

BETAUUNG- DIE UNBEKANNTE GRÖSSE

Joachim Cäsar, Fraunhofer ICT
Dr.-Ing. Ulrich Braunmiller, Fraunhofer ICT

Zusammenfassung

Die verschiedenen Umweltparameter, die auf technische Produkte wirken und zu Ausfällen führen können, sind bei Produktprüfungen und Umweltsimulationstests in vielfältiger Weise im Labor nachzubilden.

Bei vielen Prüfspezifikationen taucht vermehrt der Begriff der „Betauung“ auf. Was ist Betauung, wann beginnt Betauung, wann hört Betauung auf, wann tritt sie auf? Was bewirkt Betauung?

Was geschieht bei den verschiedenen Klima- oder Feuchteprüfungen?

Der nachfolgende Beitrag soll versuchen den Begriff der „Betauung“ zu erläutern.

Einleitung

Jede Oberfläche, die sich außerhalb eines Vakuums oder einer Schutzatmosphäre befindet, ist den Wassermolekülen in der Luft oder seines umgebenden Gases ausgesetzt. Diese Wassermoleküle „lagern“ sich aufgrund unterschiedlicher Vorgänge an der Oberfläche an und können unter Umständen zu optischen Beeinträchtigungen (Reflexionen), Kurzschlüssen, biologischer Keimbildung, Korrosion und weiteren chemischen Reaktionen führen.

Ausfälle, insbesondere an technischen Produkten, sollen im Vorfeld durch Funktions-, Qualifikations- und Lebensdauerprüfungen simuliert und durch geeignete Maßnahmen unterbunden werden. In den Prüfvorschriften findet man die unterschiedlichsten Prüfungen mit dem Hintergrund Feuchteinflüsse und/oder Betauung nachzubilden. Was ist aber eigentlich Betauung / Konden-

sation? Was haben Betauungsprüfungen mit Feuchtewechseltests oder Klimaprüfungen gemeinsam?

Der Schwerpunkt der nachfolgenden Überlegungen liegt bei den Ausfallerscheinungen an technischen Produkten, insbesondere auf elektronischen Leiterplatten.

1. Physikalische Unterschied zwischen hoher Luftfeuchte und Betauung

[1]Bei einer atmosphärischen Belastung unter üblichen Klimaten liegt immer auch eine Feuchtebelastung vor, wobei die Oberfläche z. B. einer Baugruppe mit dem Wasserdampf der Atmosphäre im Gleichgewicht steht. Selbst eine Lackierung, wie sie bei Leiterplatten als Schutz angewandt wird, stellt keine sichere Barriere dar. Kein Polymer ist wasserdampfundurchlässig, somit wird immer ein Anteil an Wasser in der polymeren Lackschicht gelöst (Absorption). Mit zunehmender Temperatur und zunehmender Luftfeuchte wird dieser Effekt noch verstärkt. In diesen Fällen ist das Gleichgewicht Wasser, gelöst im Polymer, zum Dampfdruck des Wassers in der Luft der physikalisch maßgebliche Prozess.

Gleichzeitig bilden sich bei etwa 40 % relativen Feuchte (RF) dünnste Wasserfilme im molekularen Maßstab (Adsorption). Bei ca. 60 % RF hat sich ein bis zu 4 Moleküllagen dicker Film auf der Oberfläche gebildet. Ein Film dieser Dicke kann bereits mit hygroskopischen – d. h. wasseranziehenden – Verunreinigungen auf der Filmoberfläche in Wechsel treten.

Die meisten Baugruppen werden bei diesen Klimakonditionen betrieben und die Praxis zeigt, dass ein derart dünner Film kaum zu Veränderungen der Oberfläche führt. Daher wird oft auf eine Schutzbeschichtung verzichtet.

Bei einer relativen Feuchte von 80 % haben sich ca. 10 Moleküllagen gebildet. Diese verhalten sich bereits ähnlich wie „normales“ Wasser; es können Lösungsvorgänge von Salzen auf der Oberfläche beginnen und ionische Prozesse ablaufen.

Anders liegen die Bedingungen bei einer Betauung. Eine Betauung tritt dann auf, wenn der Sättigungsdampfdruck bei einer gegebenen Temperatur über-

schritten wird. Wird ein kaltes Bauteil in eine warme Atmosphäre gebracht, so kühlt sich die unmittelbar an die Baugruppe grenzende Luft ab. Da kalte Luft weniger Wasser aufnehmen kann als warme Luft, kondensiert das Wasser aus und kann sich sichtbar in Form von Tropfen auf der Baugruppe niederschlagen.

2. Definitionen (Ursprung häufig aus der Meteorologie)

Luft

[4]Die Luft ist ein Gasgemisch, das die Erde umgibt. Die Zusammensetzung der Atome und Moleküle ist bis in eine Höhe von etwa 120 km annähernd konstant. Der Wasserdampf bildet allerdings eine Ausnahme, da sich dessen Anteil in Abhängigkeit von der Lufttemperatur ändert. Auch der Gehalt an Kohlendioxid (CO_2) ist nicht konstant und schwankt örtlich stark.

Die Anteile (Volumen-Prozente) der permanenten Gase der Luft sind:

- Stickstoff (N_2) 78,08 %
- Sauerstoff (O_2) 20,95 %
- Argon (Ar) 0,93 %
- Weitere Edelgase: Neon (Ne), Helium (He) Krypton (Kr), Xenon (Xe) und Wasserstoff (H), insgesamt weniger als 0,01 %

Nichtpermanente Gase:

- Wasserdampf (H_2O)
- Kohlendioxid (CO_2)
- Kohlenmonoxid (CO)
- Schwefeldioxid (SO_2)
- Stickstoff (NO_2)
- Methan (CH_4)
- Ozon (O_3), u. a.

Wie die Auflistung zeigt, stellen Stickstoff und Sauerstoff den Hauptbestandteil der Luft dar und sind für das irdische Leben die wichtigsten Gase. Für das Wettergeschehen ist der wichtigste Bestandteil ist der Wasserdampf. Von besonde-

Selbstverständlich treten Kondensation bzw. Betauung auch mit verschiedenen anderen Substanzen und/oder Verunreinigungen auf.

Wasserdampf

Er ist unsichtbar. Der Wasserdampfgehalt der Luft schwankt mit der Temperatur: bei 10°C können 30 Gramm, bei -30°C nur 0,4 Gramm Wasserdampf pro Kubikmeter vorhanden sein. Der Wasserdampfgehalt spielt in der Atmosphäre eine entscheidende Rolle, da Luft nur einen bestimmten Maximalbetrag Wasser in gasförmiger Phase enthalten kann. Jede Wasserdampfmenge, die den "Sättigungswert" überschreitet, kondensiert mehr oder weniger schnell zu flüssigem Wasser als Wolke oder Nebel bzw. bildet kleine Eiskristalle. Je größer die Übersättigung wird, um so mehr wird als Niederschlag ausgeschieden. Im Jahresdurchschnitt beträgt der Wasserdampfgehalt der Luft etwa 7 Gramm pro Kubikmeter.

Luftfeuchtigkeit

Mit Feuchte bezeichnet man den Gehalt eines Stoffes an Wasserdampf. Wichtig in der Meteorologie ist die Feuchte der Luft, die Luftfeuchtigkeit. Sie kann auf verschiedene Arten angegeben werden:

- Dampfdruck in hPa (Partialdruck des Wasserdampfes)
- Relative Feuchte in Prozent
- Absolute Feuchte (Gramm Wasserdampf pro Kubikmeter Luft)
- Mischungsverhältnis (Gramm Wasserdampf pro Kilogramm trockener Luft)
- Spezifische Feuchte (Gramm Wasserdampf pro Kilogramm feuchter Luft)
- Taupunktdifferenz (Differenz zwischen Lufttemperatur Taupunkt)
- Taupunkttemperatur

Die Luft kann bei einer bestimmten Temperatur nur eine bestimmte Menge Wasserdampf aufnehmen ("Sättigung"); je höher die Temperatur der Luft, umso

mehr Wasserdampf kann sie aufnehmen. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100% ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt; überschüssiger Wasserdampf kondensiert zu Tröpfchen. Absolut trockene Luft (0%) kommt selbst über Wüsten mit sehr tiefer Temperatur nicht vor. Im Wetterdienst wird hauptsächlich der Taupunkt bzw. die Taupunktdifferenz als Maß für die Luftfeuchtigkeit verwendet.

Taupunkt

Der Taupunkt ist jene Temperatur, auf die ein Luftpaket abgekühlt werden muss, damit Kondensation eintritt. Am Taupunkt herrscht eine Luftfeuchtigkeit von 100%.

Der Taupunkt kann beispielsweise aus relativer Feuchte und Temperatur berechnet werden.

Es gibt auch eine Näherungsformel, um den Taupunkt (in °C) aus dem Dampfdruck e (in hPa) zu berechnen:

$$t_p = \frac{234.67 \cdot \log e - 184.2}{8.233 - \log e}$$

Dampfdruck

Der Dampfdruck ist der Druckanteil (Partialdruck) des Wasserdampfs am Gesamtluftdruck und ein Maß für die Luftfeuchtigkeit. Er wird indirekt aus der Psychrometer-Messung (feuchtes und trockenes Thermometer) oder aus der Taupunktdifferenz bestimmt. Der Druck des Wasserdampfes steigt mit der Temperatur bis zum Sättigungsdampfdruck, z.B. bei 0°C etwa 6 hPa, bei 10°C etwa 12 hPa und bei 20°C etwa 23 hPa. Das Verhältnis zwischen dem herrschenden Dampfdruck und dem bei dieser Temperatur maximal möglichen Dampfdruck (Sättigungsdampfdruck) wird relative Feuchte genannt, angegeben in Prozent.

Der Dampfdruck ist ein Feuchtemaß und lässt sich berechnen:

$$e = \rho_d \cdot R_d \cdot T$$

Dabei ist

e = Dampfdruck in Pa

ρ_d = Wasserdampfdichte in kg/m^3 ,

R_d = individuelle Gaskonstante von Wasserdampf = $461.5 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

T = Temperatur in K

Relative Feuchte

Die Relative Feuchte ist gegeben durch den Quotienten aus dem in der Luft herrschenden Dampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck über Wasser. Sie gibt die Luftfeuchtigkeit in Prozenten an.

$$r = 100 \cdot \frac{e}{E(T)}$$

Dabei ist r = Relative Feuchte in %

e = Dampfdruck

$E(T)$ = Sättigungsdampfdruck

Andere Definition: Die Relative Feuchte ist das Verhältnis des Wasserdampfpartialdruckes zum Sättigungsdampfdruck. Der Ausdruck Luft kommt in dieser Definition nicht vor, die relative Luftfeuchtigkeit ist daher völlig unabhängig von der vorhandenen Menge Stickstoff oder Sauerstoff. Der Sättigungsdampfdruck von Wasserdampf ist im Vakuum gleich wie bei hohem Luftdruck!

Absolute Feuchte, Dampfdichte

Die absolute Luftfeuchtigkeit ist ein Feuchtigkeitsmaß, das die Masse Wasserdampf in einem Volumen feuchter Luft angibt. Die absolute Feuchte ist identisch mit der Dampfdichte. Da dieses Maß dichteabhängig ist, verändert es sich bei

der vertikalen Verschiebung eines Luftpakets. Ein Nachteil ist, dass die absolute Luftfeuchtigkeit nicht messbar ist.

Die Dampfdichte ist gegeben durch:

$$\rho_d = \frac{100 e}{R_d T} = 0.21668 \frac{e}{T}$$

ρ_d = Dichte des Wasserdampfes in kg/m^3

R_d = individuelle Gaskonstante für Wasserdampf = 461.5
J/(kg·K)

e = Dampfdruck in hPa

T = Temperatur in K

Für die absolute Feuchte gilt nun

$$a = 216.68 \frac{e}{T}$$

a = absolute Luftfeuchte in g/m^3

Sättigungsdampfdruck

Der bei der gegebenen Temperatur maximal mögliche Dampfdruck ist also der Dampfdruck, der bei Sättigung herrschen würde. Er ist abhängig von der Temperatur (warme Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte, der Sättigungsdampfdruck ist darum für warme Luft höher). Weil die Moleküle in Eis stärker gebunden sind als in Wasser, können sie auch weniger schnell in Wasserdampf übergehen. Darum ist der Sättigungsdampfdruck über Eis kleiner als über unterkühltem Wasser gleicher Temperatur:

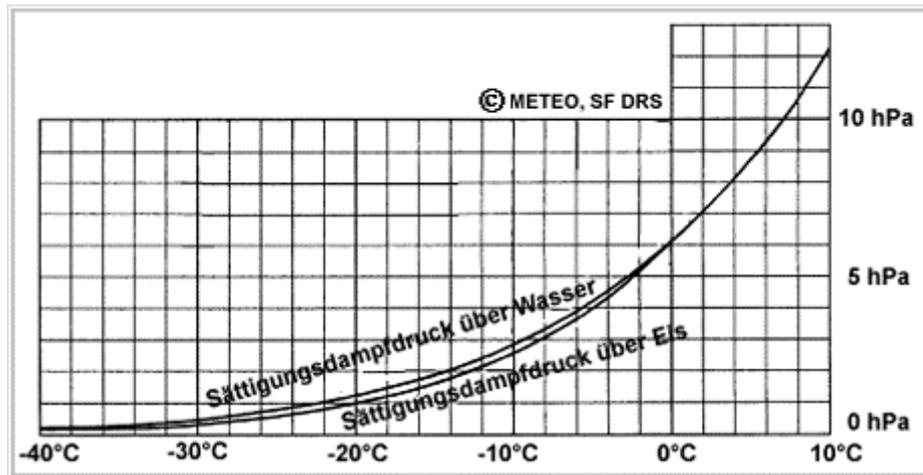


Bild 2: Sättigungsdampfdruck von Wasserdampf [4]

Der Sättigungsdampfdruck kann in einer Annäherung mit der **Magnusformel** berechnet werden:

$$E(T) = 6.107 \cdot 10^{\frac{a \cdot T}{b+T}}$$

E ist der Sättigungsdampfdruck in hPa, T die Temperatur in °C; und für a und b setzt man folgende Werte ein:

Über einer Wasseroberfläche	a	b
T höher 0°C	7.5	235.0
T tiefer 0°C	7.6	240.7
Über Eis	9.5	265.5

Beispiel: Relative Feuchte 50%, Temperatur 0°C. Aus folgender Grafik entnehmen wir, dass der Sättigungsdampfdruck bei 0°C, etwa 6.1 hPa beträgt. (siehe Bild 2).

Mit der Formel für die relative Feuchte lässt sich nun der herrschende Dampfdruck e berechnen:

$$e = \frac{r}{100} \cdot E(T)$$

Mit $E(T)$ = Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur T und r = relative Feuchte in %. Für unser Beispiel erhalten wir einen Dampfdruck von etwa 3 hPa. In der Grafik können wir nun den Taupunkt ablesen, indem wir die 3-hPa-Linie mit der Kurve (Dampfdruck über Wasser) schneiden und die Temperatur an diesem Punkt bestimmen: Etwa -9.5°C .

3. Tropfenbildung

Tropfen und wie sie entstehen (in der Luft)

Als Tropfen werden Wasserteilchen benannt, die größer als 0.1 Millimeter sind. Kleinere Tröpfchen sind Wolkentröpfchen. Damit Tropfen gebildet werden können, muss die Luft mit Wasserdampf gesättigt sein (Luftfeuchtigkeit = 100%). Luft wird meist durch Abkühlung gesättigt (kalte Luft kann weniger Wasserdampf enthalten, als warme).

Eigentlich müsste die Luft sogar übersättigbar sein. Aber weil Staubpartikel, Salze, Eis etc. als Kondensationskerne dienen, genügt eine Luftfeuchtigkeit zwischen 80% und 100% zur Bildung von Tropfen auf einer Oberfläche. Die Wassermoleküle lagern sich an diesen Teilchen an.

Allein dieser Mechanismus reicht aber nicht aus, um innerhalb der kurzen Lebenszeit einer Gewitterwolke Tropfen von der Größe der Regentropfen zu bilden. Es gibt weitere Mechanismen: Wachstum aufgrund unterschiedlicher Fallgeschwindigkeit von großen und kleinen Tropfen (Koagulation). Gleichgroße Tropfen entgegengesetzter Ladung ziehen sich an und verbinden sich (Koaleszenz). Von der Oberfläche kleinerer Tropfen verdunstet Wasser besser als von großen Tropfen (die Oberfläche kleiner Tropfen ist stärker gekrümmt, ein einzelnes Molekül wird von den Nachbarn weniger stark zurückgehalten). Darum ist der Dampfdruck über kleinen Tropfen größer als über großen. Der Wasserdampf geht vom Gebiet mit hohem zu Gebieten mit tieferem Dampfdruck. Die kleinen Tropfen verdunsten also, der Wasserdampf kondensiert an den großen Tropfen.

In Wolken mit einem Gemisch von Wassertröpfchen und Eis wachsen die Eiskristalle auf Kosten der Wassertröpfchen. Dieser Prozess wird Bergeron-Findeisen-Prozess genannt.

Betauung - Kondensation

In der Literatur findet sich unter dem Begriff kein Unterschied zwischen Betauung und Kondensation. Allerdings verbergen sich hinter dieser trivialen Definition komplexe Abläufe, die nachfolgend betrachtet werden sollen. Bei der Betauung erfolgt ein Feuchtigkeitsniederschlag aus der Atmosphäre auf eine Oberfläche. Der Niederschlag kann aus den verschiedensten Stoffen sein, da aus Gasen und Aerosolen, sowie der Verbindung mit in der Atmosphäre befindlichen „Keimen“, sich eine Kondensationsschicht bilden kann. Des Weiteren spielt die Reinheit der Oberfläche eine maßgebliche Rolle, da die Kondensationsschicht, je nach Dicke, wiederum chemische Reaktionen in Form von Verbindungen oder Elektrolyse usw. hervorrufen kann.

Zur Kondensatbildung haben auch außer den Keimen (Staub, Salz, Säure usw.) die Oberflächenspannung des Kondensates, die Oberflächenrauigkeit und die molekularen Bindungskräfte des Kondensates Einfluss.

In den nachfolgenden Betrachtungen beschränken wir uns auf die **Kondensation / Betauung von Wasser**.

4. Wasser H₂O

Das Erscheinungsbild reinen Wassers ist geruchs-, geschmacks- und nahezu farblos. Der Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) von Wasser hängt nicht nur von der Temperatur ab, sondern auch von dem umgebenden Druck. So kocht Wasser auf dem Mount Everest schon unter 100°C. Alle folgenden Werte auf dieser Seite beziehen sich auf die sogenannte Normalbedingung, also Normaldruck auf Meereshöhe. Der Siedepunkt, also der Punkt, an dem das Wasser von dem flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht, liegt bei 100°C bzw. 373,16 K. Das Wasser gefriert bei 0°C bzw. 273,16 K, geht also von dem flüssigen in den festen Zustand über.

Anomalie des Wassers

Auch in der Physik ist das Wasser etwas Besonderes. Im Gegensatz zu anderen Flüssigkeiten, dehnt es sich bei Erwärmung nicht immer aus. Wasser be-

sitzt bei 4°C (also bei 277,16 K) seine größte Dichte. Zwischen 0°C und 4°C zieht es sich bei Erwärmung zusammen, erst oberhalb von 4°C dehnt es sich aus. Aus diesem Grund ist Wasser auch nicht besonders gut als Flüssigkeit in einem Thermometer geeignet. Denn es würde oft die Temperatur nicht eindeutig anzeigen, da Wasser bei z.B. ca. 1°C und ca. 7°C die gleiche Ausdehnung hat.

Temperatur in °C	Temperatur in K	Dichte in g/cm ³
0	273,16	
1	274,16	0,9999
4	277,16	1,0000
10	283,16	0,9997
15	288,16	0,9991
20	293,16	0,9982
25	298,16	0,9971
100	373,16	0,9584

In der Literatur gibt es noch erhebliche Widersprüche, was die Dichte von Wasser bei verschiedenen Temperaturen betrifft.

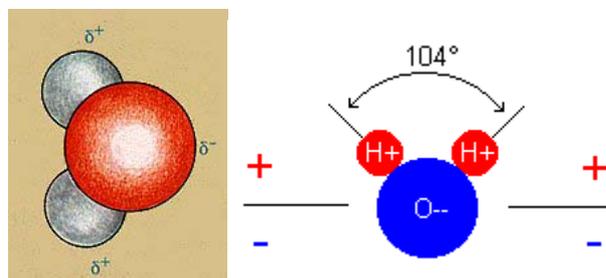


Bild 3: Wassermolekül

Wassermoleküle sind nicht linear oder rechtwinklig aufgebaut, sondern die Wasserstoffatome schließen einen Winkel von 104,5° ein. Sie sind aufgrund der Ladungsverteilung elektrische Dipole. Als Dipole bilden Wassermoleküle im Vergleich zu anderen Bindungen erstaunlich stabile Wasserstoffbrücken-Bindungen, die die Moleküle untereinander fest zusammenhalten

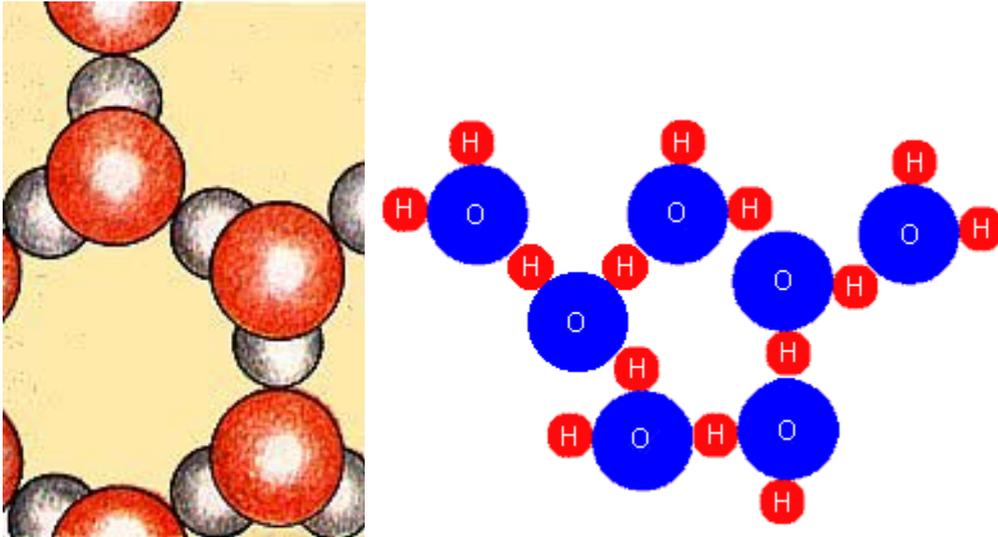


Bild 4: Wasserstoffbrücken

[5] Durch die unterschiedlichen Elektronegativitäten von Wasserstoff und Sauerstoff liegen sich die Wasserstoffatome nicht genau gegenüber. Daher heben sich die elektrischen Felder der gebundenen Wasserstoff- und Sauerstoffionen nicht auf. Es existiert ein elektrisches Feld über dem Wassermolekül, deswegen ist es polar. An der Seite, an der sich die Wasserstoffionen befinden, hat das Wassermolekül einen positiven Pol, auf der anderen Seite hat es einen negativen Pol. Wegen dieser Polarität ist das Wasser in der Lage, Stoffe zu lösen, die aus einer Ionenbindung (z.B. Salze) bestehen.

In flüssigem Wasser kleben die Wassermoleküle durch elektrostatische Bindungskräfte aneinander. Diese Bindungen bezeichnet man auch als "Wasserstoffbrücken" oder als "Van der Waals"-Bindungen. Gleichnamige Pole stoßen sich ab, während sich Pole entgegengesetzter Polarität anziehen. Nur wegen dieser Wasserstoffbrücken ist Wasser, trotz der winzigen Molekülgröße, bei Zimmertemperatur überhaupt flüssig, außerdem erhält es durch sie seine große Oberflächenspannung. Diese Klumpen aus Wassermolekülen werden übrigens als "Cluster" bezeichnet. In dieser Clusterkonstruktion ist im Mittel jedes Wassermolekül von 6 anderen Wassermolekülen umgeben. In diesen Clustern zeigen die Wassermoleküle in alle möglichen Richtungen, also heben sich die e-

lektrischen Felder der Wassermoleküle gegenseitig auf. Es gibt deshalb kein großräumiges elektrisches Feld in einem Glas Wasser.

[6]Die intermolekularen Anziehungskräfte in bestimmten Wasserstoffverbindungen sind ungewöhnlich stark. In den betreffenden Verbindungen sind Wasserstoffatome an kleine, sehr elektronegative Atome gebunden. Das elektronegravere Atom übt eine starke Anziehung auf die Elektronen der Bindung aus und erzeugt einen beträchtlichen positiven-Ladungsanteil am Wasserstoffatom. Das Wasserstoffatom verbleibt als fast nicht abgeschirmtes Proton.

Das Wasserstoffatom eines Moleküls und ein einsames Elektronenpaar am elektronegativen Atom eines anderen Moleküls ziehen sich gegenseitig an und bilden eine Wasserstoffbrücke. Dieser Bindungstyp, von z.B. HF-, H₂O- und NH₃- Molekülen über Wasserstoffbrücken wird in Formelbildern durch punktierte Linien zum Ausdruck gebracht.

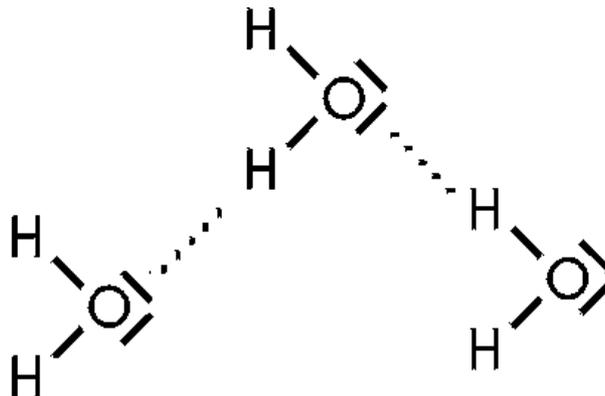


Bild 5: Darstellung von Wasserstoffbrücken im Formelbild

Diese Wasserstoffbrücken haben auf die Moleküle eine auffällige Wirkung. So erhöht sich der Siedepunkt stark gegenüber Molekülen die ähnlich gebaut, sind aber keine Wasserstoffbrücken (H-Brücken) haben. H-Brücken erschweren das Abtrennen einzelner Moleküle aus der Flüssigkeit. Auch hohe Schmelzpunkte und eine hohe Viskosität sind zu finden.

Weitere Eigenschaften des Wassers werden in sonst ungewohntem Ausmaß von H- Brücken beeinflusst. Im Eis werden die Wassermoleküle über H-Brücken zusammengehalten, wobei jedes Sauerstoffatom von vier Wasserstoffatomen umgeben ist. Diese Anordnung führt im Eiskristall zu relativ großen Hohlräu-

men. Deshalb hat Eis eine geringere Dichte als flüssiges Wasser (Eis schwimmt!). Beim Schmelzen fallen die Hohlräume wieder zusammen. Auch in flüssigem Zustand werden die H_2O -Moleküle über H-Brücken zusammengehalten, jedoch in geringerem Ausmaß und weniger starr als im Eis.

Die außerordentlich hohe Löslichkeit einiger Sauerstoff-, Stickstoff- und Fluor-Verbindungen in Wasser (wasserstoffhaltige Lösungsmittel) hängt mit Wasserstoffbrücken zusammen. Ammoniak (NH_3) und Methanol (H_3COH) lösen sich in Wasser unter Ausbildung von H-Brücken. Entsprechendes gilt für einige sauerstoffhaltige Ionen.

[5] Wassermoleküle im elektrischen Feld

Wird nun ein Wassermolekül einem externen elektrischen Feld (von einer Spannungsquelle) ausgesetzt, so wird es sich nach diesem Feld ausrichten.

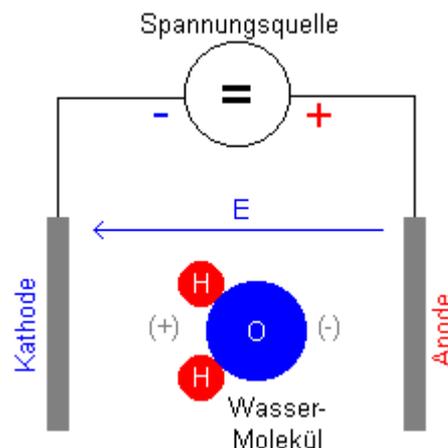


Bild 6: Wassermolekül im elektrischen Gleichfeld [6]

Die Spannungsquelle erzeugt, so wie sie hier an die Elektroden angeschlossen ist, ein elektrisches Feld E um das Wassermolekül herum. Das Wassermolekül hat aufgrund seiner Polarität selbst ein elektrisches Feld, also richtet es sich gemäß diesen elektrischen Feldes aus. Man kann sich das vorstellen, wie eine Kompaßnadel, die sich nach einem magnetischen Feld ausrichtet. Das positive "Ende" des Moleküls mit den Wasserstoffatomen zeigt zur negativen Elektrode (Kathode) hin, und das Sauerstoffatom, das den negativen Pol des Moleküls

darstellt, zeigt in Richtung der Anode. Das Wassermolekül hat zwar sehr wohl ein elektrisches Feld, ist aber nicht ionisiert, also elektrisch neutral. Wegen der elektrischen Neutralität des Wassermoleküls besitzt dieses keine Ladung und wird sich nicht zu einer Elektrode hin bewegen. Es bleibt also an Ort und Stelle, auch wird es nicht elektrolysiert.

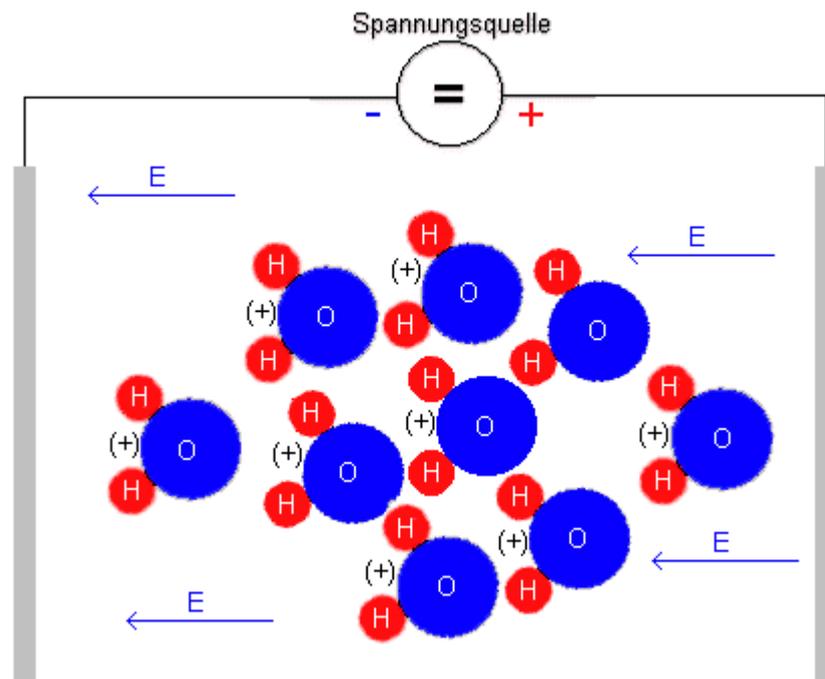


Bild 7: Wasser im elektrischen Feld [6]

Die Wassermoleküle richten sich nach dem elektrischen Feld E aus und die Cluster aus Wassermolekülen verbiegen sich. Sobald das externe elektrische Feld abgeschaltet wird, ordnen sich die Wassermoleküle wieder, wie im vorigen Kapitel beschrieben, von selbst zu den Clustern an. Um die Wasserstoffbrückenbindungen derart zu verbiegen und die Wassermoleküle mechanisch zu drehen, ist Energie erforderlich, die in der Anordnung der Wassermoleküle gespeichert ist. Durch seinen Dipolcharakter wirkt das Wasser also wie das Dielektrikum eines Kondensators. Damit dieses dielektrische Verhalten des Wassers aber zum Tragen kommt, muß dieses, anders als bei der Elektrolyse, möglichst frei von Ionen sein. Um Wasser als Dielektrikum eines Kondensators verwenden zu können, muß es als Isolator fungieren und nicht als Leiter. Hochgereinigtes Wasser weist diese Eigenschaft tatsächlich auf. Weil durch diesen Ef-

feht viel Energie in der Anordnung der Wassermoleküle gespeichert werden kann, hat Wasser eine hohe Dielektrizitätskonstante von 80. Reagiert Wasser also nicht so empfindlich auf Verunreinigungen, die Ionen einbringen, wäre Wasser durchaus als Dielektrikum für technische Kondensatoren zu verwenden.

[7]Oberflächenspannung

Unter Oberflächenspannung versteht man die Grenzflächenspannung von Festkörpern und Flüssigkeiten gegenüber der Dampfphase bzw. Luft. Die Abbildung veranschaulicht die Bedeutung der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten.

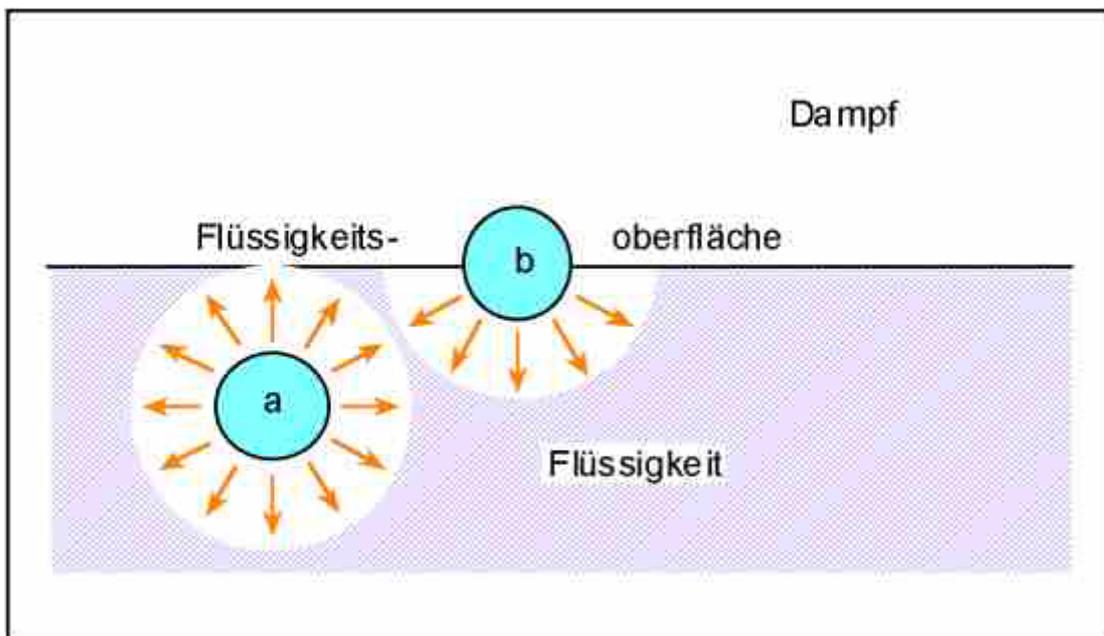


Bild 8: Flüssigkeitsmoleküle an der Oberfläche erfahren eine gerichtete Wechselwirkung [7] Während in der Flüssigkeit (a) auf die Moleküle gleiche Anziehungskräfte (zwischenmolekulare Kräfte) aus allen Richtungen wirken, sind diese Kräfte an der Flüssigkeit/Dampf-Grenzfläche (b) nicht ausgeglichen. Es besteht daher eine in das Flüssigkeitsinnere gerichtete Kraft, die Moleküle aus der Oberfläche in die Flüssigkeit zu treiben versucht. Die Flüssigkeit ist bestrebt, ihre Oberfläche zu verkleinern, weshalb Tröpfchen und Gasblasen Kugelgestalt anzunehmen versuchen. Die Oberflächenspannung ist definiert als Kraft pro Längeneinheit in der Oberfläche und hat die Dimension mN/m ($10\text{E-}3$ Newton/Meter). Mit Oberflächenarbeit bezeichnet man die Arbeit, die nötig ist, um unter reversiblen Be-

dingungen und bei isothermem Verlauf die Oberfläche zu bilden oder zu vergrößern. Unter bestimmten Voraussetzungen entspricht die Oberflächenspannung (Oberflächenenergie) der freien Energie oder Helmholtz-Energie der Oberfläche pro Flächeneinheit. Unmittelbar nach der Ausbildung der Oberfläche erhält man Werte für die Oberflächenspannung, die vom Gleichgewichtszustand abweichen. Man bezeichnet diesen Effekt als dynamische, den Gleichgewichtswert als statische Oberflächenspannung.

5. Betauung

Die aufgeführten Definitionen sollen zum Denkanstoß dienen, um die Komplexität der Betauung zu verdeutlichen. Abhängig von der Betrachtungsweise ist die Vertiefung der mathematischen Zusammenhänge der einzelnen Vorgänge erforderlich, die hier in dieser Abhandlung bewusst weggelassen wurde.

Den Kondensationsvorgang, bzw. die Auslöser für eine Kondensation, sind aus den Definitionen ersichtlich. Einfach ausgedrückt, durch eine Taupunktunterschreitung bildet sich Kondensat auf einer kühleren Oberfläche.

Wie schon in vergangenen GUS-Vorträgen erwähnt, gibt es zwei Sensortypen (CiS und RS-Simulatoren) die in der Lage sind, den Betauungsgrad zu messen. Der **Betauungsgrad** gibt an, welche Kondensatmenge sich auf einer Oberfläche abgeschieden hat. Diese Kondensatmenge ist schließlich ausschlaggebend, welche Reaktionen ablaufen können. Es ist möglich, dass sich parasitäre Kapazitäten und Widerstände aufbauen, in Verbindung mit Salzen sich Elektrolyten bilden und dadurch Kurzschlüsse, Korrosion usw. in Gang gesetzt wird.

Der Betauungsgrad abhängig ist in erster Linie von der homogenen Kondensation von Wassermolekülen auf der Oberfläche abhängig!

Die homogene Kondensation ist von der Oberflächenbeschaffenheit, -reinheit und -material abhängig. Raue Oberflächen ermöglichen den Wassermolekülen Bindungen einzugehen und wiederum Cluster und somit Tropfen zu bilden. Die Oberflächenreinheit ist von großer Bedeutung, weil erst durch Verunreinigungen Keime zu Kondensationsstellen entstehen. Das Oberflächenmaterial ist ebenso entscheidend für den Betauungsgrad, weil durch seine Polarität die eingelager-

ten Wassermoleküle (z. B. in einer Polymerschicht) eine Beeinflussung der Kondensatbildung abläuft.

Zusätzlich ist die Prüflingsmasse und / oder die Betauungssensormasse ein Parameter, der den Betauungsgrad beeinflusst. Ist das Verhältnis zwischen thermischer Sensormasse (groß) und Prüflingsmasse (klein) nicht im entsprechenden Verhältnis, kommt es zu Fehlinterpretationen von den chemisch-physikalischen Vorgängen auf der Prüflingsoberfläche. Zuletzt gehört in die Betrachtungskette die Reinheit der Umgebungsluft. In der Luft dürfen sich keine Staub- oder Schwebstoffe befinden, damit eine Keimbildung durch Luftverschmutzung (auch Aerosole) ausgeschlossen ist, und somit sich selbstverständlich nur Wassermoleküle zur Kondensation befinden, damit die homogene Tröpfchenbildung nicht durch die Verbindungen mit anderen Stoffen verhindert wird.

Temperaturtests im Prüfschrank

Bei Temperaturprüfungen oder Klimaprüfungen, tritt Betauung während der ansteigenden d.h. während der Aufheizphase auf. Im Bereich der Heizphase ist seine Oberflächentemperatur entweder genau gleich der Prüfraumtemperatur (bei sehr kleinen Massen) oder etwas kälter. Somit kann der Prüfling die Taupunkttemperatur unterschritten und die Wassermoleküle aus der Prüfraumlufte können sich an der Prüflingsoberfläche niederschlagen. Wie lange dieser Feuchteniederschlag andauert, hängt von der Prüflingsmasse und vom Wärmestrom in der Kammer ab. Wenn der Prüfschrank von der Warmphase in die Kaltphase umschaltet, wird die Prüfraumlufte automatisch entfeuchtet, da der Verdampfer während der Abkühlphase kälter ist als die Prüfraumlufte. Außerdem kann der Prüfling maximal die gleiche Temperatur annehmen wie die Prüfraumlufte, aber in der Regel ist er etwas wärmer. Aus diesem Grund kann während der Kaltphase keine Betauung auftreten.

Klima- / Feuchtetests im Prüfschrank

Bei Klimaprüfungen wird die Prüfraumlufte mittels unterschiedlicher Befeuchtungssysteme befeuchtet. Das bedeutet, dass entweder eine konstante Feuchte oder

eine wechselnde Feuchte mit der Prüfraumtemperatur eingestellt wird. In dem annähernd geschlossenen Prüfraumsystem entsteht ein der Feuchte entsprechende Dampfdruck und die Feuchte stellt sich ein. In diesem Prüfraumsystem kondensiert überall an den Stellen das Wasser aus, wo eine Taupunktunterschreitung auftritt. Das kann auch in nicht ausreichend isolierten Prüfraumecken, im Türbereich oder im Verdampferbereich sein. Ist der Prüfling kälter als die Prüfraumluft, so kondensieren die Wassermoleküle an seiner Oberfläche. Bei Klima-Wechsel-Prüfungen mit geringen Temperaturgradienten kann es durchaus vorkommen, dass die thermische Masse des Prüflings so klein ist, dass der Prüfling immer der Temperaturanstiegskurve folgen kann und es zu keiner Taupunktunterschreitung kommt und somit der Prüfling nicht betaut. Aus diesem Grund kann nicht davon ausgegangen werden, dass bei Klima-Wechsel-Prüfungen auch der Prüfling jemals betaut.

Wichtig ist an dieser Stelle das Befeuchtersystem. Bei einem Badbefeuchter, mit Rückleitung aus dem Prüfraum, kann entsprechend von vorangegangenen Prüfungen das Wasser kontaminiert sein und somit zusätzlich Keime auf der Oberfläche des Prüflings verursachen. Daher ist es äußerst wichtig, dass das Befeuchtersystem ausschließlich mit sauberem destilliertem oder entmineralisiertem Wasser betrieben wird. Auch dürfen sich keine Schmutzpartikel oder Lösemittel in der Prüfkammer befinden, die durch den Ventilator im Luftstrom mitgefördert werden.

Bei Klimaprüfungen mit permanenter Betauung, also Kondenswasserprüfungen, beträgt die rel. Feuchte in den Kammern 100 %. Dadurch steigt der Sättigungsdampfdruck und die Wassermoleküle kondensieren an allen Oberflächen. Durch die permanente Wasserdampfzufuhr in der Kammer ist die Prüfraumluft ständig übersättigt und die Wassermoleküle kondensieren.

Bei der bekannten Betauungsprüfung nach BMW N 601 22.0 Teil 4 wird tatsächlich eine Betauung des Prüflings zyklisch durchgeführt. Hierbei kann der Prüfling während der Aufheizphase betauen. Der Betauungsgrad ist nicht geregelt, das heißt, die Wassermenge auf der Oberfläche stellt sich entsprechend der thermischen Masse des Prüflings ein. Dadurch ist jede Prüfung, sobald die

Prüflinge nicht gleich aufgebaut sind, nicht mehr reproduzierbar. Ebenfalls ändern sich selbstverständlich die Zeiträume der Betauungsphase und dadurch die unterschiedlichen Reaktionen auf der Oberfläche.

Der einzige Ausweg zu einer reproduzierbaren und bewertbaren Betauungsprüfung kann nur ein Betauungssensor sein, der den Betauungsgrad einer Oberfläche messen kann.

Im zweiten Schritt ist es wünschenswert, entsprechende Klimaprüfschränke einsetzen zu können, die den Betauungsgrad und eventuell die Betauungszeit regeln können.

Um einen einheitlichen Prüfablauf definieren zu können ist es erforderlich, einem Betauungsgrad und einem Betauungszeitraum eine Wirkung zuzuordnen.

Literatur

[1] Lackwerke PETERS GmbH & Co. KG Speziallacke für die Elektronik, LPin-fos; Leitartikel: Warum Dickschichtlacke?

[2] Internet <http://www.net-lexikon.de>

[3] Internet http://www.chemie.uni-hamburg.de/studium/materialien/ac/ACFI_Albert1.pdf

[4] Internet <http://www.sfdrs.ch/sendungen/meteo/lexikon/taupunkt.html>

[5] Internet http://www.serious-technology.de/Experiment_zur_Wasserspaltung.htm#Etwas%20Theorie

[6] Internet <http://www.guidobauersachs.de/allgemeine/FLUFEST.html>

[7] Internet http://www.spiralex.de/produkte/produkte_wasser04_d.htm#oberflaechenspannung