Gehäuse -

sicherer Schutz oder sicheres Verderben?

Die Nutzung des in den nachfolgenden Folien Mitgeteilten geschieht auf eigene Gefahr des Nutzers. Irgendwelche Ansprüche gegen den INGNIEURSERVICE DR. WANDERS SACHVERSTÄNIGENSOZIETÄT (ISWS), gleich aus welchem Grund, sind selbst dann ausgeschlossen, wenn dieser Folienvortrag Fehler enthalten sollte.

Das Vervielfältigen auch nur einzelner Folien ist nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des ISWS gestattet.

© INGENIEURSERVICE DR. WANDERS – 2000
Rudi-Ismayr-Str. 11 D-85375 Neufahrn Tel.: 08165/94090 Fax: 940940
eMail: ISWanders@t-online.de

Nachfolgende Folien behandeln das Eindringen von Wasser in Hohlräume, z. B. Gehäuse, Spalte, die dicht gegen Wasser in flüssiger Form, gegen Fremdkörper und auch gegen Stäube sein können.

Die nachfolgend geschilderten Phänomene treffen für alle Hohlräume zu, bei denen sich Druckdifferenzen zwischen ihrem Inneren und der Umgebung außen einstellen können, bei denen aber ein (geringer) Gasaustausch mit der Umgebung dennoch auftreten kann. Solche Hohlräume können u. a. sein

Gehäuse, Schränke, Boxen
Schaltschränke
Maschinengehäuse allgemein
Gebäudehohlräume
Schalter und vieles mehr

Beispielhaft wird nachfolgend das Eindringen von Wasser in Elektrogehäuse behandelt, jedoch wirklich nur beispielhaft.

Die Dichtheit solcher technischer Gehäuse wird in der DIN VDE 0470 Teil 1 beschrieben, Kurzbezeichnung z. B. IP 54.

Die erste Ziffer gibt den Schutzgrad gegen Berühren und gegen feste Fremdkörper an (hier: Geschützt gegen den Zugang zu gefährlichen Teilen mit einem Draht, staubgeschützt).

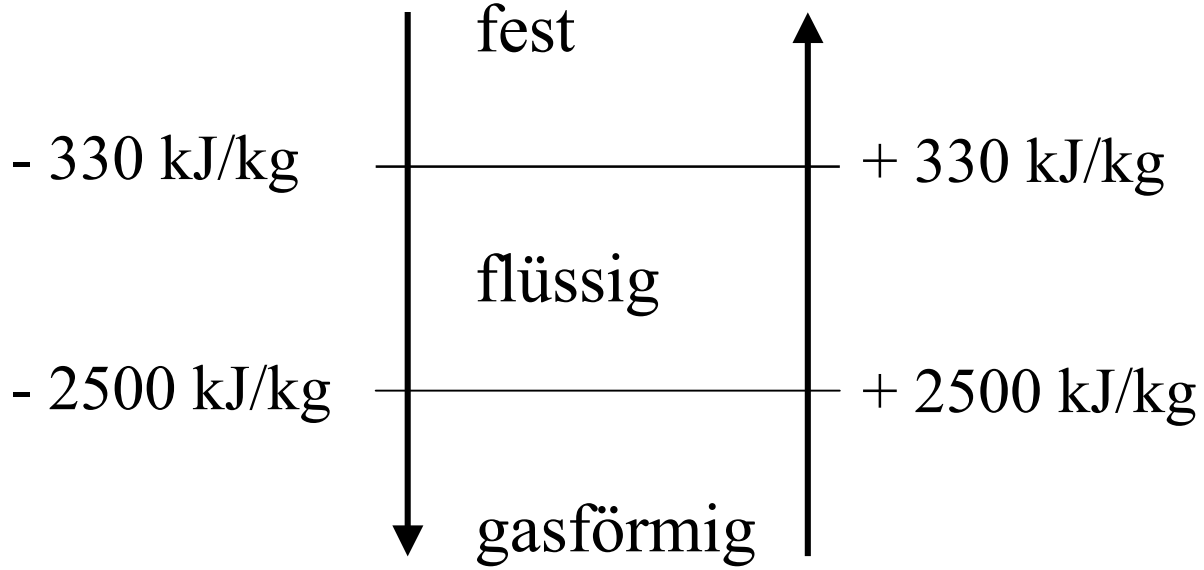
Die zweite Ziffer kennzeichnet die Schutzart gegen Eindringen von Wasser (hier: Spritzwassergeschützt).

Solche Gehäuse müssen aber nicht gasdicht sein. In aller Regel findet denn auch ein Gasaustausch mit der Umgebung statt, so daß alle dort vorhandenen Gase unter bestimmten Bedingungen ins Innere eines Hohlraumes gelangen können.

Wasser tritt nun in drei Aggregatzuständen auf:

- Fest — interessiert hier nicht
- Flüssig — große Oberflächenspannung
hohe Viskosität
große spezifische Wärme
- Gasförmig — sehr geringe Oberflächenspannung
sehr geringe Viskosität
geringe spezifische Wärme

Wird Wasser von einem Aggregatzustand in den anderen überführt, so wird Energie frei (+) oder verbraucht (-):



Trockene Luft ist ein Gemisch idealer Gase. Sie verhält sich mit ausreichender Genauigkeit selbst wie ein ideales Gas.

Wasser in Gas- oder Dampfform ist der Luft **stets** beigemischt. Selbst in der Wüste enthält die Luft noch nachweisbar Wasserdampf, ist also „feucht“.

Luft enthält Wasser in Tröpfchenform dann, wenn sie mehr Wasserdampf lösen müßte, als sie bei ihrer Temperatur vermag: Wassertropfen kondensieren aus (Nebelbildung).

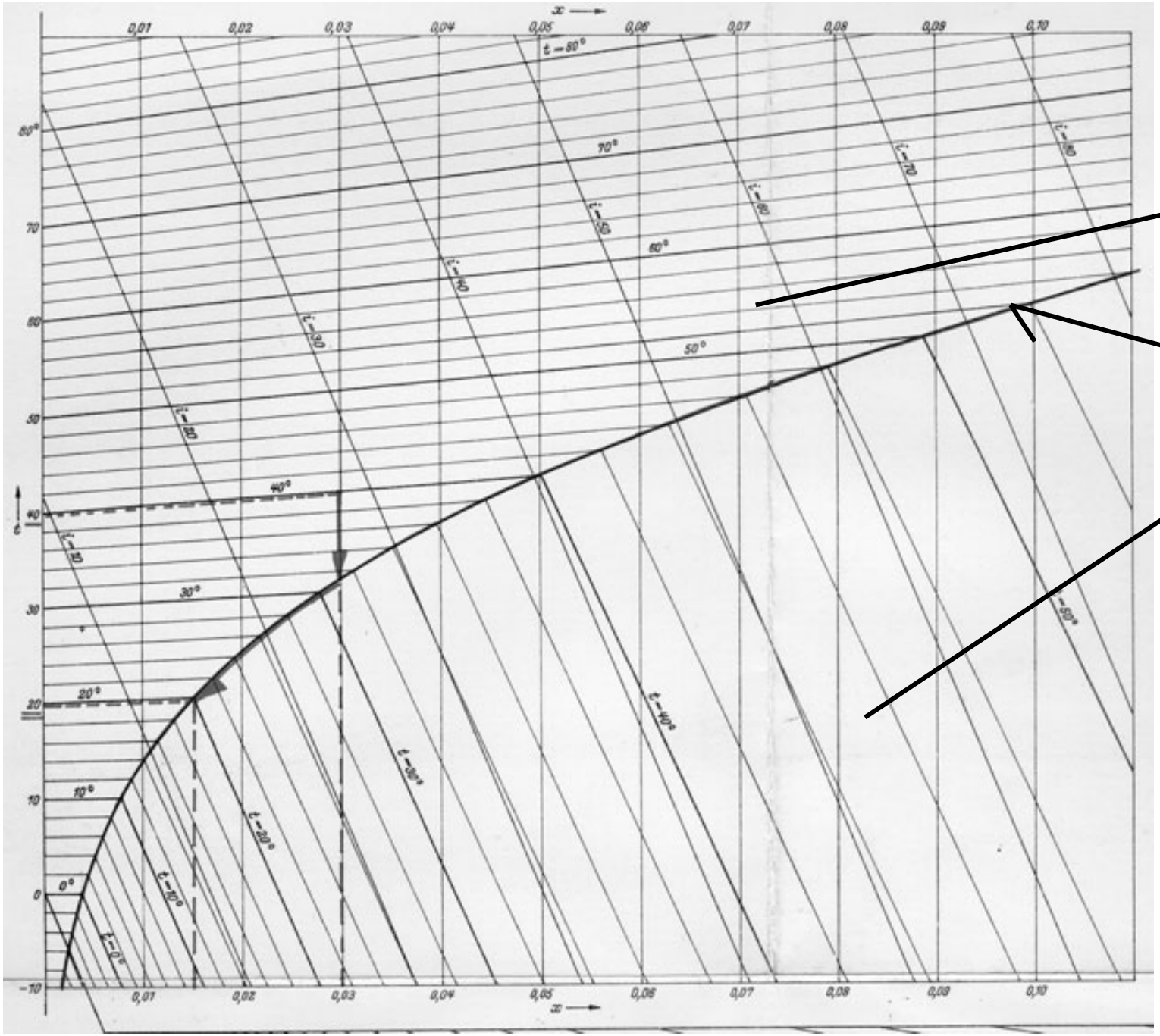
Auch die Mischung aus Luft und Wasserdampf verhält sich (fast) wie ein ideales Gas, kann und wird nachfolgend so behandelt.

In Abhängigkeit von der Temperatur kann die Luft unterschiedlich viel Wasser in Dampfform aufnehmen.

Das Verhältnis von tatsächlich in der Luft enthaltenem Wasserdampf (X_{tat} [g]) zu der bei der jeweiligen Temperatur maximal möglichen Menge (X_{max} [g]) ist die relative Feuchte [rF].

Zur Angabe der relative Feuchte wird der Quotient X_{tat}/X_{max} mit 100 multipliziert: Y % rF.

Das Verhalten von feuchter Luft bei Temperaturänderungen ist Im Mollier-i-x-Diagramm abzulesen:



Feuchte kleiner als 100%

Feuchte gleich 100%

Gebiet der Kondensation

Mollier-Diagramm

Beispiel nächste Folie

Zum Mollier-Diagramm für feuchte Luft:

Ein Kilogramm Luft der Temperatur 40°C enthalte 0,03 kg Wasser (30 Gramm) in Dampfform.

Da sie bei dieser Temperatur 0,05 kg Wasserdampf aufnehmen könnte (Schnittpunkt der Temperatur- mit der Taulinie), hat sie eine relative Feuchte (rF) von 60% (0,03/0,05 = 0,6).

Kühlte die Luft nun ab (Bewegung auf der Linie gleichen Absolutwassergehalts nach unten), wird bei 31°C die Taulinie und damit 100% rF erreicht.

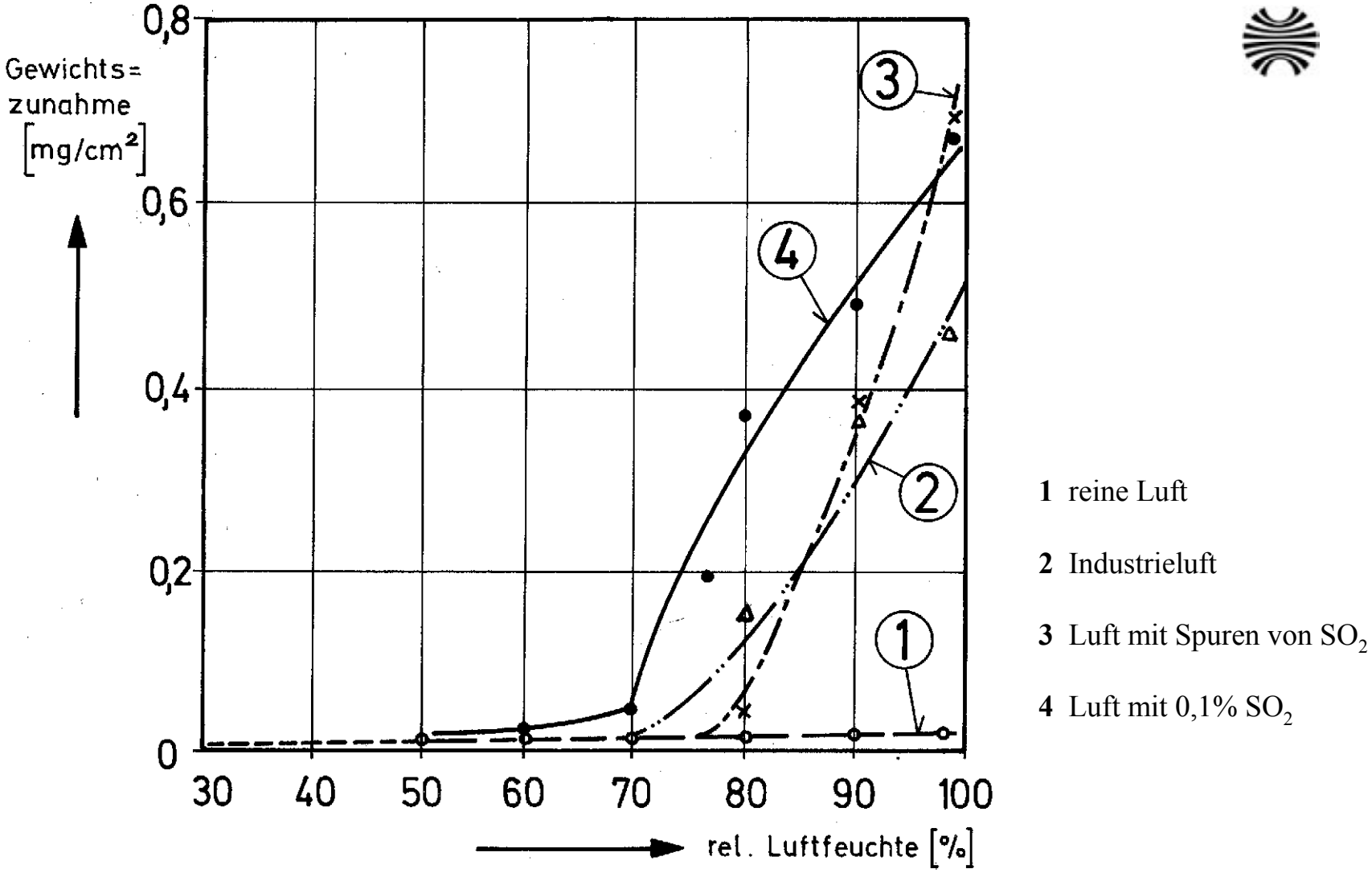
Kühlte die Luft weiter ab, erfolgte die Bewegung (im Mollier-Diagramm) entlang der Taulinie, wobei überschüssiger Wasserdampf als Kondensat ausgeschieden wird.

Bei einer Abkühlung auf 20°C verliert daher diese Luft von ursprünglich 0,03 kg Wasserdampf pro Kilogramm Luft die Hälfte: Sie kann nur noch 0,015 kg Wasser/kg Luft aufnehmen.

Feuchtigkeit in der Luft ist für viele Lebewesen, auch für den Menschen, äußerst wichtig und daher erwünscht. Günstig wird eine relative Feuchte von etwa 60% angesehen, auch etwa 70% gelten noch als angenehm.

Für viele Metalloberflächen aber ist bereits eine solche Luftfeuchte (70% rF) unerwünscht, weil dadurch schon, auch ohne Kondensation, die Korrosion beschleunigt wird.

Dies gilt insbesondere dann, wenn der Luft neben dem Wasserdampf noch korrosiv wirkenden Schadgase beigemischt sind, wie heute in Industrieumgebungen unvermeidlich. Korrosive Luftverunreinigungen emittieren auch die Autos.



1 reine Luft

2 Industrieluft

3 Luft mit Spuren von SO_2

4 Luft mit 0,1% SO_2

Korrosion als Funktion der Luftfeuchte und der Luftverschmutzung (Hudson 1976)

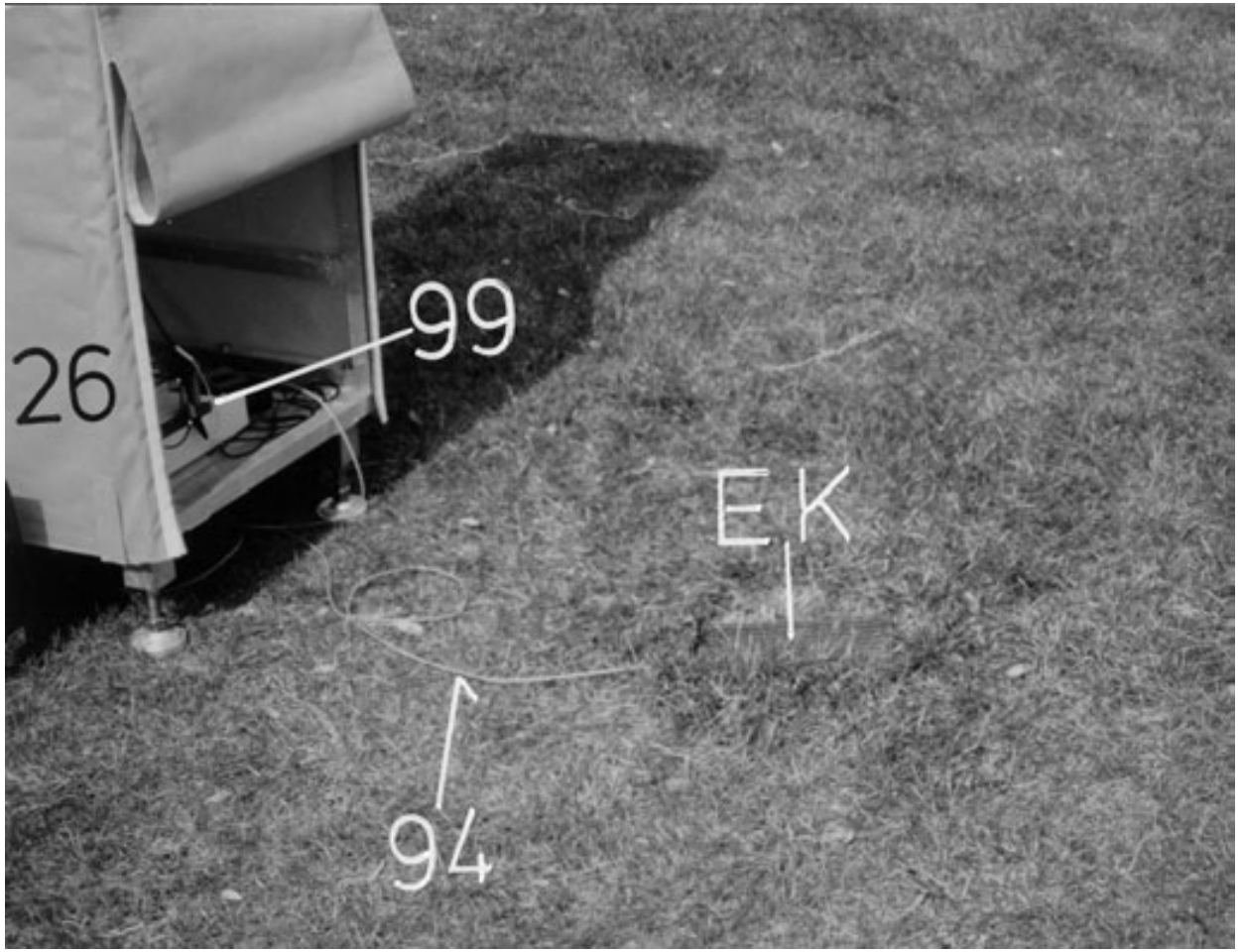
In der Thermodynamik sind vier Zustandsänderungen bekannt:

Isotherm	: Keine Änderung der Temperatur
Isobar	: Keine Änderung des Drucks
Adiabat	: Kein Wärmeaustausch mit der Umgebung
Isochor	*: Keine Volumensänderung*

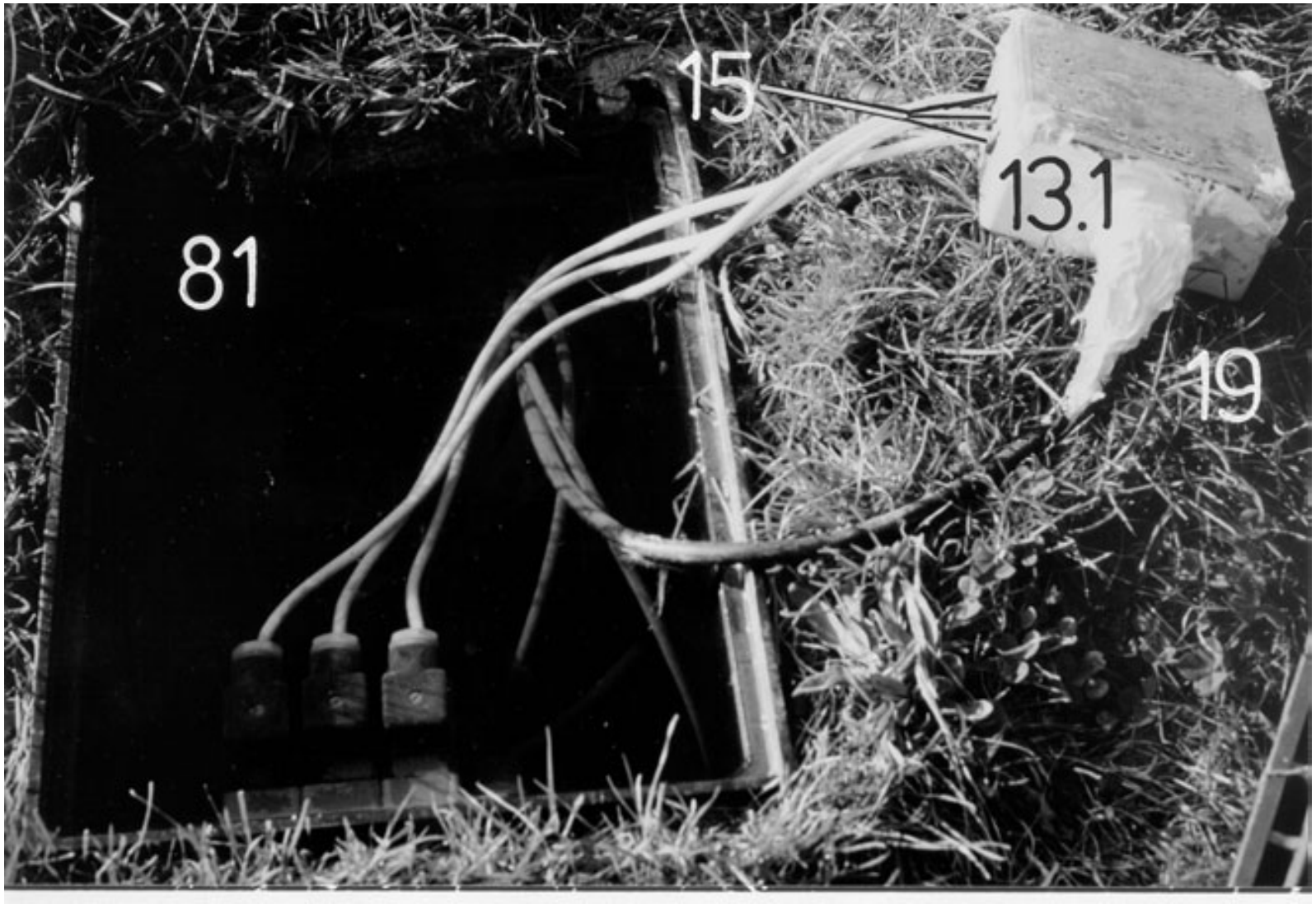
Gehäuse und Hohlräume weisen ein konstantes Volumen auf, selbstverständlich ändert sich die Temperatur der eingeschlossenen Luft, daraufhin ihr Druck, und es findet ein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt. Für die Beantwortung der Frage, wie Wasser in solche Gehäuse gelangt muß also die *isochore Zustandsänderung* betrachtet werden.

Beispiel: Eindringen von Wasser in Gehäuse einer Fernsteuerung

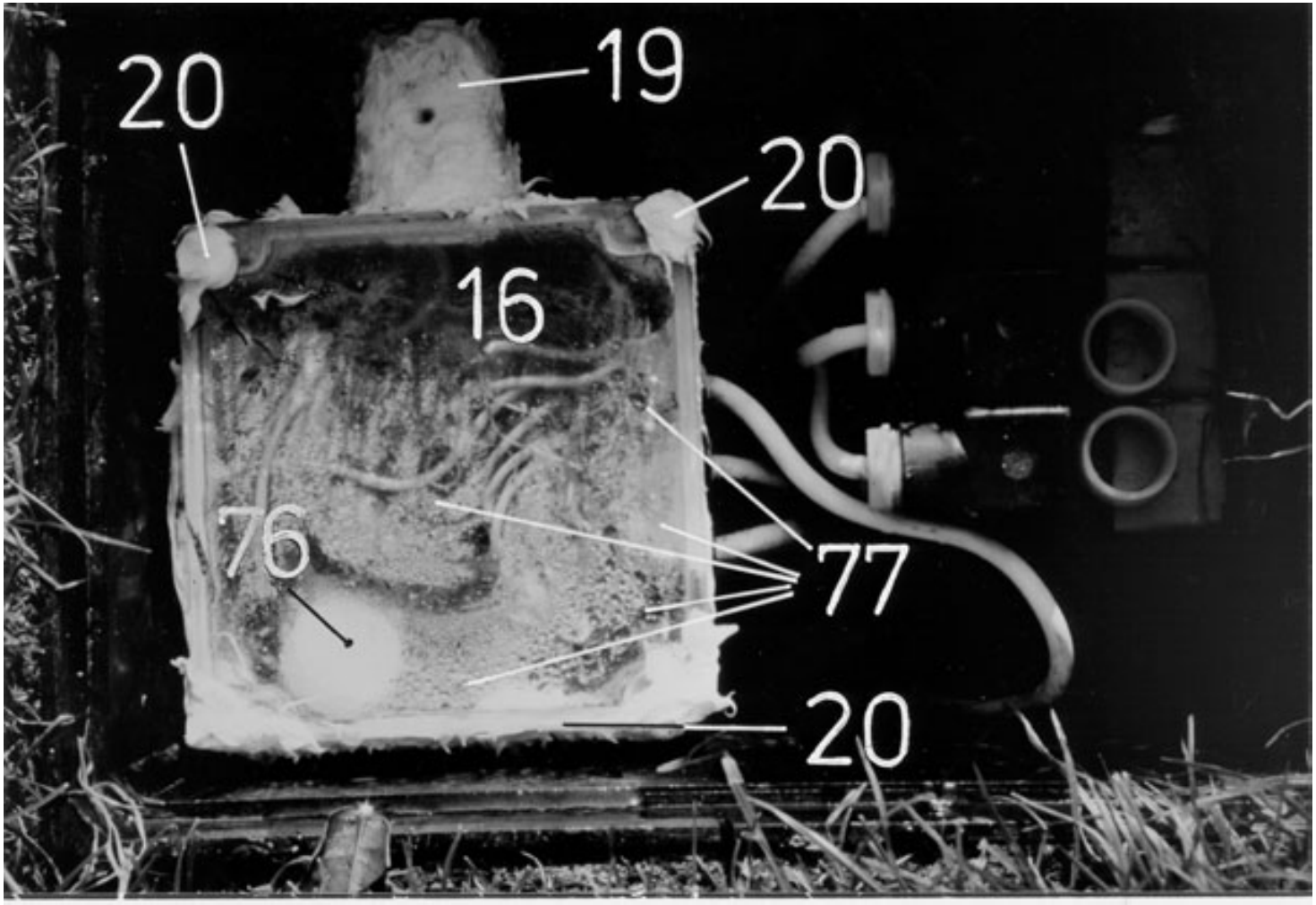
Erdkasten (EK) einer Golfplatz-Bewässerungsanlage



Erdkästen (EK) haben eine Stirnfläche von ca.
25 x 40 cm und sind zumeist 30 cm bis 60 cm tief.
Das Fernsteuerungsgehäuse liegt im Erdkasten.



Offener Erdkasten (81) mit Fernsteuerungsgehäuse (13.1), das, wie der Anschlußstecker (19) auch, mit Silikon abgedichtet ist.

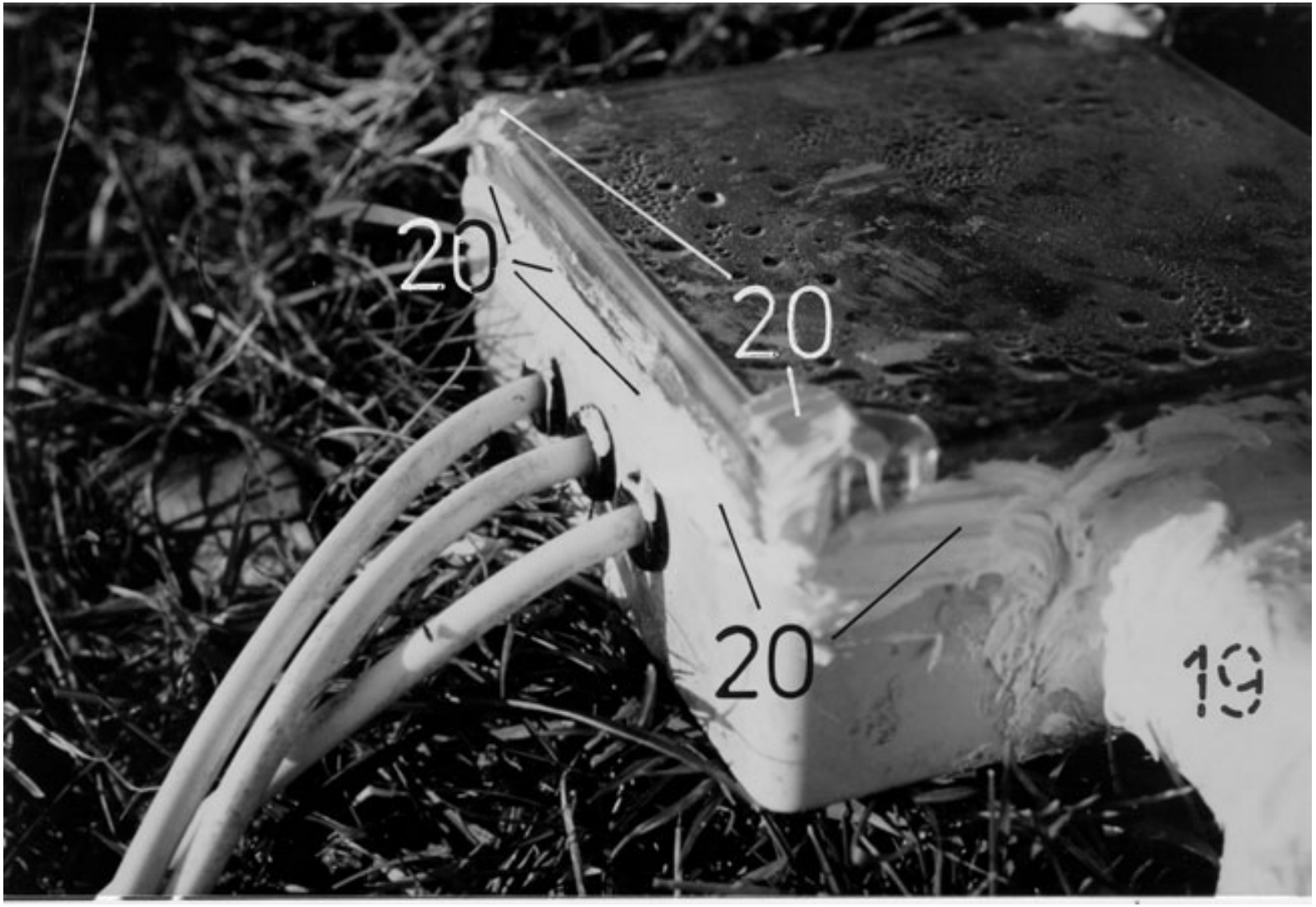


Fernsteuerungsgehäuse (16) nach ca. 300 Nächten und den im Tag-Nacht-Wechsel auftretenden Temperatur-schwankungen im Erdkasten: Kondenswasser (77, grau)

Das zusätzlich durch Silikon abgedichtete Elektrogehäuse ist in trockenem Zustand (etwa 55%rF) geschlossen und mit Silikon eingestrichen worden. Einige der Gehäuse hatten Silicagelpillen eingelegt, die eine Kondenswasserbildung ebenfalls nicht verhinderten.

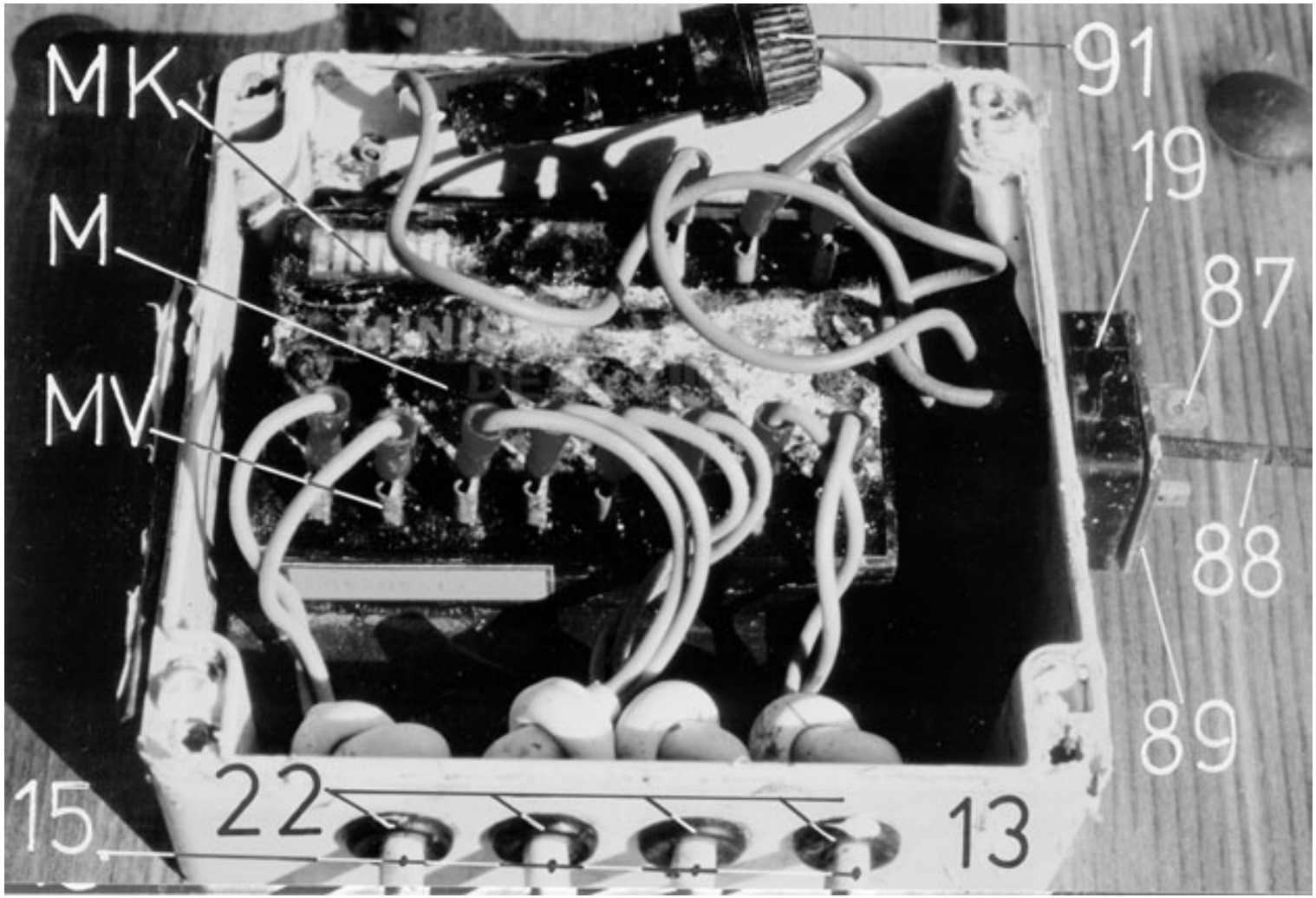
Das Gehäuse ist im Erdkasten Temperaturschwankungen zwischen etwa 40°C um die Mittagszeit und minimal 10°C in der Nacht ausgesetzt.

Ein solcher Schaltkasten (Gehäuse), der in einem wasserüberfluteten Erdkasten nach Trocknung und erneutem Zusammenbau lag, zeigte nach 9 Tag-Nacht-Zyklen keine Kondenswasserbildung noch war Wasser in flüssiger Form eingedrungen, der Kasten war vielmehr völlig trocken.



Fernsteuerungsgehäuse mit Kabeldurchführungen und Silikon-abdichtung (20) und mit Silikon-ummantelten Stecker (19)

Kondenswasserniederschlag im Fernsteuerungsgehäuse trotz intakter Kabeldurchführungen und Silikonabdichtung (13.1)



Fernsteuerungsgehäuse ohne Deckel mit Empfänger (M), fliegender Sicherung (91) und deutlichen Korrosionsspuren

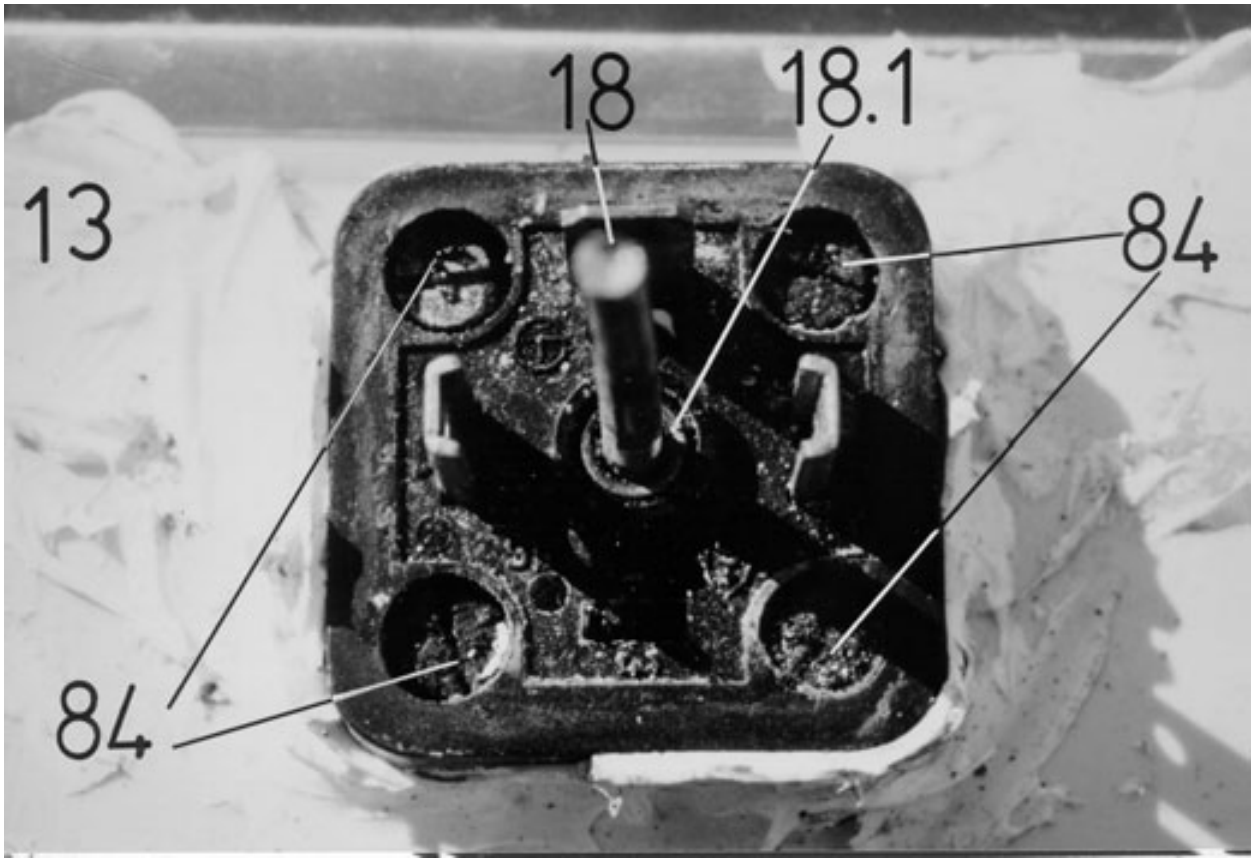
In den Schaltkasten der vorhergehenden Folie ist Wasser nicht nur in den Kasten selbst eingedrungen und hat dann korrodierend gewirkt, sonder sogar in den Sicherungshalter. Dabei lag dieser nicht auf dem Kastenboden, so daß etwa Kondenswasser aus dem Kasten in ihn hineinlaufen konnte, sondern, steife Drähte, der Halter hing „in der Luft“.

Wasser konnte also nicht in flüssiger Form in ihn eindringen, sondern nur in gasförmigem Zustand, mußte danach im Sicherungshalter auskondensieren.

Hier ist also feuchte Luft aus der Umgebung in den Kasten eingedrungen, danach feuchte Luft aus dessen Atmosphäre in den Sicherungshalter: Also ist auch ein Gehäuse im Gehäuse kein sicherer Schutz gegen Wassereindringung.

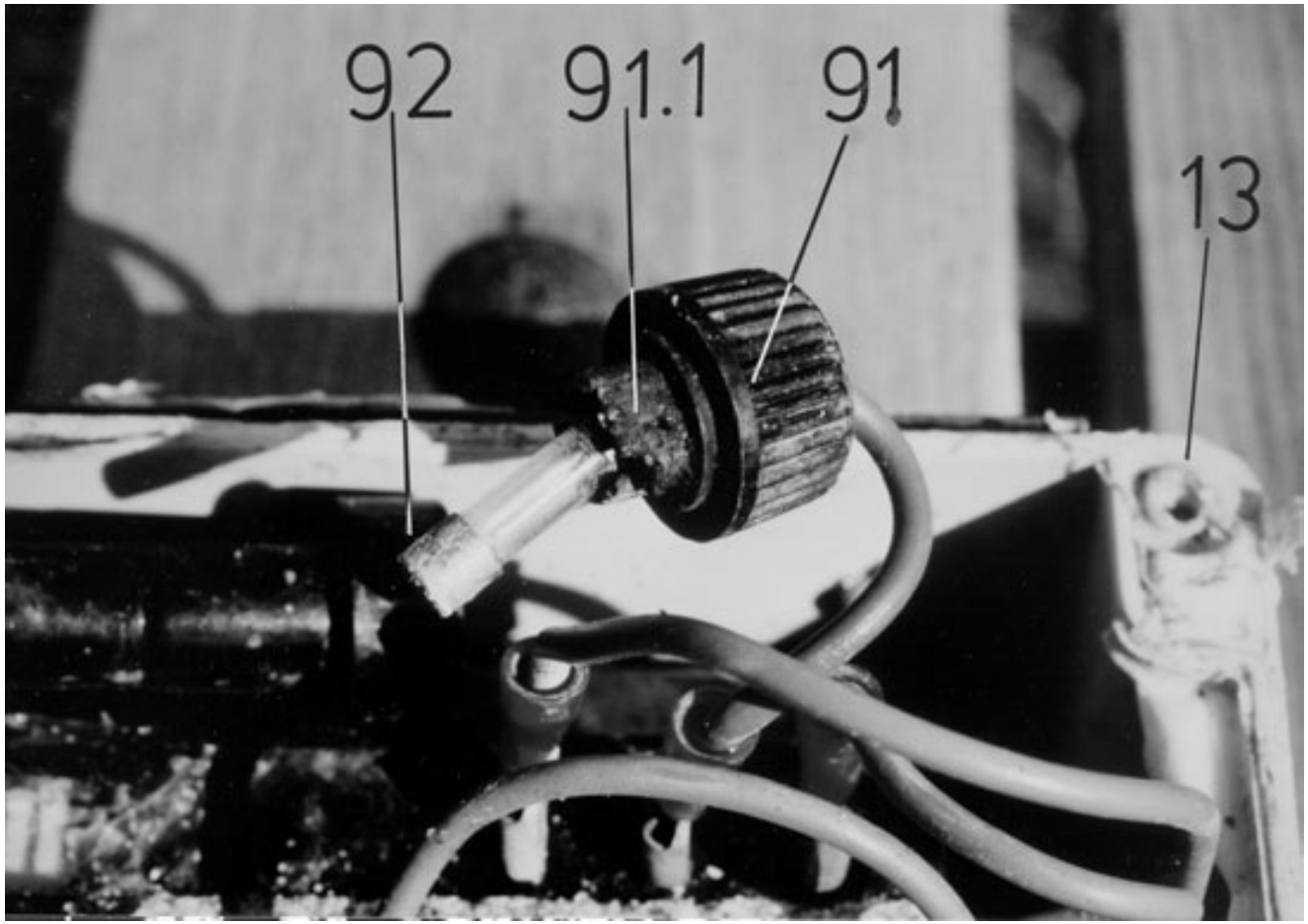
Korrosionsspuren (M, S, 84) im Kasteninneren

Deckel des Fernsteuerungsgehäuses mit Korrosionsrückständen nach zweitätiger Lagerung auf dem Deckel zum Entleeren des Gehäuseunterteils.

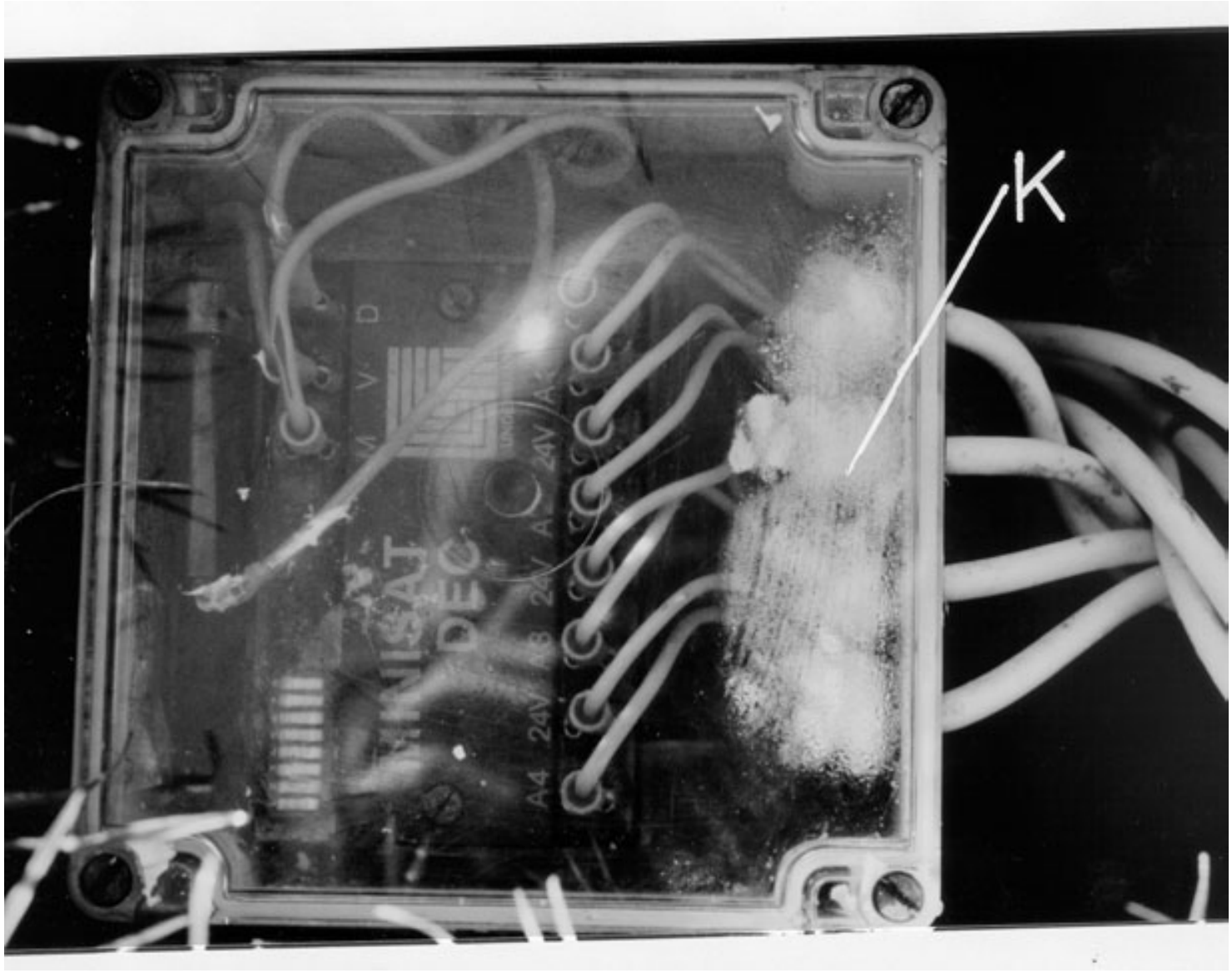


Steckersockel außen am Fernsteuerungsgehäuse:
Der Stecker hat einen Hohlraum, in den wegen
des Temperaturgangs auch feuchte Luft eindrang.

Gehäuseoberteil des Anschlußsteckers mit Eisenschwamm: Kurzschluß zwischen den Adern der Busleitung, damit Ausfall der Beregnungsanlage

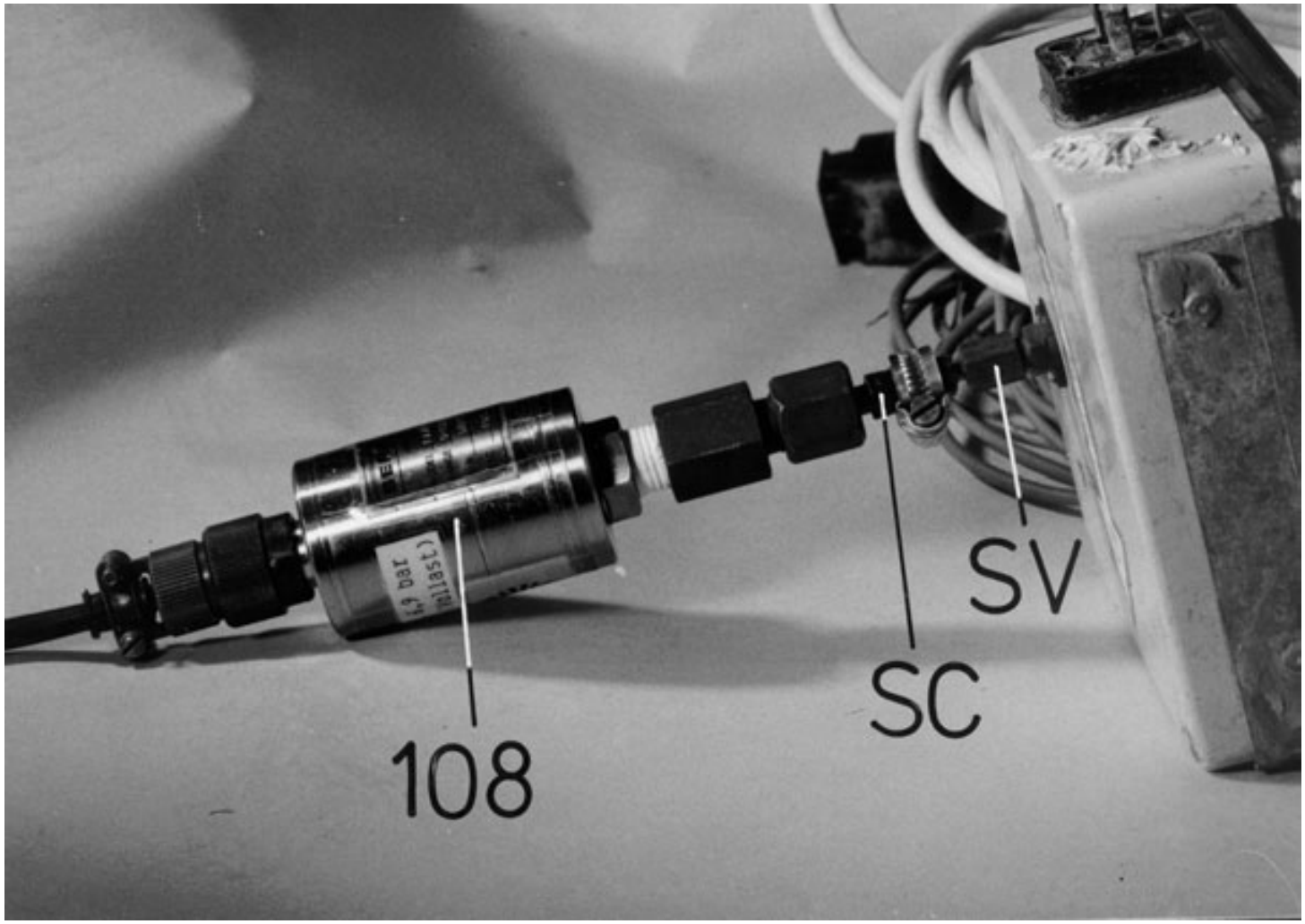


Korrosion am Sicherungshalter (91), der im Inneren des Fernsteuerungsgehäuses liegt: Gehäuse im Gehäuse und dennoch Korrosion aufgrund eingesaugter feuchter Luft und Kondensatbildung bei Abkühlung



Fernsteuerungsgehäuse nach einem Warm-Kalt-Zyklus (24h): Deutlich ist der Kondensatniederschlag (K) zu sehen

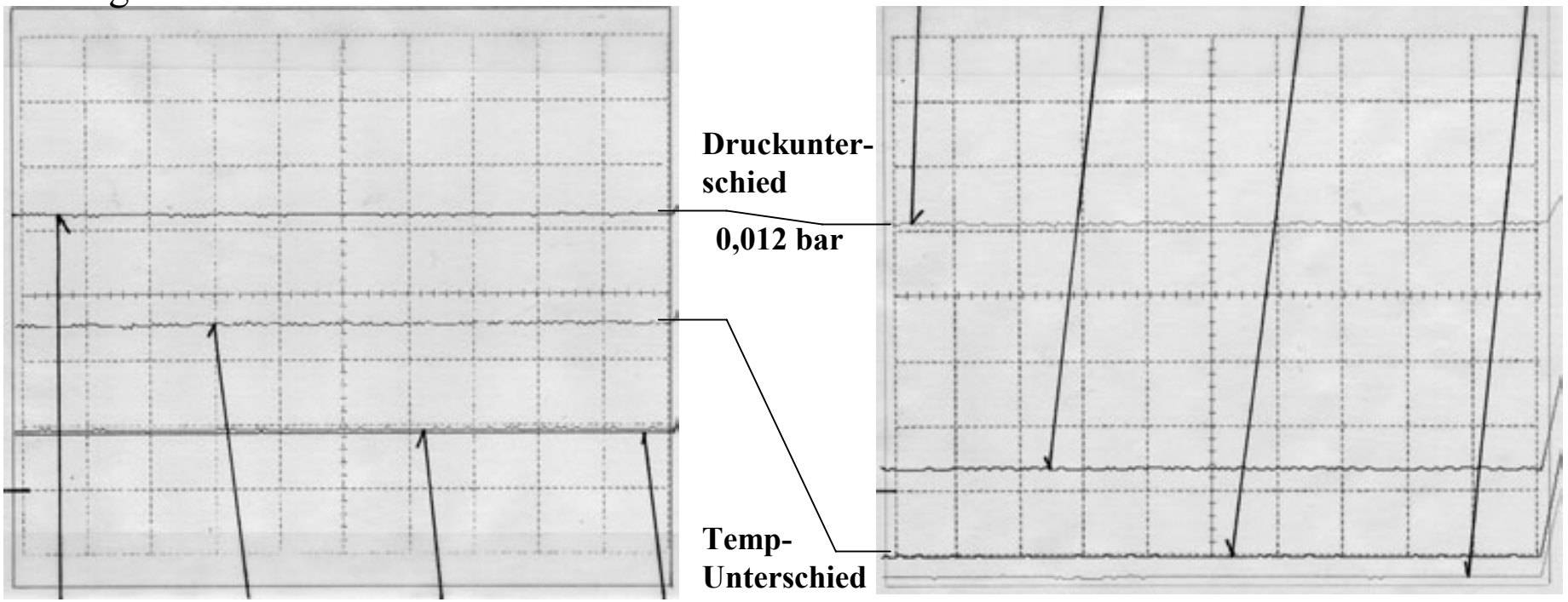
Fernsteuerungsgehäuse nach zwei Warm-Kalt-Zyklen (48h): Überall am Deckel Kondensatniederschlag



Zur Innendruckmessung präpariertes Fernsteuerungsgehäuse: Empfindlicher Absolutdruckaufnehmer (108) ist am Gehäuseboden angeschlossen, im Gehäuseinneren mißt ein Thermoelement die Lufttemperatur.

Mittags 12.oo h

Abends 20.oo h



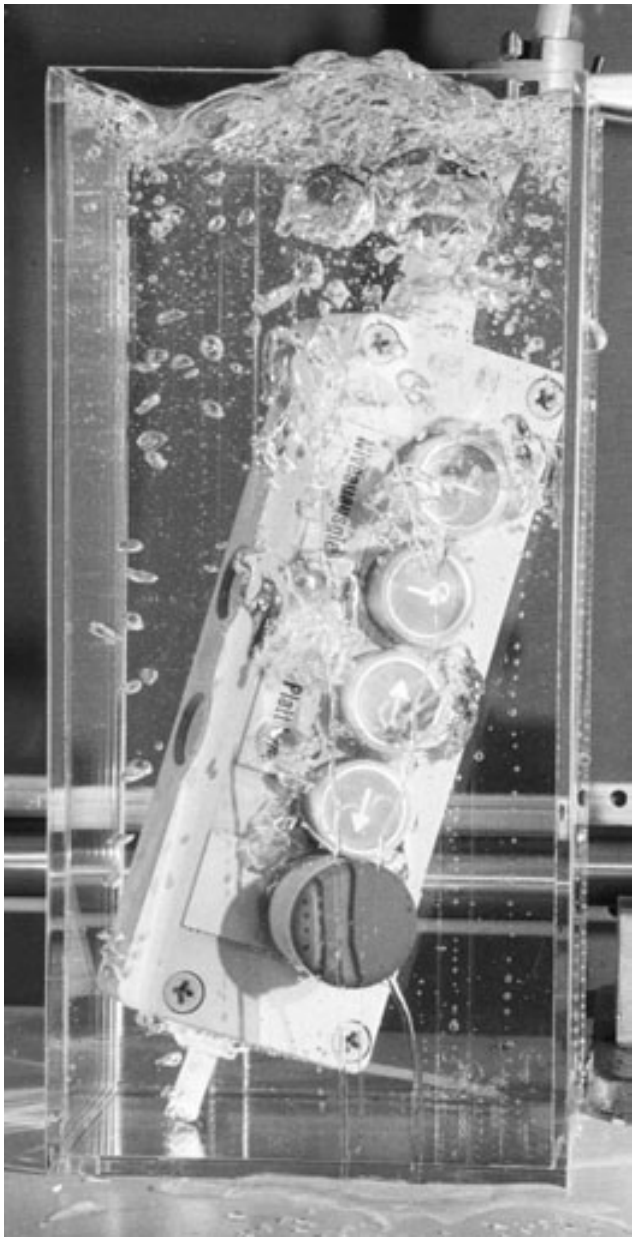
Einem Temperaturunterschied von 40 grd im Fernsteuerungsgehäuse entspricht bei isochorer Zustandsänderung rechnerisch eine Druckdifferenz von 0,14 bar. Der gemessene Druckunterschied ist aber nur rd. 1/10 davon, 0,012 bar. Das bedeutet, daß während der Temperaturabsenkung im Gehäuseinneren eine Luftströmung von außen nach innen stattgefunden hat:

Es wurde während der Abkühlung feuchte Luft in das Fernsteuerungsgehäuse eingesaugt.

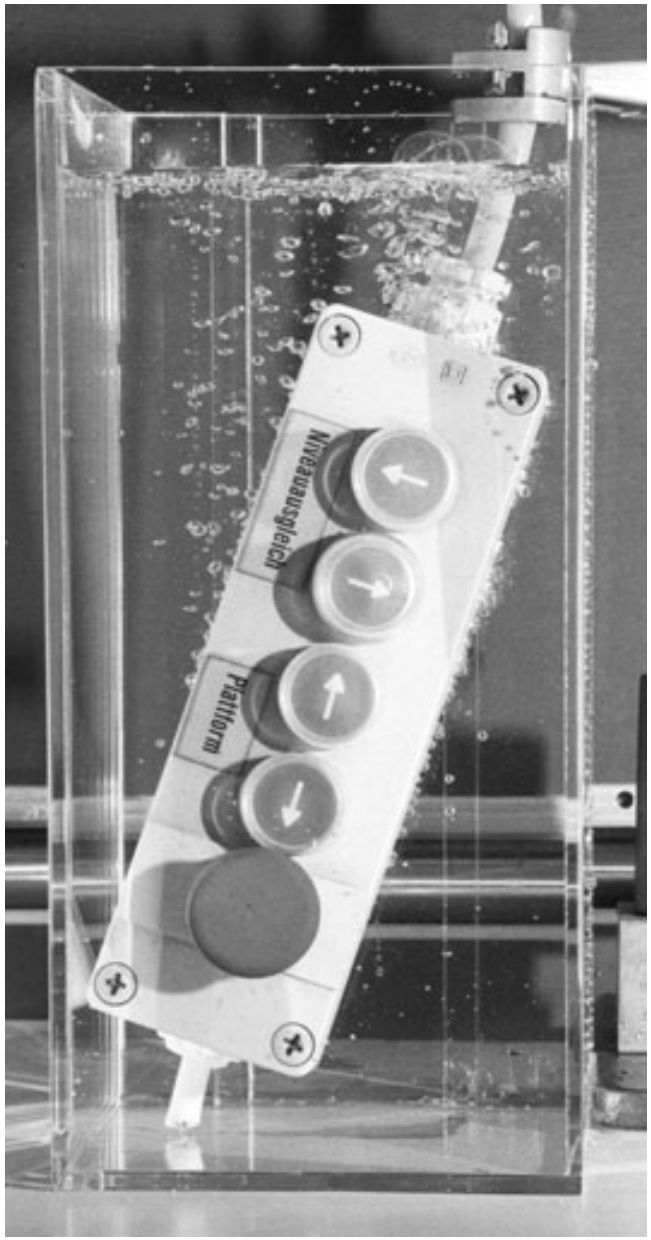
Normale Abdichtungen von Hohlräumen, wenn nicht gasdicht konstruiert, lassen zwar keine Flüssigkeiten (Tropfwasser, Spritzwasser, Strahlwasser, Schwallwasser) passieren, können sogar tauchwasserdicht sein, dabei jedoch nicht gasdicht.

Daher ist stets davon auszugehen, daß ein Luftaustausch zwischen Hohlraum und Umgebung stattfindet, wenn sich ein Druckunterschied zwischen beiden aufbauen kann.

Druckunterschiede sind bei abgedichteten, aber nicht gasdichten Gehäusen die zwangsläufige Folge von Temperaturunterschieden. Während in der Atmosphäre („unendlicher“ Raum) bei üblichen Temperaturwechseln keine Druckunterschiede auftreten oder durch Luftbewegungen ausgeglichen werden, sind solche in Gehäusen, deren Volumina stets endlich sind, als Folge von Temperaturwechseln unvermeidlich.

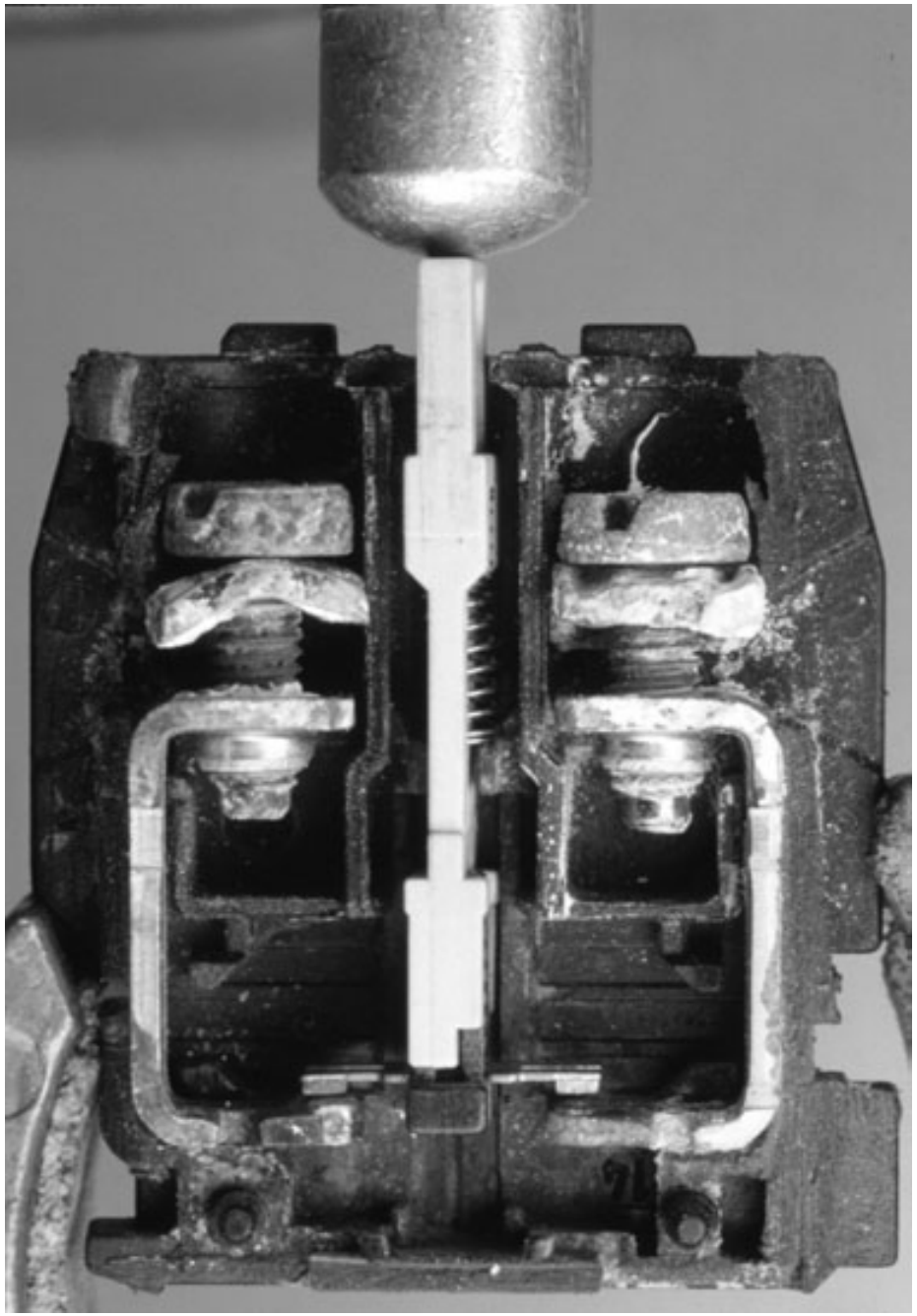


Not-Aus unbetätigt



Not-Aus betätigt

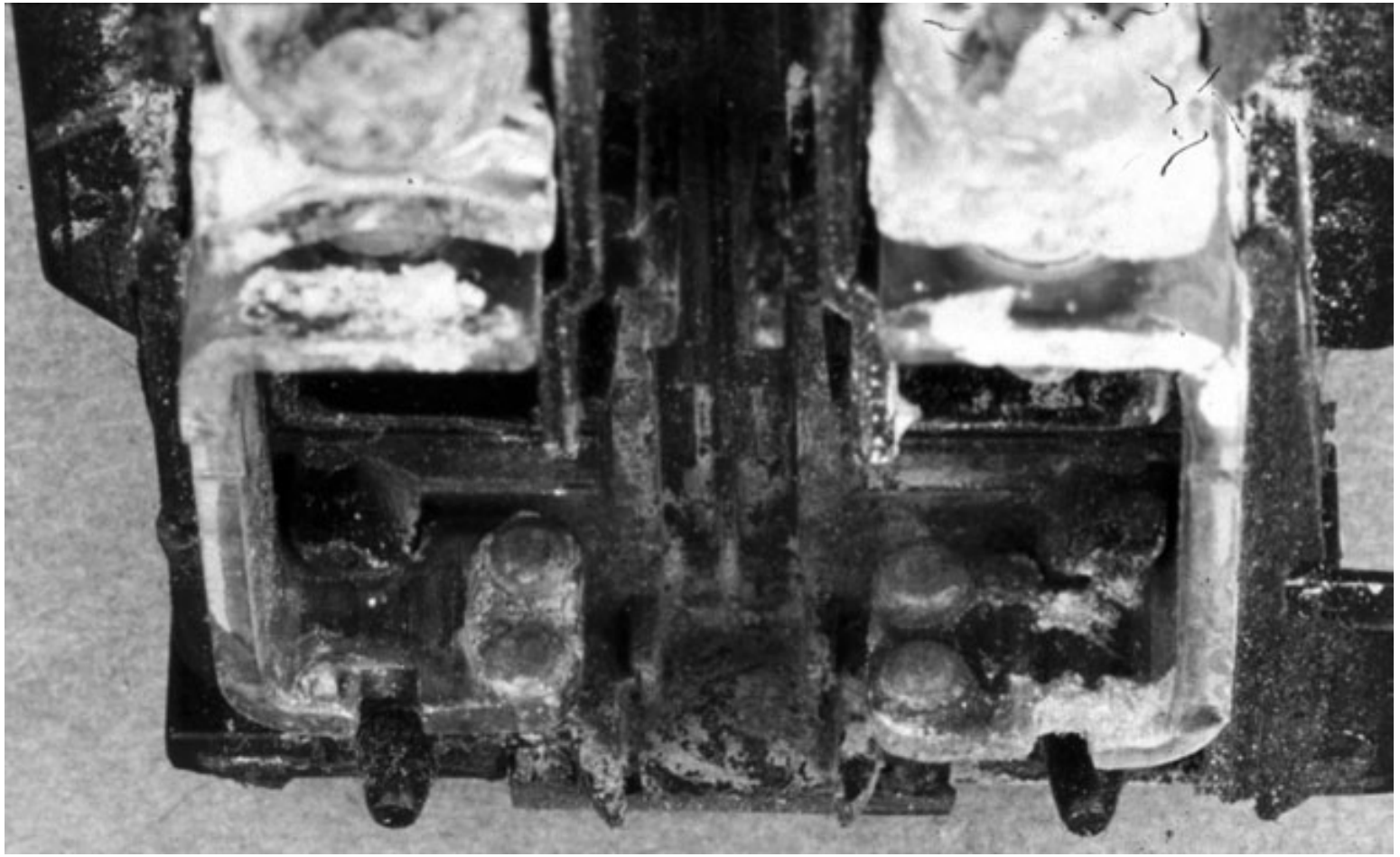
Das unter Wasser getauchte Gehäuse hat die Schutzart IP54. Mit betätigtem Not-Aus ist es tauchwasserdicht. Bei Unterdruck im Gehäuse werden die Dichtkräfte der vier Schrauben verstärkt und so die Dichtheit erhöht. Bei Überdruck im Gehäuse wölben sich die Gehäusehälften auf und Luft entweicht über die Teilfuge (rechtes Bild) . Der Not-Aus ist unbetätigt stark undicht.



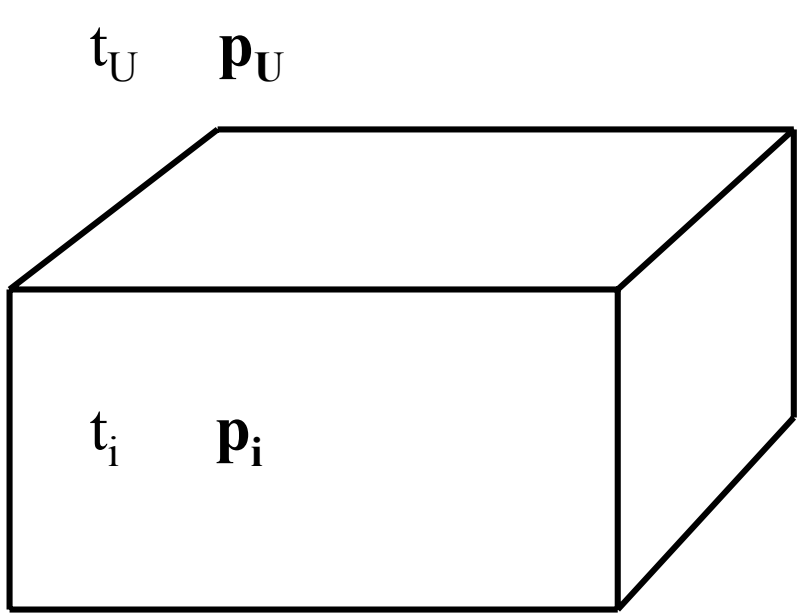
Tasterelement aus dem Schaltkasten der vorherigen Folie.

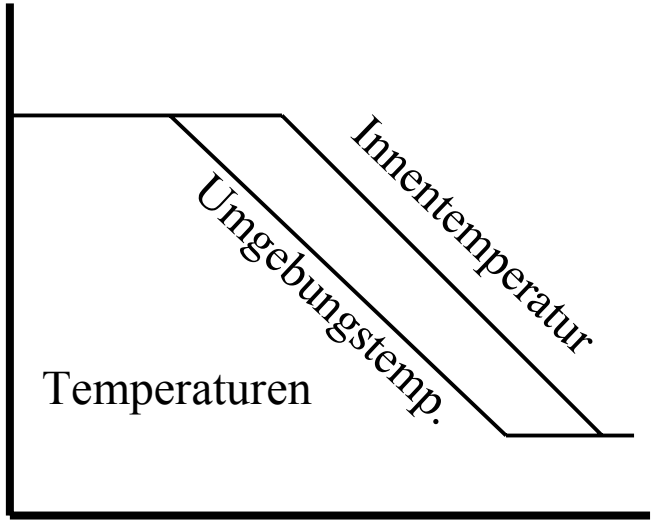
Durch das in das Gehäuse und dann weiter in den Schalter (Gehäuse im Gehäuse) eindringende Wasser sind alle Metallteile stark korrodiert.

Bei tiefen Temperaturen war das in der Feder abgelagerte Wasser gefroren und verhinderte den Rückhub des Stößels



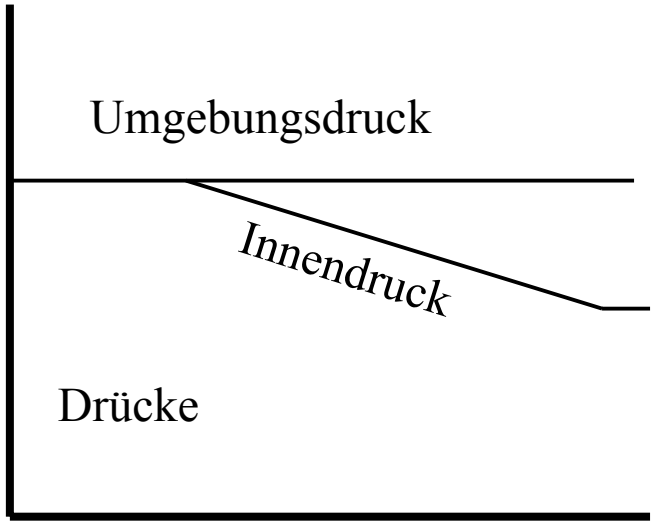
Detail des Tasters: Kontakte und Kontaktträger sind unter der Wirkung von Kondenswasser stark korrodiert. Im Winter führte das Kondenswasser sogar zum Blockieren des Tasters.

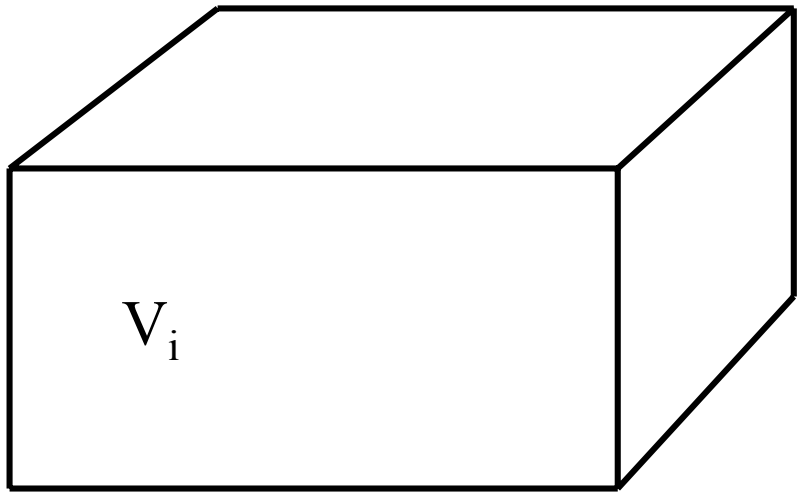




Mechanik des Wassertransports

Mit fallender Umgebungstemperatur t_U fällt auch die Innentemperatur t_i, sinkt demzufolge der Innendruck p_i, während der Atmosphärendruck auf konstantem Niveau p_U bleibt. Also setzt eine Luftströmung von außen (höherer Druck) nach innen ein, die auch Wasserdampf einschleppt.

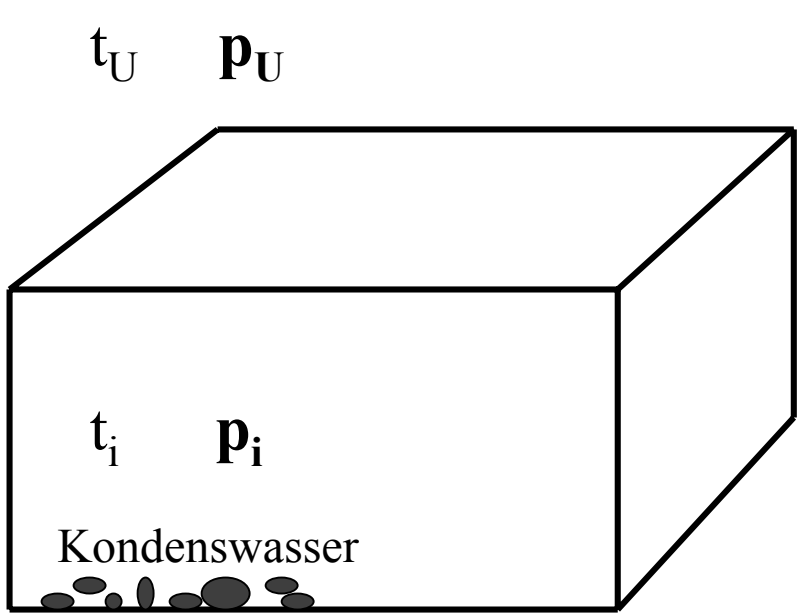


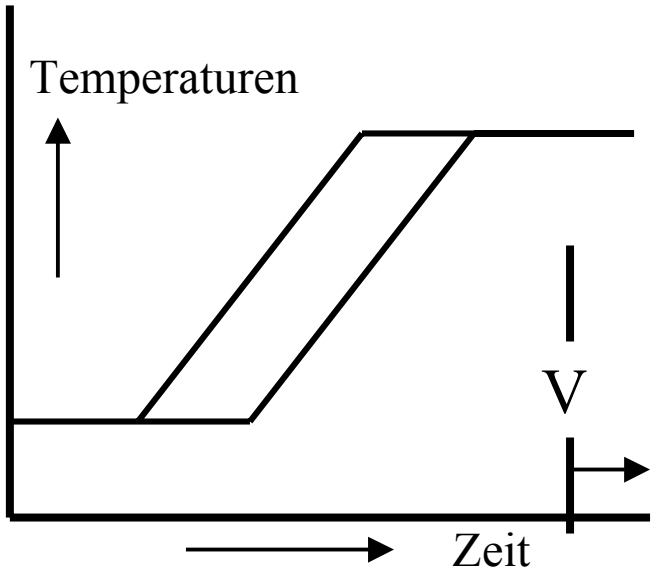


Die in einen Hohlraum V_i eindringende Luft enthält stets Wasserdampf, der bei einem Druckgefälle außen-innen mit der Luft ins Gehäuseinnere gelangt.

Sinkt dann die Innentemperatur ausreichend weit, so wird die Taulinie unterschritten und Wasser fällt im Gehäuseinneren aus.

Kondenswasser hat (fast) keine Oberflächenspannung und enthält keine Salze. Daher dringt es in feinste Spalte ein, der Lösungsdruck ist sehr groß.





Mit neuerlicher Erwärmung der Innenluft steigt deren Temperatur t_i und damit der Innendruck, während wieder der Atmosphärendruck unverändert bleibt, so das der Innendruck größer als jener wird: Lufttransport von innen nach außen.

Das Kondenswasser bleibt im Inneren des Hohlraums, denn seine Verdunstung setzt erst ein (**V**), wenn längst Temperaturausgleich Innen-Außen herrscht und damit auch Druckausgleich, also keine Strömung mehr von innen nach außen stattfindet.

Der Grund für das Ausströmen der Innenluft infolge Erwärmung und dem Verharren des Kondenswassers im Hohlraum liegt in der Thermodynamik der Vorgänge:

Um ein Kilogramm Luft um 20°C zu erwärmen, ist eine Wärmemenge von **20 kJ** erforderlich.

Um ein Kilogramm Wasser zu verdunsten und damit als Gas transportfähig zu machen wird die 125-fache Wärmemenge benötigt, nämlich **2500 kJ**.

Ehe diese Wärmemenge durch die Umgebungsluft über Wärmetransport im Hohlrauminneren bereitgestellt werden kann, herrscht längs Temperaturausgleich zwischen Innen und Außen, womit auch keine Druckdifferenz mehr vorhanden ist und Strömungsvorgänge zum Erliegen gekommen sind.

Der Zyklus

Abkühlung der Innenluft
Innendruckabsenkung
Feuchtluftströmung von außen nach innen
Auskondensation von Wasser

wiederholt sich bei der nächsten Abkühlung der Umgebungsluft. Erneut erfolgt ein Wassertransport von außen nach innen.

Bei der nächsten Erwärmung der Innenluft erfolgt

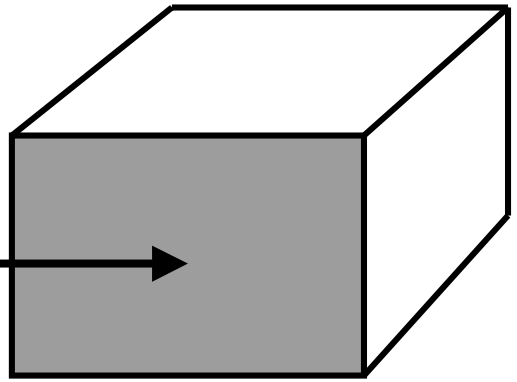
Temperaturerhöhung der Innenluft
Druckerhöhung innen

Verdunstung erfolgt zeitverzögert

Trockene Luft strömt von innen nach außen
Kondenswasser bleibt im Hohlrauminneren

Der Wassertransport erfolgt bei temperaturgängigen Hohlräumen auf einer

EINBAHNSTRASSE



und zwar gut wie ausschließlich von außen nach innen

Die Temperatureinwirkung auf die Innenluft kann keineswegs nur von außen erfolgen:

Ist im Gehäuseinneren eine temporär genutzte Wärmequelle vorhanden, etwa ein Elektromotor, ein Magnet oder entsteht Reibungswärme, so erfolgt ein Temperaturanstieg und damit eine Erhöhung des Innendrucks über den Außendruck, also kommt eine Strömung von innen nach außen in Gang.

Wird der Energiespender im Gehäuse abgeschaltet, sinkt die Innentemperatur und damit der Innendruck unter den Umgebungsdruck, und der Transport feuchter Luft aus der Umgebung in den Hohlraum beginnt.

Damit in einen Hohlraum hinein kein Wasserdampf gelangt, muß eine **Druckdifferenz** Hohlrauminneres-Umgebung **vermieden** werden.

Dies ist durch eine ausreichend großquerschnittige Verbindung des Hohlraumvolumens zur Umgebung möglich, wobei diese so gestaltet werden sollte, daß bei Temperaturgang des Hohlraumes die Luft in der Verbindung nur als Pfropfen hin- und hergeschoben wird. Auch ist die u. U. abnehmende Schutzklasse nach DIN VDE 0470 Teil 1 zu beachten.

Die zweite Möglichkeit ist, eine Hohlraumheizung vorzusehen, die die Temperatur des **Hohlraumes** stets über der **Umgebungstemperatur** hält. Natürlich müssen alle Bauteile im Hohlraum dieser Temperatur standhalten können.

Welche Hohlräume sind gefährdet?

Alle, die einem zyklischen oder auch nur **einmaligen** Temperaturwechsel (Brandgeschehen) ausgesetzt sind, z. B.

Schalter, Sicherungshalter, Installationskästen
Schaltkästen und Schaltschränke
Festplattengehäuse, Kameras
gekapselte Netzgeräte
sonstige gekapselte Geräte
Stecker
IP-Gehäuse allgemein
Maschinengehäuse
Lager, vor allem gedichtete Wälzlager
Relais
Spalte
....