

## **Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Vakuumdämmplatten**

R. Caps, va-Q-tec AG, Würzburg

### **1. Eigenschaften von Vakuumdämmplatten**

Evakuierte Wärmedämmplatten erreichen eine hohe Dämmwirkung mit kleinsten Dämmstärken. Sie bestehen in der Regel aus einem evakuierbaren, porösen Kernmaterial geringer Wärmeleitfähigkeit und einer vakuumdichten Umhüllung, z.B. einer metallisierten Hochbarrierefolie aus Kunststoff. Als Kernmaterialien eignen sich druckbelastbare Füllstoffe wie mikroporöse Kieselsäurepulver oder offenporige Schäume aus Polyurethan und Polystyrol.

Um die Wärmeleitfähigkeit der Luft in den Kernmaterialien praktisch auszuschalten, reicht bei mikroporösen Kernen aufgrund ihrer extrem kleinen Porengröße von weniger als einen halben Mikrometer schon ein Vakuum von 1 bis 5 mbar aus. In diesem Druckbereich wird eine Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,004 und 0,005 W/mK erreicht. Eine Erhöhung des Gasdruckes auf 100 mbar läßt die Wärmeleitfähigkeit in mikroporösen Kieselsäureplatten auf nur ca. 0,008 W/mK ansteigen. Bei normalem Luftdruck von 1000 mbar beträgt die Wärmeleitfähigkeit 0,020 W/mK. Im Falle von offenporigen Schäumen muss aufgrund der größeren Poren der Gasdruck dagegen im Bereich 0,01 bis 0,1 mbar liegen, um die Wärmeleitfähigkeit der Luft auszuschalten.

Die Firma va-Q-tec hat zur Qualitätssicherung der eingesetzten Folien und der Versiegelungs- und Evakuierverfahren der Vakuumdämmplatten verschiedene Tests entwickelt, um eine hohe Zuverlässigkeit und lange Nutzungsdauer seiner Produkte sicherzustellen.

## **2. Anforderungen an die Lebensdauer von Vakuumdämmplatten**

Da die Vakuumdämmplatten ihre geringen Wärmeleitfähigkeit nur im evakuierten Zustand erreichen – bei Belüftung steigt auch in mikroporösen Pulverkernen die Wärmeleitfähigkeit um das vier- bis fünffache an – muss das notwendige Vakuum über eine ausreichend lange Zeit gehalten werden können. Je nach Anwendungsfall kann das von einem Jahr bis zu mehreren Jahrzehnten reichen. Bei Anwendungen im Gebäudebereich werden oft Anforderungen an die Lebensdauern der Vakuumdämmplatten von 30 Jahren oder gar 50 Jahren an den Hersteller herangetragen.

In vielen interessanten Anwendungen wie z.B. die Bodendämmung mit darüber liegendem Estrich können Vakuumdämmplatten nur mit großem Aufwand wieder ausgetauscht werden. Daher sollte der Hersteller die Perspektive geben können, dass Vakuumdämmplatten viele Jahrzehnte funktionieren. Dies stellt hohe Anforderungen an die Qualitätssicherung der Vakuumdämmplatten.

Die Wärmeleitfähigkeit der Vakuumdämmplatten hängt vom Gasdruck im Inneren und vom Feuchtegehalt des Kerns ab. Daher muss bekannt sein, wie schnell der Gasdruck und der Feuchtegehalt der Vakuumdämmplatte mit der Zeit ansteigt. Dies hängt im wesentlichen von der Qualität der Umhüllungsfolie ab. Gas- und wasserdampfdichte Aluminiumfolien empfehlen sich aufgrund der großen Wärmeableitung des Aluminiums im Randbereich im allgemeinen nicht für die Umhüllung von Vakuumdämmplatten.

Deshalb ist man auf aluminiumfolienfreie Umhüllungen z.B. aus metallisch bedampften Mehrschichtfolien angewiesen, die praktisch keine Wärmebrücke mehr an den Rändern bilden. Es ist eine Aufgabe der Qualitätssicherung durch geeignete Versuche für Vakuumpaneele aus solchen Folien in möglichst kurzer Zeit eine Aussage über die Vakuumdichtigkeit und Wasserdampfdichtigkeit bzw. die zeitliche Zunahme des Gasdrucks und der Feuchte treffen zu können.

Zum anderen muss die Qualität der Vakuumdämmplatten schon während der Produktion kontrolliert werden können. Eine geeignete 100%-ige Kontrolle, ob jede Vakuumdämmplatte ihren nominellen Gasdruck erreicht, sollte möglich sein. Bei erhöhten Anforderungen an die Qualitätssicherung sollte auch noch eine Kontrolle beim Anwender vor Ort möglich sein, um z.B. eine zwischenzeitlich schleichende Belüftung ausschließen zu können.

### 3. Methoden zur Qualitätskontrolle

Zur Qualitätskontrolle der Vakuumdämmplatten können prinzipiell drei physikalische Messgrößen dienen:

- die Wärmeleitfähigkeit der Vakuumdämmplatten,
- der interne Gasdruck und
- der Feuchtegehalt bzw. die zeitliche Änderung dieser Größen.

Eine Messung der Wärmeleitfähigkeit ist an einzelnen Vakuumdämmplatten mit üblichen stationären Plattenmessverfahren möglich. Diese Messungen sind recht langwierig (mehrere Stunden Messzeit), die Genauigkeit des Verfahrens ist mit geeigneten Apparaturen allerdings recht hoch. Der Anfangsgasdruck einer mikroporösen Vakuumdämmplatte der Fa. va-Q-tec beträgt nach der Herstellung typischerweise zwischen 1 und 2 mbar.

Bei diesem Gasdruck ist die Wärmeleitfähigkeit der Restluft in der Platte nicht mehr nachweisbar. Lässt man die Zunahme der Feuchtigkeit des Dämmkerns unberücksichtigt, so führt ein weiterer Gasdruckanstieg von 1 mbar pro Jahr zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmkerns aus mikroporöser Kieselsäure um nur etwa 0,00004 W/mK, d.h. etwa 1% pro Jahr. Die Zunahme des Gasdrucks in Vakuumdämmplatten kann bei Verwendung von geeigneten Umhüllungsfolien jedoch deutlich weniger als 1 mbar pro Jahr betragen. Diese geringe Änderung ist an einem mikroporösen Dämmkern durch eine Messung der Wärmeleitfähigkeit praktisch nicht mehr nachweisbar.

Der Nachweis einer Gasdruckänderung mit der Zeit erlaubt bei mikroporösen Füllstoffen daher im allgemeinen eine viel genauere Aussage über die Lebensdauer eines Vakuumpaneels als eine Messung der Wärmeleitfähigkeit.

Eine Messung der zeitlichen Änderung der Wärmeleitfähigkeit kann unter Umständen jedoch sinnvoll sein, wenn an Stelle des mikroporösen Füllstoffes ein grobporiges Material verwendet wird. Dessen Wärmeleitfähigkeit reagiert empfindlich auf geringste Änderungen des Gasdruckes, so dass daraus ebenfalls ein Gasdruckanstieg abgeleitet werden kann.

Üblicherweise wird der Innengasdruck mit dem sogenannten Kammerverfahren bestimmt: die Vakuumdämmplatte wird wieder in eine Vakuumkammer gelegt und so lange evakuiert, bis sich merklich die Umhüllungsfolie vom Dämmkern abhebt.

In diesem Fall wird nämlich der Innendruck im Paneel gerade größer als der Gasdruck in der Vakuumkammer. Der apparative Aufwand dieses Verfahrens ist allerdings recht hoch, so dass es sich im allgemeinen nicht für eine 100%-ige Produktionskontrolle eignet.

Um eine lückenlose Produktionskontrolle zu gewährleisten, wurde von va-Q-tec ein weiteres Verfahren zur Gasdruckbestimmung entwickelt: Bei der Herstellung wird zwischen Dämmkern und Umhüllungsfolie eine dünne Metallscheibe mit einem aufliegenden porösen Material eingebracht. Der Gasdruck in der Vakuumdämmplatte wird dann aus dem Wärmestrom von einem außen anliegenden warmen Messkopfes in die innen liegende kalte Metallscheibe abgeleitet. Die Messung beginnt mit dem Aufsetzen des Messkopfes und dauert etwa 10 Sekunden. Mit speziellen Messköpfen ist sogar eine Messzeit von 5 Sekunden erreichbar. Die Unsicherheit des Verfahrens beträgt bei einem Gasdruck von 1,5 mbar etwa +/- (0,3 - 0,5) mbar. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist nun eine vollständige Kontrolle des Gasdrucks jedes ausgelieferten Vakuumpaneels sowohl in der Produktion als auch beim Anwender möglich. Abb. 1 zeigt eine Kalibrierkurve des Messgerätes an einer Reihe von Vakuumdämmplatten mit bekanntem Innengasdruck, in Abb. 2 werden zwei Wiederholungsmessungen verglichen.

Je nach Qualität der Umhüllungsfolie kann auch Wasserdampf von außen in den Vakuumdämmkern eindringen und die Wärmeleitfähigkeit erhöhen. Bei mikroporöser Kieselsäure bewirkt ein Anstieg der Feuchtigkeit um 1% im Dämmkern eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit um etwa 0,0005 W/mK.

#### **4. Messungen des Gasdruck- und Feuchteanstiegs**

Die Messung des Gasdruckes jeder Vakuumdämmplatte nach der Produktion lässt eine Aussage über deren Qualität zu diesem Zeitpunkt zu. Um auf die Lebensdauer der Vakuumdämmplatte schließen zu können, muss die zeitliche Änderung der

Wärmeleitfähigkeit, bzw. der sie beeinflussenden Größen wie Gasdruck und Feuchtegehalt bekannt sein. Es müssen daher Gasdruckänderungen im Bereich von 0,5 mbar pro Jahr bzw. Änderungen des Feuchtegehalts im Bereich von 0,1 % pro Jahr gemessen werden können.

Die Hersteller von vakuumdichten Umhüllungsfolien geben üblicherweise Durchlässigkeiten der Folien für Sauerstoff (in Einheiten Standard cm<sup>3</sup> Gas pro Quadratmeter pro Tag und pro bar Partialdruckdifferenz) und Wasserdampf (in Gramm pro Quadratmeter und pro Tag) an.

Die Angaben der Hersteller lassen sich aber nur bedingt auf ein fertig hergestelltes Vakuumpaneel übertragen. Denn die Schweißnähte sowie Fehlstellen in der Folie durch Knicke und Falten, wie sie beim Umlegen von Laschen entstehen, können unter Umständen die Durchlässigkeit der Hülle für Gase und Wasserdampf beträchtlich erhöhen. Schließlich können auch Ausgasungen im Inneren der Vakuumdämmplatte zu einer zusätzlichen Gasdruckzunahme führen.

Daher muss der Gasdruckanstieg und Feuchteeintrag unbedingt an fertigen Vakuumdämmplatten - auch bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen - geprüft werden können. Eine alleinige Berechnung der Anstiegswerte aus den Foliendaten kann nur einen Anhaltswert für die erreichbare Lebensdauer eines Vakuumpaneels liefern.

#### **4.1 Messungen des Gasdruckanstiegs**

Um die Eigenschaften von Folien verschiedener Hersteller beurteilen, bzw. um vielleicht sogar eine regelmäßigen Wareneingangskontrolle durchführen zu können, darf die Messdauer des Gasdruckanstiegs im Vakuumpaneel allerdings nicht zu lange dauern.

Sie sollte innerhalb weniger Tagen oder Wochen durchgeführt werden können. Man ist daher unter anderem auf eine künstliche Alterung der Vakuumdämmplatten angewiesen, um den Anstieg des Gasdruckes zu beschleunigen.

Eine Möglichkeit ist, die Vakuumdämmplatten bei gegenüber der Raumtemperatur erhöhten Temperatur und auch erhöhter Feuchtigkeit zu lagern, denn mit steigender

Temperatur nehmen auch die Diffusionsraten für Gase zu. Abb. 3 zeigt die zeitliche Änderung des Gasdruckes in 20 mm dicken Proben, die bei 80 °C gelagert worden sind. Die Messungen erfolgten mit dem Kammerverfahren.

Man erkennt, dass zu Beginn der Lagerung der Gasdruck etwas schneller ansteigt, danach nimmt der Anstieg jedoch einen linearen Verlauf. Mit der hier vermessenen Folie Typ A erreicht man bei 80 °C Lagertemperatur einen Gasdruckanstieg von ca. 4 –5 mbar pro Jahr. Zum Vergleich ist in der Abb. 3 auch der Gasdruckanstieg von 20 mm dicken Proben mit der gleichen Folienumhüllung Typ A dargestellt, die bei Raumtemperatur (RT) von 20 °C +/- 7 °C gelagert werden. Der Gasdruckanstieg beträgt hier zwischen 0,5 und 1 mbar pro Jahr. Genauere Aussagen können erst nach weiterer Lagerzeit getroffen werden. Durch die Lagerung bei 80 °C kann die Alterung also etwa um den Faktor 5 bis 10 beschleunigt werden.

Der Anstieg des Gasdruckes kann zum einen durch Ausgasungen der Materialien im Inneren der Vakuumdämmplatte verursacht werden, zum anderen aufgrund der Gasdiffusion durch die Umhüllungsfolie. Im zweiten Fall ist der Gasdruckanstieg umgekehrt proportional zur Dicke der Dämmplatte, da in einer dünneren Dämmplatten weniger Volumen für die gleiche durch die Folie diffundierende Gasmenge vorhanden ist. In einer 5 mm dicken Platte wird aufgrund der Gasdiffusion durch die Umhüllung gegenüber einer 20 mm Platte der Gasdruck also viermal so schnell ansteigen. Dünne Platten sind allerdings mit dem Kammerverfahren zur Gasdruckmessung schwieriger zu messen, da sich beim Abheben der Folie das Volumen merklich ändert.

Abb. 4 zeigt das Ergebnis einer Messung, bei der die Wärmeleitfähigkeit einer 5 mm dünnen Platte, die mit der Folie Typ A und einem speziellen Testmaterial als Füllung ausgerüstet war, über ein Wochenende hinweg registriert wurde. Die Temperatur der heißen Seite betrug hier 40 °C, die der kalten Seite 20 °C.

Ein linearer Fit der Messpunkte ergibt einen Anstieg des Wärmedurchgangskoeffizienten um 0,0072 W/m<sup>2</sup>K pro Tag. Zusammen mit den bekannten Eigenschaften der Testfüllung lässt sich daraus auf einen Gasdruckanstieg von ca. 1 mbar pro Jahr schließen. Umgerechnet auf eine 20 mm Kieselsäureplatte wären das maximal 0,25 mbar pro Jahr Gasdruckanstieg aufgrund von Gasdiffusion durch die Umhüllung.

Alternativ dazu wurde mit Hilfe des va-Q-check Verfahrens auch direkt die zeitliche Änderung des Gasdruckes in den mit dem Testmaterial gefüllten Platten über einige Wochen hinweg geprüft. Aus einem Fit der zeitlichen Änderung des Messsignals (Abb.5) an einer Probe mit 10 mm Stärke lässt sich z.B. ein Anstieg des Gasdrucks im Bereich von 0,5 mbar pro Jahr berechnen.

Setzt man voraus, dass sich die Diffusionsrate von Gasen durch die Umhüllungsfolie und die Siegelnähte mit den Jahren nicht verändert, so lassen sich aus den obigen Daten (z.B. maximal 0,5 mbar Anstieg pro Jahr für die Folie Typ A bei 20 mm Plattenstärke) die aufgrund des aktuellen Gasdrucks sich ergebenden Wärmeleitfähigkeiten ableiten.

Nach 50 Jahren und einem Gasdruck von  $< 25$  mbar errechnet sich z.B. eine zusätzliche Wärmeleitfähigkeit von weniger als  $25 \text{ mbar} \times (0,00004 \text{ W/mK pro mbar}) = 0,001 \text{ W/mK}$ . Dem Druckanstieg von 0,5 mbar pro Jahr bei 20 mm Stärke entspricht einer Gasdiffusionsrate von ca.  $0,01 \text{ Standard cm}^3 \text{ pro m}^2 \text{ Folie und pro Tag}$ .

## **4.2 Messungen der Feuchtigkeitszunahme**

Die Füllungen der Vakuumdämmplatten werden bei va-Q-tec vor der Evakuierung soweit ausgeheizt, dass nach der Fertigstellung praktisch keine Feuchte mehr in den Füllkernen enthalten ist. Messungen der Zunahme des Feuchtegehalts bei Raumtemperatur sind aufgrund der relativ geringen Massenzunahme langwierig. Bisherige Ergebnisse deuten für die Folie Typ A und 20 mm starke Paneele auf einen Wert der Feuchtigkeitszunahme im Bereich von 0,1 Gewichtsprozent pro Jahr hin, wenn die Proben bei Raumtemperatur und relativen Feuchten um 50 % gelagert werden. Diesem Wert entspricht eine Diffusionsrate von Wasserdampf durch die Hüllfolie von etwa  $0,005 \text{ g pro m}^2 \text{ Folie und pro Tag}$ .

Nach 50 Jahren ergäben sich bei linearer Extrapolation etwa 5 Gew. % Feuchtegehalt im Vakuumpaneel. Die Feuchtezunahme kann sogar etwas geringer als bei einer linearen Extrapolation ausfallen, da mit steigendem Feuchtegehalt der Partialdruckunterschied des Wasserdampfs zwischen innen und außen sinkt. Dem Feuchtegehalt von 5 Gew. % entspricht etwa einer zusätzlichen Wärmeleitfähigkeit von  $0,0025 \text{ W/mK}$ . Man kann davon ausgehen, dass sich die zusätzlichen Wärmeleitfähigkeiten aufgrund der Gasdruck- und Feuchtigkeitszunahmen linear überlagern, so dass sich

die Gesamtwärmeleitfähigkeit einer 20 mm dicken Vakuumdämmplatte um nicht mehr als 0,004 W/mK erhöhen sollte.

Die Gesamtwärmeleitfähigkeit sollte daher bei Anwendung der Folie A und normalen Umgebungsbedingungen gemäß dieser Extrapolation auch nach 50 Jahren bei nicht mehr als 0,008 W/mK liegen.

Lagerung unter erhöhten Feuchte- und Temperaturbedingungen können jedoch unter Umständen einen drastischen Einfluss auf die Beständigkeit von Folien haben. Vakuumdämmplatten, die zum einen mit der Folie Typ A und zum anderen mit einer weiteren Folie Typ B umhüllt waren, wurden solchen Bedingungen ausgesetzt. Bei Versuchen dieser Art hat sich beispielsweise die oberste Folienschicht der Folie Typ B delaminiert oder es verschwand sogar deren Metallisierung und die Folie B wurde transparent. Dagegen blieb die Folie Typ A in allen Versuchen jeweils unbeschädigt, Gasdruck- und Feuchtigkeitsanstiege waren gering.

## **5. Schlussbetrachtungen**

Mit den besten der heute bei va-Q-tec zur Verfügung stehenden metallisierten Folien lassen sich so geringe Gasdruckanstiege und Feuchtigkeitszunahmen erreichen, dass die Wärmeleitfähigkeit in mikroporösen Vakuumdämmplatten im Laufe von mehreren Jahrzehnten nur wenig ansteigen sollte. Bestimmte metallisierten Folien erreichen so geringe Durchlässigkeitswerte, dass sie mit Aluminiumverbundfolien vergleichbar sind, jedoch deren Nachteil, die hohen Wärmeverluste im Randbereich, vermeiden.

Die Firma va-Q-tec hat Methoden zur Qualitätssicherung entwickelt, mit denen man die Vakuumdämmplatten innerhalb von wenigen Wochen oder sogar Tagen auf das Einhalten von vorgegebenen Gasdruckanstiegsraten testen kann. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, ob die Gasdiffusionswerte sich aufgrund eines langfristigen Alterns der Umhüllungsfolien und der Siegelnähte doch ändern können oder ob eine einfache Extrapolation der Messdaten wie oben dargestellt auch über lange Zeiten hinweg zulässig ist.

**Abbildungen:**

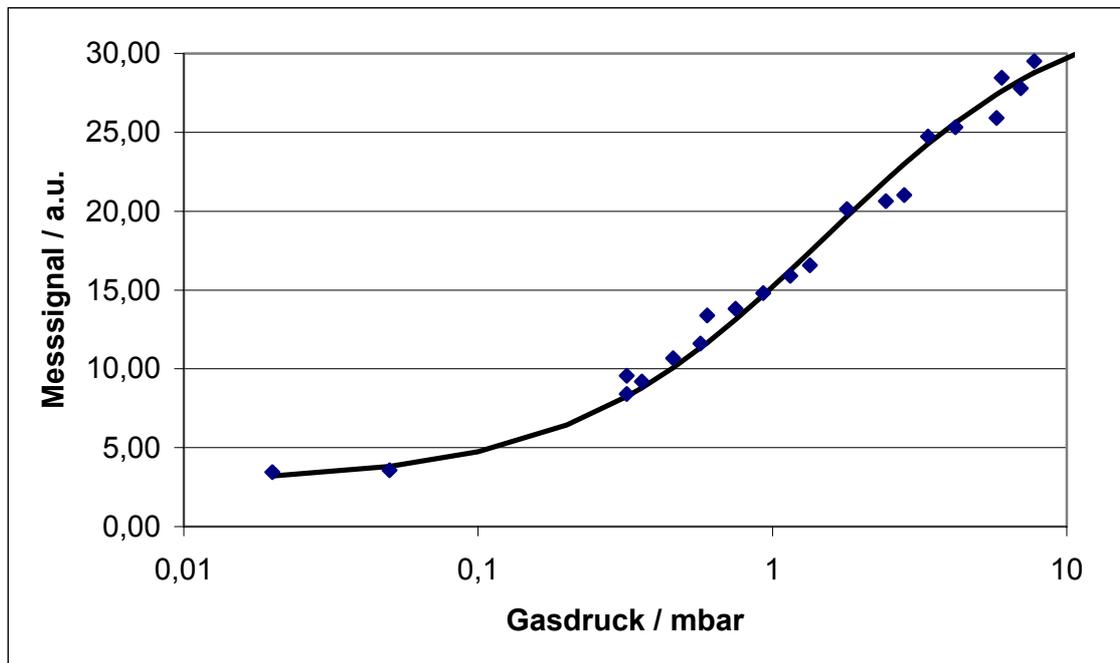


Abb.1: Beispiel für die Kalibrierkurve eines va-Q-check Messgerätes

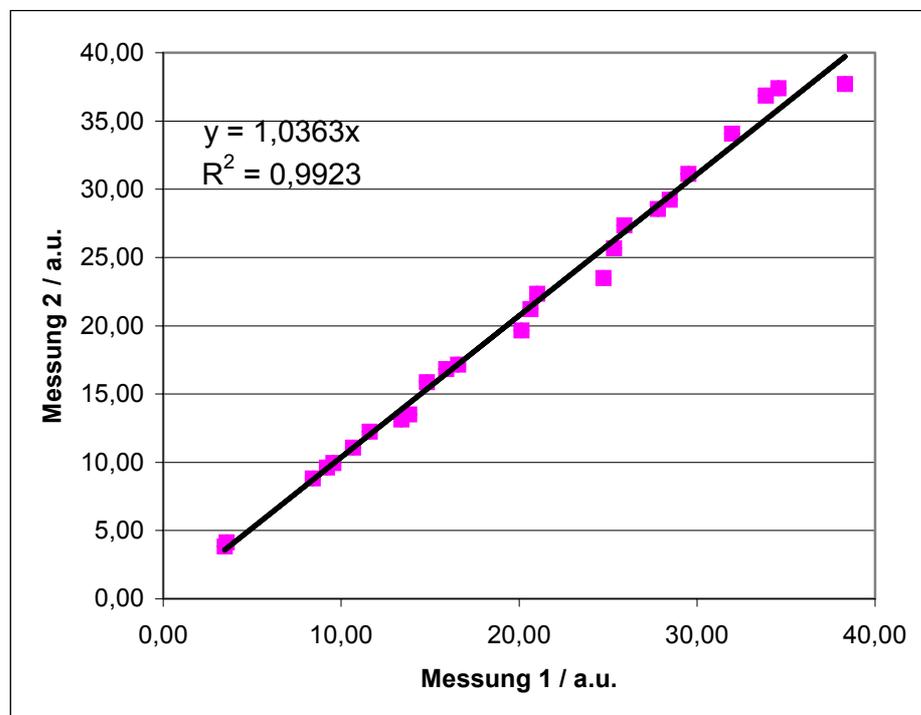


Abb.2: Vergleich der Messsignale va-Q-check bei Wiederholung innerhalb von 4 Tagen an Proben mit Gasdrücken von ca. 0,03 mbar (unterer Wert) bis ca. 100 mbar (obere Werte)

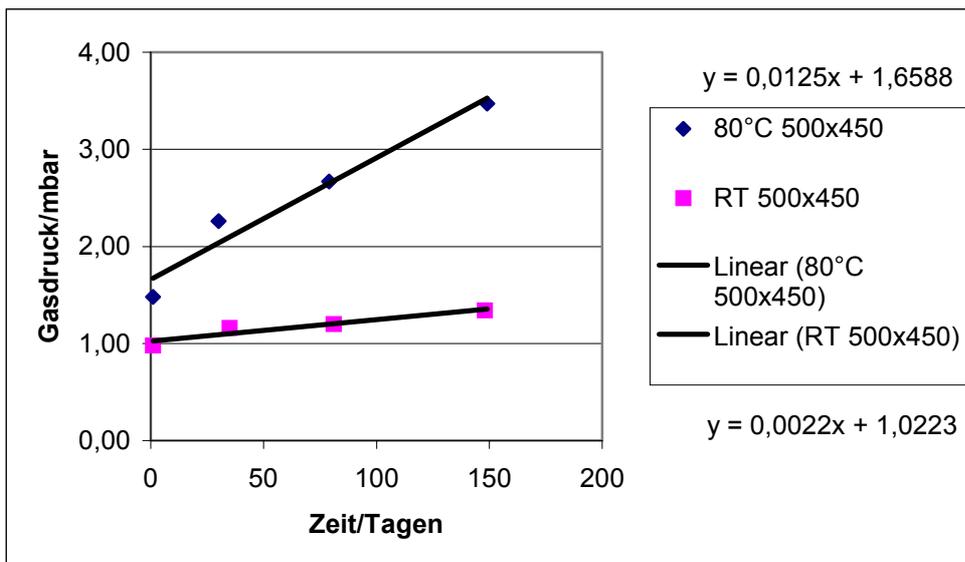


Abb. 3: Gasdruckanstieg in bei 80 °C und bei Raumtemperatur (RT) gelagerten Vakuumdämmplatten 20 mm mit Folie Typ A; Messungen mit dem Kammerverfahren, jeweils Mittelwert aus 6 Proben

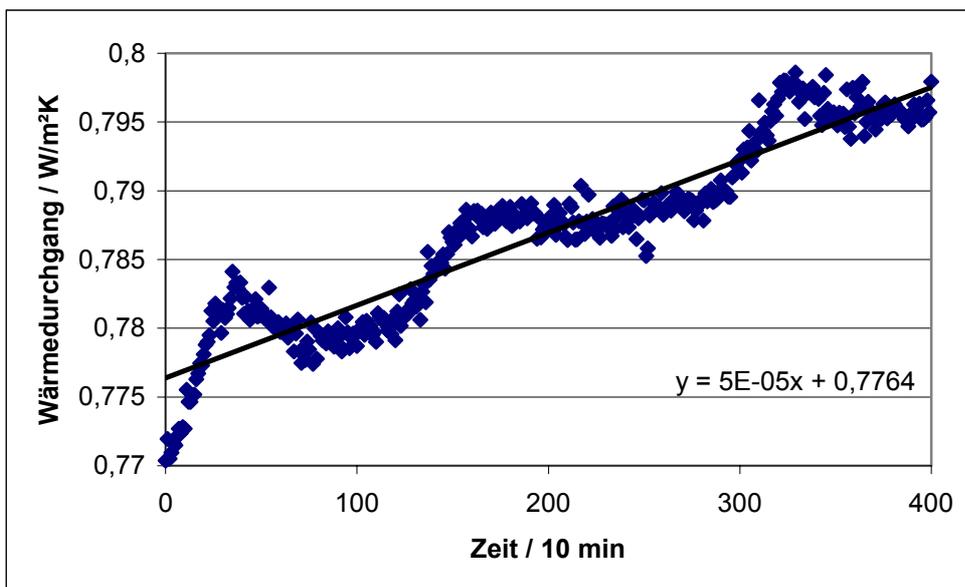


Abb. 4: Zeitliche Variation des Wärmedurchgangskoeffizienten einer 5 mm dünnen Vakuumdämmplatte mit spezieller Füllung und Folie Typ A; neben Einflüssen der tageszeitlich schwankenden Raumtemperatur auf das Messergebnis ist ein deutlicher Anstiegstrend zu sehen

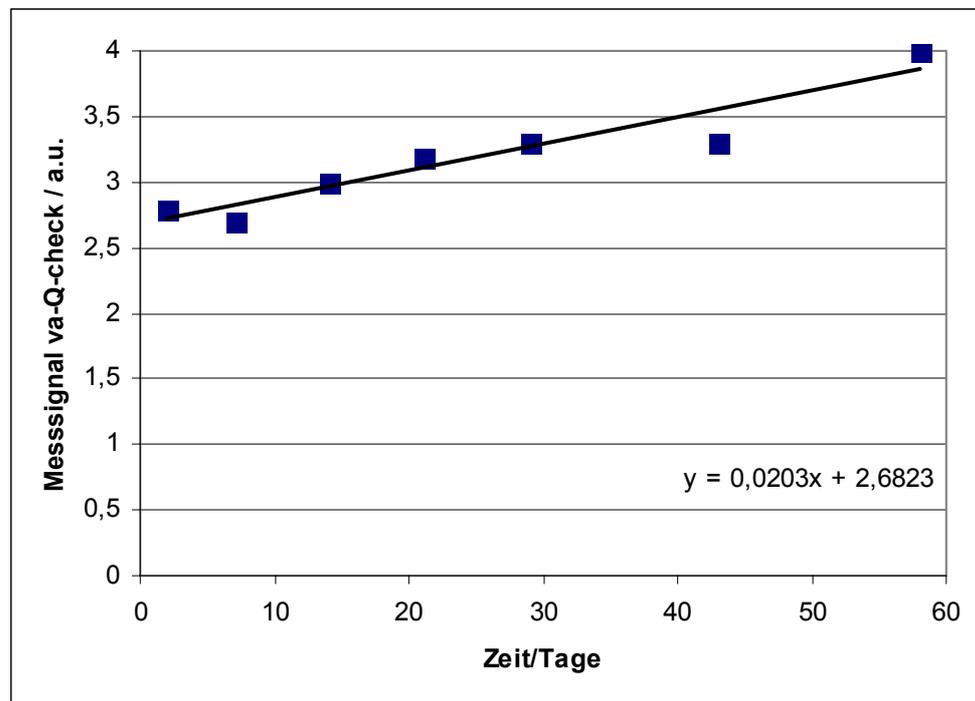


Abb.5: Anstieg des Messsignals va-Q-check mit der Zeit; Probe: 10 mm Paneel mit speziellem Füllmaterial und Folie Typ A