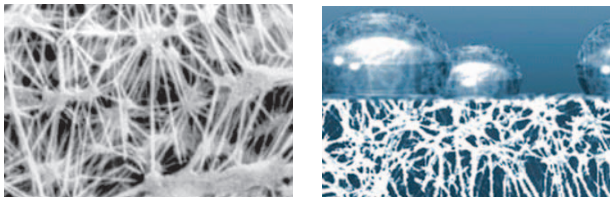


Prima Klima mit Membranen

Entsprechend dem Motto „Es gibt kein schlechtes Wetter, nur falsche Kleidung“ bieten viele Hersteller atmungsaktive und allen Wetterwidrigkeiten trotztende Bekleidung an, in denen sog. Klimamembranen die natürliche Temperaturregelung des menschlichen Körpers unterstützen.

Wind, Kälte und hohe Luftfeuchtigkeit beschleunigen den Wärmeverlust des Körpers. Bekleidung sollte also nicht nur schön sein, sondern vor allem den Wärmetransport durch Verdampfung, Leitung und Konvektion kontrollieren. Nur dadurch lässt sich erreichen, dass das Mikroklima, also die dünne Luftschicht zwischen Haut und Bekleidung, geschützt wird und sich produzierte und abgegebene Wärme die Waage halten. Um bei körperlicher Anstrengung einen Hitzestau unter der Kleidung zu vermeiden, muss zudem die beim Schwitzen entstandene Feuchtigkeit von der Haut weg transportiert werden. Zu diesem Zweck wurden sog. Klimamembranen entwickelt, ultradünne Folien, die je nach Anforderung



Die Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop zeigt die heckenähnliche Struktur einer ePTFE-Folie (links). Im Größenvergleich: Wassertropfen und Mikroporen der Membran (rechts) (Quellen: Leslie Eibest, Duke Univ.; Gore-Tex®)¹⁾

als zwei-, drei- oder mehrlagige Lamine in Bekleidung und Schuhe zwischen Oberstoff und Futter integriert werden. Auf dem Markt haben sich in den letzten Jahren besonders zwei Arten von atmungsaktiven Membranen etabliert, zum einen die mikroporösen Polytetrafluorethylen-Membranen und zum anderen die geschlossenen hydrophilen Systeme auf Polyester-Basis.

Mikroporöse Membranen

Im Allgemeinen bestehen die mikroporösen Membranen aus Polytetrafluorethylen (PTFE). Dieses Material, besser bekannt unter seinem Handelsnamen Teflon, ist ein thermoplastischer Kunststoff von milchig weißer Farbe, dessen Oberfläche wasserabweisend und glatt ist und sich wachstartig anfühlt. PTFE ist ein vollständig fluoriertes Polymer, das aus Chloroform durch par-



Kleidungsstücke aus funktionellen Textilien müssen sich erst im Regendauerst bewähren, bevor sie auf den Markt kommen. (Foto: W. L. Gore)

tielle Fluoridierung hergestellt wird. Mikroskopisch betrachtet besteht PTFE aus länglichen Knötchen, die über viele parallel laufende Molekülketten (Fibrillen) miteinander verbunden sind.

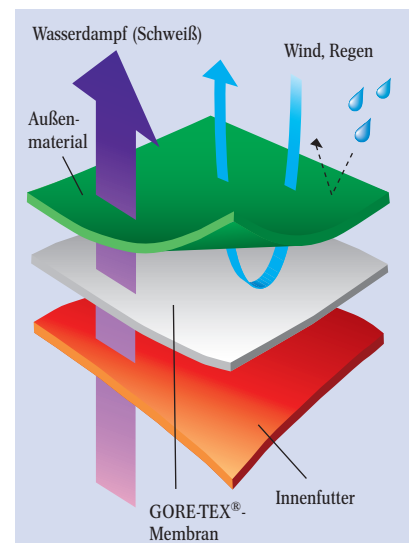
Ende der 1960er-Jahre entdeckte der Amerikaner Bob Gore eine ganz besondere Form der Verarbeitung von PTFE: Bei mechanischer und schneller Expansion des Polymers entsteht eine sehr feste, mikroporöse Membran, die als ePTFE bezeichnet wird (das Kürzel „e“ steht für engl. expanded). Die mikroporöse Faserstruktur kann je nach Art der Streckung monoaxial oder multidirektional sein. Da das PTFE nach der Expansion amorph und sehr brüchig ist, muss es bei einer exakt definierten Temperatur gesintert werden. Dadurch werden die einzelnen Körner über Grenzflächenreaktionen miteinander verschweißt, und die gereckte Membran erhält so ihre Festigkeit und Elastizität.

Entscheidend für den Einsatz als Klimamembran ist das strapazierfähige und stark hydrophobe Verhalten von PTFE, das an seiner Oberfläche – jeder kennt teflonbeschichtete Pfannen – so gut wie nichts haften lässt. Verantwortlich dafür ist die sehr kleine Oberflächenspannung, die bei PTFE mit rund 20 mN/m gut dreimal kleiner ist als die von Wasser: Dieses kann die PTFE-Oberfläche nicht benetzen und zieht sich zu Tropfen zusammen, die vom Material abperlen.

Eine Aufnahme mit einem Rasterelektronenmikroskop (Abb.

links) zeigt die heckenähnliche Struktur der ePTFE-Membran mit seinen zahlreichen Mikroporen, die dafür sorgt, dass die Membran luft- und damit windundurchlässig ist. Im Fall von Gore-Tex® besitzt die Membran bei einer Dicke von etwa 20 Mikrometern auf einem Quadratzentimeter rund 1,4 Milliarden Poren. Diese machen rund 80 % der Membranoberfläche aus. Die Poren sind im Mittel etwa 0,2 Mikrometer groß und damit etwa 700-mal größer als ein Wassermolekül mit einem Durchmesser von wenigen Angström und 20000-mal kleiner als ein Wassertropfen mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern. Die Moleküle des Wasserdampfes, der durch das Schwitzen entsteht, sind also klein genug, um durch die Poren und damit durch die Membran diffundieren zu können, während Wassertropfen aufgrund ihrer Größe nicht in die hydrophobe Membran eindringen.

Verantwortlich für den Diffusionsprozess der Wassermoleküle durch die Membran ist das Dampfdruck- bzw. Temperaturgefälle, das zwischen der Innen- und Außenseite der Membran herrscht: Je größer dieses Gefälle (in der Regel sollten es etwa 15 Grad Celsius sein), desto besser entweicht der Wasserdampf durch die Poren. Begünstigt wird die Diffusion der Wassermoleküle durch die Größe der Poren und die Kürze des Diffusionsweges. Durch Drei-Lagen-Lamine (Abb. unten) von Gore-Tex® können nach Herstellerangaben im günstigsten Fall mehr als 830 Gramm Feuchtigkeit pro Quadratmeter und Stunde durch die Membran entweichen.



Aufbau eines Gore-Tex®-Laminates, das wasserfest, winddicht und atmungsaktiv ist. (Quelle: Gore-Tex®).

¹⁾ GORE-TEX®, GORE-TEX® GUARANTEED TO KEEP YOU DRY®, GORE® und Bildzeichen sind eingetragene Marken von W. L. Gore & Associates.

Um die Funktionsfähigkeit der Klimamembran zu erhöhen und das Verstopfen der wasserdampfdurchlässigen Mikroporen zu verhindern, wird im Fall von Gore-Tex® in die stark wasserabweisende ePTFE-Membran zusätzlich eine ölabweisende Substanz eingearbeitet, die eine physikalische Barriere für ölhaltige Produkte wie Kosmetika und Insektensprays darstellt.

Polyester ohne Poren

Die geschlossenen und porenlosen, etwa 10 Mikrometer dünnen Kompaktmembranen bestehen aus zahlreichen, unregelmäßig angeordneten Molekülketten. Da Teile dieser Ketten aus unterschiedlichen Polymertypen zusammengesetzt sind, bezeichnet man diesen Typ auch als Copolymer. Im Fall von Sympatex® bestehen die Klimamembranen zu rund 70 % aus hydrophobem Polyester, das dem Polymer seine Festigkeit verleiht, und zu rund 30 % aus hydrophilem Polyether, das die Fähigkeit besitzt, Wassermoleküle anzulagern (Abb. rechts).

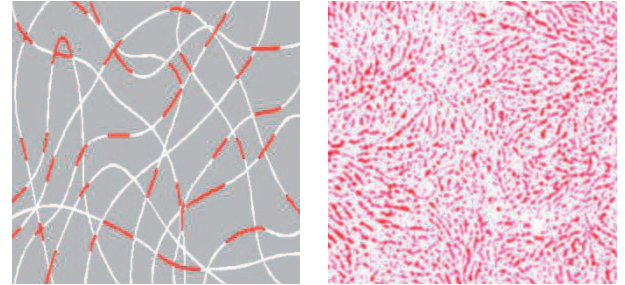
Die Dichtheit dieser Membranart gegenüber Wasser (und auch Wind) resultiert aus der geschlossenen und porenlosen Struktur der größtenteils hydrophoben Oberfläche. Im Inneren der Polymerstruktur dagegen bilden die unregelmäßig angeordneten Molekülketten kleine Öffnungen – so genannte molekulare Honigwaben. Diese sind zwar um ein Vielfaches kleiner als die Mikroporen der gereckten PTFE-Membranen, jedoch immer noch

groß genug, um die Moleküle des Wasserdampfes auf physikalisch-chemischem Wege entlang der Molekülketten von innen nach außen zu transportieren. Verantwortlich dafür sind die funktionellen Gruppen der hydrophilen Polyether-Kettenbausteinen, die eine erhöhte negative Ladungsdichte aufweisen. An diese lagern sich die polarisierten Wassermoleküle an. Treibende Kraft für den Migrationsprozess der Moleküle durch die Membran ist wiederum das Temperatur- bzw. Wasserdampfkonzentrationsgefälle zwischen der Innen- (feucht und warm) und Außenseite (kälter und trocken) der Bekleidung. Dazu kommt die Bewegung des Körpers in der Kleidung selbst, die im Inneren der Membran für eine mikroskopische Annäherung bzw. ein Auseinanderdriften der miteinander verwobenen Polymermolekülketten und damit der funktionellen Gruppen sorgt. Als Folge dessen kommt es zu einem Austausch der an diesen Gruppen angelagerten Wassermoleküle bei der Diffusion durch die Membran.²⁾ Durch zwei-Lagen-Sympatex®-Membranen können laut Hersteller mehr als 400 Gramm Feuchtigkeit pro Stunde und Quadratmeter Stoff entweichen.

Begrenzte Atmungsaktivität

Auch die besten Klimamembranen stoßen einmal an ihre Grenzen: Bei subtropischen Bedingungen, wenn die Luftfeuchtigkeit hoch ist und Körper- und Außentemperatur vergleichbar sind, funktioniert die Membran nur eingeschränkt. Er-

schwerend kommt hinzu, dass der menschliche Körper schon im Ruhezustand bis zu 0,16 Liter Wasser pro Stunde ausschwitzt und dieser Wert bei körperlichen Anstrengungen wie Wandern oder Radfahren auf bis zu zwei Liter anschwellen kann. Vor allem an Stellen, an denen man besonders stark schwitzt, etwa die



Aufbau der nichtporösen, geschlossenen Polymermembran (links): hydrophobes Polyester (weiß) und hydrophiles Polyether (rot). Die AFM-Aufnahme rechts zeigt einen $1 \times 1 \mu\text{m}$ großen Ausschnitt der Membran. (Quelle: Sympatex®).

Achseln, wird dann die Leistungsgrenze der besten atmungsaktiven – oder richtiger wasserdampfdurchlässigen – Klimamembranen überschritten und der überschüssige Wasserdampf kondensiert auf der im Vergleich zur Körpertemperatur immer etwas kühleren Innenseite der Klimamembran. Doch atmungsaktive Bekleidung lässt sich noch optimieren: So werden bei einigen Jackenmodellen unter den Achseln zusätzliche Öffnungen angebracht. Die sorgen bei Bewegung des Körpers innerhalb der Bekleidung für mehr Konvektion und damit für einen zusätzlichen Feuchtigkeits- und Wärmetransport.

KATJA BÄMMEL

2) Für Informationen danke ich Dr. Zsolt Harmati, Permeationslabor Empa (Materials Science and Technology), St. Gallen

Dr. Katja Bammel,
science & more
redaktionsbüro,
E-Mail: kb@science-
and-more.de