

## Online-Taupunktüberwachung von Anlagen mit SF6-Gasisolierung

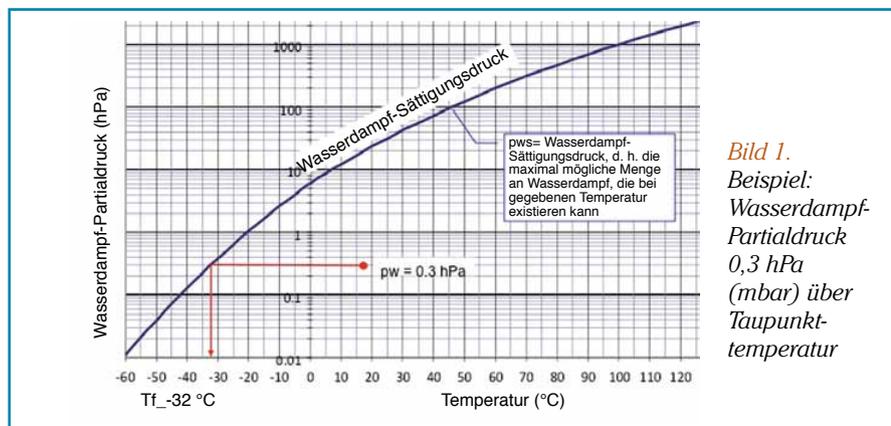
*In den letzten Jahren hat die Online-Überwachung des SF6-Taupunkts stetig zugenommen. Die Faktoren, die auf die Zuverlässigkeit von Online-Messungen in Umgebungen ohne Gasströmung Einfluss haben, sind jedoch weniger bekannt. Dieser Artikel beschäftigt sich mit Wasserdampf sowie dem transienten Verhalten der Feuchte und hinterfragt die grundlegenden Auswirkungen auf die Montage, deren Planung und die Wahl der Verbindungs- und Dichtungsmaterialien.*

Um die Eigenschaften der SF6-Isolierung aufrechtzuerhalten und die Entstehung korrosiver Nebenprodukte beim Abbau von SF6 zu verringern, muss die in gasisolierten Hochspannungsanlagen vorhandene Menge an Wasserdampf auf einem Minimum gehalten werden.

Auch wenn ursprünglich mit einem trockenen Gas befüllt und bei erhöhtem Druck und unter Ausschluss eines externen Gasflusses versiegelt wurde, kann es aufgrund des hohen Eindringvermögens von Wassermolekülen besonders bei

alternden Anlagen zu einem erhöhten Feuchteniveau kommen.

Gewöhnlich wurde der Feuchtegehalt durch regelmäßige Entnahmen von Gasproben überwacht, in den letzten Jahren jedoch haben sich immer mehr Zustandsüberwachungssysteme mit Online-Taupunktmessung von SF6-Gas durchgesetzt. Dabei hat sich allerdings herausgestellt, dass diese Art von Anwendungen Herausforderungen mit sich bringen, die sich von denen herkömmlicher industrieller Taupunktmessungen oder der Messung anderer grundlegender Parameter wie Druck und Temperatur in Anlagen mit SF6-Isolierung unterscheiden. So sind insbesondere die Art der Montage, die in den Messsystemen verwendeten Materialien und die Art der Anschlüsse entscheidend für die Beurteilung, ob die Messungen tatsächlich die gewünschten wertvollen Daten für das Anlagenmanagement liefern. Darüber hinaus stellt häufig die Anordnung von fernbedienten Anlagenteilen erhebliche Anforderungen an die Stabilität und den Instandhaltungszyklus der bei der Zustandsüberwachung von Hochspannungsanlagen eingesetzten Messgeräte.



+20 °C		
	SF6 BEI 4 BAR	UMGEBUNGSLUFT
Taupunkt	-40 °C	+9,3 °C
relative Feuchte	0,6 % rF	50 % rF
Dampfdruck (pw)	0,13 hPa	11,7 hPa
+35 °C		
Taupunkt	-40 °C	+31 °C
relative Feuchte	0,2 % rF	80 % rF
Dampfdruck (pw)	0,13 hPa	45 hPa

**Tabelle 1.** Beispiele für den Taupunkt, die relative Feuchte und den Dampfdruck in einem Gastank unter normalem Luftdruck, für zwei verschiedene Temperaturen (+20 und +35 °C) und Umgebungsfeuchten (50 und 80 % rF). Die Wassermoleküle (H<sub>2</sub>O) streben danach einen Gleichgewichtszustand zu erreichen und bewegen sich aus dem Bereich des höheren in den des niedrigeren Dampfdrucks.

### Wasserdampfdruck und Taupunkt

Wasserdampf ist allgegenwärtig und immer Bestandteil des Gesamtgasdrucks, wie z. B. des Luftdrucks oder des Systemdrucks in gasisolierten Schaltanlagen (GIS).

Mit Tau-/Frostpunkt ( $T_{d/f}$ ) wird die Temperatur bezeichnet, bei der der Wasserdampf-Partialdruck ( $p_w$ ) eines Gases gleich dem Wasserdampf-Sättigungsdruck ist.

Somit ist der Taupunkt die Temperatur, auf die ein Gas abgekühlt werden muss, damit Wasserdampf als Tau oder Reif kondensiert.  $\rightarrow p_w = p_{ws}(T_{d/t})$

Der Taupunkt ist keine temperaturabhängige Größe und kann daher gemessen werden, obwohl z. B. die Temperatur einer Gasprobe von der Systemtemperatur abweicht. Der Taupunkt hängt jedoch stark vom Druck ab. Es ist also wichtig, dass eine Messung bei gleichem Druck wie im Hauptgasvolumen erfolgt oder die exakten Druckwerte bekannt sind, damit eine genaue Umrechnung der Werte erfolgen kann, zum Beispiel: Taupunkt bei 4 bar oder Taupunkt bei Normaldruck.

## Dampfdiffusion

In der Dampfphase (Gas), sind die Wassermoleküle nicht gebunden und können sich aufgrund ihrer geringen Molekülgröße leicht bewegen. Wasserdampf ist bestrebt, ein Gleichgewicht zwischen den verschiedenen Phasen zu erreichen. Daher haben Wassermoleküle die Tendenz von hohem Dampfdruck zu niedrigem zu diffundieren, und dies selbst durch polymeres Material hindurch, wie z. B. Dichtungsringe oder entlang von Metalloberflächen an den Anschlusspunkten. Dieses Phänomen tritt ebenfalls von

niedrigem Umgebungsdruck zu höherem Prozessdruck auf, so zum Beispiel bei Umgebungsluft zu SF6 in Hochspannungsanlagen. Daher bedeutet druckdicht nicht unbedingt wasserdampfdicht. Der Diffusionseffekt ist sehr langsam und nur durch Online-Messungen kleiner Mengen von ruhendem Gas sichtbar.

## Feuchteübergänge

Der Wasserdampfdruck innerhalb eines abgeschlossenen Gassystems bleibt selbst dann nicht exakt konstant, wenn keine Diffusion auftritt. Temperaturschwankungen im System führen zu Feuchte- (Dampf-) Übergängen zwischen den zwei Phasen, d.h. Gas und festen Stoffen im Kontakt mit dem Gas. Steigt die Temperatur an, geben die Feststoffe Dampf an das Gas ab, weil die zwei unterschiedlichen Phasen ein Feuchtegleichgewicht anstreben, d.h. eine relative Gleichgewichtsfeuchte; mit sinkender Temperatur geschieht genau das Gegenteil. Die Feuchtequellen innerhalb gasisolierter Anlagen können Poren der Metalloberfläche und organische Werkstoffe wie Abstandshalter oder Dichtungsringe sein. Je größer die Oberfläche der Feststoffe gegenüber dem Gasvolumen, desto größer die Wirkung der Dampfübergänge auf den Taupunkt.

Abb. 3 zeigt die Wirkung von Dampfübergängen bei einer in Finnland installierten Anlage im Herbst 2010. Weil der Sensor in einem kleinen Block mit einer langen Verrohrung vom Hauptgastank aus und mehreren Anschlusspunkten installiert wurde, weist das Gas im Bereich des Sensors nicht notwendigerweise die tatsächlichen Taupunktbedingungen im Hauptgastank auf.

Es war nicht eindeutig nachweisbar, ob die festgestellten Feuchteübergänge ausschließlich im Hauptgastank oder nur innerhalb der Gasleitung der Probenentnahme, an der der Sensor lag, auftraten. Referenzmessungen direkt am Hauptgastank waren nicht möglich, da kein Anschlusspunkt für einen weiteren Sensor verfügbar war.

Bei einer derartigen Montage ist die Temperatur ein weiterer wichtiger Faktor. Wird der Sensor an einer entfernten Stelle montiert, ist es möglich, dass sich die Temperatur am Sensor irgendwann erheblich von der im Hauptgastank unterscheidet und somit die Feuchteübergänge im Hauptgastank und in der Gasleitung dazu führen, dass das Gas einen deutlich abweichenden Feuchtegehalt aufweist. Da die Dampfdiffusion in ruhendem Gas ein sehr langsamer Prozess ist, können die gemessenen Werte für den Taupunkt eventuell nicht denen des Hauptgastanks entsprechen. Das ist vor allem dann wahrscheinlich, wenn es ständig zu Temperaturschwankungen kommt, die zu kontinuierlichen dynamischen Feuchteübergängen führen, d.h. kein Gleichgewicht erreicht wird.

Bei Druck- oder Dichtemessungen wäre ein solcher Aufbau nicht problematisch. Bei Taupunktmessungen kann diese Art der Montage aber zu falschen Ergebnissen führen.

Die Wasserdampfmenge im Zusammenhang mit den Übergängen in der Gasleitung ist äußerst gering, wird aber bei Online-Messungen in geringen ruhenden Gasmengen sichtbar.



Abb. 2: Außenmontage in einem "Sensorblock".

## Montage eines Online-Taupunktsensors

Bei der Planung eines Online-Messaufbaus für einen Taupunktsensor in SF<sub>6</sub>-isolierten Anlagen sollten die beschriebenen Grundprinzipien des Verhaltens von Wasserdampf mit berücksichtigt werden, um korrekte Messungen zu gewährleisten und somit die richtigen Schlussfolgerungen ziehen zu können. Gewöhnlich wird der Taupunkt von SF<sub>6</sub> mithilfe der Entnahme einer Gasprobe aus dem Tank gemessen. Das bedeutet aber, dass immer ein Gasdurchsatz während der Messungen mit berücksichtigt werden musste. Der Gasdurchsatz überdeckt aber den Effekt einer sehr langsamen Diffusion und der Dampfübergänge zwischen Gas und Feststoffen.

Es ist heutzutage üblich, Taupunktsensoren im selben Sensorblock mit Druckrelais oder Dichtesensoren zu installieren. Außerdem sind diese Blöcke oft nicht direkt am Hauptgastank angebracht, sondern werden entweder durch Polymer- oder Metallleitungen mit dem Tank verbunden. Diese Anschlusspunkte und Leitungen bieten Raum für eine Dampfdiffusion und sind ein Medium für Feuchteübergänge. In einem relativ kleinen ruhenden Gasvolumen sind derartige Effekte von großer Bedeutung. Daher führt die Montage eines Taupunktsensors in der oben beschriebenen Weise sehr wahrscheinlich zu Messungen, die nicht die erwarteten nützlichen Daten zur Anlagenbewertung liefern würden.

Für eine bestmögliche Onlinemessung des Taupunkts in einem SF<sub>6</sub>-isolierten System sollte der Sensor so nah wie möglich am Hauptgastank montiert werden, vorzugsweise direkt an der Tankwand. Außerdem sollte eine möglichst geringe Zahl von Anschlusspunkten genutzt und der Einsatz von Kunststoff oder Gummi in der Nähe der Messzelle vermieden werden. Falls möglich, sollten

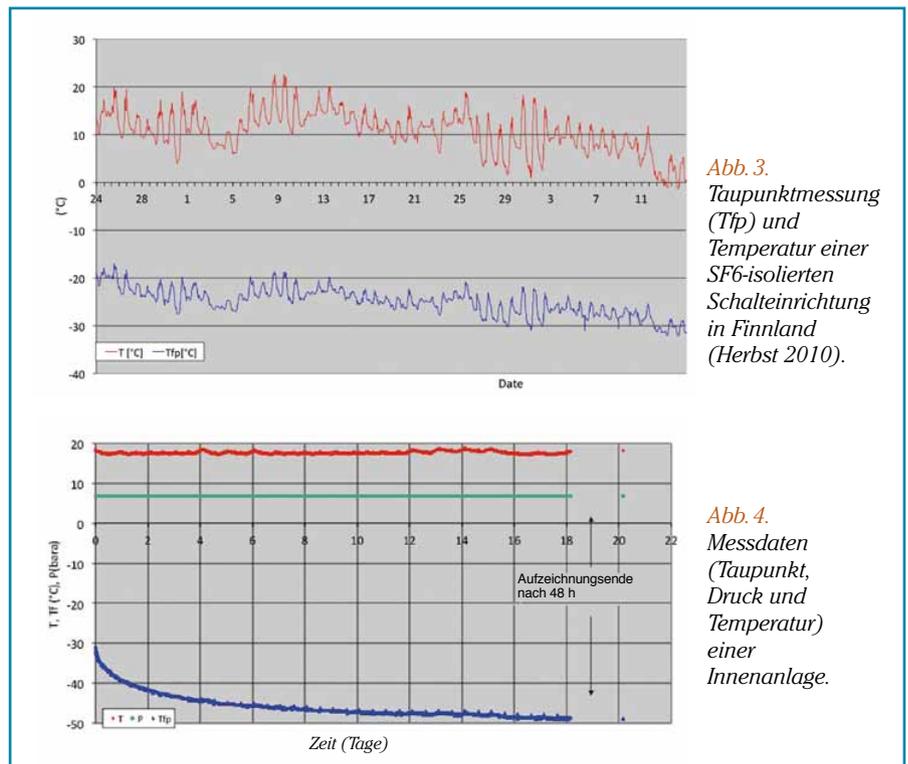


Abb. 3. Taupunktmessung (Tf) und Temperatur einer SF<sub>6</sub>-isolierten Schalteinrichtung in Finnland (Herbst 2010).

Abb. 4. Messdaten (Taupunkt, Druck und Temperatur) einer Innenanlage.

vorzugsweise metallische Abdichtungen zum Einsatz kommen.

## Systemansprechzeit nach Sensormontage

Die Ansprechzeit von Taupunktmessungen in GIS wird nicht durch die Ansprechzeit des Sensors selbst definiert, die normalerweise in Sekunden oder Minuten gemessen wird. Der entscheidende Faktor ist die Systemansprechzeit nach der Montage. Bei der Montage des Sensors dringt Feuchte der Umgebungsluft über den Anschlusspunkt des Systems ein. In Anbetracht des SF<sub>6</sub>-Gesamtvolumens kann dieser Dampf aber vernachlässigt werden. Jedoch ist der Effekt hinsichtlich des Sensors in der Messzelle deutlich sichtbar und auch messbar. Es dauert eine gewisse Zeit, bis der Dampfdruck in der Messzelle ein Gleichgewicht mit dem Hauptgastank erreicht. Selbst wenn der Sensor sehr nahe am Haupttank angebracht ist, kann es Stunden oder sogar einige Tage dauern, bis der Dampfdruck und somit auch der

Taupunkt in beiden Gasvolumen gleich sind.

Die Ansprechzeit des Systems wird dadurch bestimmt, wie schnell eine Messzelle nach der Montage auf den gleichen Dampfdruck wie das SF<sub>6</sub>-Volumen trocknet, d.h., wie schnell Wassermoleküle aus dem Feststoff in das Gas der Zelle übergehen, dann von der Zelle zum Tank diffundieren und schließlich ein Gleichgewicht erreicht wird. Je trockener das Gas ist, desto länger dauert die Trocknung der Feststoffe und Oberflächen, ganz besonders in ruhendem Gas. Der Abstand zwischen den zwei Volumen und der Trockenheit des SF<sub>6</sub> beeinflusst die Diffusionsgeschwindigkeit von der Zelle zum Tank. Je größer der Abstand und je trockener das Gas ist, umso länger dauert es, ein 100%ig korrektes Ansprechverhalten zu erreichen. Liegt eine zu starke Diffusion durch die Leitungen oder Anschlusspunkte vor, kann es passieren, dass der Dampfdruck in der Messzelle nie ein Gleichgewicht mit dem Hauptgastank erreicht und daher die Messung nicht



*Abb. 5. Montage eines Multiparameter-Messwertgebers (DPT145) direkt im Hauptgastank (25.03. – 14.04.2010). Das Gasvolumen in der Messzelle beträgt ungefähr 20 ml.*

den tatsächlichen Zustand im Tank darstellt.

Daher ist es besonders wichtig, schon während der Montage das Eindringen von Feuchte so gering wie möglich zu halten. Um zu vermeiden, dass Wassertropfen mit den Sensoranschlüssen in Berührung kommen, sollte die Montage nicht bei Regenwetter erfolgen. Darüber hinaus sollte auch darauf geachtet werden, dass weder Staub noch Schmutzpartikel auf der Dichtungsoberfläche zurückbleiben. Sie könnten später das Medium für die Diffusion von Wassermolekülen sein und die Messung ruinieren. Im schlimmsten Fall kann es so zu einer Befeuchtung des SF6 kommen. Bei Außenmontage sollte ein Regenschutz verwendet werden, um Wasseransammlungen auf den Anschlusspunkten und eine erhöhte Dampfdiffusion zu vermeiden.

### Systemansprechzeit im Betrieb

Es stellt sich die Frage, wie der Sensor bei Anstieg des Taupunkts im SF6 Gasvolumen anspricht, denn die Ansprechzeit des Systems nach der Sensormontage ist verhältnismäßig langsam.

Diese anfänglich langsame Ansprechzeit resultiert vor allem daraus, dass die Trocknung der Oberflächen von Feststoffen (Poren) selbst dann lange Zeit in Anspruch nimmt, wenn ein Gasstrom vorhanden ist. Bei ruhenden Gasen dauert dieser Trocknungsprozess noch wesentlich länger. Das Phänomen hat jedoch nur eine geringe Auswirkung, wenn Gas mit höherer Feuchte aus dem Haupttank in die trockenere Messzelle diffundiert, wo der Taupunkt gemessen wird.

Ein zweiter zu berücksichtigender Faktor bei großen SF6-Gasmengen liegt im sehr langsamen Anstieg des

Taupunkts aufgrund der Diffusion durch das Dichtungsmaterial oder entlang von Metalloberflächen. Wenn der Taupunkt im Hauptgastank anzusteigen beginnt, geschieht das auch in der Messzelle und wird vom Sensor mehr oder weniger zur gleichen Zeit festgestellt, vorausgesetzt dass der Sensor sich nahe genug am Hauptgastank befindet.

Ob die Taupunktwerte zum gleichen Zeitpunkt exakt dieselben sind (100 %iges Ansprechen) ist nicht entscheidend, da die steigende Tendenz anzeigt, dass Korrekturen vorgenommen werden müssen.

Jede schnelle, drastische Veränderung des Taupunkts weist auf ein Leck hin, das sowohl durch Taupunkt- als auch Druckmessungen auffindig gemacht werden sollte.

### Zusammenfassung

Um sicherzustellen, dass ein Online-Messsystem verlässliche und nützliche Daten über den Taupunkt liefert, die geringstmögliche Unsicherheiten aufweisen, ist es entscheidend, sowohl der Bauart des Taupunktsensors als auch dem Montagevorgang selbst große Aufmerksamkeit zu schenken. Qualität und Langzeitstabilität des Sensors sind dabei ebenfalls entscheidend. Die besten Messergebnisse werden dann erreicht, wenn der Sensor direkt im Hauptgastank montiert wird. Es sollten sowohl für Anschlüsse als auch Dichtungen am Sensor nur hochwertige metallische Werkstoffe verwendet werden. Wenn sichergestellt wird, dass die Sensormessungen die Taupunktwerte des SF6-Volumens nach der Montage erreichen, kann dadurch bestätigt werden, dass eine weitere oder Leitungen die Messung nicht beeinträchtigt, die Messdaten langfristig zuverlässig sind und somit Fehlalarme vermieden werden.

**VAISALA**

Weitere Informationen erhalten Sie auf unserer Webseite unter [www.vaisala.de](http://www.vaisala.de) oder senden Sie eine Nachricht an [sales@vaisala.com](mailto:sales@vaisala.com)

Ref. B211198DE-A ©Vaisala 2012

Das vorliegende Material ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte hierfür liegen bei Vaisala und ihren jeweiligen Partnern. Alle Rechte vorbehalten. Alle Logos und/oder Produktnamen sind Markenzeichen von Vaisala oder ihrer jeweiligen Partner. Die Reproduktion, Übertragung, Weitergabe oder Speicherung von Informationen aus den vorliegenden Unterlagen in jeglicher Form ist ohne die schriftliche Zustimmung von Vaisala verboten. Alle Spezifikationen, einschließlich der technischen, können ohne vorherige Ankündigung geändert werden. Der vorliegende Text ist eine Übersetzung aus dem Englischen. Bei Widersprüchen zwischen Übersetzung und Original ist die englische Fassung des Textes maßgebend.