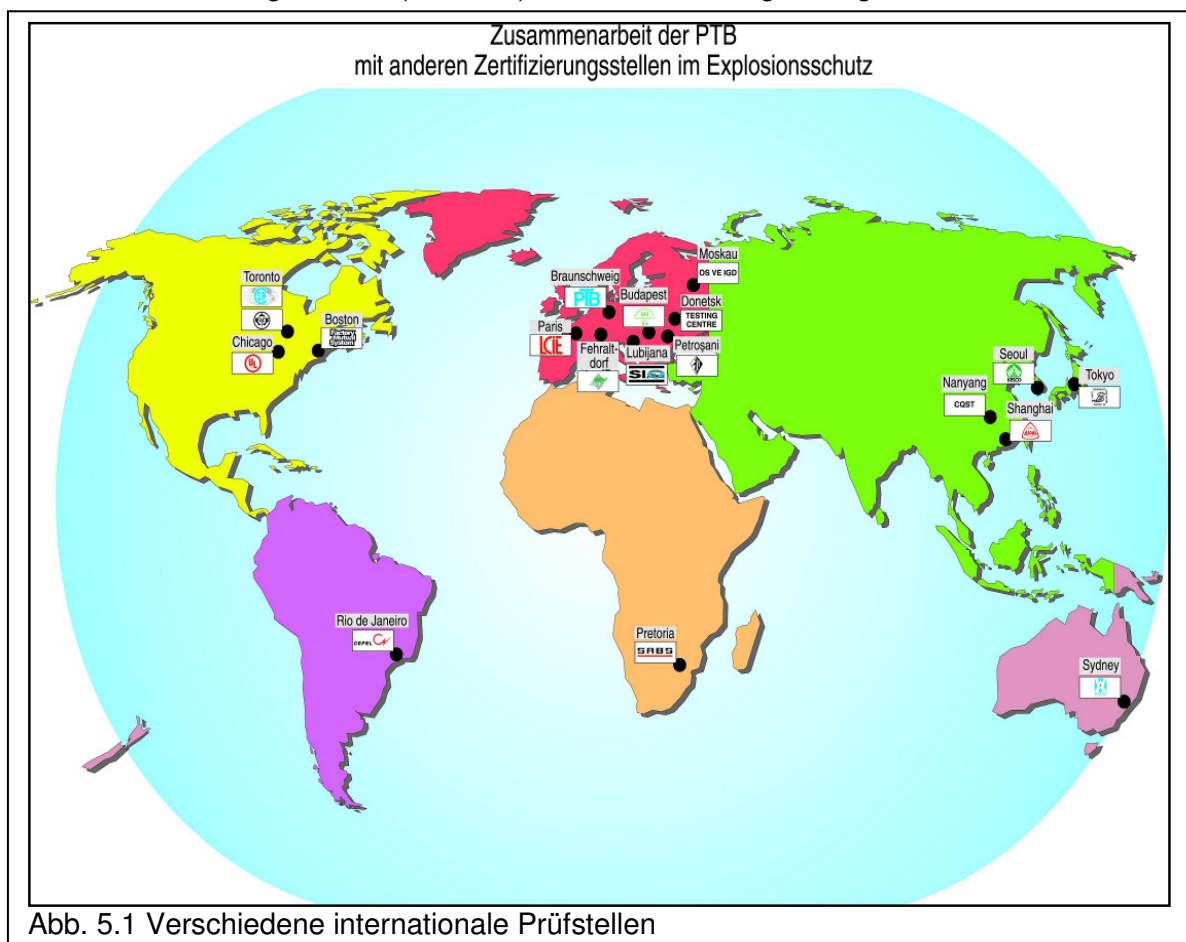


Abb. 5.1 Verschiedene internationale Prüfstellen

PTB-Bescheinigung eine lokale Bescheinigung ausgestellt werden, ohne dass eine Neuprüfung für das Produkt notwendig ist. Die formalen Anforderungen müssen jedoch erfüllt werden und sind auch kostenpflichtig. Dies drückt sich auch insbesondere in der Bereitstellung einer ausführlichen Dokumentation aus.

Für die Hersteller von explosionsgeschützten Betriebsmitteln sind zunächst nur die Anforderungen an ihre Produkte von Interesse. Die Anforderungen an die Installation können sich jedoch auch direkt auf das Produkt auswirken, worauf im Folgenden auch eingegangen werden soll.

## 5.1 Internationale Zulassungsverfahren

In Nordamerika ist die NFPA (National Fire Protection Association) für den Brand- und Personenschutz zuständig. Die NFPA hat in der NFPA 70 den NEC (National Electrical Code) publiziert. Der NEC nennt die allgemeinen Regeln sowie die grundsätzlichen Anforderungen und ist nicht im Sinne einer Norm zu interpretieren. Der NEC wird im dreijährlichen Rhythmus durch die verschiedenen Interessenvertreter aus Industrie, Behörden und Zulassungsstellen überarbeitet. Voraussetzung für die Anerkennung des Zonenkonzeptes war die Implementierung in den NEC 505 in den neunziger Jahren. Das Divisionkonzept ist im NEC 500 genannt.

Der Vergleich der Zone und der Division verdeutlicht den Unterschied (Abb. 5.2). Während die Zone in 3 Bereiche unterteilt ist, hat die Division lediglich eine Zweiteilung. Die Zone 0 und Zone 1 ist zusammengefasst zur Division 1 und es muss mit einer ständigen Gefahr durch die Anwesenheit einer explosiblen Atmosphäre gerechnet werden. Dadurch sollten sich auch erhöhte Anforderungen an die Sicherheit ergeben. Ebenso bedingen sich unterschiedliche räumliche Einteilungen der Gefahrenbereiche bei der Projektierung von explosionsgeschützten Anlagen. Die Zone 2 ist direkt mit der Division 2 vergleichbar, in der mit explosibler Atmosphäre selten oder kurzzeitig zu rechnen ist.

<b>Zoneneinteilung</b>			
	<b>Gefahr ständig, langzeitig oder häufig</b>	<b>Gefahr gelegentlich</b>	<b>Gefahr selten und kurzzeitig</b>
<b>CENELEC / IEC</b>	<b>Zone 0 (Zone 20 - Staub)</b>	<b>Zone 1 (Zone 21 - Staub)</b>	<b>Zone 2 (Zone 22 - Staub)</b>
<b>USA NEC 505 Class I (gas)</b>	<b>Zone 0</b>	<b>Zone 1</b>	<b>Zone 2</b>
<b>Divisioneinteilung</b>			
	<b>Gefahr ständig oder gelegentlich</b>		<b>Gefahr selten und kurzzeitig</b>
<b>US NEC 500 Class I (gas) Class II (dust) Class III (fibers)</b>	<b>Division 1</b>		<b>Division 2</b>

Abb. 5.2 Gegenüberstellung von Zone und Division

Die Richtlinie definiert für den Staub die Zone 20, 21 und 22. Der NEC 505 beschränkt sich auf Gas (Class I). Der NEC 500 definiert für Gas die Class I, für Staub die Class II und für Fasern sowie Flusen die Class III. Die Class III ist nach Richtlinie nicht explizit genannt und wird durch die Zonen 20 bis 22 abgedeckt.

Die europäische Richtlinie 94/9/EG verlangt für elektrische Geräte der Zone 0 und 1 die Zulassung durch eine benannte Stelle. Parallel dazu sind Anforderungen an das QM-System notwendig. Die Anforderungen an das Produkt beziehen sich jedoch lediglich auf die für den Explosionsschutz relevanten. Die grundlegenden elektrotechnischen Anforderungen werden in Eigenverantwortung durch den Hersteller garantiert und durch die Konformitätserklärung bestätigt. Geräte für die Zone 2 liegen vollständig in der Eigenverantwortung des Herstellers.

In Nordamerika verlangt der Markt, dass quasi alle elektrischen Geräte hinsichtlich ihrer Anforderungen durch „Risk of Fire and Electric Shock Hazards“ für die Markteinführung durch eine Prüfstelle verifiziert und gelistet werden, obwohl keine gesetzliche Verpflichtung besteht. Die OSHA (Occupational Safety and Health Administration) als zuständige Behörde im Arbeitsministerium der USA verlangt darüber hinaus auch eine ständige Überwachung des QM-Systems. Dies erfolgt üblicherweise im Rhythmus eines Quartals.

Für den Betrieb explosionsgeschützter Geräte in den USA muss die lokale Genehmigungsbehörde (des Bundesstaates) die Anlage verifizieren, die die Listung des Gerätes üblicherweise auch fordert. Des Weiteren kann die Versicherungsgesellschaft für die explosionsgeschützte Anlage eigene Standards definieren.

Durch die Definition der Bereiche können Produkte nach dem Zonenkonzept nur in die Division 1 eingesetzt werden, wenn die Zone 0 bescheinigt ist. Hingegen eignen sich Division 1 Produkte auch für die Zone 1; jedoch nicht für die Zone 0, da zusätzliche Anforderungen notwendig sind. Geräte der Zone 2 und der Division 2 sind dagegen kompatibel.

Produkte für die Zone 1 und 2, die in Europa entsprechend der Richtlinie und den harmonisierten Standards zugelassen sind, können nicht direkt in den nordamerikanischen Markt exportiert werden, da sie den grundlegenden Anforderungen der OSHA hinsichtlich des QM-Systems nicht genügen. Genügen die Produkte den Anforderungen der OSHA ist zu beachten, dass sie ohne Zertifizierung einer akzeptierten Prüfstelle wenig Akzeptanz finden könnten.

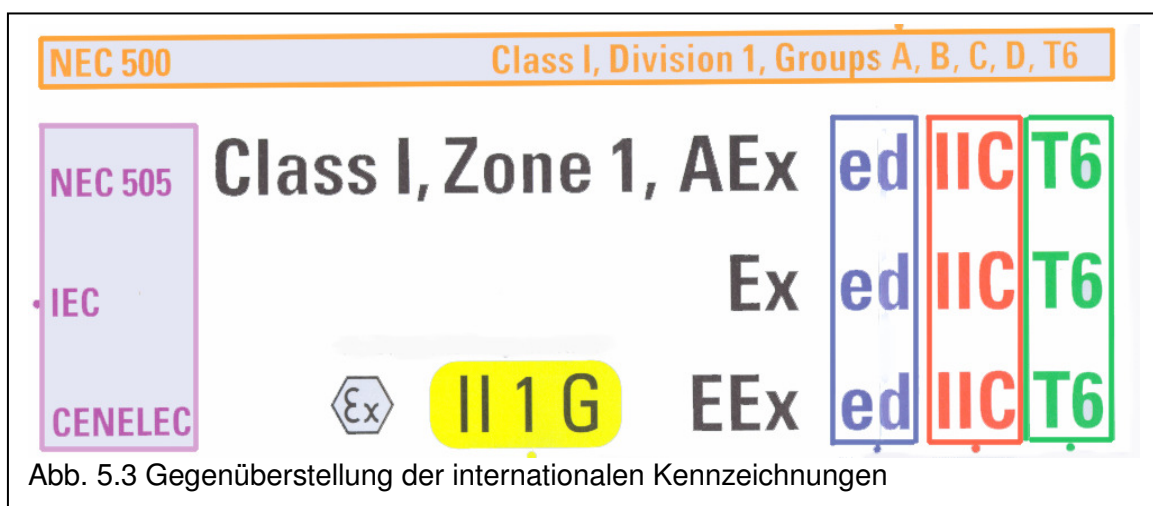


Abb. 5.3 Gegenüberstellung der internationalen Kennzeichnungen

Die Kennzeichnung der explosionsgeschützten Geräte im internationalen Vergleich zeigt Abbildung 5.3. Die Gruppen nach NEC 500 sind nicht direkt mit den Explosionsgruppen nach CENELEC vergleichbar. Die Class I entspricht dem „G“ für Gasexplosionsschutz mit den Gruppen A bis D und die Class II dem „D“ für Staubexplosionsschutz mit den Gruppen E bis G. Die Gruppe A entspricht dem Acetylen, Gruppe B steht für Wasserstoff, Gruppe C für Ethylen sowie Gruppe D für Methan als Prüfgas. Bei der Festlegung der Temperaturklassen sind weitere Unterteilungen möglich (z.B. T3A für 180 °C). Die Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ ist nicht definiert.

Im Gegensatz zur IEC-Kennzeichnung wird entsprechend NEC 505 die Class und die Zone spezifiziert. Das „A“Ex deutet auf die Spezifikation nach NEC hin. Die jeweiligen amerikanischen Prüfstellen ziehen nationale Normen für die Verifizierung heran. Das „E“Ex deutet auf die Verwendung harmonisierter Normen der EN 50014 entsprechend der Richtlinie 94/9/EG hin. Im Rahmen des „Parallel Voting“ zwischen EN und IEC fällt mit Beginn der EN 60079-0 das erste „E“ weg und die Kennzeichnung lautet „Ex“. Die Zündschutzarten, Explosionsgruppen und Temperaturklassen sind identisch. Die Definition der Kategorien anstatt der Zonen innerhalb der Richtlinie ist insbesondere für den nichteuropäischen Markt eher verwirrend. Als Pendant zur Kategorie wird auf internationaler Ebene der EPL (Equipment Protection Level) eingeführt. Ansonsten ist zu beachten, dass die Kennzeichnung, Anschluss- und Verlegungstechnik sowie die Erdungsmaßnahmen im NEC nicht konform mit der IEC sind.

Bezüglich der nichtelektrischen Betriebsmittel gibt es in den Vereinigten Staaten keine systematischen Anforderungen und entspricht damit der Praxis in Europa vor der Richtlinie 94/9/EG. Die Normenreihe EN 13463 ist lediglich auf Europa beschränkt. Eine Überführung auf die internationale Ebene (ISO) befindet sich in der Vorbereitung.

Das chinesische Zulassungsverfahren beruht auf den IEC-Normen, die in eine nationale Norm (GB3836.X) umgesetzt werden. Üblicherweise entspricht jedoch der Normenstand nicht der aktuellen Ausgabe der IEC sondern jeweils einer Generation davor. Im Unterschied zur Richtlinie 94/9/EG gilt eine Zertifizierungspflicht aller explosionsgeschützten Betriebsmittel. Weiterhin besteht momentan keine Verpflichtung zur Auditierung der Fertigungsstätten. Zukünftig sollen jedoch die explosionsgeschützten Betriebsmittel unter CCC gelistet werden, so dass weitere formale Anforderungen entstehen werden, wie sie aus anderen Produktkategorien bekannt sind.

In Japan ist eine Einteilung in Zonen oder Division nicht üblich. Es wird lediglich zwischen explosionsgefährdeten und nicht explosionsgefährdeten Bereichen unterschieden. Für die explosionsgefährdeten Bereiche gelten Standards, die auf den Standards der Zone 1 nach IEC basieren. Die Kennzeichnung ist nicht mit der oben beschriebenen vergleichbar (z.B. „d IIB T4“ => „d2G4“)

## 5.2 Internationale Normung

Die europäischen Normen für elektrische Geräte werden von CENELEC veröffentlicht (z.B. EN 60079-0) und sind für die Zulassung innerhalb der Richtlinie harmonisiert. Dadurch gilt die Vermutungswirkung der Einhaltung der grundlegenden Anforderungen der Richtlinie. Die

globalen Normen werden durch IEC veröffentlicht. Im Sinne der einheitlichen Regelung besteht die Einigkeit die von IEC herausgegebenen Normen ohne technische Änderungen zu übernehmen. Dies gilt insbesondere für die Explosionsschutznormen und wirkt sich zunehmend auf die Normen für elektrische Maschinen aus. Die formalen Unterschiede sollen durch einen entsprechenden Anhang spezifiziert werden.

In Nordamerika ist eine multiple Normungslandschaft zu beobachten. Zum einen ist es üblich, dass die Prüforganisationen ihre eigenen Normen definieren (z.B. UL, CSA oder FM). Zum anderen können auch die IEC -, NEMA -, NFPA-, IEEE-, ISA- Normen ihre Anwendung finden und durch die Prüforganisationen herangezogen werden (CEC sowie CSA-Normen für Kanada). Die ANSI (American National Standards Institute) ist der Administrator und Koordinator der nichtstaatlichen Normungslandschaft.

Entsprechend den für elektrische Maschinen gängigen Zündschutzarten sind für die unterschiedlichen Zulassungsmöglichkeiten einige heranzuziehende Normen gegenübergestellt (Tab.5.1).

	<b>Richtlinie 94/9/EG</b>	<b>IEC</b>	<b>NEC 505 e.g.</b>	<b>NEC 500 (Explosion- proof)</b>	<b>China</b>
„d“	EN 50018 EN 60079-1	IEC 60079 -1	UL 2279, UL 60079 -1 FM 3600	UL 1604, UL 1836 UL 674 (Div. 1) FM 3615	GB 3836.2:2000
„e“	EN 50019 EN 60079-7	IEC 60079 -7	UL 2279, UL 60079 - 7 FM 3600		GB 3836.3:2000
„p“	EN 50016 EN 60079-2	IEC 60079 -2	UL 2279 FM 3620 NFPA 496		GB 3836.5:2004
„n“	EN 50021 EN 60079-15	IEC 60079 - 15	UL 2279, UL 60079 -15	UL 1604, UL 1836 FM 3611 (NI)	GB 3836.8:2003

Tab. 5.1 Gegenüberstellung einiger Normen verschiedener Zündschutzarten

Für die explosionsgeschützten Geräte entsprechend dem Zonenkonzept gilt darüber hinaus die EN 50014 bzw. EN/IEC 60079-0. Die Überdruckkapselung nach NEC 500 unterteilt die Typen X, Y und Z. Type X ändert die Klassifizierung von Class I, Division 1 zu nicht explosionsgefährdetem Bereich; Typ Y von Division 1 zu 2 und Typ Z von Division 2 zu nicht explosionsgefährdetem Bereich. Eine entsprechend gleiche Interpretation ist auch der EN 60079-2 zu entnehmen, jedoch auf die Zoneneinteilung bezogen.

Durch das sich etablierende Parallel-Voting ist zukünftig nur mit einer temporären Abweichung zwischen IEC und EN zu rechnen; inhaltlich dagegen nicht.

### 5.3 IECEx

Die Vielzahl von Normen und Regelungen für die verschiedenen Märkte erschweren dem Hersteller von Ex-Produkten den Marktzugang und erfordern häufig eine Vielzahl von



Doppel- und Dreifachprüfungen, die auch mit hohen Kosten sowie insbesondere einer langen Bearbeitungszeit einhergehen. Im IECEx - Schema hat sich eine Vielzahl internationaler Prüfstellen zusammengeschlossen und erarbeiten ein einheitliches Zertifikationsschema. Bezüglich der Verpflichtungen für die Zugehörigkeit wird unterschieden zwischen „Full Participation“ und „Participation at a Transitional Level“. Basis für die Auslegung sind die IEC- Normen, die auch hierdurch global an Bedeutung gewinnen.

Basierend auf einheitlichen Normen ist eine weitere Voraussetzung des IECEx- Ansatzes die gegenseitige Anerkennung der Prüfergebnisse (ExTR, Test Report). Dabei hat sich auch als vertrauensbildende Maßnahme die gegenseitige Verifizierung (ExCB, Certification Body sowie ExTL, Ex-Testing Laboratory) erwiesen, die auch getrennt für die Zündschutzarten durchgeführt werden. Die zusätzlichen Anforderungen der zuständigen regulierten Überwachungsorgane in den jeweiligen Wirtschaftsräumen ermöglichen die gegenseitige Anerkennung der Zertifikate häufig nicht. Daher ist eine wesentliche Bestrebung die Anforderungen des IECEx- Schemas auch flexibel und offen zu halten, ohne dass Abschlüsse bei der sicherheitstechnischen Bewertung hingenommen werden.

Zusätzlich zur Produktzertifizierung ist identisch zu den Anforderungen der Richtlinie 94/9/EG eine Auditierung der Produktionsstätte notwendig. Durch die Erfüllung der beiden Anforderungen ist der Hersteller berechtigt das IECEx Mark of Conformity am Produkt anzubringen. Die Zertifizierungsdokumente werden im Internet abgebildet und können dort öffentlich eingesehen werden ([www.iecex.com](http://www.iecex.com)).

Eine weitere Ausdehnung von IECEx ist die Einbindung von Anforderungen für die Instandhaltung und Reparatur von explosionsgeschützten Betriebsmitteln sowie die Qualifikationskriterien von Personen zur Durchführung solcher Tätigkeiten.

#### **5.4 Prüfung elektrischer Maschinen im internationalen Vergleich**

Die widersprüchlichen Anforderungen in den Normen für den Explosionsschutz und den Definitionen in den Standardnormen für elektrische Maschinen haben zu abweichenden Prüfungsroutinen geführt. Insbesondere die unklare Formulierung über die sicherheitstechnische Funktion des Überwachungsgerätes im Zusammenspiel mit der Maschine bedarf für die Praxis einheitlicherer Regelungen.

Die EN 60079-0 legt fest, dass das elektrische Betriebsmittel zwischen 90 % und 110 % der Bemessungsspannung geprüft werden muss. Eine mögliche Frequenzschwankung der Spannungsnetze wird nicht tangiert. Für die Prüfung der elektrischen Maschine im Bemessungsbereich kann als Basis die Leistung oder das Drehmoment herangezogen werden, da keine Festlegungen in den Explosionsschutznormen getroffen werden. Abhängig von der Methode werden sich unterschiedliche Erwärmungen ergeben, die sich unmittelbar auf die Eingruppierung der Temperaturklasse für die jeweiligen Bemessungsleistungen auswirken. Die EN 60034-1 fordert jedoch eindeutig als Bemessungsgrundlage das Drehmoment.

Für den notwendigen Schutz der elektrischen Maschine muss zunächst unterschieden werden, ob der Schutz durch eine Überstromüberwachung oder durch in die Wicklung eingebettete Temperaturfühler realisiert werden soll. Zum anderen muss auch unterschieden werden, ob die elektrische Maschine bezüglich der Temperaturverteilung eher ständer- oder

rotorkritisch ist. Insbesondere für Maschinen der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ ist dies zu beachten. Da die Normung für den Explosionsschutz keine weiteren Prüfspezifikationen festlegt, etablieren sich zwangsläufig unterschiedliche Prüfpraxen. Die Konsequenzen sollen am Beispiel der Maschinen für die Druckfeste Kapselung „d“ und Erhöhte Sicherheit „e“ erläutert werden.

### **Druckfeste Kapselung „d“**

Wird der Schutz der Maschine durch in die Wicklung eingebettete Kaltleiter realisiert, muss beim Ansprechen der Kaltleiter die Oberflächentemperatur der Maschine unterhalb der Temperaturklasse sein. Basis für die Überlegung ist die Funktion der Überwachungseinrichtung bei Bemessungsspannung. Innerhalb des Spannungsbereiches wird sich bei der oberen Spannung und konstantem Bemessungsdrehmoment der Schlupf und üblicherweise auch der Strom reduzieren. Die Eisenverluste nehmen zu. Insgesamt wird die Maschine eher ständerkritischer und die Kaltleiter werden die Maschine schützen. Bei der unteren Spannung wird der Strom und der Schlupf ansteigen. Dies hat insbesondere Auswirkungen auf die Erwärmung des Rotors, was bei rotorkritischen Maschinen berücksichtigt werden muss.

Beim Schutz der Maschine durch Überstromrelais ist der spezifizierte Bemessungsstrom ausschlaggebend, da das Überstromrelais darauf eingestellt wird. Bei der oberen Spannung und konstantem Bemessungsdrehmoment wird der Strom üblicherweise kleiner sein. Das bedeutet, dass die Maschine ohne Ansprechen des Relais bei Überlast betrieben werden kann. Bei der unteren Spannung steigt der Strom an und das Relais kann bereits beim Bemessungsdrehmoment ansprechen. Liegt das tatsächliche Drehmoment geringfügig unterhalb des Bemessungsdrehmomentes, so dass das Relais nicht auslöst, so wird durch den zunehmenden Schlupf die Rotortemperatur ansteigen.

Zusätzlich zu den elektrisch-thermischen Unterschieden sind bei der Druckfesten Kapselung „d“ die Zünddurchschlagsversuche nicht einheitlich genormt. Die nordamerikanischen Prüfstellen UL und FM nutzen für die Versuchsreihen verschiedene Mischungsverhältnisse der zu untersuchenden Gase anstatt konstanter entsprechend IEC und CENELEC.

### **Erhöhte Sicherheit „e“**

Für die Auswertung bezüglich der Temperaturklasse, dem Anzugstromverhältnis und der Zeit  $t_E$  bieten sich verschiedene Kombinationen an, die abweichende Ergebnisse liefern. Da keine verbindliche Prüfprozedur vorhanden ist, ergeben sich international starke Unterschiede bei der Prüfung und Zulassung.

Bei der Erhöhten Sicherheit „e“ gilt neben der Oberflächentemperatur des Gehäuses auch die Übertemperatur im Inneren der Maschine. Die Abhängigkeiten der Dauerbetriebserwärmung sind dem oben beschriebenen der Druckfesten Kapselung „d“ identisch. Bei blockiertem Läufer ist die Erwärmung direkt von der anliegenden Spannung abhängig. Dem entsprechend ist der Anzugstrom und damit die Erwärmung bei + 10 % Spannung höher und umgekehrt bei verminderter Spannung auch geringer, wenn die Auslösezeit konstant wäre. Da sich aber die Kennlinie der Überstromauslösegeräte mit dem Verhältnis von Anzugstrom und Bemessungsstrom ändert, wird das Auslösegerät bei Überspannung auch eher auslösen, während es bei Unterspannung später auslösen wird.

Soll die thermische Überwachung durch in die Wicklung integrierte Temperaturfühler als Alleinschutz realisiert werden, müssen bei der Prüfung der Maschine die potentiellen Szenarien bedacht werden. Im Bemessungsspannungsbereich ist die Erwärmung der Ständerwicklung von der Spannungshöhe abhängig, wodurch sich auch die Ansprechzeit des Kaltleiters ändern wird. Insbesondere ist für Maschinen, bei denen der Temperaturgradient im Rotor höher ist als im Ständer, eine Überprüfung ratsam.

Für den thermischen Schutz der Maschine muss auch der Ausfall einer Phase unterstellt werden. Überstromauslösegeräte mit integriertem Phasenausfall decken den Fehlerfall ab. Ansonsten muss der sichere Betrieb durch einen 2-phasigen Lauf nachgewiesen werden. Diese Anforderung ist in den USA durchaus üblich.

Um eine international einheitliche Prüfpraxis zu etablieren, müssten detaillierte Angaben in die Explosionsschutznormen einfließen. Für die Funktion der Überwachungseinrichtung ist die Angabe und damit die Bestimmung des Bemessungsstromes, das Verhältnis von Anzugstrom zu Bemessungsstrom sowie die Zeit  $t_E$  (Überstromauslösegeräte) oder die Ansprechzeit  $t_A$  (Kaltleiter) notwendig.

- [1] 50 Jahre Explosionsschutz mit der PTB  
Symposium am 29. September 1999
- [2] Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen  
Vom 15. August 1963 (BGBl. IS. 697) mit Änderungsverordnung vom 25. August  
1965 (BGBl. IS. 1020)
- [3] Leitfaden für die Umsetzung der nach dem neuen Konzept und dem  
Gesamtkonzept verfassten Richtlinien, New Approach Richtlinie  
<http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/legislation/guide/document/guidepublicde.pdf>
- [4] Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. März  
1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Geräte und  
Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten  
Bereichen (ATEX 95), EG-Amtsblatt: 94/L100/1
- [5] Richtlinie 99/92/EG des Rates vom 16. Dezember 1999 über die  
Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitszustandes und der  
Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet  
werden können (ATEX 137)
- [6] Dreier, H.; Stadler, H.; Engel, U.; Wickboldt, H.  
Explosionsschutzgeschützte Maschinen der Schutzart „Erhöhte Sicherheit (Ex)e“  
PTB-Prüfregel Band 3  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, 1978
- [7] U. Dreger, F. Lienesch, U. Engel  
Bewertung der Verfahren zu Wirkungsgradbestimmung von Drehstrom  
-Asynchronmaschinen unter Anwendung des GUM  
PTB Mitteilungen, 113 Jahrgang, Heft 2, Juni 2003
- [8] Leitfaden zur Durchführung der Richtlinie 99/92/EG (ATEX 137)  
<http://europa.eu/eur-lex/en/com/cnc/2003/act0515en02/1.pdf>
- [9] Ex-RL Regeln BGR 104 „Explosionsschutz-Regeln“, Regeln für das Vermeiden  
der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphären, mit Beispielsammlung  
Fachausschuss „Chemie“ der BGZ
- [10] EN 1127-1:1997  
Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz  
Teil 1: Grundlagen und Methodik
- [11] DIN EN / IEC 60079-0 Ed. 4  
Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche – Allgemeine  
Bestimmungen
- [12] Lewis, B.; von Elbe, G.  
Combustion, Flames and Explosions of Gases  
Academic Press, New York (1961)
- [13] IEC 60079-3  
Electrical apparatus for explosive gas atmospheres - Part 3: Spark-test apparatus  
for intrinsically-safe circuits
- [14] Johannsmeyer, U.  
Zündung explosionsfähiger Gemische durch kurzzeitige Schließfunken in  
kapazitiven Stromkreisen für die Zündschutzart Eigensicherheit  
Dissertation TU Braunschweig 1984
- [15] IEC 60079-1-1  
Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 1-1: Flameproof

- enclosures „d“ – Method of test for ascertainment of maximum experimental safe gap
- [16] Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)  
Verordnung über die Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb von überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes vom 27.9.2002
- [17] Explosionsschutzverordnung (ExVO)  
Verordnung über das Inverkehrbringen von Geräten und Schutzsystemen für explosionsgefährdete Bereiche  
11. GSGV vom 12.12.1996
- [18] DIN EN / IEC 60079-7 Ed. 3  
Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche  
Teil 7: Erhöhte Sicherheit „e“
- [19] DIN EN / IEC 60079-1 Ed. 5  
Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche  
Teil 1: Druckfeste Kapselung „d“
- [20] DIN EN / IEC 60079-2 Ed. 4  
Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche  
Teil 2: Überdruckkapselung „p“
- [21] IEC 60079-26 Ed. 2 (FDIS)  
Explosive atmospheres – Part 26: Equipment with equipment protection level (EPL) Ga
- [22] DIN EN / IEC 60079-15  
Elektrische Betriebsmittel für explosionsfähige Bereiche  
Teil 15: Zündschutzart „n“
- [23] DIN EN 13463-1  
Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen  
Teil 1: Grundlagen und Anforderungen
- [24] prEN 61241-0  
Elektrische Betriebsmittel zur Verwendung in Bereichen mit brennbarem Staub  
Teil 0: Allgemeine Anforderungen
- [25] DIN EN 61241-1 (DIN EN 50281-1-1)  
Elektrische Betriebsmittel zur Verwendung in Bereichen mit brennbarem Staub  
Teil 1: Schutz durch Gehäuse „tD“
- [26] IEC 60079-31:CD  
Explosive atmospheres  
Part 31: Equipment - protection by enclosure „tD“
- [27] prEN 61241-4 (IEC 61241-4:2001)  
Elektrische Betriebsmittel zur Verwendung in Bereichen mit brennbarem Staub  
Teil 4: Elektrische Betriebsmittel - Zündschutzart „p“ („pD“)
- [28] Lienesch, F.  
Untersuchungen zum Durchschlag brennbarer Gase als Beitrag zum Explosionsschutz elektrischer Betriebsmittel  
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 282, 1999, ISBN 3-18-328221-6
- [29] Gerlach, U.; Wagner, S.  
Feldbusanschlüsse mit Wechselstromspeisung für die Zündschutzart Eigensicherheit  
Berichte aus dem Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der

- Elektrotechnik, Technische Universität Braunschweig, Prof. Varchmin,  
Wissenschaftsverlag, Aachen, 1999, ISBN 3-89653-670-2
- [30] CENELEC TR 50404 (BGR 132)  
Electrostatics – Code of practice for the avoidance of hazardous due to static  
electricity
- [31] EN 45000  
Qualitätsstandards für Prüflaboratorien
- [32] ISO 17025  
Akkreditierung von Prüflaboratorien
- [33] GUIDELINES ON THE APPLICATION OF COUNCIL DIRECTIVE 94/9/EC OF 23  
MARCH 1994 ON THE APPROXIMATION OF THE LAWS OF THE MEMBER  
STATES CONCERNING EQUIPMENT AND PROTECTIVE SYSTEMS  
INTENDED FOR USE IN POTENTIALLY EXPLOSIVE ATMOSPHERES, Ed. 2  
[http://ec.europa.eu/enterprise/atex/guide/guidesec\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/atex/guide/guidesec_en.pdf)
- [34] DIN EN 60 034-1  
Drehende elektrische Maschinen  
Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten
- [35] DIN EN 13463-5  
Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen  
Teil 5: Schutz durch sichere Bauweise
- [36] GUM, Guide to Expression of Uncertainty in Measurement first edition  
1993, corrected 1995
- [37] DIN EN 60034-17  
Drehende elektrische Maschinen  
Teil 17: Umrichter gespeiste Induktionsmotoren mit Käfigläufer -  
Anwendungsleitfaden
- [38] IEC 60034-25 Ed. 2 DTS  
Rotating electrical machines  
Part 25: Guide for the design and performance of cage induction motors  
specifically designed for converter supply
- [39] Lienesch, F.  
Umrichtergespeiste elektrische Antriebe  
Stahl, Ex-Zeitschrift 2003
- [40] Ch. Lehrmann, U. Engel, F. Lienesch  
Umrichtergespeister Induktionsmaschinen Teil 1 - 3  
Bulletin SEV/VSE 15/2002, 7/2003 24-25/2004
- [41] Ch. Lehrmann, H. Pape, U. Dreger, F. Lienesch  
Umrichtergespeiste Antriebe – Ein neuartiges Schutzkonzept für Antriebe in  
explosionsgefährdeten Bereichen  
Stahl, Ex-Zeitschrift 2006
- [42] Berth, M.; Eberhardt, M.; Kaufhold, M.; Speck, J.; Auinger, H.  
Elektrische Belastung und Ausfallverhalten der Wicklungsisolierung von  
Asynchronmaschinen bei Umrichterspeisung  
Elektrie 49, S. 336-346, 1995
- [43] Kaufhold, M.  
Elektrisches Verhalten der Wicklungsisolierung von Niederspannungsmaschinen  
bei Speisung durch Pulsumrichter  
VDI Verlag, Reihe 21, Elektrotechnik Nr. 172, 1995

- [44] U. Engel, F. Lienesch  
Zur Dimensionierung von Luft- und Kriechstrecken in explosionsfähiger Atmosphäre unter Berücksichtigung höherfrequenter Spannungen  
ELEKTRIE, Berlin 10-12/98 (52)
- [45] F. Lienesch, H. Wehinger  
Gasentladungen bei hochfrequenter Wechselspannung  
ELEKTRIE, Berlin 53 (1999) A Sonderausgabe
- [46] Schampel, K.  
Explosionsschutz an Ventilatoren  
PTB-Bericht W -15, ISSN 0341-6739
- [47] prEN 14986:2006  
Konstruktion von Ventilatoren für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen
- [48] EN / IEC 61986:2002  
Drehende elektrische Maschinen: Verfahren der äquivalenten Belastung und Überlagerung – Indirekte Prüfung zur Ermittlung der Übertemperatur
- [49] DIN V ENV 50269:1997  
Auswahl und repräsentative Prüfung von Hochspannungsmaschinen
- [50] Seinsch, Hans Otto  
Grundlagen elektrischer Maschinen und Antriebe  
B.G. Teubner Stuttgart, ISBN 3-519-06164-3
- [51] DIN EN / IEC 60079-14  
Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche  
Teil 14: Elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (ausgenommen Grubenbaue)
- [52] Greiner, H. u.a.  
Elektroinstallationen und Betriebsmittel in explosionsgefährdeten Bereichen  
Hüthig & Plaum, ISBN-10:3-8101-0235-0, 2006
- [53] DIN EN / IEC 61241-14  
Elektrische Betriebsmittel zur Verwendung in Bereichen mit brennbarem Staub  
Teil 14: Auswahl und Errichten
- [54] DIN EN / IEC 60079-17  
Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche  
Teil 17: Prüfung und Instandhaltung elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (ausgenommen Grubenbaue)
- [55] DIN EN / IEC 61241-17 (Entwurf)  
Elektrische Betriebsmittel zur Verwendung in Bereichen mit brennbarem Staub  
Teil 17: Prüfung und Instandhaltung elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (ausgenommen Grubenbaue)
- [56] IEC TS 60034-23 (DIN V VDE V 0530-23)
- [57] EN / IEC 60079-19 FDIS  
Explosive atmospheres - Part 19: Equipment repair, overhaul and reclamation
- [58] EN / IEC 61241-19  
Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust -  
Part 19: Repair and overhaul of electrical apparatus for combustible dust areas
- [59] Greiner H.  
Staubexplosionsschutz nach nordamerikanischer Praxis  
Stahl, Ex-Zeitschrift 37, 2005