

## Die Wasserdichtigkeit von Textilien aus physikalischer Sicht

Wilfried Suhr

Universität Münster, Institut für Didaktik der Physik,  
Wilhelm-Klemm-Straße 10, 48149 Münster  
wilfried.suhr@uni-muenster.de

### Kurzfassung

Gibt der Hersteller einer Regenjacke als Maß für deren Wasserdichtigkeit beispielsweise 4000mm Wassersäule an, so steht hinter dieser Druckangabe ein rein empirisch ermittelter Wasserdurchgangswiderstand des Gewebes. Demgegenüber wird in diesem Artikel ein analytischer Zugang vorgestellt, der anhand eines stark vereinfachenden Modells erschließt, von welchen physikalischen Größen dieser Grenzwert maßgeblich abhängt. In welchem Verhältnis die Prognosen dieses Modells zu Messungen der Wasserdruckbeständigkeit von realen Geweben stehen, wird im Anschluss diskutiert.

### 1. Einleitung

Einfache Textilgewebe bestehen aus sich gegenseitig unter- und überlaufenden Längs- und Querfäden, die man als Kett- und Schussfäden bezeichnet. Der Abstand zwischen benachbarten Fäden bestimmt dabei die Maschenweite, wobei je nach Dicke der Fäden eine entsprechend große Maschenöffnung verbleibt. Trotz der darauf beruhenden Luftdurchlässigkeit können Gewebe dem Durchtritt von Wasser einen gewissen Widerstand entgegensetzen, der sich durch eine Imprägnierung zumeist noch deutlich erhöhen lässt.

Als Maß für die Wasserdichtigkeit von Textilien geben die Hersteller den maximalen Wasserdruck an, der einseitig auf einer 100 cm<sup>2</sup> großen Gewebeprobe lasten darf, ohne dass dabei mehr als drei Tropfen hindurch dringen. Dieser rein empirische Messwert eignet sich zwar als Beurteilungs- und Kaufkriterium, doch bietet er keinerlei Aufschluss darüber, welche physikalischen Zusammenhänge für ihn bestimmend sind. Um derartige Einsichten zu gewinnen, würde man einen analytischen Zugang benötigen, auf dessen Grundlage sich die Wasserdruckbeständigkeit von Textilien vorhersagen lässt. Die Suche nach einer dafür bereits aufgestellten physikalischen Theorie blieb jedoch erfolglos, vermutlich weil die Theoriebildung aufgrund der Komplexität und Vielfalt textiler Gewebe recht verzwickelt ist. Ein umfassendes Modell müsste nämlich die Art der Bindung des Gewebes, das Fasermaterial, die Struktur der Fasern und alle oberflächenphysikalischen Effekte einbeziehen, die bei der Berührung mit Wasser eine Rolle spielen.

Weil sich eine fachdidaktische Erschließung dieser Thematik auf die elementaren Prinzipien beschränken kann, wird hier auf solche Vollständigkeit zugunsten der Anschaulichkeit verzichtet. Auf der

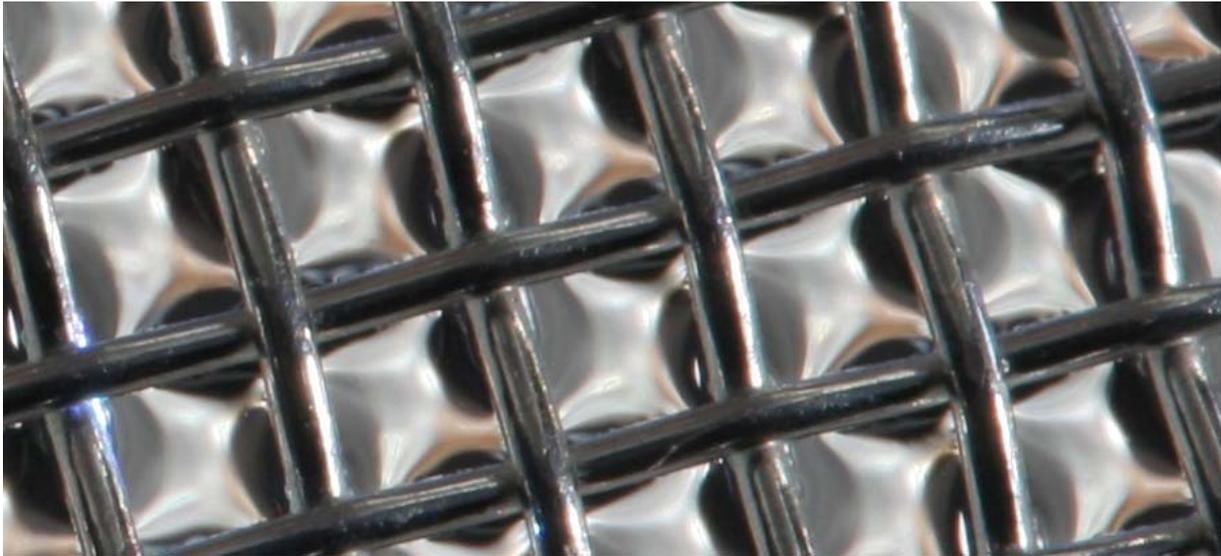
Basis damit einhergehender Idealisierungen wurde ein vereinfachtes Modell textiler Gewebe geschaffen, an dem im Folgenden gezeigt wird, worauf die Wasserdruckbeständigkeit von Textilien maßgeblich beruht.



Abb.1: Wegen der relativ weiten Maschen eines Teesiebs ist seine Wasserdruckbeständigkeit verblüffend.

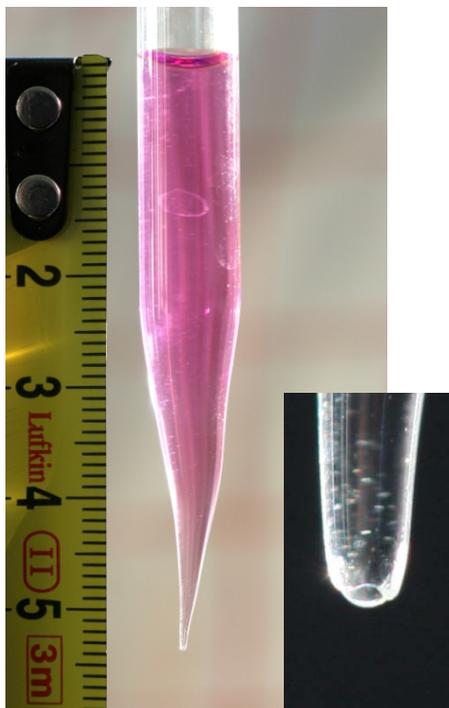
### 2. Erkundung analoger Modelle

Empfehlenswert ist ein qualitativer Einstieg, bei dem man direkt in Augenschein nimmt, wie sich Wasser verhält, das von einem Gewebe getragen wird. Um dabei beurteilen zu können, was an den freien Flächen der Flüssigkeit in den Maschenöffnungen geschieht, darf die Maschenweite nicht zu eng sein. Gut geeignet ist das für haushaltsübliche Teesiebe verwendete Drahtgewebe, weil die Oberfläche seiner „Draht-Fasern“ glatt und für Wasser undurchdringlich ist, was zur Vereinfachung der Verhältnisse beiträgt. Das Wasser bringt man vorsichtig mit einem Löffel auf, weil es bei einem zu großen Impulsübertrag das Gewebe durchdringen würde. Schichthöhen von über einem Zentimeter sind durchaus erreichbar (siehe Abbildung 1), insbesondere dann, wenn man die Benetzbarkeit des Gewebes



**Abb.2:** Makroskopische Aufnahme von freien Wasserflächen, die sich in den Maschenöffnungen eines Teesiebs vorwölben.

vermindert, indem man es vorher einfettet oder mit Imprägnierspray besprüht. Mit einer Lupe erkennt man nun in den Maschenöffnungen, dass sich darin die freien Flächen des Wassers vorwölben, während sie an den Maschenrändern anhaften (siehe Abbildung 2). Diese erste Betrachtung lässt bereits vermuten, dass für die Wasserdichtigkeit sowohl Kohäsions- als auch Adhäsionskräfte von Bedeutung sind, weil Erstere dem Wasser inneren Zusammenhalt verleihen und Letztere sein Anhaften am Metallrahmen ermöglichen.



**Abb.3:** Demonstration der Wasserdruckbeständigkeit einer einzelnen „Masche“, die von der engen Öffnung eines Glasrohrs verkörpert wird. Ausschnittsvergrößerung: Der „Verschluss“ am Rohrende ist eine konvex gewölbte Wasseroberfläche.

Welche Wasserdruckbeständigkeit eine einzelne „Masche“ aufweist, lässt sich mit Hilfe eines eigens dafür präparierten Glasrohrs demonstrieren. Als Ausgangsmaterial verwendet man ein Glasrohr von etwa 8 mm Durchmesser und 20 cm Länge. In der Flamme eines Bunsenbrenners wird es auf halber Länge so stark erhitzt, dass es sich dort zu einer sehr engen Kapillare ziehen lässt, die man nach dem Abkühlen in der Mitte trennt. Man erhält dadurch zwei sich stark verjüngende Rohre. Füllt man eines mit Wasser und hält es mit dem engen Ende nach unten, dann bleiben, nach anfänglichem Auslaufen, noch einige Zentimeter Wasser im Rohr stehen (siehe Abbildung 3). Mit einer Lupe kann man dann erkennen, dass eine vorgewölbte Wasseroberfläche das enge Rohrende verschließt. Um dem möglichen Einwand zu begegnen, dass es sich hier doch vielleicht um Kapillarwirkung handelt, taucht man das enge Rohrende in eine offene Wasseroberfläche. Daraufhin sinkt der Flüssigkeitsspiegel im Rohr bis auf wenige Millimeter ab, womit gezeigt wurde, dass sich nur diese verbleibende Höhendifferenz der Kapillarwirkung verdankt.

In beiden Versuchen ist zu beobachten, dass nichts weiter als eine konvex gewölbte Wasseroberfläche dem Durchtritt des Wassers durch die freien Öffnungen entgegen steht. Wodurch sie sich wie eine Art Verschluss auswirkt, bleibt nun zu klären. Gut veranschaulichen lässt sich diese Verschlusswirkung am Beispiel einer Seifenhaut, die einen „Pustering“ für Seifenblasen überspannt. Die Seifenhaut ist eben, wenn auf beiden Seiten der selbe Druck herrscht. Für Luft, die man auf einer Seite dagegen pustet, wirkt sie als „Verschluss“, wobei sie sich allerdings unter der Last des einseitig erhöhten Drucks wölbt. Für eine Analyse dieser Situation betrachtet man den Fall des statischen Gleichgewichts. Es stellt sich ein, wenn die durch das Pusten zwischen der konvexen und konkaven Seite der Seifenhaut auftretende

Druckdifferenz kompensiert wird. Da außer der Seifenhaut nichts vorhanden ist, was für diese Kompensation sorgen könnte, lässt dies den Schluss zu, dass ihre gekrümmte Oberfläche den entsprechenden Druck auszuüben vermag. Durch Variieren des Pustedrucks kann man leicht herausfinden, dass die einem höheren Pustedruck standhaltende Krümmung stärker sein muss. Energetisch betrachtet, lässt sich dieser Druck auf das Anstreben eines Zustands zurückführen, bei dem die Oberflächenenergie der Seifenhaut minimal wird.

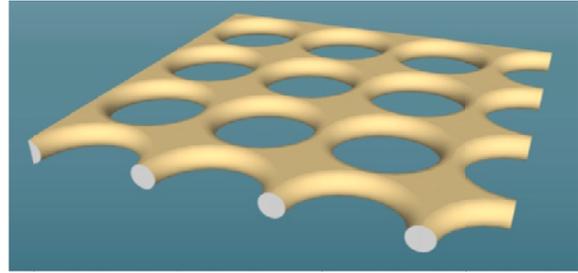
Im Unterschied zu Seifenhäuten, die beidseitig zur Luft angrenzen, grenzt eine als „Wasserhaut“ anzusehende freie Wasseroberfläche nur einseitig an Luft. Dennoch sind die eben erläuterten Argumente darauf übertragbar. Dementsprechend wird der Inhalt eines Wassertropfens von seiner gekrümmten Oberfläche gepresst. Der von einer sphärischen Wasseroberfläche verursachte Krümmungsdruck  $p$  wird quantitativ durch die Young-Laplace-Gleichung  $p = 2\sigma/r$  beschrieben [1]. Dabei ist  $\sigma$  die Oberflächenspannung des Wassers und  $r$  der Krümmungsradius.

Diese Gleichung bietet sich nun zur quantitativen Auswertung des oben angeführten Versuchs an, bei dem Wasser nur bis zu einem Füllstand  $h$  aus einem stark verjüngten Rohr ausfließt. Weil das Rohrende einen kreisförmigen Querschnitt hat, hat die dort als Verschluss wirkende vorgewölbte Wasserfläche nämlich etwa die Form einer Kugelkalotte, mit dem Kugelradius  $r$ . Ein statisches Gleichgewicht stellt sich daher ein, wenn der hydrostatische Druck der Wassersäule  $p = \rho gh$  dem Krümmungsdruck des Tropfens gleich ist.

### 3. Wasserdruckbeständigkeit im Modell

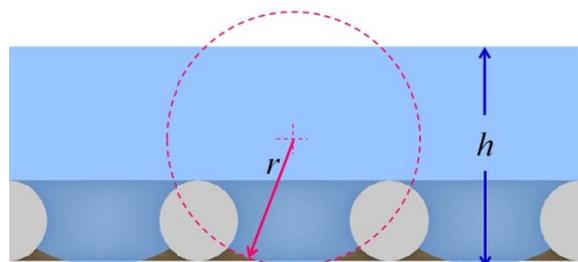
Welche Form die Wasseroberfläche annimmt, die sich in einer Masche vorwölbt, hängt nicht allein von dem darauf lastenden Druck, sondern auch von der Form ihres Randes ab. Dies lässt sich am bereits angeführten Beispiel der Maschen eines Teesiebes beobachten, bei denen der Rand etwa so, wie bei einem leicht gewellten Blatt Papier verläuft.

Da sich eine vorgewölbte Wasserfläche gegenüber ihrem Rand etwas absenkt, herrscht dort ein etwas größerer hydrostatischer Druck als am Rand. Geht man aber davon aus, dass die mittlere Höhe des vom Gewebe getragenen Wassers so groß ist, dass diese Abweichungen demgegenüber vernachlässigbar klein sind, hat jedes Flächenelement etwa den selben Krümmungsdruck aufzubringen. Maßgeblich dafür ist die sogenannte „mittlere Krümmung“, die sich für jedes Flächenelement durch zwei orthogonal zueinander verlaufende Hauptkrümmungsradien  $r_1$  und  $r_2$  anhand des Ausdrucks  $1/r_1 + 1/r_2$  berechnen lässt. Für diesen allgemeineren Fall, der auch asphärisch gekrümmte Wasserflächen einbezieht, lautet die Young – Laplace – Gleichung  $p = \sigma/(1/r_1 + 1/r_2)$ .



**Abb.4:** Ausschnitt von einem auf Idealisierungen beruhenden Modellgewebe.

Stattdessen beschränkt sich das hier vorgestellte Modell auf sphärisch gekrümmte Wasserflächen, damit die oben erwähnte, einfachere Young-Laplace-Gleichung verwendet werden kann. Ermöglicht wird dies durch die Idealisierung, dass die Maschenöffnungen wie die innere Hälfte eines Kreisrings geformt sind. Eine sich darin vorwölbende freie Wasserfläche ist somit kreisförmig umrandet und hat damit die Form einer Kugelkalotte (mit dem Kugelradius  $r$ ). Fügt man in einer Ebene eine Vielzahl solcher Kreisringhälften in einem quadratischen Raster zusammen, ergibt sich das Modellgewebe (siehe Abbildungen 4 und 5). Die dabei zwischen den Ringen verbleibenden astroidförmigen Öffnungen, werden mit dem Material, aus dem die Fasern bestehen, verfüllt. Idealisierend wird dafür ein Vollmaterial verwendet. Gegenüber realen Fasern, die oftmals aus verdrehten Strängen bestehen, hat dies den Vorteil, dass sie sich nicht durch Kapillarwirkung mit Wasser vollsaugen können. Der Weg des Wassers durch das Modellgewebe, das nun einer regelmäßig durchlöchernten Scheibe Schweizer Käse gleicht, bleibt somit auf die Maschenöffnungen beschränkt.



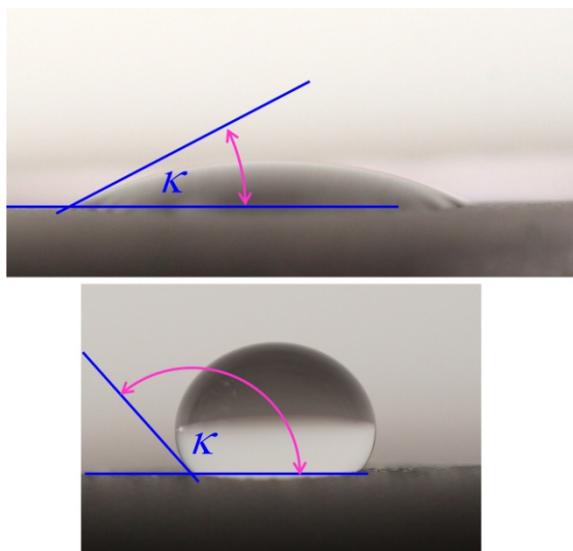
**Abb.5:** Querschnitt durch das Modellgewebe, das eine Wasserschicht der Höhe  $h$  trägt.

Bereits diese Geometrie gibt vor, welche maximale Wasserdruckbeständigkeit das Modellgewebe aufweist. Zu erreichen ist sie beim größtmöglichen Krümmungsdruck der freien Wasserflächen in den Maschenöffnungen. Da der Krümmungsdruck zum Krümmungsradius  $r$  umgekehrt proportional ist, tritt sein Maximum bei einer Konstellation auf, bei der  $r$  minimal ist. Dies ist der Fall, wenn sich jeweils halbkugelförmige Wassertropfen durch den minimalen Durchmesser der Maschenöffnungen hindurch wölben. Dementsprechend wäre die Größe dieses Durchmessers  $2r_{min}$  woraus sich eine maximale

Beständigkeit gegenüber einer Wassersäule von der Höhe  $h_{max} = 2\sigma/(r_{min}\rho g)$  berechnet. Dass diese Konstellation aber nur theoretisch denkbar ist, zeigt eine zweite Überlegung. Man kann sich nämlich klar machen, dass in dieser Konstellation der Kontaktwinkel des Tropfens zur Oberfläche des Gewebes  $180^\circ$  betragen muss. Das Material des Gewebes müsste in diesem Fall also noch weniger benetzbar sein, als superhydrophobe Materialien.

#### 4. Einfluss der Benetzbarkeit

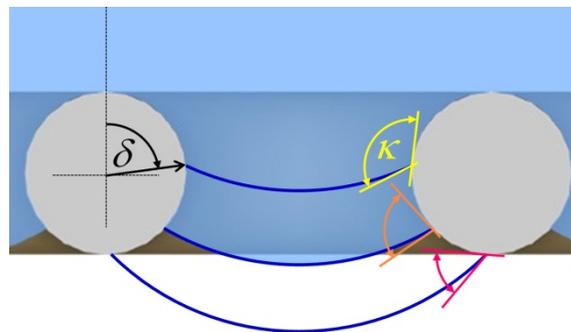
Aus einfachem Textilgewebe bestehende Regenschutzbekleidung muss imprägniert werden, damit sie ihren Zweck erfüllen kann. Zumeist werden bei der Imprägnierung die Gewebefasern von einer dünnen Schicht überzogen, die weniger gut benetzbar ist, als die unbehandelte Gewebeoberfläche. Wie benetzbar eine Festkörperoberfläche durch einen darauf aufsitzenden Tropfen Wasser ist, zeigt der sogenannte Kontaktwinkel  $\kappa$ . Oberflächen gelten als hydrophil, wenn  $\kappa < 90^\circ$  und als hydrophob, wenn  $\kappa > 90^\circ$  ist. Der in Abbildung 6 gezeigte Vergleich führt vor Augen, dass ein ursprünglich hydrophiles Textilgewebe durch Imprägnierung hydrophob werden kann. Im Folgenden soll es darum gehen, wie sich eine unterschiedliche Benetzbarkeit des Modellgewebes auf dessen Wasserdruckbeständigkeit auswirken würde.



**Abb.6:** Vergleich der Kontaktwinkel von zwei Wassertropfen, die auf dasselbe Gewebe aufgesetzt wurden. Oben: unbehandeltes Gewebe. Unten: Imprägniertes Gewebe.

Für die anzustellenden Überlegungen ist es von Bedeutung, welcher Anteil der Maschenöffnungen des Modellgewebes benetzt wird. Um dafür ein Maß angeben zu können, wird der Benetzungswinkel  $\delta$  eingeführt. Seine Schenkel liegen innerhalb der kreisrunden Schnittfläche einer Gewebefaser (siehe Abbildung 7). Der Scheitelpunkt von  $\delta$  ist mit dem Mittelpunkt der kreisrunden Schnittfläche identisch. Einer seiner Schenkel ist eine Normale zur Gewebe-

ebene. Der andere Schenkel ist ein vom Mittelpunkt ausgehender Zeiger, dessen Spitze zum Rand der Wasserfläche ragt, die sich in der Maschenöffnung hindurch wölbt. Bei einem Benetzungswinkel  $\delta = 0^\circ$  wäre der halbkreisförmige Randwulst einer Maschenöffnung noch völlig unbenetzt. Bei  $\delta = 180^\circ$  wären dagegen die Maschenöffnungen vollständig benetzt.



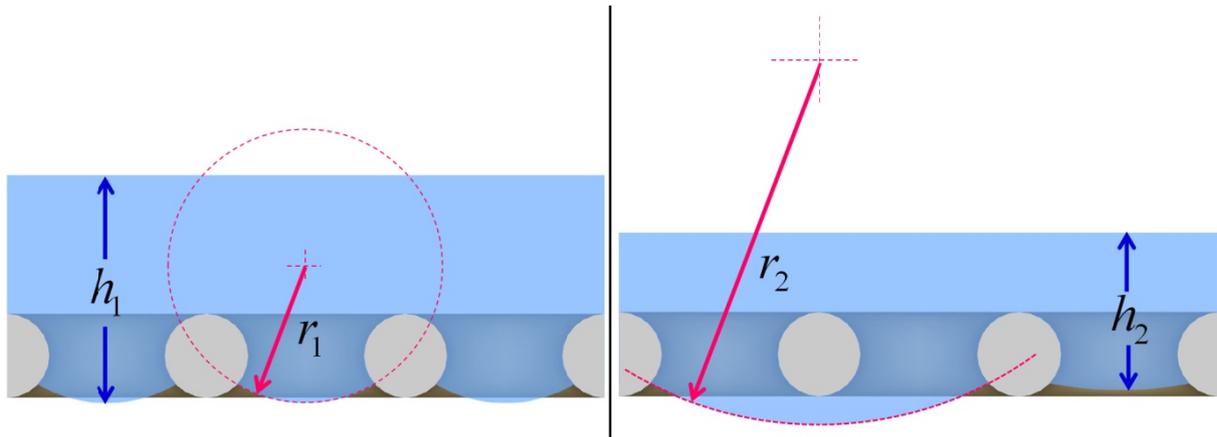
**Abb.7:** Bei konstantem Krümmungsradius der Wasserfläche bestimmt der Kontaktwinkel  $\kappa$  die Größe des Benetzungswinkels  $\delta$ . Somit hängt es von der Benetzungsfähigkeit des Gewebes ab, wie weit das Wasser die Maschen durchdringt.

In einem Gedankenexperiment soll nun die Benetzungsfähigkeit des Modellgewebes variiert werden, das unter einem konstanten hydrostatischen Druck von darauf lastendem Wasser stehen soll. Da diesem Wasserdruck ein gleich großer Krümmungsdruck entgegen stehen muss, bleibt der Krümmungsradius der freien Wasserfläche in den Maschenöffnungen unverändert. Weil sich aber eine Änderung der Benetzungsfähigkeit als entsprechende Änderung des Kontaktwinkels zwischen der Wasserfläche und der Gewebeoberfläche äußert, bedingt dies von der Geometrie her eine Änderung des Benetzungswinkels. Diesen geometrischen Zusammenhang illustriert Abbildung 7, in der sich zeigt, dass  $\delta$  um so kleiner sein muss, je größer  $\kappa$  ist. Darauf, wie weit das Wasser in den Maschen vordringt, hat (bei konstantem Wasserdruck) also der Kontaktwinkel deutlichen Einfluss.

Dies erklärt auch die Wirkung einer Imprägnierung. Da durch sie der Kontaktwinkel deutlich vergrößert wird, kann das Wasser bei gleichem Druck weniger weit durch die Maschen dringen, als bei einem unbehandelten Gewebe. Warum dies allerdings die Wasserdruckbeständigkeit erhöht, soll im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

#### 5. Undichtigkeit

Erhöht man den auf einem Gewebe lastenden Wasserdruck über die maximale Wasserdruckbeständigkeit hinaus, so entstehen Undichtigkeiten. An einzelnen Stellen läuft dann so lange Wasser aus, bis die Wassersäule im Vergleich zum vorherigen Maximalstand auf einen deutlich niedrigeren Stand abgesunken ist. Über diesen neuen Pegel kommt



**Abb.8:** Die Wasserdruckbeständigkeit eines Gewebes vermindert sich, wenn Wasserflächen benachbarter Maschen miteinander verschmelzen, da sich dabei der ursprüngliche Krümmungsradius  $r_1$  (links) auf  $r_2$  (rechts) vergrößert.

man zumeist nicht mehr hinaus, wenn Wasser von oben hinzugefügt wird, weil es gleich wieder durch die selben Stellen des Gewebes abläuft. Wie lässt sich das erklären?

Betrachtet man den Fall, dass das Modellgewebe aus hydrophilem Material besteht, so stellt sich bei entsprechendem Wasserdruck ein Benetzungswinkel von  $\delta = 180^\circ$  ein, noch bevor der maximale Krümmungsdruck erreicht wird. Da nunmehr alle Maschen vollständig benetzt sind, trifft das hindurchgetretene Wasser auf Wasser aus direkt benachbarten Maschenöffnungen. Die Folge ist, dass es zur Verschmelzung dieser Wasserflächen unterhalb des Gewebes kommt. Es bilden sich dabei durchhängende Wasserflächen mit einem größeren Krümmungsradius aus, weshalb dort der Krümmungsdruck dementsprechend sinkt (vgl. Abbildung 8). Diese Einbuße des Druckgleichgewichts führt dazu, dass an diesen Stellen Wasser durch das Gewebe läuft. Es kommt erst wieder zum Stillstand, wenn der hydrostatische Druck, durch Absenken des Wasserstandes, von dem an den undichten Stellen aufzubietenden Krümmungsdruck kompensiert wird. Da aber die verbundenen Tropfen unterhalb des Gewebes verbleiben, bestimmt deren größerer Krümmungsradius die noch vorhandene Wasserdruckbeständigkeit.

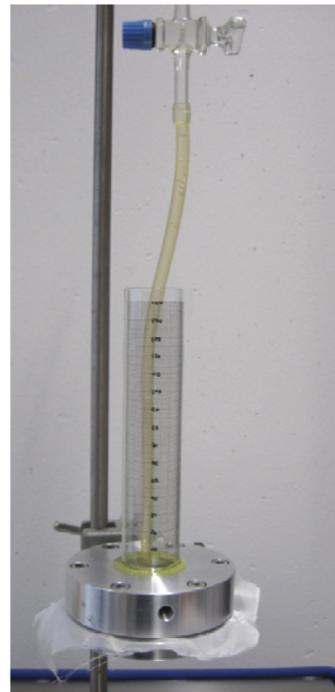
Auch wenn der Benetzungswinkel kleiner als  $180^\circ$  ist, können andere Einwirkungen dazu führen, dass unterhalb des Gewebes benachbarte Wasserflächen miteinander verschmelzen. Diese Erfahrung machen viele Camper, die sich während eines Regenschauers in einem Zelt befinden. Solange man die beregnete Zeltplane nicht von innen berührt, bleibt sie zumeist dicht. Indem man sie allerdings berührt, verbindet man die durch die Maschenöffnungen ragenden Wasserflächen miteinander, wodurch an dieser Stelle eine Undichtigkeit nach dem oben beschriebenen Muster entsteht.

Ausgehend von den bisherigen Argumenten kann man nun überlegen, wie reale Textilgewebe beschaffen sein müssten, um sie möglichst Wasserdruckbe-

ständig zu machen. Die hierfür wohl wichtigste Eigenschaft sind sehr enge Maschenöffnungen, damit darin befindliche freie Wasserflächen möglichst kleine Krümmungsradien haben. Außerdem sollte die Benetzbarkeit der Textilfasern möglichst gering sein, auch um zu vermeiden, dass sie sich durch Kapillarwirkung vollsaugen.

## 6. Tauglichkeit des Modells

Um eine Vorstellung davon zu bekommen, wie gut sich die Wasserdruckbeständigkeit eines realen Textilgewebes mit dem oben beschriebenen Modell vorhersagen lässt, wurden Untersuchungen an unterschiedlichen Textilproben vorgenommen. Um dem



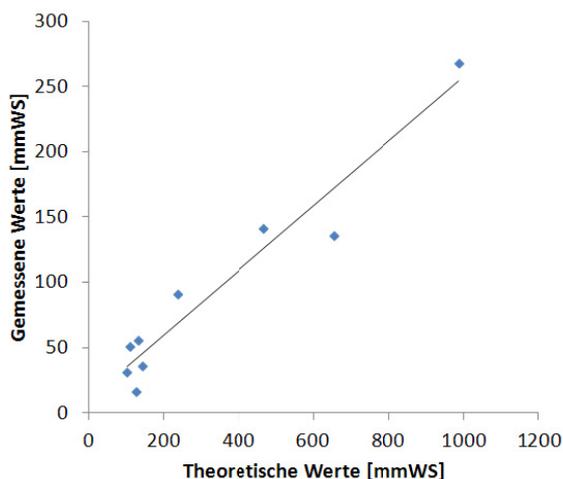
**Abb.9:** Apparatur zur Messung der Wasserdruckbeständigkeit von Gewebeprouben.

Vollmaterial des Modellgewebes möglichst gut zu entsprechen, wurden hierfür hauptsächlich synthetische Textilien ausgewählt, die ähnlich einem feinen

Sieb, aus Fasern mit vollem Querschnitt gewebt waren. Die Abmessungen der Maschenöffnungen wurden anhand von mikroskopischen Aufnahmen bestimmt.

Die Apparatur zur Messung der Wasserdruckbeständigkeit (siehe Abbildung 9) bestand aus zwei mit Dichtringen versehenen Flanschringen, zwischen die die Gewebeprouben einzeln eingespannt wurden. Ein in einem der Ringe eingepasstes Steigrohr aus Glas war mit einer Millimeterskala ausgestattet. Zur Messung wurde durch das vertikal nach oben ausgerichtete Steigrohr langsam Wasser eingefüllt, das in dieser Konstellation von dem horizontal eingespannten Gewebe getragen wurde. Als gemessene Wasserdruckbeständigkeit wurde diejenige Steighöhe des Wassers notiert, bei der der dritte Tropfen Wasser durch das Gewebe gedrungen war.

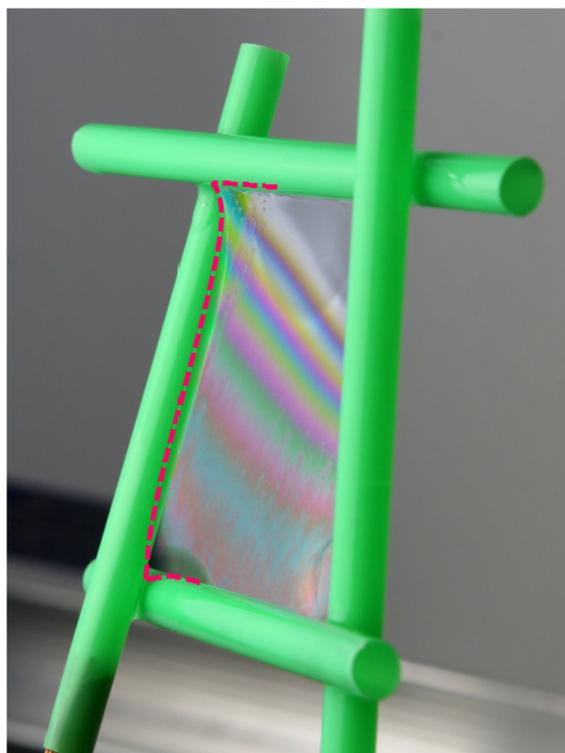
Die für neun verschiedene Gewebe ermittelten Mess- und Prognosewerte wurden in Abbildung 10 gegeneinander aufgetragen. Dieser Vergleich zeigt, dass zwischen diesen Wertepaaren zwar ein linearer Zusammenhang besteht, doch liegen die gemessenen Werte etwa nur bei einem Viertel der theoretisch vorhergesagten Werte.



**Abb.10:** Gegenüberstellung der durch Messung und Modellrechnung bestimmten Wasserdruckbeständigkeit von neun unterschiedlichen Textilgeweben.

Um eine bessere Übereinstimmung zwischen Modell und Realität zu erzielen, genügt es nicht, das Modell zu verfeinern, weil auch das Messverfahren problembehaftet war. Denn es war kaum möglich, die Stoffproben völlig glatt zwischen die Flansche einzuspannen, da sich bei steigendem Anpressdruck der Dichtungen Falten ausbildeten. Bereits solche Unebenheiten des Gewebes konnten ein vorzeitiges Verschmelzen benachbarter Wasserflächen in den Maschen begünstigen. In gleicher Weise haben sich die auf das Gewebe pressenden Dichtungen ausgewirkt, da sie eine Verbindung zwischen den Maschen herstellten.

Im Modell wäre demgegenüber zu berücksichtigen, dass die Fasern des Gewebes nicht parallel zueinander verlaufen, da sie sich gegenseitig unter- und überlaufen. Welche Auswirkungen dies hat, demonstriert ein Analogmodell einer realen Masche, das aus Trinkhalmen angefertigt wurde. Verschließt man die Maschenöffnung dieses Modells mit einer Seifenhaut, so zeigt sich (siehe Abb. 11), dass die Ränder dieser Seifenhaut weder geradlinig noch parallel zur Ebene des Gewebes verlaufen. Insbesondere an den Kreuzungspunkten der Fasern werden die Ränder in die der Nähe benachbarter Maschen gezogen. Ein geringer Druckunterschied auf beiden Seiten der Seifenhaut würde daher bereits ausreichen, dass benachbarte Seifenhäute miteinander in Kontakt kämen. Da sich in Maschenöffnungen befindliche freie Wasserflächen analog dazu verhalten würden, muss die Wasserdruckbeständigkeit eines realen Gewebes geringer sein, als die eines vollkommen ebenen Modellgewebes mit vergleichbaren Abmessungen.



**Abb.11:** Analogmodell einer Masche, die von einer Seifenhaut verschlossen ist. Die gestrichelte Linie hebt den Rand der Seifenhaut hervor, der nicht geradlinig verläuft.

## 7. Literatur

- [1] Bergmann, Ludwig; Schaefer, Clemens (1998): Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd.1. Mechanik, Relativität, Wärme, Walter de Gruyter, Berlin, New York, S. 460 - 461