

Handlungsempfehlung zur Vermeidung von Generatorschäden in Folge von Betauung spannungsführender Teile

Vorwort

Die in gasförmigen Stoffen enthaltene Feuchtigkeit kondensiert beim Auftreffen auf kältere Oberflächen in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen, insbesondere in Abhängigkeit von Druck und Temperatur. Geschieht dies im Bereich von nicht isolierten elektrischen Verbindungen innerhalb des Generators, sind elektrische Fehler kaum zu verhindern. Mehrere Schäden an Kraftwerksgeneratoren mit ähnlichen Schadensursachen und Ereignisabläufen durch die genannten Betauungen waren Anlass für die VGB-Projektgruppe Generatoren, die Ursachen zu analysieren und eine Handlungsempfehlung zur künftigen Vermeidung zu erarbeiten.

Die vorliegende Handlungsempfehlung definiert zunächst die spezifischen Begriffe und erläutert die Mechanismen, die zu einer Betauung innerhalb des Generators führen können. Darauf aufbauend werden Empfehlungen abgeleitet, wie durch technische und organisatorische Maßnahmen Generatorschäden in Folge von Betauung vermieden werden können.

An der Erarbeitung haben maßgeblich mitgewirkt:

Herr Bomba	E.ON Engineering, Gelsenkirchen
Herr Deisenhammer	KKW Gundremmingen
Herr Geraerds	Essent, Geertruidenberg (NL)
Herr Springer	EnBW, KW Heilbronn
Herr Wittner	RWE Power, Essen
Herr Kaiser	VGB-Geschäftsstelle Essen

Der VGB dankt allen an der Erarbeitung beteiligten Experten und deren Unternehmen für die Unterstützung, ebenso den Hersteller-Firmen Alstom und Siemens für die Abstimmung. Hinweise zur Anwendung und Verbesserung nimmt die VGB-Geschäftsstelle jederzeit gern entgegen.

Die vorliegende Empfehlung wurde nach bestem Fachwissen erstellt. Eine Haftung durch den VGB ist ausgeschlossen.

Anwendungsbereich

Die vorliegende Handlungsempfehlung dient als Leitfaden zur Reduktion der Gefahr von Generatorschäden als Folge von Betauung spannungsführender Teile. Sie gilt insbesondere für H₂-gekühlte Generatoren mit zusätzlich direkt Wasser gekühlter Ständerwicklung. Die beschriebenen Grundsätze bzw. Schadensmechanismen gelten sinngemäß auch für Generatoren ohne direkt Wasser gekühlte Ständerwicklung sowie für Generatoren mit Luftkühlung.

Das Gefahrenpotenzial für einen Generatorschaden in Folge von Betauung ist im Einzelfall durch Analyse der individuellen Betriebsparameter und Umgebungsbedingungen, des Generator designs, der Instrumentierung sowie des zugehörigen Regelkonzepts der Kühlkreisläufe zu bewerten. Die nachfolgend aufgeführten Empfehlungen sind als Leitfaden zu verstehen. Sie entbinden den Betreiber jedoch nicht von der Verpflichtung zur Analyse der vorgenannten Randbedingungen.

Insbesondere sind Maßnahmen bei Inbetriebnahme nach längeren Stillständen mit möglichem Feuchtigkeitseintrag in den Generator zu beachten.

Begriffe

Kühlgas:

Nachfolgend wird der Begriff Kühlgas als Synonym für die zur internen Generatorkühlung verwendeten Gase wie Luft und H₂ verwendet. Die beschriebenen Phänomene gelten für beide Gase. Ausprägung und Umfang unterscheiden sich jedoch quantitativ.

Kaltgas:

Kühlgas direkt nach Austritt aus dem Gaskühler

Warmgas:

Kühlgas vor Eintritt in den Gaskühler

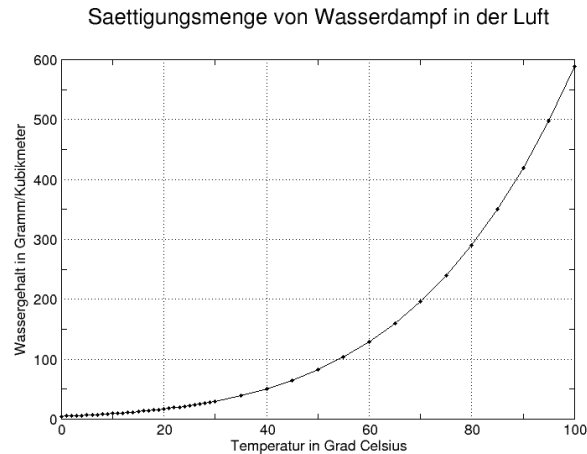
Ständerkühlwasser:

Direktes Kühlwasser für die Ständerwicklung. Es sind auch die Begriffe Primärwasser und Reinstwasser gebräuchlich.

Betauung:

Der Begriff Betauung bezeichnet den Vorgang des Niederschlags des innerhalb des Kühlgases gebundenen Wassers auf kalten Anlagenteilen. Die Wasseraufnahmefähigkeit der Kühlgase ist u. a. von der Art des Kühlgases, der Kühlgastemperatur sowie des Kühlgasdrucks abhängig. Der Wassergehalt von 1 m³ gesättigter Luft ist nahezu gleich wie der von 1 m³ gesättigtem Wasserstoff.

Darüber hinaus nimmt die Wasseraufnahmefähigkeit von Gasen mit steigender Temperatur zu.



Ist die Wasseraufnahmefähigkeit zu 100% erreicht, ist das Kühlgas gesättigt. Eine weitere Aufnahme von Wasser ist bei gleich bleibenden Parametern von Druck und Temperatur im Bereich der Sättigung nicht möglich. Wird die Temperatur des Kühlgases bei gleich bleibender, absolut im Kühlgas gespeicherter Wassermenge reduziert, so kondensiert das überschüssige Wasser bei Erreichen der Sättigungsgrenze und weiterer Reduktion der Kühlgastemperatur (Nebelbildung, Tropfenbildung). Das kondensierte Wasser schlägt sich als Feuchtigkeitsbelag an den kalten Anlagenteilen nieder.

hygroskopisch:

Eigenschaft von Stoffen, die Luftfeuchtigkeit anzuziehen und sich unter Feuchtigkeitseinfluss zu dehnen.

Die Wasseraufnahmefähigkeit der in modernen Generatoren eingesetzten lackisolierten Blechpakete ist zwar deutlich geringer als bei der papierisolierten Ausführung, jedoch wirken die beschriebenen Effekte ebenso.

Adsorption:

Bindung von Gasen oder gelösten Stoffen an der Oberfläche von festen Stoffen.

Schadensmechanismen

Eine Betauung im Inneren des Generators zu ermöglichen, setzt das Vorhandensein folgender Kriterien voraus

1. Feuchtigkeit innerhalb des Generators
2. partielle Sättigung des Kühlgases mit Feuchtigkeit
3. Generatorbereiche mit Temperaturen unterhalb der Kühlgastemperatur.

Kriterium 1, Feuchtigkeit innerhalb des Generators:

Innerhalb des Generators werden Materialien mit hygroskopischem Verhalten eingesetzt. Hierzu zählen u. a. das bei älteren Generatoren (bis Baujahr Mitte 80er Jahre) für die Isolierung der einzelnen Blechsegmente des Ständerblechpakets verwendete Isolierpapier und auch das heute teilweise als Isoliermaterial eingesetzte Nomex.

Insbesondere bei Generatorstillständen mit geöffnetem Generatorgehäuse diffundiert die in der Umgebungsluft des Generators (z.B. Maschinenhaus) vorhandene Luftfeuchtigkeit in die vorgenannten Materialien ein und wird von diesen gespeichert.

(Erfahrungen an einem 300 MW Generator haben gezeigt, dass durch Diffusion in hygroskopische Materialien und hauptsächlich Adsorption von Feuchtigkeit an Materialoberflächen bis zu ca. 50 kg Feuchtigkeit eingetragen werden können.)

Es ist daher davon auszugehen, dass die für eine Sättigung des Kühlgases erforderliche Feuchtigkeitsmenge, insbesondere nach Öffnung des Generatorgehäuses z.B. im Zuge einer Generatorrevision, gespeichert ist.

Versuche haben gezeigt, dass eine H₂-Nachschleusung die Feuchtigkeitsmenge nicht deutlich reduziert.

Kriterium 2, partielle Sättigung des Kühlgases mit Feuchtigkeit:

Bei Betrieb (Reibung, Erregung) des Generators wird durch die Erwärmung die in den hygroskopischen Materialien gespeicherte Feuchtigkeit freigesetzt und an das Kühlgas abgegeben. Das Kühlgas nimmt die freiwerdende Feuchtigkeit auf. Ist das Kühlgas gesättigt, d.h. hat es bei den vorherrschenden Bedingungen für Temperatur und Druck seine maximale Wasserspeicherkapazität erreicht, ist keine weitere Aufnahme der Feuchtigkeit durch das Kühlgas möglich.

Hinweis: Die zur Sättigung von ca. 800 m³ i.N. H₂-Gas, bei einem Betriebsdruck von 6 bar absolut und einer Temperatur von 40 °C erforderliche Menge Wasser beträgt ca. 8 Liter.

(Bei einem freien Volumen von 130 Gas i.N. und einem Betriebsdruck von 6 bar absolut und 40 °C reichen ca. 6 l Wasser aus, um den Sättigungszustand zu erreichen.)

Wird weiterhin aus den hygroskopischen Materialien Feuchtigkeit in Folge z.B. zunehmender Erwärmung des Ständerblechpakets (Eisenverluste) ausgetrieben, so kommt es innerhalb des Generators zu Schlierenbildung der Feuchtigkeit.

Kriterium 3. Generatorbereiche mit Temperaturen unterhalb der Kühlgastemperatur

Im Bereich der Gaskühler erfolgt die Rückkühlung des Kühlgases. Die Oberflächentemperaturen der Gaskühler liegen in diesen Bereichen unterhalb der Temperaturen des Kühlgases (gilt gleichermaßen für den Bereich vor bzw. hinter den Gaskühlern (Warmgas-/Kaltgasseite). Durchströmt gesättigtes Kühlgas die Kühlerelemente, so kondensiert ein Teil der im Kühlgas gespeicherten Feuchtigkeit im Bereich der Kühlerelemente. Die Gaskühler sind im Allgemeinen so konstruiert, dass eine gezielte Abführung/Rückhaltung der kondensierten Feuchtigkeit im Bereich der Gaskühler erfolgt und somit der Eintrag in den Bereich spannungsführender Teile verhindert wird.

Unter besonderen Betriebsbedingungen wie z.B. bei fehlender oder eingeschränkter wasserseitiger Durchströmung der Gaskühler, kalten Umgebungstemperaturen, direkt wassergekühlten Ständer- bzw. Läuferwicklungen usw., ist eine Verlagerung der kältesten Stelle außerhalb der Kühlerbereiche möglich. In diesem Fall erfolgt die Kondensation/Betauung an unkontrollierter Stelle außerhalb der Gaskühler z. B. an den spannungsführenden Teilen des Wickelkopfes.

Durch Unterschreitung der minimalen Isolationsstrecken als Folge der Betauung spannungsführender Teile ist die Gefahr eines Generatorschadens gegeben.

Achtung! Der Prozess der Betauung ist ein schnell fortschreitender Prozess. Falls auf Oberflächen außerhalb der Gaskühler die Temperaturen der zugehörigen Kaltgastemperaturen unterschritten werden, kann es innerhalb kurzer Zeit (< 30 Minuten) hierdurch zum Totalschaden des Generators kommen. Als besonders kritisch sind hier die nichtisolierten spannungsführenden Bereiche anzusehen.

Oberstes Ziel zur Verhinderung eines Generatorschadens ist die Vermeidung von unkontrollierter Betauung.

Aus diesem Grund werden zum Schutz des Generators der Einsatz von (automatisch) wirkenden Schutzmechanismen bzw. Regelungen empfohlen.

Handlungsempfehlung:

Zur Vermeidung von Generatorfehlern in Folge von Betauung, ist eine detaillierte Analyse der Umgebungsbedingungen, Anfahr- und Betriebszustände, Betriebsparameter sowie messtechnischen Ausrüstung der Generatoren erforderlich. In die Betrachtungen sind insbesondere auch die Funktionsweisen und regelungstechnischen Eigenschaften der Nebenanlagen einzubeziehen und unter Berücksichtigung der konstruktiven Ausführung des Generators zu bewerten. Eine Einbeziehung des Herstellers der Generatoranlage ist zu empfehlen.

Ungeachtet der erforderlichen detaillierten Bewertung der Einzelanlage sind, zur Vermeidung eines internen Generatorfehlers in Folge von Betauung spannungsführender Teile, nachfolgend aufgeführte Ziele zu verfolgen:

1. Vermeidung/Reduktion des Feuchtigkeitseintrags in den Generator durch
 - 1.1 Reduktion der Öffnungszeiten des Generatorgehäuses auf ein Minimum
 - Anschluss von Lufttrocknern während der Generatorstillstände zur Beaufschlagung der Generatoren mit vorgetrockneter Luft
 - Einsatz von Gasstillstandsumwälzgebläsen (ggf. als fest installierte Komponente in der H₂-Anlage)
 - Optimierung des Einsatzes der Kühlgastrockner vor bzw. beim Anfahren der Generatoranlage
 - 1.2 Minimierung von Generatorstillständen ohne H₂-Füllung
2. Kontrolle des Feuchtigkeitsgehalts des Kühlgases sowie schnellstmögliche Reduktion/Abführung der generatorinternen Feuchtigkeit
 - Überprüfung der vorhandenen Feuchtigkeitserfassung bzw. Einbau einer geeigneten Feuchtigkeitserfassung (Taupunktmessung) für Taupunkte im Bereich von -20 °C bis +50 °C. Mit der derzeit verfügbaren Gerätetechnik sind für diese Messaufgabe zwei Messsysteme erforderlich (-20 °C bis +10 °C und 0 bis 50 °C). Bei der Auswahl und Anordnung der Messung sind die örtlichen Gegebenheiten des Generators zu betrachten. Es ist sicherzustellen, dass der ermittelte Feuchtigkeitswert repräsentativ für den Feuchtigkeitsgehalt innerhalb des Generators ist und mit kurzer Ansprechzeit (geringe Totzeit) zur Verfügung steht. Dabei ist bereits bei der Anordnung der Messung darauf zu achten, dass die Messung in allen Betriebspunkten des Generators (auch bei geringer Drehzahl und damit ggf. geringen Druckunterschieden innerhalb der Kühlgasbereiche) ausreichend von Kühlgas durchströmt wird. Kondensation in den zur Messung führenden Leitungen ist zu vermeiden, da diese zu einer Verfälschung des Messergebnisses (Anzeige eines geringeren als des tatsächlich vorhandenen Feuchtigkeitsgehalts) führt.
3. Kontrolle der generatorinternen Temperaturverteilungen zur Vermeidung der Kondensation/Betauung
 - Gewährleistung eines Sicherheitsabstands (Taupunkt Abstandes) zwischen wärmster Kaltgastemperatur (max. Momentanwert der Temperatur des Kühlgases hinter den Gaskühlern) und kältester Temperatur möglicher Kondensationsstellen (z.B. Eintrittstemperatur des Ständerkühlwassers) durch entsprechende Regelung. Dies ist z.B. durch die Verwendung des max. Kaltgastemperaturmesswertes als Führungsgröße für die Regelung der Ständerkühlwassereintrittstemperatur zu realisieren. Durch die Regelung ist sicherzustellen, dass die Ständerkühlwassereintrittstemperatur der max. Kaltgastemperatur mit einem Sicherheitsabstand von $\geq 3\text{-}5\text{K}$ (herstellerabhängig) voraus läuft.

Eine Anhebung der Ständerkühlwassereintrittstemperatur und eine damit verbundene Sicherstellung des Abstandes zwischen wärmster Kaltgastemperatur und Ständerkühlwassereintrittstemperatur kann als Maßnahme ebenfalls geeignet sein.
 - Durch geeignete Optimierung der Regelung und anderer Parameter ist sicherzustellen, dass der Abstand von $\geq 3\text{-}5\text{K}$ auch bei transienten Vorgängen sichergestellt wird.
 - Installation von Kaltgastemperaturmessungen hinter jedem Gaskühler (Kaltgasseite)

-
- Aufzeichnen sämtlicher Kaltgastemperaturen und Visualisierung der Kaltgastemperaturen zusammen mit Temperaturen möglicher Kondensationsstellen (wie z.B. Vorlauftemperatur des Ständerkühlwassers bei direkt wassergekühlten Ständerwicklungen; mögliche Kondensationsstelle Ständerkühlwassereintritt innerhalb des Generators)
 - Ableitung von Alarmmeldungen bei Unterschreitung einer minimalen Differenztemperatur zwischen der kältesten Temperatur möglicher Kondensationsstellen und der max. Kaltgastemperatur von z.B. weniger als 3-5K
 - Einsatz der Generatorstillstandsheizung vor dem Anfahren zur Erhöhung der Generator internen Temperaturen (z.B. Kaltstellen, Erhöhung der Ständerkühlwasservorlauftemperatur, ggf. Verwendung eines Gasstillstandsumwälzgebläses usw .)
 - Der Einsatz eines 3-Wege Kaltgasregelventils mit Rezirkulation auf der Wasserseite der H2-Kühler zusammen mit dem Einsatz eines Ständerkühlwasser Vorwärmers können das Regelverhalten und die Gefahr der Betauung, speziell beim Anfahren nach Stillständen, drastisch reduzieren.
 - Erregung beim Anfahrprozess erst dann, wenn der Sicherheitsabstand von 3-5K eingehalten wird und der Taupunkt unterhalb +10°C ist. (Alarm bei Taupunkt $\geq + 10^\circ\text{C}$)
 - Bei einer Störung der Regelung der Ständerkühlwassertemperatur kann der erforderliche Mindestabstand von $\geq 3-5\text{K}$ zwischen Primärwasser- und Gastemperatur unterschritten werden.

Wird die Primärwassertemperatur nur an einer Stelle gemessen und fällt diese Messung nach oben aus, so würde die Primärwassertemperatur durch Öffnen des Regelventils stark abgesenkt werden. Es ist daher empfehlenswert, die Primärwassertemperatur mindestens an zwei Stellen zu erfassen und den Minimalwert für die Regelung zu verwenden.

Der Einsatz eines AMOT-Reglers im Kühlwasserkreislauf verringert dieses Risiko.

Essen im September 2005