

# 1 Einleitung

## 1.1 Schaumstoffe

Der weltweit steigende Energieverbrauch und die Suche nach möglichen Einsparungspotentialen sind wesentlicher Antrieb für weite Bereiche der Forschung. Ein großes Potential liegt dabei auf dem Gebiet der Wärmeisolation. Moderne Schaumstoffe aus Polyurethan oder Polystyrol und Melaminharzen decken den Großteil des weltweiten Wärmeisolationmarktes ab.

In Deutschland werden pro Jahr ca. 35 Millionen m<sup>3</sup> Dämmstoffe verarbeitet [1,2]. So wird von staatlicher Seite die Nachrüstung von alten Bauten mit neuen Isoliermaterialien gefördert. Seit dem Start eines Förderprogramms der Bundesregierung im Jahre 2001 mit Mitteln aus dem Bundeshaushalt in Höhe von insgesamt 1,42 Milliarden Euro wurde ein Darlehensvolumen von rund 5,6 Milliarden Euro im Zins verbilligt und Maßnahmen zur energetischen Gebäudesanierung gefördert. Seit dem Programmstart bis März 2005 wurden von der KfW-Förderbank insgesamt rund 75.500 Darlehen mit einem Volumen von 4,2 Milliarden Euro zugesagt und Maßnahmen von rund 223.000 Wohnungen gefördert. Der Ausstoß von CO<sub>2</sub> sinkt damit alleine durch dieses Programm im Jahre 2005 und in jedem Folgejahr um rund 1 Million Tonnen.

Diese Zahlen zeigen, von welcher Bedeutung Schaumstoffe sind und wie groß das Interesse an einer weiteren Verbesserung dieser ist. Jedoch scheinen die Verbesserungsmöglichkeiten der heute angewandten Produktionsverfahren nach jahrzehntelanger Forschung nahezu ausgereizt zu sein. Eine signifikante Erhöhung der Isolationseigenschaften ist nach allgemeiner Ansicht von Forschung und Industrie am ehesten durch eine drastische Reduzierung der Zellgröße zu erreichen [3]. Angestrebt werden Schäume, bei denen der seit 1909 bekannte KNUDSEN-Effekt wirksam wird. Dieser sagt vorher, dass bei genügend kleinen Blasen die Wärmeleitung über die Blasen zusammenbricht und das Schaumaterial nur noch über die Stege und Lamellen leitet. Dabei wird das Verhältnis der mittleren freien Weglänge  $\lambda$  der Gasmoleküle in den Blasen zum Durchmesser  $d$  der Blasen betrachtet. Ist das Verhältnis von  $\lambda / d \geq 0.5$ , so findet die Bewegung der Gasmoleküle nur noch ungerichtet statt [4]. Es kann sich keine Gaskonvektion aufgrund unterschiedlich warmer Zellwände aufbauen.

Bei einer Temperatur von 25 °C und Atmosphärendruck findet man beispielsweise für Kohlendioxid eine mittlere freie Weglänge von 55 nm [5] und für Luft einen gemittelten Wert

von 65 nm [4]. Da in heutigen Schaumstoffen ein wesentlicher Teil der Wärmeleitung über diese Konvektion stattfindet und dieser Anteil bei Schäumen mit Poren im Nanometerbereich wegfällt, besitzen Nanoschäume hervorragende Isolationseigenschaften.

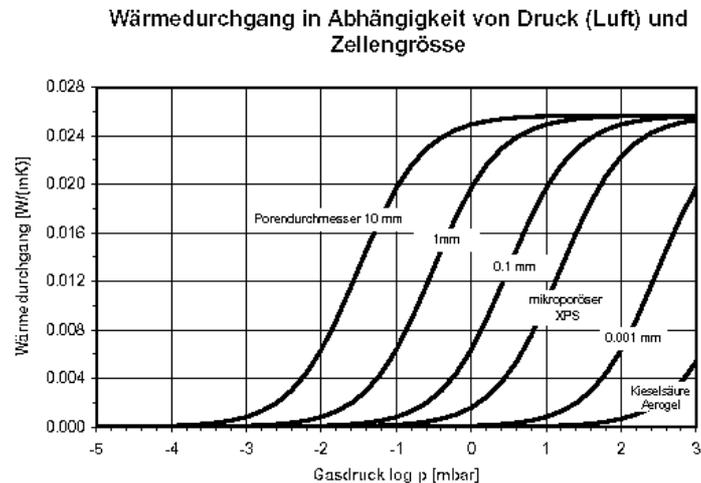


Abbildung 1-1: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Luft in Schaumblasen als Funktion von Gasdruck und Porendurchmesser [6]

## 1.2 Schäume in Naturwissenschaft und Technik

Ein Schaum ist im Allgemeinen definiert als eine Dispersion von Gasblasen in einer Flüssigkeit. Dabei liegt der Gasanteil zwischen 50-97 Volumen-%. Bei einem Gasanteil von mehr als 75% lassen sich diese nicht mehr als dichteste Kugelpackung anordnen. Die Blasen stoßen aneinander und deformieren sich zu einem Polyederschaum. Die Entstehung der Gasblasen lässt sich in drei Kategorien unterteilen:

1. Das Gas wird in eine Flüssigkeit eingerührt oder durch Düsen in dieser dispergiert. Diese Methoden benötigen relativ viel Energie und führen zu sehr groben, polydispersen Blasen. Sie werden nicht für die Herstellung von Isolationsschäumen eingesetzt. Durch Unterrühren von Luft wird beispielsweise im Haushalt Eischnee oder Sahne geschlagen. Industriell werden diese Verfahren unter anderem beim Papier-Recycling angewandt, um Verschmutzungen aus wässriger Zellulose mit Schaum auszutreiben.

2. Ausgangspunkt der zweiten Kategorie ist eine Emulsion. Diese wird ausgehärtet und die emulgierte Komponente anschließend entfernt. Es bleiben Hohlräume in der polymerisierten Matrix zurück. Dieses Verfahren gehört somit nicht zu den

Schäumvorgängen im engeren Sinne, führt aber zu vergleichbaren Materialien. Die Zahl und Größe der Emulsionströpfchen bestimmt dabei direkt die Eigenschaften des späteren Schaums. Problematisch ist bei diesem Verfahren die inhomogene Größenverteilung der Emulsionströpfchen und infolge dessen auch die der späteren Schaumblasen, sowie die untere Grenze der Tröpfchengröße auf den  $\mu\text{m}$ -Bereich. Dies führt zu Schäumen mit großen Blasen und inhomogener Größenverteilung. Hinzu kommt, dass die Emulsionen nicht stabil sind und mit der Zeit koagulieren. Eine Variante ist das Sol-Gel-Verfahren, bei dem anstatt Emulsionen Netzwerkstrukturen in der Größenordnung von wenigen Nanometern fixiert werden. Das Resultat sind Schäume mit sehr kleinen Hohlraumdimensionen, zum Beispiel die sogenannten Aerogele [7-11]. Nachteil des Sol-Gel-Verfahrens sind die vergleichsweise hohen Kosten, weshalb Aerogele bislang nur in Spezialgebieten, wie beispielsweise der Weltraumforschung, eingesetzt werden [12].

3. In der dritten Kategorie werden Gasblasen durch Keimbildungsprozesse erzeugt. Findet die Keimbildung ohne irgendwelche Fremdpartikel in einer homogenen Phase aufgrund von Dichtefluktuationen statt, so spricht man von homogener Keimbildung. Wenn Oberflächen beispielsweise durch dispergierte Partikel als Keimbildungshilfe eingesetzt werden, spricht man von heterogener Keimbildung. Weiterhin kann man zwischen Keimbildung in Einkomponentensystemen und Keimbildung in Mehrkomponentensystemen unterscheiden. Im ersten Fall betrachtet man eine reine Flüssigkeit, die durch Temperaturerhöhung oder Druckabsenkung in den gasförmigen Zustand übergeht. In der Schaumherstellung wird dies angewandt, wenn Emulsionen eines verflüssigten Treibgases durch Temperaturerhöhung oder Druckabsenkung aufgeschäumt werden. Im zweiten Fall, der Blasenbildung aus Mehrkomponentensystemen, handelt es sich um das Ausgasen eines in einer Flüssigkeit monomer gelösten Gases. Das Treibgas kann dabei entweder durch Druck in die Flüssigkeit eingelöst oder durch eine chemische Reaktion gebildet werden. Durch Druckabsenkung oder Temperaturerhöhung wird die Flüssigkeit mit Treibgas übersättigt und der statistische Prozess der Keimbildung beginnt. Oft werden auch Kombinationen aus diesen beiden Varianten eingesetzt, bei denen sowohl eine Dispersion von Treibmitteltröpfchen als auch monomer gelöstes Treibgas vorhanden sind.

Für die industrielle Anwendung sind Blasenbildungsprozesse in vielerlei Hinsicht von Interesse. Es gibt sowohl Anwendungen bei denen Blasenbildung unerwünscht ist oder Gefahren birgt, wie zum Beispiel im Falle von Siedeverzügen oder Kavitation, als auch Anwendungen, bei denen eine möglichst gute Steuerung von Blasenbildung erwünscht ist, wie zum Beispiel für die Erzeugung von Schaumstoffen. Im Falle der Schaumstoffherstellung