BMBF-Forschungsprojekt:

Entwicklung innovativer textiler Werkstoffe zur Trinkwassergewinnung aus Nebel

Projektkonsortium

Koordination:

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf
der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung (DITF) Denkendorf
Projektleiter: Dr.-Ing. Thomas Stegmaier
Körschtalstr. 26
73770 Denkendorf
www.itv-denkendorf.de

Partner aus der Forschung:

Institut für Geowissenschaften (IFG) der Universität Tübingen
Ansprechpartnerin: PD Dr. Anita Roth-Nebelsick
Sigwartstr. 10
72076 Tübingen
www.ifg.uni-tuebingen.de

Partner aus der Industrie:

Mattes & Ammann KG
Ansprechpartner: Christoph Larsen
Brühlstr. 8
72469 Meßstetten
www.mattesammann.de

Solarenergie Stefanakis
Ansprechpartner: Dr.-Ing. Jannis Stefanakis
An der Steig 17
55271 Stadecken-Elsheim
www.solarenergie-stefanakis.de

Betreut durch den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA-WTE) vom
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Projektbegleitung: Dr. Reiner Rudek

Inhaltsverzeichnis:

I Kurze Darstellung des Gesamtvorhabens 1

II. Eingehende Darstellung 23

- ITV Denkendorf (Teilvorhaben 1): Entwicklung und Erprobung textiler Werkstoffe mit funktionellen Oberflächen 23
- Universität Tübingen (Teilvorhaben 2): Analyse biologischer Vorbilder zur Wasserabscheidung aus Nebel 83
- Fa. Mattes & Ammann (Teilvorhaben 3): Entwicklung textiler Fasermaterialien und Flächengebilden 107
- Fa. Solarenergie Stefanakis (Teilvorhaben 4): Entwicklung innovativer Nebelkollektoren 119

I. Kurze Darstellung des Gesamtvorhabens

1.1 Aufgabenstellung 2
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 3
1.3 Planung und Ablauf 4
1.4 Wissenschaftler und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 8
1.4.1 Biologische Nebelfänger 8
1.4.2 Technische Nebelfänger 11
1.4.3 Textile Maschenwaren 14
1.4.4 Textilausrüstung 16
1.5 Angaben zur Literatur 17
1.6 Zusammenarbeit im Verbundvorhaben 19

1.1 Aufgabenstellung

Ausgehend vom Stand der Technik lag das Ziel des Projekts darin, die gewonnenen Erkenntnisse aus den natürlichen Vorbildern der nebelerntenden Käfer als auch nebelerntender Pflanzen in wesentlich besser funktionierende textiltechnische Systeme der Wassergewinnung aus Nebel umzusetzen. Die hierzu angestrebten Innovationsschritte umfassten:

- Detailanalyse der biologischen Vorbilder
- Abstraktion der Erkenntnisse in chemisch / physikalische Modelle
- Gezielte Textilfaserherstellung im Hinblick auf die Eigenschaften der Wasseraufnahme, -leitung und -abgabe.
- Oberflächenbeschichtung der Textilfasern zur Verbesserung der Nebelfangeigenschaften.
- Entwicklung, Herstellung und Verwendung von:
    - Mikro- und Nanostrukturen zur Sammlung sowie Ableitung des gewonnenen Wassers.
    - Dreidimensional ausgeformten Textilien (Abstandstextilien) zur Ausnutzung der dritten Dimension, welche die notwendige hohe Luftdurchlässigkeit mit einem geringen Luftwiderstand (im Hinblick auf hohe Windgeschwindigkeiten bei Stürmen) mit einer verbesserten Aerosolabscheidung vereinen.
- Umsetzung von Erkenntnissen aus der Filtration bei Koaleszer für die Wasserabscheidung bei minimalem Luftwiderstand.

Insgesamt war durch die Innovationen eine erhebliche Steigerung der aus Nebel zu gewinnenden Wassermenge angestrebt. Die zu entwickelnden textilbasierten Nebelfänger hatten weitere Eigenschaften zu erfüllen:

- Hohe Reißfestigkeit, um Sandstürme zu überstehen,
- Selbstreinigende Eigenschaften, damit Staub und Schmutz bei Kontakt mit Wasser abgespült wird,
- UV-Beständigkeit für bei extremer Sonnenexposition.

Für die Konstruktion der Gesamtanlagen waren auf Basis der physikalischen Grundprinzipien zwei verfahrenstechnisch unterschiedliche Konzepte zu entwickeln:

1. Die Abscheidefläche der Nebelfänger war in einer flächigen Form auszuführen. Das durch den Nebelfänger aufgefangene Wasser sollte entlang der Fasern durch die Gewichtskraft nach unten und weiter über Rinnen in die Vorratsbehälter abgeleitet werden. Der besonderen Vorteile lag hier in der hohen „Ernte“-fläche.
2. Die Textilbahnen sollten in eine Zylinderform gebracht und diese senkrecht aufgestellt werden. Die Vorteile hierbei wurden in der sehr robusten Bauweise für windstarke Gebiete und die Option von Drehbewegungen, um höhere Relativgeschwindigkeiten des Textils zu den Aerosoltröpfchen zu erzielen, gesehen.

Für die Bewässerungsaufgaben waren kleinere Konstruktionen zu entwickeln, die direkt Einzelpflanzen oder Pflanzengruppen mit Wasser versorgen können.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Obwohl die Erde zu rund 70 % mit Wasser bedeckt ist, steht nicht jedem Menschen die zum Leben notwendige Menge Wasser in ausreichender Menge zur Verfügung. Die Bereitstellung von Trinkwasser erweist sich somit als eine der großen Herausforderungen der Zukunft. Etwa eine Milliarde Menschen haben derzeit keinen Zugang zu dem lebensnotwendigen Nass - ein Problem, das insbesondere die Entwicklungsländer betrifft. So benötigt nach *Katzman* eine Person in Afrika (Sahara) rund 5 Liter am Tag, während dessen der Wasserverbrauch pro Person in Deutschland 128 Liter am Tag beträgt [1]. Der zunehmende Wasserverbrauch in westlichen Industrienationen lässt die Wasserressourcen knapp werden und erhöht somit das Konfliktpotential in der Welt. Das beschlossene Ziel von 189 Ländern im Jahre 2000 in Rio de Janeiro ist es daher, bis 2015 die Zahlen der von Wassermangel betroffenen Menschen zu halbieren [2].
Vor allem die ländliche Bevölkerung in den ärmsten Regionen dieser Welt, den Entwicklungs- und Schwellenländern leidet unter Wassermangel. Hinzu kommt, dass in weiten Teilen der Erde natürliche Wasserquellen nur sehr spärlich vorhanden sind oder gänzlich fehlen. Besonders in abgelegenen Gebieten wie z.B. entlegenen Siedlungen auf Inseln, in isolierten Meeresbuchten oder Hochlagen ist die Trinkwasserversorgung zum einen unwirtschaftlich und darüber hinaus oftmals technisch oder logistisch nicht realisierbar. Daher fehlt es häufig nicht nur an entsprechenden Brunnen oder Wasserzapfstellen.

Wasserknappheit zieht aber auch geringere landwirtschaftliche Erträge nach sich, während andererseits unangepasste Bewässerung Versalzung und Erosion zur Folge haben kann. Wird den Seen, Flüssen und dem Grundwasser mehr Wasser entzogen, als durch Regen nachgeliefert werden kann, versiegen die Speicher mit der Zeit, und damit wird die zur Verfügung stehende Wassermenge immer geringer.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass vor allem in trockenen und süßwasserarmen Gebieten auf dieser Erde ein enormer Bedarf an Trinkwasser besteht. Auf der anderen Seite werden die Ressourcen des Wassergehaltes in der Luft in Form von Nebel – im Gegensatz zu Pflanzen in trockenen Gebieten – nur ganz selten für die Menschheit genutzt, obwohl Nebel, als ein elementarer Bestandteil des Wasserkreislaufs, für Trockengebiete mit sehr niedrigem bis keinem Niederschlag oftmals die einzige Wasserquelle ist.

1.3 Planung und Ablauf

Das Arbeitsprogramm umfasste die Konzeption, Konstruktion und Fertigstellung von Prototypen zur Trinkwassergewinnung aus Nebel, die - entsprechend biologischen Vorbildern - aus innovativen technischen textilen Materialien bestehen sollten. Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- **Biologische Analysen an nebelerntenden Pflanzen (*Pinus canariensis* und *Erica arborea*)**

Dem Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen (IFG) fiel die Aufgabe zu, die Wasserabscheidung von pflanzlichen Systemen zu untersuchen, denen eine besondere Fähigkeit zur Nebelernte zugeschrieben wird. Hierbei handelte es sich vor allem um *Pinus canariensis* (Kanarenkiefer) und *Erica arborea*, zwei Arten der Kanarischen Inseln. Betrachtet wurde die tatsächliche Fähigkeit zur Nebelernte, wobei die Ernteraten mit derjenigen von mutmaßlich nicht nebelerntenden Kiefernarten und artefizieller Objekte verglichen wurde. Weiter wurde der Einfluss von Oberfläche und Kontaktwinkel auf die Nebelernterate untersucht. Zusätzlich wurden die durch die Messungen gewonnenen Erkenntnisse zur Erstellung eines physikalische Modelles verwendet, dass die Bildung, das Abrollen bzw. das Abfallen von Tropfen beschreibt. Diese Studien umfassten somit:

1. Quantitative Messungen der Nebelernte unter verschiedenen Bedingungen und Objektorientierungen
2. Kontaktwinkelmessungen und Ermittlung der Kontaktwinkelhysterese
3. Untersuchungen zur Oberflächenstruktur mittels Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie (REM)
4. Erstellung eines physikalischen Modelles und Anwendung des Modelles auf die verschiedenen Objekte

Die mikroskopischen Untersuchungen erfolgten in Tübingen am Institut für Geowissenschaften. Die Messungen zur Nebelernte erfolgten zu einem großen Teil am Botanischen Garten in Freiburg. Die Kontaktwinkelmessungen wurden in Zusammenarbeit mit dem ITV Denkendorf durchgeführt. Die Modellerstellung erfolgte am Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen.
Die Ergebnisse wurden integrativ analysiert und erlaubten eine Charakterisierung des Zusammenhangs zwischen dem Wärmehaushalt der Blätter, den Blattoberflächeneigenschaften und der Kondensationsleistung. Dies bildete die Basis für einen zielgerichteten Transfer von biologischen Funktionsprinzipien in die Konzeption der technischen Nebelfänger.

- **Konzepterarbeitung aus biologischen Erkenntnissen**

In einer gemeinsamen Phase aller Projektpartner erfolgte die Analyse und Interpretation der erkannten biologischen Zusammenhänge. Darauf aufbauend schloss sich eine kreative Phase zur Erarbeitung von Konzepten der technischen Umsetzung an, die sich auf realisierbare Konstruktionen konzentrierte. Diese Phase umfasste u.a.:

- Die technische Umsetzung von Oberflächeneigenschaften und
- die Wechselwirkung von hydrophilen und hydrophoben Oberflächenanteilen für eine wirkungsvolle Koaleszenz der Nebeltropfen.

In Ergänzung zu den Erkenntnissen aus der Natur waren für technische Anwendungen weitere Rahmenbedingungen zu berücksichtigen:

- Erhöhung der Nebelausbeute unter Berücksichtigung von Tropfenbildung in einem 3-dimensionalen Textilaufbau und
- technische Realisierbarkeit der physikalischen Mechanismen durch Auswahl und Kombination von verschiedenen Faserwerkstoffen.

- **Grundlagentest in einer Klimakammer (Nebelkammer)**

In einer entwickelten und gebauten Klima-(Nebel-)kammer im ITV Denkendorf mit definiert einstellbarer Wasseraerosolgröße und -anströmgeschwindigkeit, Temperatur und Luftfeuchte, erfolgten Basisanalysen zur Effizienz der Abscheidung von Nebeltröpfchen an ausgewählten und neu entwickelten Fasermaterialien und textilen Gebilden. Die Analysen in der Klimakammer dienten der Auswahl des textilen Fasermaterials, der Beurteilung der funktionellen Beschichtungen der Oberfläche der Faserpolymere und textilen Gebilden sowie zur Konstruktion der textilen Fläche mit ausgeprägter dritter Dimension. Die Entwicklung und Herstellung der textilen Materialien und textilen Gebilde erfolgten durch das ITV Denkendorf in Zusammenarbeit mit der Fa. Mattes & Ammann, die konstruktiven Aspekte für den Kollektorbau durch die Fa. Solarenergie Stefanakis.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Auswahl des textilen Fasermaterials:

  Die Auswahl der Faser-Polymerwerkstoffe berücksichtigte die Verfügbarkeit von Mono- und Multifilamenten auf der Basis von synthetischen Fasern. Die Parameter des verfügbaren Filamentdurchmessers (Feinheit), der chemischen Alterungsbeständigkeit, der Abrasionsbeständigkeit, der Kosten, als auch die Veränderbarkeit der Oberflächeneigenschaften durch funktionelle Ausrüstungen wurden gegeneinander abgewogen und die Materialien entsprechend ausgewählt und entwickelt.

- Funktionelle Beschichtungen der Oberfläche der Faserpolymere:

  Die Oberflächenstruktur der Textilien beeinflusst entscheidend den Wasserabtransport [3]. An ausgewählten Filamenten wurden Oberflächenbeschichtungen zur gezielten Einstellung von Hydrophilie und Hydrophobie beschichtende Prozesse erprobt, z.B. für eine hydrophobe Beschichtung mit Fluorcarbonen sowie einer superhydrophoben Lotus-Effekt-Ausrüstung für Selbstreinigungseffekte mit Mikro- und Nanostrukturen an der Oberfläche (z.B. um Sand und Staub abzuspülen).

- Konstruktion der textilen Fläche mit ausgeprägter dritter Dimension:

  Nach Auswahl des Fasermaterials und deren Oberflächenbehandlung schloss sich die Herstellung von Textilien mit kleiner Fläche mit mehreren konstruktiven Varianten an unter Berücksichtigung der mechanischen Stabilität, Witterungsbeständigkeit, Luftwiderstand in Verbindung mit der Porengröße, des Wasserab-

transportverhaltens, der zu gewinnenden Wassermenge sowie der Verschmutzungsneigung.

- Funktionalisierung der textilen Oberfläche:
  Ausgehend aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden nun auch die textilen Flächen funktionell beschichtet und die Wechselwirkung der Bindungspunkte im Hinblick auf die Tropfensammlung und der Wasserführung zur Sammelstelle optimiert.

- **Entwicklung und Konstruktion der Gesamtsysteme**

Auf der Basis der botanischen Grundlagenforschung und experimentellen Entwicklungsarbeiten in kleinem Maßstab erfolgte die Herstellung und Erprobung erster Prototypen. Zum Aufbau der Gesamtsysteme war die Konstruktion der mechanischen Elemente für die Stabilität der beiden Grundprinzipien erforderlich. Zu berücksichtigen war ebenso die Ableitung der Wassertropfen in die Sammelbehälter. Hierfür war eine enge Zusammenarbeit zwischen dem ITV Denkendorf und dem Anlagenbauer Solarenergie Stefanakis von entscheidender Bedeutung.
Den Erprobungen im Technikum des ITV Denkendorf schlossen sich die Feldversuche an. Die Erkenntnisse flossen in die weitere Optimierung der Gesamtkonstruktionen ein.

- **Erprobung im Feldversuch**

Aufbauend auf den ersten Erkenntnissen mit Prototypen wurden anschließend größere Anlagen mit den Industriepartnern hergestellt und in Feldversuchen erprobt. Als Haupterprobungsort wurde die Wüste Namib in Namibia ausgewählt. Die Wüste Namib ist gekennzeichnet durch ein hyper-arides Klima mit lediglich 20 Millimeter Regen pro Jahr, jedoch einer starken Nebelbildung, welche je nach Höhe und Windverhältnissen weit von der Küste im Westen, bis zu 60 km ins Innere reicht. Der Nebel entsteht, wenn von Westen einströmende feucht-warme Atlantikluft an der kalten Meeresoberfläche (Tiefenwasser aus der Antarktis) vor der Küste abkühlt, ins Landesinnere gelangt und der Wasserdampf zu feinen Tröpfchen kondensiert [4, 5].
Der Aufbau der Nebelfänger erfolgte in der Wüstenforschungsstation Gobabeb in der Wüste Namib. Die Wüstenforschungsstation ist eine unabhängige Organisation, welche neben Forschungsaktivitäten im Bereich regenerativer Energiequellen (Wind, Photovoltaik) und Wassermanagement aus aller Welt Fachleute aus- und weiterbildet. Die Ausbildung konzentriert sich weitgehend auf den Umweltbereich, auf Landwirtschaft in Tro-

ckengebieten, angepasste Landnutzung, nachhaltige Entwicklung auf kommunaler Ebene und auf das Management bei Dürreperioden [6, 7].

Für die Auswahl des Standortes Gobabeb sprachen neben dessen Lage, die Kompetenz der Angestellten und eine vorhandene Wetterstation mit (automatischer) Erfassung von Licht, Wind und Regen. Die ständige Betreuung der Nebelfängersysteme erfolgte im Unterauftrag des ITV Denkendorf durch das Personal der Wüstenforschungsstation. Die Optimierung und Wartung der parallel aufgebauten Systeme in Deutschland und Namibia erfolgten durch das ITV Denkendorf.

Eine weiteres Erprobungsfeld waren – als Resultat einer ausgedehnten Recherche bei Behörden und Begehungen - die Höhenlagen bei Anno Vianos auf der Insel Kreta. Der landwirtschaftliche Anbau auf der Insel Kreta wird derzeit und vor allem in Zukunft, durch das knappe Wasserangebot limitiert. Wasser in Form von Luftfeuchte steht jedoch auf den Berghöhen, welche die weitaus größte Fläche der Insel belegen, in den meisten Monaten des Jahres zur Verfügung. Dieser kondensiert in der Nacht oder wird als feiner Nebel vom Meer hereingetragen. Aufgrund der guten Geschäftskontakte durch die Fa. Solarenergie Stefanakis nach Kreta konnte die Betreuung vor Ort durch einheimisches Personal sichergestellt werden.

1.4 Wissenschaftler und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Biologische Nebelfänger

Viele Tiere und Pflanzen in der Wüste entwickelten im Laufe der Zeit Strategien, den Nebel zu nutzen. Eine bislang nur ansatzweise in die Technik umgesetzte Funktion biologischer Strukturen betrifft die aus der Feuchtigkeit der Luft erfolgte Gewinnung von lebenswichtigem Wasser. Besonders geeignete Pflanzenvorbilder in der Natur sind in Gebieten zu finden, die sehr niederschlagsarm sind, jedoch zu gewissen Zeiten über eine sehr hohe Luftfeuchtigkeit und /oder Nebeleintrag verfügen.

- **Wüstenkäfer**

Ein interessantes zoologisches Beispiel zur Wassergewinnung aus Nebel bietet uns der Wüstenkäfer. Der Schwarzkäfer (*Onymacris unguicularis*) ist ein Käfer, der endemisch in der Namib-Wüste vorkommt. Der Nebeltrinker-Käfer ist schwarz gefärbt, etwa zwei Zentimeter groß und hat auffällig lange Beine. Diese ermöglichen einen großen Abstand des Leibes vom heißen Sand.

Der Käfer hat eine bemerkenswerte Art, das Wasser aus den vom Atlantik in die Wüste ziehenden Nebelschwaden zu gewinnen. Dazu balancieren die Tiere auf einem Dünenkamm mit dem Kopf nach unten gesenkt und strecken ihr Hinterteil nach oben zum Wind, einem Kopfstand gleichend. Bei Nacht- und Morgentau ziehen die Spitzen der Hügel die feinen Nebeltropfen an und sammeln diese. Wenn die Tropfen eine bestimmte Größe erreichen (ca. 5 mm), überschwemmen sie die wachsartige Struktur und beginnen über den Rücken direkt in dem Mund zu laufen [5, 8]. Das auf diese Weise aufgenommene Wasser entspricht etwa 40 % seines Körpergewichts.

- **Welwitschia Mirabilis**

Ein weiteres extremes Beispiel für die Nutzung des Nebels als Lebensquelle ist die Wüstenpflanze Welwitschia mirabilis. Das Alter ausgewachsener Pflanzen wird auf 2.000 bis 3.000 Jahre geschätzt. Welwitschias erscheinen im Pflanzenreich relativ isoliert, da offenbar keine engen Beziehungen zu anderen Pflanzengruppen existieren. Welwitschia mirabilis ist die einzige Art der Gattung Welwitschia und der Familie Welwitschiaceae.

Heimat dieser sehr skurrilen Pflanze ist die Namib-Wüste und ein schmaler Streifen nach Norden bis ins südliche Angola. An diesem extremen Standort kann sie nur durch besondere Anpassung überleben. Neben Wurzeln, die extrem in die Tiefe reichen, nutzt die Pflanze auch Nebel und/oder Tau, der sich an ihren Blättern absetzt und von dort auf den Boden tropft. Entgegen des ersten Eindrucks besteht die Welwitschia nur aus einem knolligen kurzen Stamm, zwei Keimblättern sowie zwei gegenständigen langen Blättern. Diese ständig langsam nachwachsenden beiden großen Blätter zerfransen durch den Wind und sterben an den Spitzen ab. Feuchtigkeit nimmt die Pflanze durch ein weit ausgedehntes feines Wurzelwerk dicht unter der Erdoberfläche auf. Nebel kondensiert an den Blättern der Welwitschia und führt so zu Tropfen, die nach dem Herabfallen den Boden minimal durchfeuchten [9, 10].

Abb. 1.1: Welwitschia mirabilis subsp. mirabilis, blühende Pflanzen (l.: männlich, r.: weiblich)

- **Epiphytische Bromelien**

Landpflanzen decken ihren Wasserbedarf in der Regel mit Hilfe ihres Wurzelsystems aus dem Boden. Es gibt jedoch Mechanismen, mit denen Pflanzen Flüssigkeit aus der Luft gewinnen können.

Beispielsweise zeichnen sich die Epiphyten (Aufsitzerpflanzen) dadurch aus, dass sie nicht im Boden wurzeln, sondern sich auf lebenden oder auch abgestorbenen Wirtspflanzen niedergelassen haben. Epiphyten sind aber keine Schmarotzer, die ihre Wirtspflanze anzapfen. Es sind eigenständige Pflanzen, die sich mit ihren Wurzeln lediglich auf den Wirtspflanzen festgehalten, ohne in sie einzudringen, solange diese leben. Durch die Luftwurzeln, die ohne Kontakt zum Boden sind, nehmen die Pflanzen aus der Luft/Nebel die für sie lebenswichtigen Stoffe auf. Hierzu haben sich bei Epiphyten eine ganze Reihe von besonderen Strategien und Strukturen zur Wassergewinnung sowie der Verhinderung von Verdunstung des gewonnenen Wassers entwickelt.

In den Klimabereichen der gemäßigten Zone sind es hauptsächlich Algen, Moose und Flechten. In den tropischen Regenwäldern sind es manche Farne, Orchideen und Ananasgewächse.

Abb. 1.2: Epiphytische Bromelien auf einem Trägerbaum

- **Nebelerntende Pflanzen der Kanaren**

Vielen Arten der Kanarischen Inseln werden eine besondere Fähigkeit zur Nebelernte zugeschrieben. An vielen Standorten dieser Inseln ist der jährliche Niederschlag spärlich oder auf bestimmte Jahreszeiten beschränkt, jedoch kommen dort regelmäßig tiefhängende Wolken oder Nebel vor. Diese werden dann durch die Vegetation ausgekämmt. Die Nebelwälder sind auf bestimmte Standorte oder Höhen beschränkt.

Ein besonders gutes „Auskämmvermögen“ wird in der Rebel bei Arten betrachtet, die in die Höhe reichen, also baumförmig sind, und die zudem über eine dichte Krone nadelförmiger Blätter verfügen. Dies betrifft insbesondere *Erica arborea*, die Baumheide, so-

wie *Pinus canariensis*,, die Kanarenkiefer. Da die Struktur dieser mutmaßlichen Nebelernter, eines dichten Geflechtes von langgestreckten Objekten, den textilen Konstrukten recht nahekommt, konzentrierten sich die Untersuchungen auf diese Organismen. Im Verlaufe der Arbeiten ergaben sich verschiedene Fragestellungen, die insbesondere einen Vergleich von ähnlichen, aber mutmaßlich nicht nebelerntenden Strukturen forderten. Dieser Vergleich war insbesondere zwischen verschiedenen Kiefernarten möglich, so dass vor allem Kiefern während der Arbeiten in den Mittelpunkt des Interesses rückten.

- **Spinnenetze**

Dass der Einsatz von Fasern für die Wasserabscheidung funktioniert, zeigen auch Spinnennetze, wobei diese Funktion hier sicherlich nicht optimiert ist.
Die spektakulärste und effektivste Einrichtung zum Insektenfang ist unzweifelhaft der Bau von Netzen, mit denen die Beute direkt aus der Luft gefangen werden kann, aber auch (Trink-)Wasser kondensiert, koalesziert und abfließen kann. Um diese Aufgabe jedoch zu bewältigen, muss ein Spinnennetz auf der einen Seite hochelastisch und reißfest sein, auf der anderen Seite sollte es jedoch ausgesprochen leicht bleiben.

Abb. 1.3: Spinnennetz im Morgentau

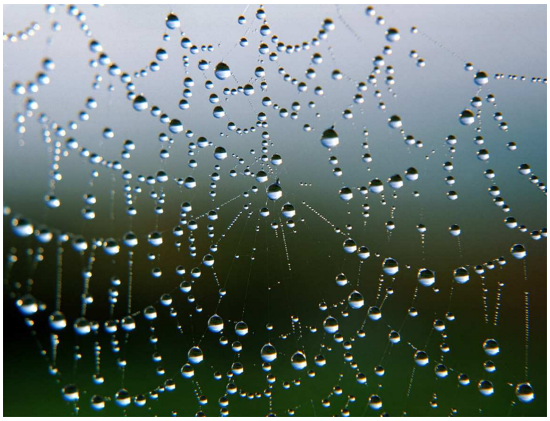


Abb.1.4: Spinnennetz mit Tau

1.4.2 Technische Nebelfänger

Erste Versuche zur Wasserabscheidung aus dem Nebel sind in Lateinamerika bekannt geworden [4]. Das chilenische Fischerdorf Chuncungo ist einer der Orte, wo die Menschen von den Ergebnissen der wissenschaftlichen Untersuchungen profitieren. Große Nebelnetze (12 Meter breit und 4 Meter hoch, Abb. 1.5), welche die Fischer selbst herstellen können, decken dort seit 1986 beinahe den gesamten Süßwasserbedarf [5].

Abb. 1.5: Aufgespannte Fischernetze in Lateinamerika

Dem Beispiel Chiles folgend, findet sich weitere Nebelfänger in der Wüste Namib (Namibia), eine der trockensten Orte der Erde [8]. Dabei werden Testkollektoren, bestehend aus 1 m^2 und 16 m² großen Rahmen, mit unterschiedlichsten Materialien (z.B. PP, PTFE, Aluminiumbändchen) und textilen Mustern (z.B. Raschelnetze, Gewirke, u.s.w.) eingesetzt, um aus den regelmäßig vom Atlantik an die Küste Namibias herantreibenden Nebeln Wasser zu gewinnen (Abb. 1.6-1.7) [11]. Eine besondere Herausforderung an die Netze in Namibia ist der extreme Westwind von 24 bis 32 m/s, der die Netze mechanisch stark beansprucht.

Der Ertrag pro Nebelereignis liegt zwischen 1 und 14 Liter je Kollektor, im Durchschnitt 3,3 Liter pro Tag und Quadratmeter. Eine Modellrechnung basierend auf meteorologischen Daten wie z.B. Nebeltage und -art geht von einem Ertrag von ca. 1 l/m²d aus bei 105 Nebeltagen im Jahr aus [12]. Die Qualität des eingesammelten Wassers ist dabei fast immer besser als die des Grundwassers. Lediglich nach einer längeren Trockenphase spült der erste ankommende und kondensierte Nebel Staub vom Netz in die Auffangbehälter [5].

Abb. 1.6: Nebelfänger (1 m²) in der Wüste Namib (Namibia)

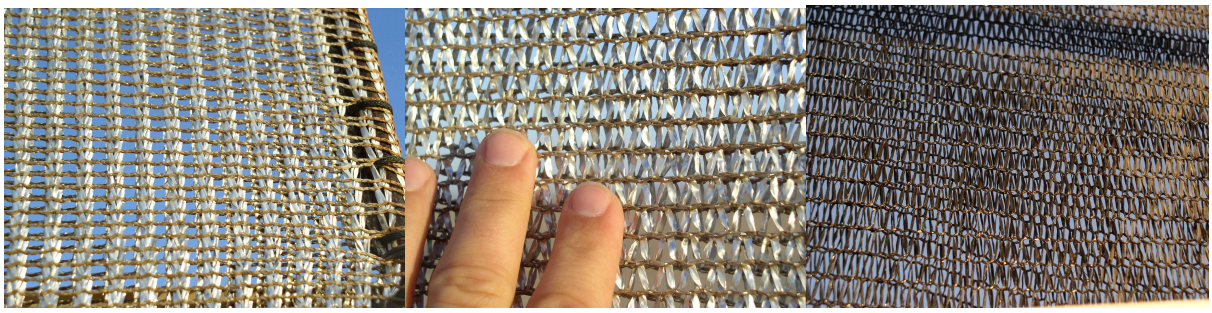


Abb. 1.7: Eingesetzte Nebelfängernetze (l.: schwarzes Raschelnetz, Mitte: Alubändchen mit Gewirke, r.: verwirkte Alubändchen)

In den Soutpansbergen in Südafrika sind ebenfalls Nebelfänger mit einer Projektionsfläche von 70 m² zu finden (Abb. 1.8). Hier beträgt der Ertrag 0,1 bis 60 l/m²d. Das gewonnene Wasser ist prinzipiell trinkbar, fließt durch einen Sandfilter und versorgt die Toilette einer örtlichen Schule mit Wasser (Abb. 1.9) [11].

Abb. 1.8: Nebelfänger in den Soutpansbergen in Südafrika

Abb. 1.9: Wasseraufbereitung mit Grob- und Sandfilter

Weitere aktuelle Beispiele sowie einen umfassenden Überblick über den Stand der Technik zeigt das Tagungsband zur 5.Internationalen Nebel- und Taukonferenz 2010 in Münster [13]

Der Stand der Technik zeigt somit bereits erste Ansätze für eine Wassergewinnung mittels textiler Netze aus den Nebeln und demonstriert die prinzipielle Machbarkeit. Die Bilanz der verwendeten textilen Werkstoffe ist jedoch im Vergleich zum natürlichen Vorbild minimal, da hier auf Materialien und Konstruktionen zurückgegriffen wurde, die mehr oder weniger zufällig in diesen Regionen vorhanden sind. Beispielsweise arbeiten die benutzten textilen Netze z.Z. kaum mit der Nutzung der dritten Dimension der Textilkonstruktion, lediglich doppelte Textillagen werden eingesetzt.

1.4.3 Textile Maschenwaren

Als Maschenwaren werden alle textilen Flächengebilde bezeichnet, die durch Verformen von textilen Fäden zu Maschen entstehen und sich durch die Art ihrer geometrischen Fadenverbindung von den Geweben unterscheiden. Je nach Art der Fadenverarbeitung und Fadenvorlage werden Maschenwaren in Einfadenwaren und Mehrfadenwaren eingeteilt (Abb. 1.10).

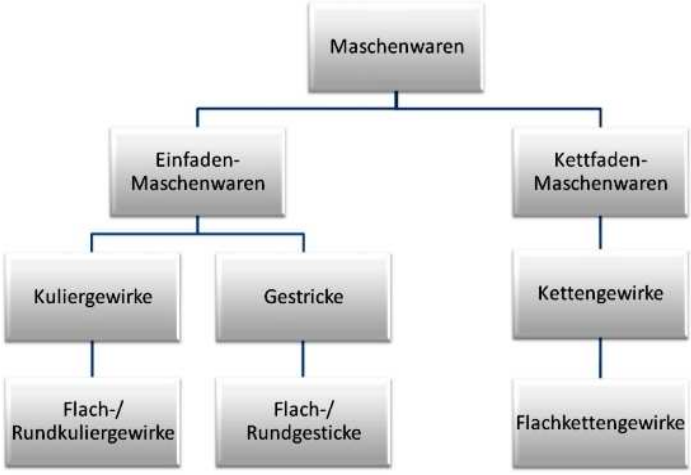


Abb. 1.10: Einteilung der Maschenwaren [14]

In Abhängigkeit der Verschlingung von Fäden können verschiedene Bindungen hergestellt werden. Von der Art der Bindung sind unter anderem die guten Dehnungseigenschaften der Maschenwaren abhängig, wodurch sich diese besonders auszeichnen und eine breite Palette von Erzeugnismöglichkeiten bieten.

Eine Sonderform der Kettengewirke sind die so genannten Abstandsgewirke. Hierbei handelt es sich um dreidimensionale textile Flächengebilde, bestehend aus zwei textilen

Warenflächen, die durch Abstandsfäden, den so genannten Polfäden, miteinander verbunden werden. Abstandsgewirke können auf RR-Raschelmaschinen unter Verwendung von Zungen- oder Schiebernadeln hergestellt werden. Zur Herstellung solcher doppelflächigen Gewirke sind zwei vertikal angeordnete Nadelsysteme notwendig, die Rücken an Rücken aufgestellt sind und auf denen der Maschenbildungsvorgang jeweils nacheinander erfolgt. Die Maschenbildung erfolgt analog der einflächigen Kettengewirke, mit dem Unterschied, dass die Oberflächen des Gewirkes separat durch die meist ersten beiden Legebarren je Seite erzeugt werden und die übrigen für die Legung der Abstandsfäden verwendet werden, indem diese die Fäden über die Nadeln beider Nadelträger legen.

Der Abstand zwischen den Abschlagbarren bestimmt die Dicke des Abstandsgewirkes. Aus der Herstellung von Plüsch- oder Velourwaren hervorgegangen, die sich durch das Durchtrennen der verbindenden Polfäden charakterisieren lassen, werden die meist aus steifen Monofilamenten bestehenden Polfäden von Abstandsgewirken, im Gegensatz zu diesen nicht durchtrennt. Stattdessen dienen sie dem Erzeugen und Erhalten des vorher definierten Abstandes zwischen den textilen Oberflächen zueinander.

Die auf diese Weise hergestellten Abstandstextilien werden für eine dauerhafte und gleichmäßige Struktur anschließend thermofixiert. Hierzu werden die Textilien in Spannrahmen, oder anderen Halterungssystemen auf Nadelleisten basierend, fixiert und unter Verwendung von beispielsweise Konvektionstrockner und Infrarottechnologie in ihren Dimensionen stabilisiert. In Abbildung 1.11 ist das Herstellungsprinzip von Abstandsraschelgewirken veranschaulicht.

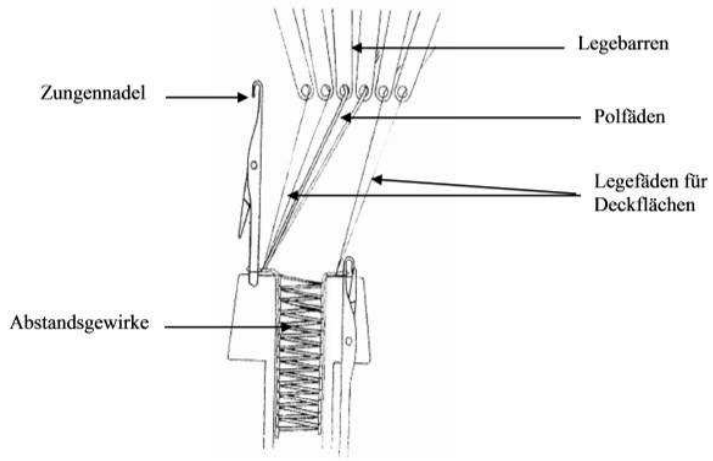


Abb. 1.11: Herstellungsprinzip Abstandsgewirke auf einer Raschelmaschine [15]

Mit dieser Technologie wurden besonders luftdurchlässige Muster im Projekt in verschiedenen Varianten hergestellt.

1.4.4 Textilausrüstung

Die Ziele der Textilausrüstung einer textilen Ware sind zusätzliche Eigenschaften zu verleihen, das Warenbild, die Verarbeitungseigenschaften oder den Griff zu verbessern. Hierfür gibt es verschiedene mechanische und chemische Appreturverfahren. Verfahren und Vorrichtungen zum Appretieren der Textilien können u. a. Tauchen und Quetschen, Spritzen und Rakeln sein. Weitere Ausrüstungsverfahren für flüssige Ausrüstungen sind das Klotzen oder Pflatschen sowie Aufsprühen oder vorherige Verschäumen der Ausrüstung [15].

Eine Form der chemischen Appretur ist die Hochveredlung, welcher auch die Verfahren der Hydrophobierung und Hydrophilierung zur Beeinflussung der Benetzbarkeit zugeordnet werden kann [16].

Die Benetzbarkeit eines textilen Materials gibt Aufschluss darüber, ob dieses wasserabstoßend (hydrophob) oder wasseranziehend (hydrophil) ist. Sie lässt sich durch das Eindringen der Flüssigkeit in das Textil beschreiben, wobei die Flüssigkeit die Luft innerhalb des Textils verdrängt [17]. Eine gute Benetzung bewirkt daher die Spreitung der Flüssigkeit.

Wie stark eine Flüssigkeit eine Oberfläche benetzt, kann durch den so genannten Kontakt- oder Randwinkel Θ beschrieben werden, welcher sich zwischen einem auf eine Oberfläche aufgebrachten Flüssigkeitstropfen und dessen Oberfläche ausbildet. Veranschaulicht wird die Benetzung einer horizontalen, ebenen Oberfläche in der nachfolgenden Abbildung 1.12. Hieraus wird der Zusammenhang zwischen der Benetzbarkeit und dem Kontaktwinkel deutlich.

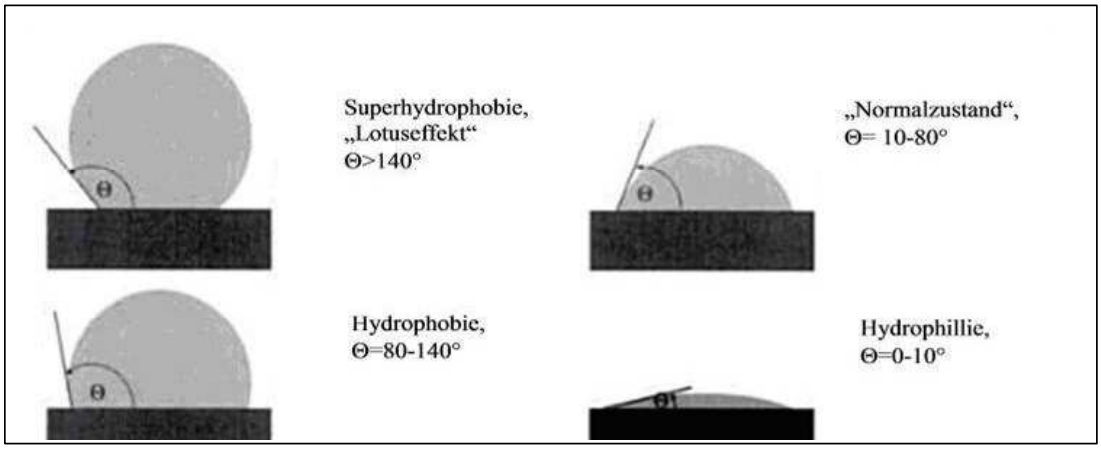


Abb. 1.12: Zusammenhang von Kontaktwinkel und Benetzung einer Oberfläche [17]

Diese Möglichkeiten der definierten Einstellung von Oberflächeneigenschaften durch die Textilveredlung wurden im Projekt ausgenutzt, um die Nebelausbeute zu erhöhen.

1.5 Angaben zur Literatur

[1] Postel, S.L.; Daily, G.C.; Ehrlich, P.R.
„Human appropriation of renewable fresh water"
Science 271, 1996

[2] Official site of the International Year of Freshwater 2003:
http://www.wateryear2003.org, Stand:31.12.2010

[3] Stegmaier, T.; Bahners, T.:
„Plasma treatment under atmospheric pressure for continuous hydrophobic and oleophobic modification of textiles" Unitex, Wetenschappelijke Publicaties, 1/2001 (Belgien) und in Technische Textilien, 4/2001

[4] Cereceda, P.; Schemenauer, R.:
„Harvesting Fog Around the World"
International Development Research Centre, http://www.idrc.ca/en/ev-5077-201-1-O_TOPIC.html, Stand:31.12.2010

[5] Enders, M.; Henschel, J.:
„Nebel: Wasserquelle in der Wüste"
Spektrum der Wissenschaft, 2/2000.

[6] Homepage der Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)
Programmkurzbeschreibung: Unterstützung des Ausbildungs- und Forschungszentrums Gobabeb
http://www.gtz.de/de/weltweit/afrika/8421.htm, Stand:31.12.2010

[7] Homepage der Wüstenstation Gobabeb - Training und Research Centre
http://www.gobabebtrc.org, Stand:31.12.2010

[8] Hamilton W.; Henschel J.; Seely M.:
„Fog collection by Namib Desert beetles"
South Africa Journal of Science 99, 3-4/2003

[9] Botanischer Garten und Botanisches Museum Berlin-Dahlem, FU Berlin
http://www.bgbm.org/bgbm/garden/bereiche/bereiche/welwitsh.htm, 2001

[10] Küpers, U.; Tributsch, H.:
„Verpacktes Leben – Verpackte Technik"
Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002

[11] Stegmaier, T.:
Bericht zur Forschungsreise nach Südafrika und Namibia
ITV Denkendorf, DFG-Zeichen: STE 1431/3-1, 2005

[12] Henschel, J.; Mtuleni, V.; Gruntkowski, N.; Seely, M.; Shanyengana, C.:
„Namibian application of fog-collecting systems. Phase I: Evaluation of fog-water harvesting“, Paper report „Namfog project“, 8/1998

[13] 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. Tagungsband, Münster, 25-30. Juli 2010.

[14] Planck, H.; Singer, E.: *Einführung in die Textiltechnik*. Niederschrift zur Vorlesung, Lehrstuhl für Textiltechnik, Universität Stuttgart, Juli 2009.

[15] Wulfhorst, B.:
Textile Fertigungsverfahren
Hanser Verlag, München, 1998

[16] Keller, H.; Dieleman, C.; Ebenau, A.:
„Entwicklungen zur Lotus-Effekt® Ausrüstung“
Referat auf dem Workshop „Nanotechnologie für die Textilindustrie“, ITV Denkendorf in Zusammenarbeit mit Gesamttextil e.V., 19. Februar 2004

[17] Stegmaier, T., Arnim, V. v., Scherrieble, A.; Planck, H.:
„Selbstreinigende Oberflächen auf der Basis des Lotus-Effects®“
Vortrag auf dem Internationalen Kolloquium „Beschichtung und Oberflächenfunktionalisierung von Technischen Textilien“, 29.-31. Januar 2003, Denkendorf, Abdruck im Tagungsband

1.6 Zusammenarbeit im Verbundvorhaben

Das Verbundprojekt wurde entsprechend der Fachkompetenzen in einer engen Kooperation von zwei Instituten und zwei Industriebetrieben umfassend bearbeitet. Die Industriepartner hatten bereits jahrelanger Erfahrung in den relevanten Bereichen.

Folgende Projekteile bzw. Arbeitspakete wurden in enger Zusammenarbeit der einzelnen am Projekt beteiligten Institute und Betrieben bearbeitet (Tabelle 1.1):

Teil-vor-haben	Thema	Bearbeiter
1	Entwicklung und Erprobung textiler Werkstoffe mit funktionellen Oberflächen	Institut für Textil- und Verfahrenstechnik, Denkendorf
2	Analyse biologischer Vorbilder zur Wasserabscheidung aus Nebel	Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen
3	Entwicklung textiler Fasermaterialien und Flächengebilden	Fa. Mattes & Ammann, Meßstetten
4	Entwicklung innovativer Nebelkollektoren	Fa. Solarenergie Stefanakis, Elsheim-Stadecken

Tab. 1.1: Verbundpartner und Aufgaben im Projekt

Das **Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf** unterstützt mit ca. 200 Mitarbeitern kleine und mittlere Unternehmen in Forschungs- und Entwicklungsprojekten in Form der industriellen Gemeinschaftsforschung. Die Arbeitsfelder sind an diesem Hauptziel orientiert und decken die ganze Bandbreite der Textiltechnologie und angrenzender Bereiche ab. In Ergänzung zur wissenschaftlich orientierten Arbeit werden Auftragsforschung und Informationsverteilung angeboten. Alle Projekte konzentrieren sich auf die Entwicklung neuer bzw. die Verbesserung existierender Technologien und Produkte.

Das vorliegende Projekt wurde in der Forschungsgruppe Umwelttechnik bearbeitet. Auf dem Gebiet der Umwelttechnik/Technische Textilien werden/wurden zur industriellen Umsetzung bionischer Vorbilder in den letzten Jahren u.a. folgende öffentliche und industrielle Arbeiten durchgeführt [10]:

- Einfluss der Struktur und Anordnung von Fasern auf extrem selbstreinigende Lotus-Oberflächen (BMBF-Machbarkeitsstudie 2000-03, AIF 2003-2005) [11, 12]
- Veränderbare Porengrößen für die Mikrofiltration (BMBF-Machbarkeitsstudie, 2004) [13]
- Entwicklung von flexiblen und extrem wirtschaftlichen Sonnenkollektoren auf der Basis des Eisbärfells (FlexColl, EU-CRAFT, 2003-05) [14]
- Energieeffizientes Textiles Bauen mit Transparenter Wärmedämmung für die solarthermische Nutzung nach dem Vorbild des Eisbär-Fells“ (Baden-Württemberg, seit 2010)
- Pflanzliche Strukturen zur Flüssigkeitsaufnahme aus der Luft: Biomimetisches Potential für innovative Filtermaterialien (Baden-Württemberg, 2007-2010)
- Entwicklung (energetisch) hocheffizienter Koaleszenzabscheider auf der Basis neuartiger dreidimensionaler, nanostrukturierter Filtermedien (BMBF, 2007-2011)
- Absorptionshaare der Bromeliaceen: Biologisches Vorbild für ein selbstregulierendes Ventil zum Abtransport von Flüssigkeiten (BMBF-Machbarkeitsstudie, 2006-2007)
- Bionisch inspirierte hocheffektive Feinst-Tropfenabscheidung (BMBF-Machbarkeitsstudie, 2006-2007)
- Entwicklung innovativer geflochtener Schlauchfiltersysteme für eine energiearme Membranfiltration nach biologischem Vorbild (DBU, 2006-2007)

Das **Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen** (IFG) bearbeitet seit vielen Jahren Studien zum Form/Funktionszusammenhang des pflanzlichen Wassertransportes und Wärmeaustausches sowie der evolutiven Anpassung entsprechender Gewebe [15, 16]. Insbesondere basieren diese Studien auf numerischen Methoden. Es werden jedoch auch mathematisch-analytische Studien durchgeführt sowie anatomische Untersuchungen (licht- und elektronenmikroskopisch) zum Struktur-Funktionszusammenhang. Die Studien umfassen neben Fragestellungen zum Wasser- und Wärmetransport auch Grenzflächeneffekte und Gasaustausch.
Das IFG ist zusammen mit dem ITV Denkendorf Mitglied der Bionik-Netzwerke „BIO-KON“ (gefördert durch das BMBF) und Kompetenznetz Biomimetik „Pflanzen als Ideengeber für die Entwicklung biomimetische Materialien und Technologien“ (gefördert durch das Land Baden-Württemberg).

Die **Fa. Mattes & Ammann KG** in Meßstetten ist ein wachsender, mittelständischer Betrieb mit mehr als 200 Mitarbeitern und fertigt sowohl Gestricke als auch Gewirke für die Anwendungsfelder Automobil, Hygiene, Militär, Flaggen. 400 Maschinen produzieren auf 24.000m² Produktionsfläche ca. 40 Mio. m² Maschenstoff im Jahr. Ein gut ausgestattetes Labor sorgt für die laufende, akkreditierte Qualitätskontrolle. Insbesondere mit den Abstandsstrukturen werden für dieses Vorhaben innovative Materialien und ein neuer, großer Markt erhofft.

Die **Fa. Solarenergie Stefanakis** bei Mainz entwickelt und produziert Solaranlagen für die Warmwassergewinnung und vertreibt diese in Europa und weltweit. 6 Mitarbeiter arbeiten in Voll- oder Teilzeit in der Firma mit weiteren ca. 20 Mitarbeitern in weiteren kleinen Firmen. Die Firma wurde 1976 gegründet. Die Arbeitsfelder umfassen alle erforderlichen Aktivitäten im Bereich der Solarenergie und verwandter Gebiete wie Energieversorgung, Planung, Organisation, Arbeitssicherheit, Ergonomie und Design, Wertanalyse, Wirtschaftlichkeitsberechnungen, Marketing sowie Forschung und Entwicklung. In den letzten Jahren wurden neue Materialien und Konstruktionen für die Solarthermie entwickelt, die auch für die Meerwasserentsalzung zur Gewinnung von Trinkwasser geeignet sind [13]. Somit ist ein potentielles Vermarktungsnetz für die neuen Nebelfänger vorhanden.

II. Eingehende Darstellung

Teilvorhaben 1: Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf

2.1 Material und Methode 24
2.1.1 Verwendete Materialien 24
2.1.2 Benebelungsprüfstand und Versuchsdurchführung 26
2.1.2.1 Versuchsaufbau 26
2.1.2.2 Versuchsbeurteilung 29
2.2 Anforderungen an Nebelfänger im Hinblick auf biologische Erkenntnisse ... 30
2.3 Ergebnisse der Analyse der Materialstruktur 32
2.3.1 Strukturelle Untersuchungen an Noppengewirke 33
2.3.2 Strukturelle Untersuchungan an Abstandsgewirke 36
2.4 Ergebnisse der textilphysikalischen Prüfungen 39
2.4.1 Flächengewicht 39
2.4.2 Luftdurchlässigkeit und Porengröße 41
2.4.3 Wasseraufnahme und Wasserabgabe 42
2.4.4 Berstfestigkeit 44
2.4.5 Zugfestigkeit 45
2.5 Ergebnisse der Grundlagentests in der Nebelkammer 46
2.5.1 Gewonnene Wassermengen in Screening-Versuchen 46
2.5.2 Einfluss der Textilstruktur auf die Wassermenge 47
2.5.3 Einfluss textilphysikalischer Parameter auf die Wassermenge 51
2.5.4 Gewonnene Wassermenge im Dauerversuch 54
2.6 Einfluss des Benetzungsverhaltens auf die gewonnene Wassermenge 56
2.6.1 Hydrophobausrüstung 57
2.6.2 Hydrophilausrüstung 61
2.7 Untersuchungen zum Ablaufverhalten entwickelter Textilien 63
2.8 Untersuchungsergebnisse an alternativen Konstruktionen 70
2.9 Feldversuche auf der Wüstenforschungsstation Gobabeb in Namiba 71
2.9 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse 74
2.10 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 76
2.11 Veröffentlichung der Ergebnisse 76
2.12 Diskussion der Ergebnisse und Zusammenfassung 79

2.1 Material und Methode

2.1.1 Verwendete Materialien

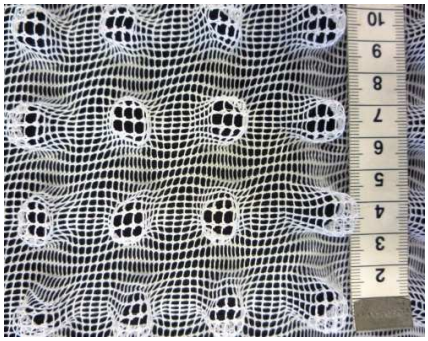
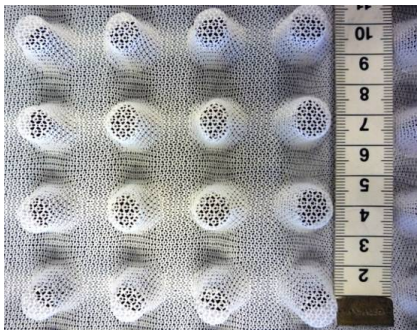
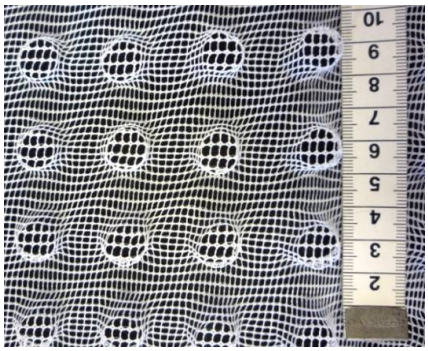
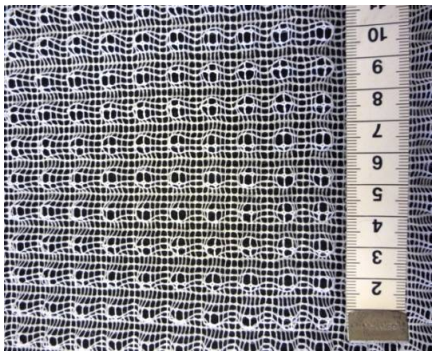
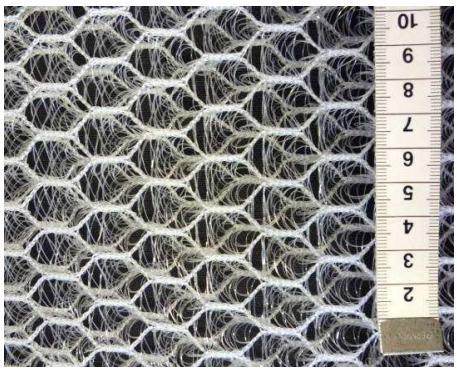
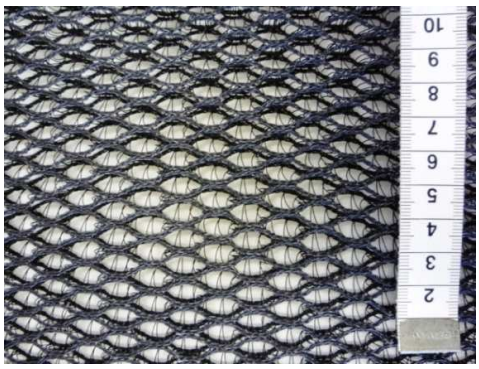
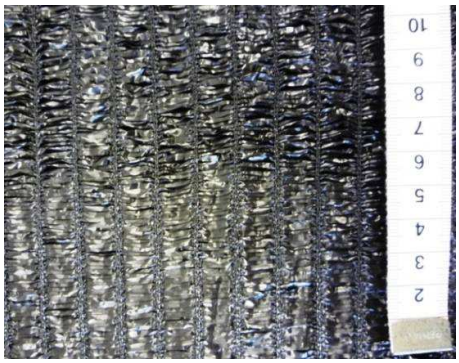
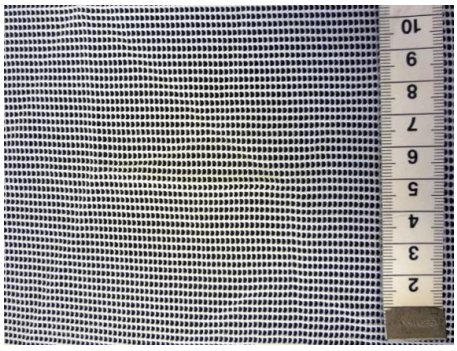
Im Rahmen einer Screeningphase wurden eine Vielzahl von textilen Flächengebilden eruiert, beschafft, bewertet, ausgewählt und getestet. Dabei wurden sowohl handelsübliche Textilien als auch speziell für das Vorhaben von der Fa. Mattes & Ammann entwickelte Muster untersucht. Die textilen Gebilde aus Polyester (PET) - es handelt sich dabei um Kuliergewirke, und Abstandsgewirke - unterschieden sich in ihrem Material und in ihrer Struktur.

Bei den untersuchten Kuliergewirken handelt es sich um Maschenwaren, die durch den Einsatz von nur vorverstreckten Fasern in Kombination mit einem anschließenden speziellen Tiefziehverfahrens zu einer Art Noppenstruktur verformt wurden. Durch die dabei einwirkende Temperatur behalten die Materialien die Noppenstruktur. Die im Folgenden als Noppengewirke bezeichneten umgeformten Kuliergewirke, unterschieden sich durch verschiedene Strukturparameter bzw. Konstruktionsmerkmale, auf welche in Kapitel 2.3 näher eingegangen wird.

Neben den beschriebenen Noppengewirken wurden Abstandsgewirke untersucht, die sich neben ihrer Struktur durch ihre eingesetzten Fasermaterialien unterschieden.

Zu Vergleichszwecken wurde ein aus Folienbändchen hergestelltes Gewirk aus Polyethylen (PE) herangezogen und - wie alle Muster - auf dessen Aerosolabscheidevermögen untersucht. Dieses wird bisher als Nebelfängertextil u.a. in Afrika und Chile eingesetzt und repräsentiert somit den Stand der Technik. Darüber hinaus wurde vergleichend das Ausgangsmaterial der Noppengewirke zur Ermittlung des Einflusses der ausgebildeten Noppenstruktur untersucht.

In nachfolgender Tab. 2.1 sind die einzelnen Materialien aufgeführt. Die Materialien wurden vor den Untersuchungen und/oder der Oberflächenfunktionalisierung mit Wasser unter Raumtemperatur ausgewaschen, um etwaige Präparationen aus dem Herstellungsprozess zu entfernen.

Materialgruppe 1: Tiefgezogene Kuliergewirke (Noppengewirke)	
Textil 1: PET-Noppengewirke 	Textil 2: PET-Noppengewirke 
Textil 3: PET-Noppengewirke 	Textil 4: PET-Noppengewirke 
Materialgruppe 2: Abstandsgewirke	
Textil 5: PET-Abstandsgewirke 	Textil 6: PET-Abstandsgewirke 
Vergleichsmaterialien	
PE-Folienbändchengewirke 	Rohware der Noppengewirke (PET) 

Tab. 2.1: Untersuchte Materialien

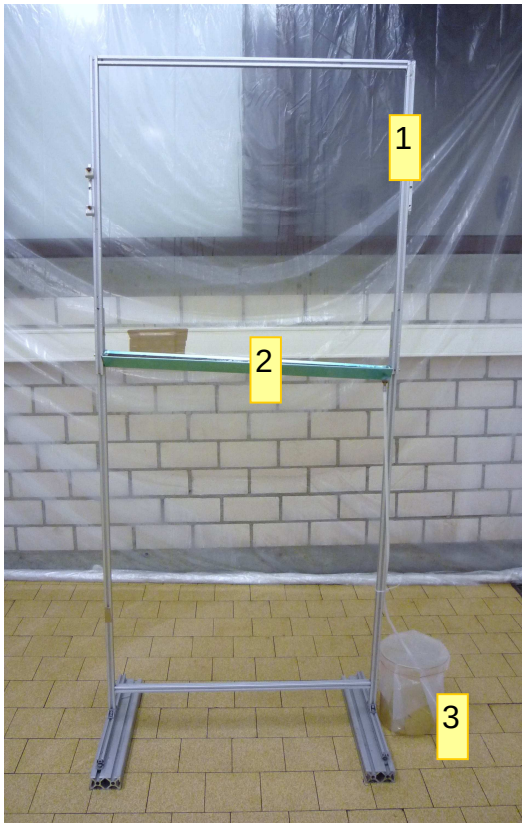
Weitere Textilmaterialien wurden im Laufe des Projektes insbesondere auf Basis von Gestricken von der Partnerfirma Mattes&Ammann entwickelt. Die Textilmaterialien, welche im Teilbericht 3 aufgeführt sind, erwiesen sich jedoch in Vorversuchen aufgrund der niedrigen Luftdurchlässigkeit als weniger geeignet für die Abscheidung von Nebelaerosolen.

2.1.2 Benebelungsprüfstand und Versuchsdurchführung

2.1.2.1 Versuchsaufbau

Für die Auswahl der geeigneten textilen Materialien wurden in einer Klimakammer am ITV zwei einfache und funktionstüchtige Prüfstände mit der Möglichkeit zur Ermittlung der Wasserabscheidung aus Aerosolen aufgebaut. Viele Vorversuche zur Definition der einflussnehmenden Parameter zeigten, dass nur eine ausgefeilte und verlässliche Verfahrenstechnik reproduzierbare und damit auch brauchbare Resultate liefert. Aus den Erkenntnissen der Vortests wurden folgende Versuchsstände realisiert:

- **Benebelungsprüfstand I:**



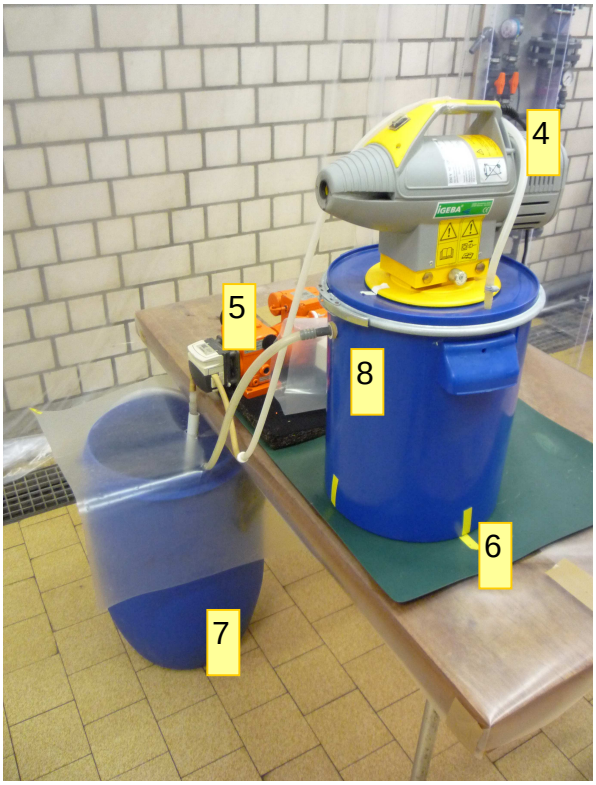


Abb. 2.1: Benebelungsprüfstand mit Rahmen für die Textilmuster und Nebelgerät

Die zu untersuchenden Textilien wurden in flächiger Form an einem höhenverstellbaren Rahmen (1) aus Aluminiumprofilen fixiert (Abb. 2.1). Eine integrierte Ablaufrinne (2) diente dabei dem Auffangen und Ableiten des abgeschiedenen Wassers in einen Messbecher (3). Die Abmaße des Rahmengestells betrugen 0,75 x 0,75 m. Hieraus ergab sich eine Benebelungsfläche von 0,56 m².

Ein wesentlicher Bestandteil des Versuchsstandes war der Kaltnebelgenerator Nebulo (4) der Fa. Igeba (Weitnau), welches der Erzeugung des Nebels diente. Die Anwendungen dieses Nebelerzeugers reichen vom Versprühen von Nebel in Gewächshäusern, der Schädlingsbekämpfung bis hin zu Übungszwecken der Feuerwehr. Die Ausbringmenge des Kaltnebelgerätes kann mittels Dosierschraube in mehrere Stufen eingestellt werden und beträgt unter Verwendung von Wasser als versprühte Flüssigkeit zwischen ca. 5 ml bis ca. 240 ml/min.

Die Wasserversorgung des Nebelgerätes erfolgte durch zwei Vorratsbehälter. Das Nebelgerät befand sich auf einem 30l-Vorratsbehälter (6) und wurde durch eine Pumpe (5) mit Wasser aus einem weiteren Vorratsbehälter (7) versorgt. Für eine stets gleichbleibende Ausbringmenge des Nebelerzeugers war ein konstantes Wasserniveau im 30l-Vorratsbehälter erforderlich, welches durch einen Überlauf (8) zu letztgenanntem gewährleistet war.

Die nachstehende Abbildung 2.2 zeigt die Größenverteilung der aus dem Nebelgenerators erzeugten Aerosolen.

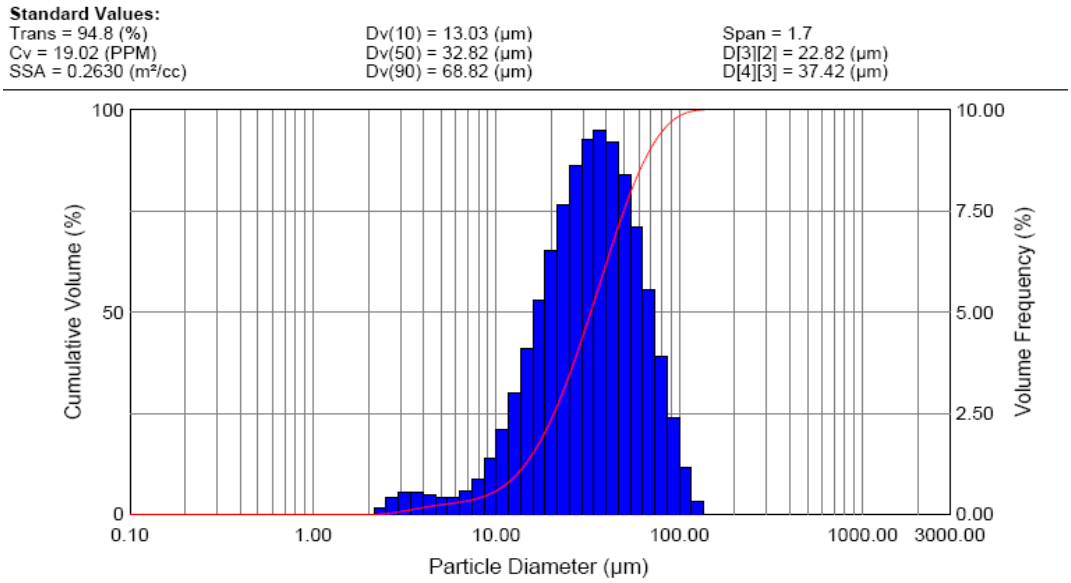


Abb. 2.2: Aerosolgrößenverteilung des Nebelgenerators Nebulo

Der gesamte Versuchsaufbau befand sich in einem mit Kunststofffolie abgedichtetem Raum. Die Abdichtung des Raumes diente der Schaffung konstanter Versuchsbedingungen, die sich durch annähernd gleiche Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit beschreiben ließen.

Die Vorversuche ergaben, dass ein konstanter Abstand der Nebelaustrittsdüse bis zum untersuchenden Textil von 2,5 m und die Benebelung bei maximaler Ausbringmenge für die Versuchsdurchführung am günstigsten sind. Es ergab sich hierbei eine Strömungsgeschwindigkeit ca. 1,8 m/s und eine durchschnittliche Tröpfchengröße von 32,8 µm (Abb 2.2). Diese Einstellungen gewährleisteten, dass möglichst viele Nebeltropfen bis zum Textil gelangten. Zudem war der so erzeugte Nebel hinsichtlich Tropfengröße (ca. 30-70 µm) und Windgeschwindigkeit annähernd vergleichbar mit dem in Namibia auftretenden Nebel.

- **Benebelungsprüfstand II:**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden neben einem zweidimensionalen Versuchsaufbau auch dreidimensionale bzw. zylindrische Konstruktionen untersucht. Hierfür wurde eine Zylinderkonstruktion entwickelt, welche in Abbildung 2.3 mit untersuchtem Material 4 dargestellt ist.

Abb. 2.3: Zylindrisch geformter Nebelfänger

Die Grund- und Deckflächen des Zylinders bestanden aus kunststoffummantelten, flachen und gelochten Metallkonstruktionen (1). Diese wurden durch sieben senkrecht angeordnete Metallstäbe (2) verbunden. Die Konstruktion wurde an der Oberseite des zuvor beschriebenen Rahmengestells befestigt. Das vom Textil abgeschiedene Wasser wurde von einer Abtropfschale (3) aufgefangen, welche sich unter dem Zylinder befand und an dem Rahmengestell befestigt war.

2.1.2.2 Versuchsbeurteilung

In der Klimakammer des ITV wurden im Rahmen des Projektes zwei verschiedene Versuchsvarianten (Kurzzeit- und Langzeitversuche) zur Benebelung und Beurteilung der abgeschiedene Wassermenge der textilen Materialien durchgeführt.

- **Abgeschiedene Wassermenge in Screening-Versuchen (Kurzzeitversuche)**

Ein in den Rahmen oder um den Zylinder gespanntes Textil wurde einer vom Nebelgerät erzeugten Nebelströmung ausgesetzt. Es wurden je Messreihe mindestens 3 Versuche durchgeführt, deren Versuchsdauer sich jeweils aus einer Benebelungsdauer von 60 Minuten (W_{60}) und einer Abtropfdauer von 15 Minuten (W_t) zusammensetzte. In die Berechnung wurde eine durchschnittliche Wassermenge der Rahmenkonstruktion (W_R) einbezogen (konstant 0,1 l/h).
Die Ergebnisse der abgeschiedenen Wassermenge (W_α) wurden aus den Mittelwerten der jeweiligen Versuchsreihen gebildet und zunächst wie folgt berechnet (Gl. 1):

$$W_{Ab} = W_{60} + W_t - W_R \qquad [\frac{l}{h}] \qquad (1)$$

Wird die abgeschiedene Wassermenge W_α nun auf die benebelte Fläche (A) bezogen, erhält man die Wassermenge W_{Ab} in Liter je Stunde und Quadratmeter (Gl. 2).

$$W_{Ab} = \frac{W_{60} + W_t - W_R}{A} \qquad [\frac{l}{h \times m^2}] \qquad (2)$$

Die benebelte Fläche betrug für die flächigen Versuche 0,56 m². Zu beachten war, dass sich die Auftreffläche und damit die Tröpfchenverteilung der Nebelströmung mit der Materialgröße, d.h. der zu benebelten Fläche des Materials, änderte. Dies beeinflusste das Ergebnis der abgeschiedenen Wassermenge und wurde bei den Berechnungen berücksichtigt.

Die abgeschiedene Wassermenge der Zylinderkonstruktion wurde analog der zweidimensionalen Konstruktion berechnet, mit dem Unterschied der Größe der Abscheidefläche. Diese lag bei 0,36 m².

- **Abgeschiedene Wassermenge im Dauerversuch (Langzeitversuche)**

Um die Abscheideeffizienz über ein gesamtes Nebelereignis zu beurteilen, wurden auch Langzeitbenebelungsversuche über eine Dauer von acht Stunden ohne Unterbrechung durchgeführt. Diese Versuche sollten darüber Aufschluss geben, in wieweit die verwendeten Materialien sich auch in der Praxis eignen. Nebelereignisse in Namibia beispielsweise dauern bis etwa sechs Stunden an.

Anhand der wie oben beschrieben durchgeführten Versuche wurden die Materialien ausgewählt, welche sich für den Einsatz als Nebelfänger als geeignet erwiesen. Diese wurden in der Konstruktion in ihrer optimalen Ausrichtung befestigt. Stündlich wurde die abgeschiedene Wassermenge erfasst und auf $l/(h \cdot m^2)$ berechnet (siehe oben).

2.2 Anforderungen an Nebelfänger im Hinblick auf biologische Erkenntnisse

Neben der abgeschiedenen Wassermenge waren auch wirtschaftliche Gesichtspunkte und textilphysikalische Größen ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Eignung eines Textils für den Einsatz als Nebelfänger.

Die Anforderungen der Textilien ergaben sich aus den Umgebungsbedingungen, denen die Nebelfänger ausgesetzt sind. Diese können sich sowohl auf die Beständigkeit der Textilien bzw. ihre Einsatzdauer auswirken, als auch die mit den Textilien zu gewinnende mögliche Wassermenge beeinflussen. Folgende Abbildung 2.4 veranschaulicht die an einen Nebelfänger gestellten Anforderungen.

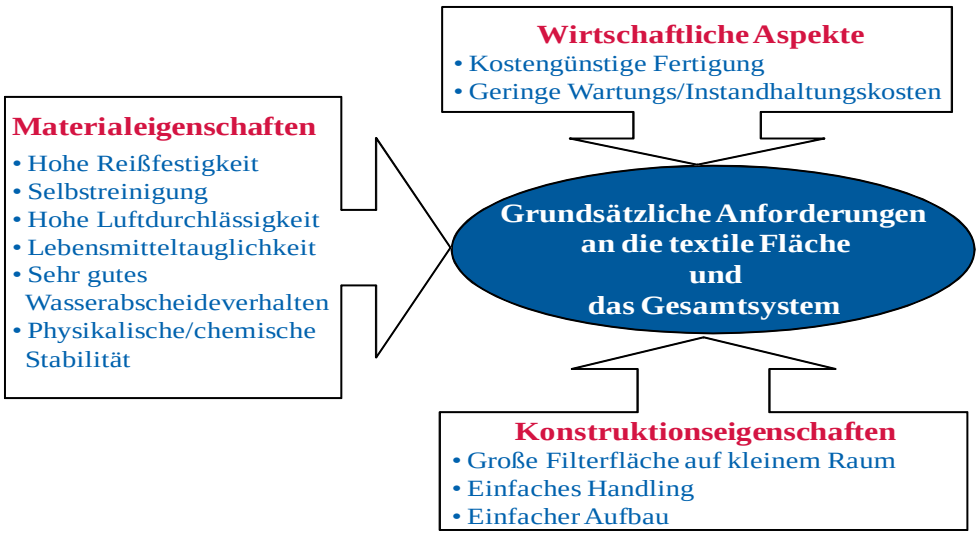


Abb. 2.4: Anforderungsprofil eines Nebelfängers

Ein beispielsweise in Namibia zum Einsatz kommender Nebelfänger ist starken Beanspruchungen aufgrund der extremen Wetterverhältnisse ausgesetzt. So muss er Windgeschwindigkeiten von mehr als 100 km/h von dort auftretenden Sandstürmen stand halten, was hohe mechanische Festigkeiten und eine hohe Luftdurchlässigkeit erfordert. Andernfalls könnten die Sandstürme und der hindurchströmende Nebel die Materialien beschädigen oder die Anlagen umreißen. Zudem müssen die verwendeten Materialien hitze- und kältebeständig sein, da in der Namibwüste tagsüber mehr als 50℃ und nachts teilweise Temperaturen von unter 0° C herrschen. Des Weiteren sind das Flächengewicht sowie die Wasseraufnahme und -abgabe von textilphysikalischer Bedeutung. Das Flächengewicht von textilen Materialien beispielsweise ist für die Auslegung der Nebelfängerkonstruktion essentiell. Wasseraufnahme und -abgabe beeinflussen sowohl die abzuscheidende Wassermenge als auch die Konstruktion der Nebelfängeranlage, da ein steigender Wassergehalt des Textils mit einer Gewichtszunahme des Materials und somit einer erforderlichen aufwendigeren Konstruktion einhergeht.

Ob die Textilien diesen Anforderungen entsprechen, kann anhand textilphysikalischer Prüfungen erfasst werden. Die textilphysikalischen Untersuchungen wurden unter Normalklima 1 durchgeführt, welches für nicht tropische Länder einer Raumtemperatur von 20 ± 2℃ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 ± 2 % (Kurzform 20/65) entspricht. Weiterhin wurden Untersuchungen im Normklima 2 für technische Textilien

mit einer Raumtemperatur von 23±2℃ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50±5% (Kurzform 23/50) durchgeführt.
Nachfolgender Tabelle 2.2 sind die jeweils durchgeführten Prüfungen zu entnehmen.

Textiles Prüfverfahren	**Durchführungsart**	**Prüfgerät**
Flächengewicht	DIN EN 12 127	Waage Mettler
Luftdurchlässigkeit	DIN EN ISO 9237	TEXTest FX3300
Porengröße / Porengröße	Makroskopische Vermessung	Makroskop Wild Heerburg
Zugfestigkeit	DIN EN ISO 13 934-1	Instron 4301
Berstfestigkeit	DIN EN ISO 13 938-2	TruBurst²
Wasseraufnahmevermögen	DIN 53 923	Waage Mettler
Wasserabgabevermögen	Für dieses Projekt entwickeltes Prüfverfahren	Waage Mettler
Benetzungsverhalten	Visuelle Beurteilung	-

Tab. 2.2: Durchgeführte Prüfverfahren

Für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes wurde Polyester als Fasermaterial für die Herstellung der Flächengebilde ausgewählt, da es den Anforderungen nach Altersbeständigkeit, biologischer Beständigkeit und Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen sowie gegenüber hohen Temperaturen und Temperaturschwankungen, UV-Einwirkung und Witterung am ehesten entspricht. Darüber hinaus zeichnet sich Polyester durch ein geringes Wasseraufnahmevermögen (<0,5%), gute mechanische Stabilität, die Möglichkeit zur Funktionalisierung, sowie ein günstiges Preisniveau und Verfügbarkeit aus.

2.3 Ergebnisse der Analyse der Materialstruktur

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die textilen Materialien hinsichtlich ihrer strukturellen und bindungstechnischen Eigenschaften, der textilphysikalischen Eigenschaften und des Benetzungsverhaltens der Materialien und nicht zuletzt die gewonnene Wassermenge der Materialien, als eines der entscheidendsten Kriterien für die Eignung als Nebelfänger, analysiert.
Im Folgenden werden die eingesetzten Materialien (Noppengewirke und Abstandsgewirke) hinsichtlich ihrer Konstruktion und Struktur durchleuchtet.

2.3.1 Strukturelle Untersuchungen an Noppengewirke

Zur Herstellung der Noppengewirke wurden ausschließlich Polyester-Multifilamentgarne verwendet. Die untersuchten Textilien 1 bis 4 (vgl. Tab. 2.1) zeichneten sich durch ihre ausgeprägten, als Noppen bezeichneten, Verformungen aus, welche ein signifikantes Unterscheidungsmerkmal gegenüber anderen Textilien war. Dabei unterschieden sich die Materialien sowohl in der Noppenzahl je Flächeneinheit als auch in ihrer Noppenhöhe.

Die Noppenzahl wurde durch die sogenannte Rastergröße des Materials bestimmt. Die Rastergröße bezeichnet den Abstand zwischen den Noppen, angegeben in Millimetern, ausgehend vom Zentrum der Noppen. Die untersuchten Materialien lassen sich somit der Größe des Rasters nach in zwei Gruppen einteilen: Rastergröße 28 mm und Rastergröße 12 mm.

Die Anzahl der Noppen wird aus der Zahl der Noppen auf 200 mm in Längsrichtung multipliziert, mit der Zahl der Noppen auf 200 mm in Querrichtung ermittelt und auf eine Noppenanzahl pro m² hochgerechnet. Die Messung der Bezugslängen erfolgt dabei beginnend am Ende einer Noppe. Die Noppenhöhe der Textilien zeigte, wie stark das Ausgangsmaterial verformt wurde und kennzeichnete gleichzeitig den Abstand zwischen der am stärksten verformten Stelle und dem unverformten Grundmaterial. Die Noppenhöhe ergab sich aus dem Tiefziehwerkzeug des Herstellers (Abb. 2.5).

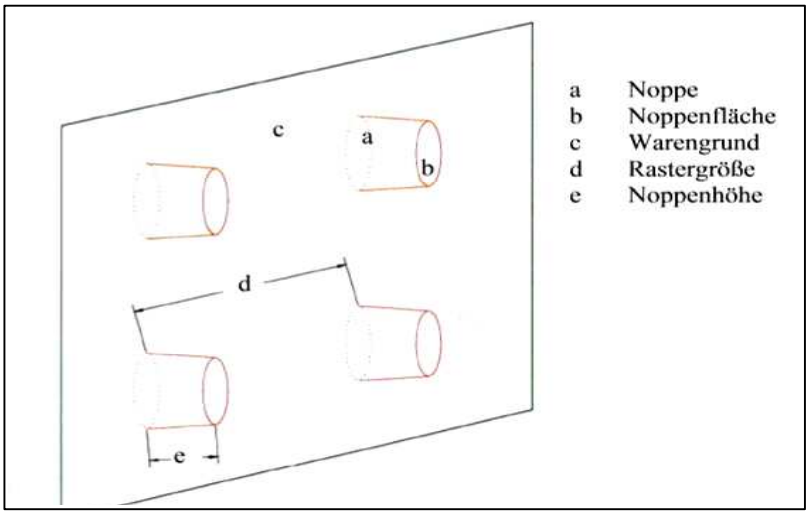
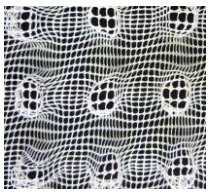
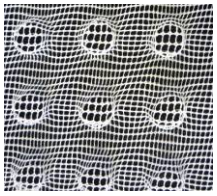
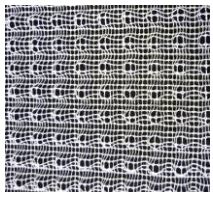


Abb. 2.5: Veranschaulichung der Noppenstruktur

In der Tabelle 2.3 sind die untersuchten Textilien mit ihren wesentlichen Konstruktionsmerkmalen (Noppenstruktur und Porenstruktur) aufgeführt.

Material / Parameter	Textil 1 	Textil 2	Textil 3 	Textil 4 
Rastergröße [mm]	28	28	28	12
Noppenanzahl / m²	1.225	1.225	1.225	7.225
Noppenhöhe [mm]	19	19	9	7
Warenbild / Porengröße [mm²]	Durchbrochen 3,63	Homogen 0,35	Durchbrochen 2,77	Durchbrochen 3,06

Tab. 2.3: Strukturparameter der Noppengewirke

Alle Noppengewirke wiesen eine Rechts/Links-Bindung auf, welche somit auf den Warenseiten jeweils nur rechte oder nur linke Maschen zeigten. Die Herstellung solcher Maschenwaren erfolgt auf Einnadel-barrigen Strick- oder Wirkmaschinen.

Die Noppengewirke lassen sich anhand ihrer Musterung unterscheiden. Besonders deutlich wurden diese Musterunterschiede beim Vergleich von Textil 1 und 2, da diese sich bei gleicher Noppenstruktur, nur in deren verwendeten Grundgewirken unterschieden. Während die Textilien 1, 3 und 4 eine durchbrochene Struktur aufwiesen, zeigte Textil 2 ein vergleichsweise geschlossenes, homogenes Warenbild. Die durchbrochene Musterung der Textilien 1, 3 und 4 können als Ajour-Muster betrachtet werden. Die Durchbrüche in dem Gewirke entstanden durch gespreizte Maschen, d.h. durch ein Verhängen der Maschen über drei Nadeln. Hierfür wurden zunächst mittels Drängrad und Umhängeplatine die Schenkel jeder zweiten Maschen beidseitig auf die Nachbarnadeln verhängt. In der folgenden Maschenreihe wurde dann ein Henkel ausgebildet, welcher die gespreizte Masche trug. Derartige Muster werden auch als C-Ajour oder Knüpftrikot bezeichnet (Abb. 2.6).

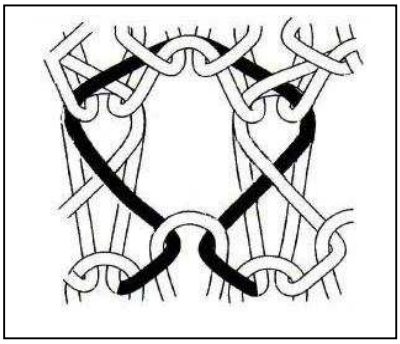


Abb. 2.6: Knüpftrikot

Die Bindung der untersuchten Materialien 1, 3 und 4 ergab sich aus einer Kombination von Masche und Flottung. Die erste Maschenreihe war gekennzeichnet von gespreizten Maschen, welche in der nachfolgenden Reihe von Maschen gehalten wurden. Im Unterschied zum herkömmlichen Knüpftrikot, wird die gespreizte Masche in der nachfolgenden Maschenreihe jedoch nicht von einem Henkel getragen. Stattdessen bildet der Faden der folgenden Maschenreihe eine Flottung.

Die Abbildung 2.7 veranschaulicht die Bindung der Textilien 1, 3 und 4 sowohl photographisch, wobei für die Aufnahmen ein Mikroskop der Firma WILD Heerburg mit 16-facher Vergrößerung verwendet wurde, als auch schematisch.

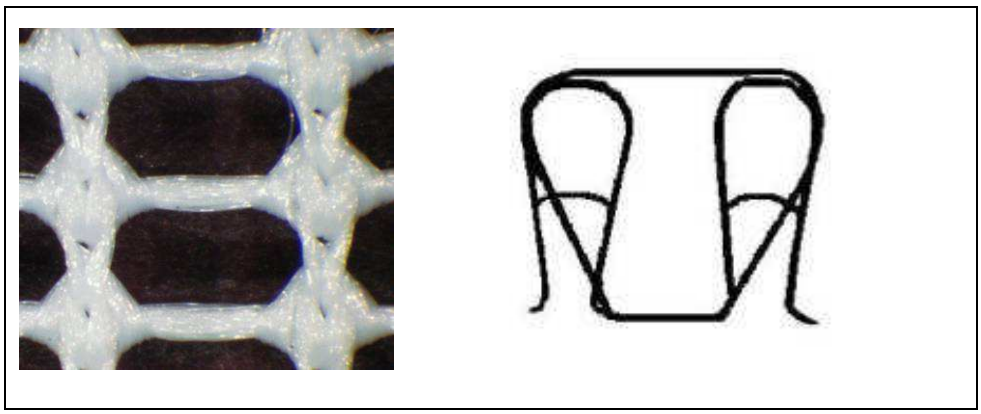


Abb. 2.7: Durchbrochenes Muster von Textil 1, 3 und 4

Im Gegensatz zu den durchbrochenen Textilien wies Textil 2 ein vergleichsweise homogenes Warenbild auf. Die geschlossenere Oberfläche entstand durch eine Kombination der Bindungselemente Masche und Henkel. In dieser ebenso zweireihigen Bindung waren Masche und Henkel jeweils reihenweise versetzt angeordnet. Dabei wurden die Henkel von den langgezogenen Maschen getragen. Weiterhin bestand die Bindung aus abwechselnd kurzen Maschen und „normalen“ Maschen. Eine solche, aus abwechselnd angeordneten Henkeln bestehende Bindung wird auch als Piqué

bezeichnet. Das derart hergestellte Flächengebilde zeichnet sich durch viel geringere Porengrößen aus, was aus Tabelle 2.3 zu erkennen ist.
In Abbildung 2.8 ist die Bindung von Textil 2 photographisch (Mikroskopische Aufnahme mit 10-facher Vergrößerung) und schematisch dargestellt.

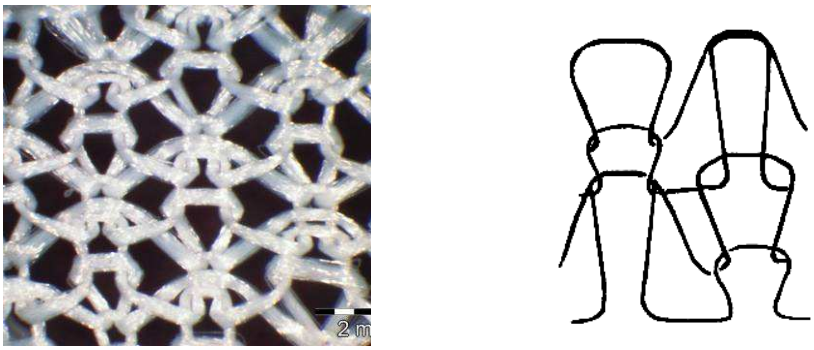


Abb. 2.8: Pique-Bindung von Textil 2

Die Größe der Durchbrüche war maßgeblich von der Verformung des Textils, d.h. vom Tiefziehen der Materialien beeinflusst. So wiesen die Textilien mit größeren Noppen größere Öffnungen auf als die Materialien geringer Noppengröße, wobei die Öffnungen im Noppenbereich des Materials ebenfalls größer waren als an unverformten Stellen. Dies war sowohl für die durchbrochen gemusterten Textilien 1, 3, und 4 als auch das homogene Textil 2 zutreffend.
Zur genaueren Spezifizierung der musterungsabhängigen Porenstruktur wurde die durchschnittliche Größe der Durchbrüche in den verschiedenen Bereichen mikroskopisch ausgemessen.

2.3.2 Strukturelle Untersuchungan an Abstandsgewirke

Zur Materialgruppe der Abstandsgewirke gehörten die Textilien 5 und 6 an. Diese unterschieden sich in der Verwendung des Fasermaterials und ihrer Materialstruktur. Die untersuchten Textilien wiesen eine offene Oberfläche auf, hergestellt durch eine Filetbindung, wobei zusätzliche Schussfäden Stabilität gaben und dem Verbinden der Fransen zu den so genannten Waben dienen. Unterschiede zwischen Textil 5 und 6 bestanden in der Zahl und Anordnung der Waben. Als Waben wurden die sechseckigen Öffnungen der textilen Flächen bezeichnet (Abb. 2.9).

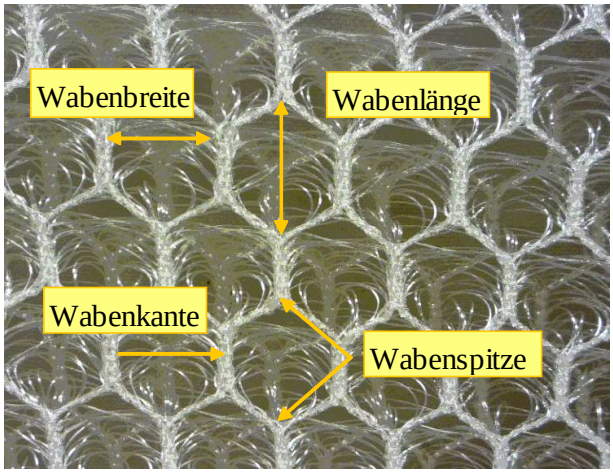


Abb. 2.9: Veranschaulichung der Wabenparameter der Abstandsgewirke

In Abbildung 2.10 sollen die Bindungen der Abstandsgewirke veranschaulicht werden.

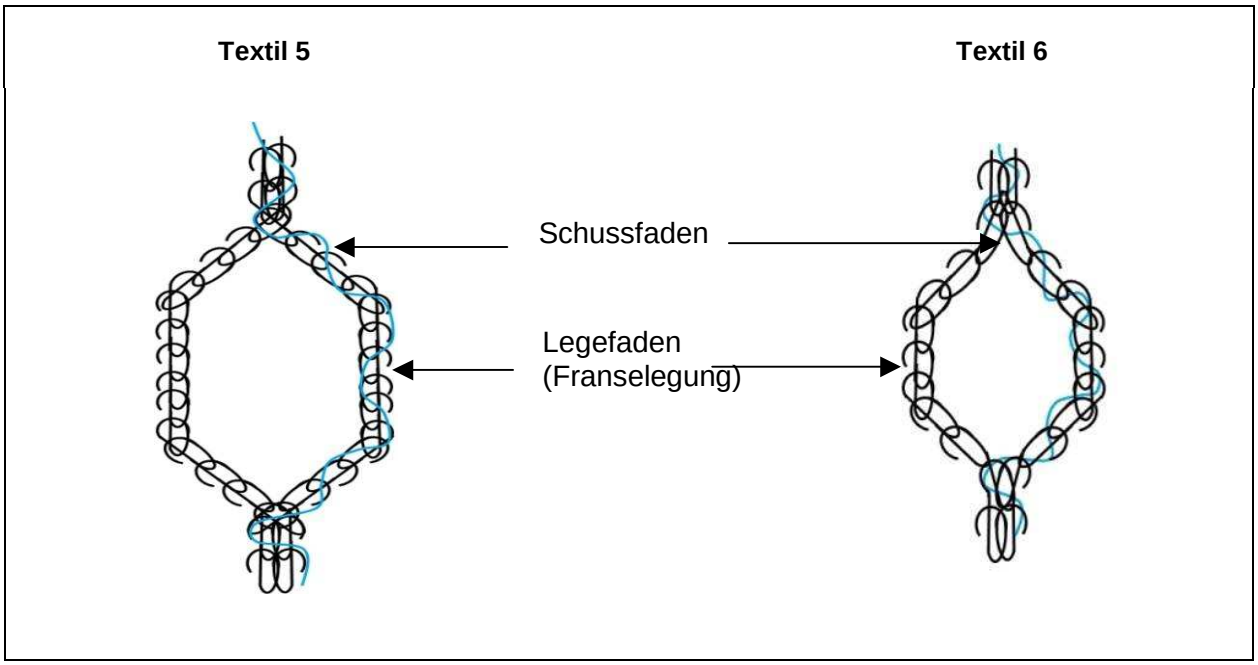


Abb. 2.10: Bindungen der Abstandsgewirke

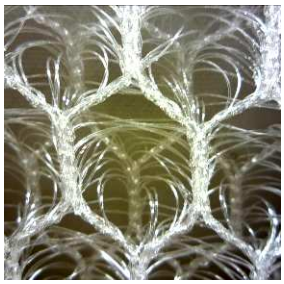
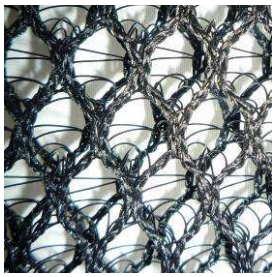
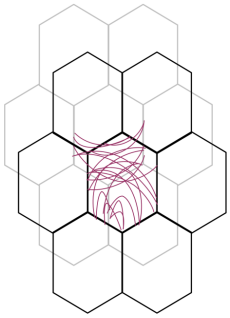
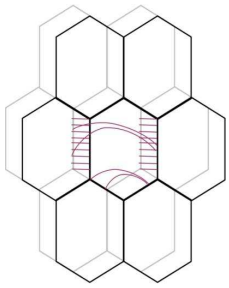
Während die Waben der textilen Oberflächen von Material 5 versetzt zueinander angeordnet waren, waren die textilen Flächen von Material 6 symmetrisch angeordnet, so dass die Waben der Flächen sich nahezu gegenüberliegen. Dementsprechend ergab sich ein unterschiedlicher Verlauf der Polfäden zwischen den Flächen. Während sich die Polfäden des Textils 5 überkreuzten, verliefen die Polfäden von Textil 6 eher parallel auf die gegenüberliegende Wabe.

Anhand der Zahl der Waben, welche sich aus der Anzahl der Waben auf 100 mm in Längsrichtung, multipliziert mit der Zahl der Waben auf 100 mm in Querrichtung ergab, ließen sich die beiden Abstandsgewirke deutlich von einander unterscheiden. Die

Größe der Waben und somit auch die Zahl der Waben ermittelt auf 1 m² wurden maßgeblich von der Bindung, speziell der Zahl der Maschen, bestimmt. Da die Waben von Textil 5 aus mehr Maschen hergestellt waren, waren die Waben von eben diesem doppelt so groß wie die Waben des Textils 6.

Abschließend unterschieden sich die Abstandsgewirke noch durch das verwendete Fasermaterial. Material 5 bestand sowohl in den textilen Flächen als auch im Polfaden aus PET-Monofilamenten. Für das Material 6 hingegen wurde für die Flächen ein PET-Multifilament verwendet.

In nachfolgender Tabelle 2.4 sind die strukturellen Parameter der Abstandsgewirke aufgeführt und veranschaulicht.

Material / Parameter	Textil 5 	Textil 6 
Faserstoffart	Nur Monofilamente	Multifilamente in Franselegung Monofilamente (in Polfaden und Schuss)
Materialdicke [mm]	13	10
Wabenanzahl / m²	9.900	2.800
Wabengröße (Länge/Breite) [mm]	25 / 14	15 / 7
Porengröße [mm²]	180	60
Wabenanordnung und Polfadenverlauf		

Tab. 2.4: Strukturparameter der Abstandsgewirke

2.4 Ergebnisse der textilphysikalischen Prüfungen

In Tabelle 2.5 sind die Ergebnisse der textilphysikalischen Untersuchungen dargestellt. Die jeweiligen Kennwerte werden anschließend erläutert.

Material / Parameter	Textil 1	Textil 2	Textil 3	Textil 4	Textil 5	Textil 6
Flächengewicht [g/m²]	176	309	178	161	377	618
Luftdurchlässigkeit [ml/min·dm²]	6.355	3.532	5.764	6.603	6.907	4.210
Wasseraufnahme [%]	84	69	77	110	29	39
Wasserabgabe [%]	75	66	70	76	84	63
Berst-Wölbversuch						
Berstdruck [kPa]	132	285	157	153	149	463
Wölbhöhe [mm]	52	56	50	51	37	35
Zug-Dehnungs-Eigenschaften:						
Zughöchstkraft [N]	131/183	270/315	182/255	196/219	329/468	959/247
Höchstzugkraft-dehnung [%]	109/190	150/149	110/145	139/184	56/319	32/619

Tab. 2.5: Textilphysikalische Parameter

2.4.1 Flächengewicht

In der Abbildung 2.11 sind die Flächengewichte der untersuchten textilen Materialien wiedergegeben.

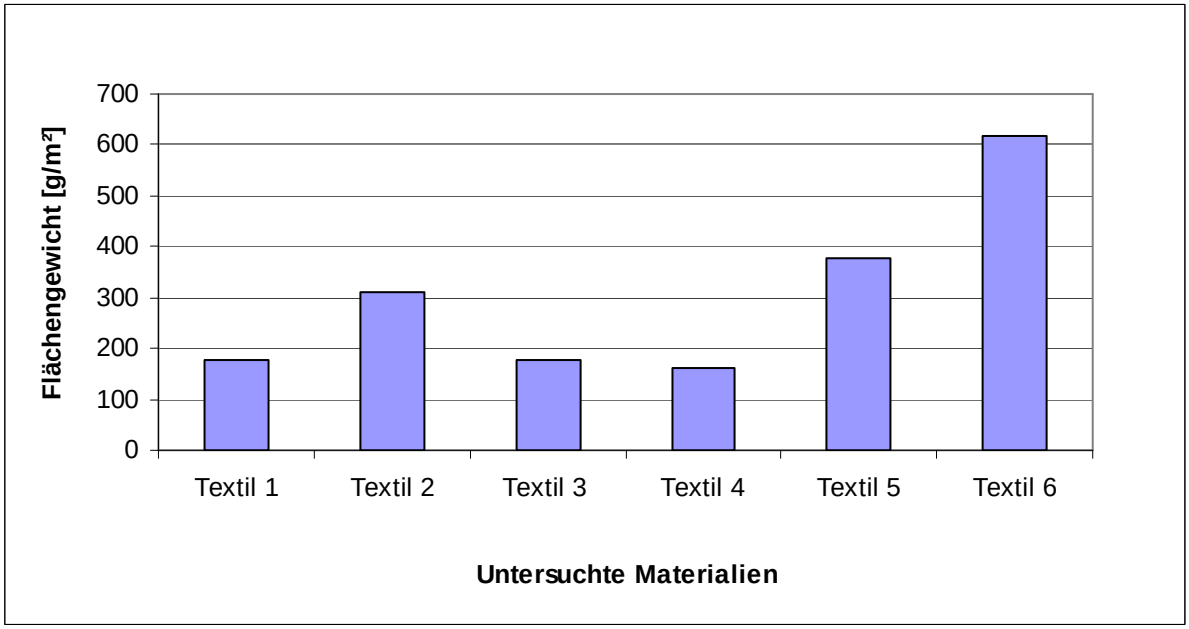


Abb. 2.11: Ergebnisse der Flächengewichte

Die Noppengewirke (Textil 1-4) unterschieden sich untereinander hinsichtlich ihres Flächengewichts vergleichsweise wenig. Lediglich das Textil 2 wies mit 309 g ein durchschnittlich um 80 % höheres Flächengewicht auf als die übrigen Textilien dieser Gruppe. Dies war auf den höheren Materialeinsatz aufgrund der Bindung des Textils zurückzuführen. Die übrigen Noppengewirke (Textil 1, 3-4) zeigten annähernd gleiche Werte für das Flächengewicht, da sie auf demselben Rohmaterial basierten. Durch die Verformung des Materials (Tiefziehen) wurde hauptsächlich die Form der Noppen bestimmt, ohne großen Einfluss auf das Rohmaterial und Fadenanzahl zu haben. Die Abweichungen zwischen den Textilien ergaben sich vor allem aus der Probennahme. Das geringste Flächengewicht unter den Noppengewirken weist mit 161 g das Textil 4 auf.

Die Abstandsgewirke (Textil 5-6) wiesen deutlich höhere Flächengewichte auf als die Noppengewirke, wobei sie sich auch untereinander stark unterschieden. Ausschlaggebend hierfür war die Dreidimensionalität der Abstandsgewirke, d.h. die im Vergleich zu den zweidimensionalen Flächengebilden zusätzliche zweite Oberfläche und die Polfäden erhöhten das Gewicht.

Textil 6 war mit 618 g das schwerste Textil unter allen untersuchten: Die Flächenmasse von Textil 6 war mehr als 60 % höher als die von Textil 5, was durch die höhere Wabenanzahl des Materials zustande kam, und rund 100% höher als die Flächenmasse des schwersten Noppengewirkes (Textil 2).

2.4.2 Luftdurchlässigkeit und Porengröße

Im Folgenden wird auf die Luftdurchlässigkeit der untersuchten Textilen eingegangen, wobei ein Zusammenhang zur Porengröße aufgezeigt werden soll. Abbildung 2.12 stellt die Ergebnisse der Luftdurchlässigkeit der untersuchten Textilien dar.

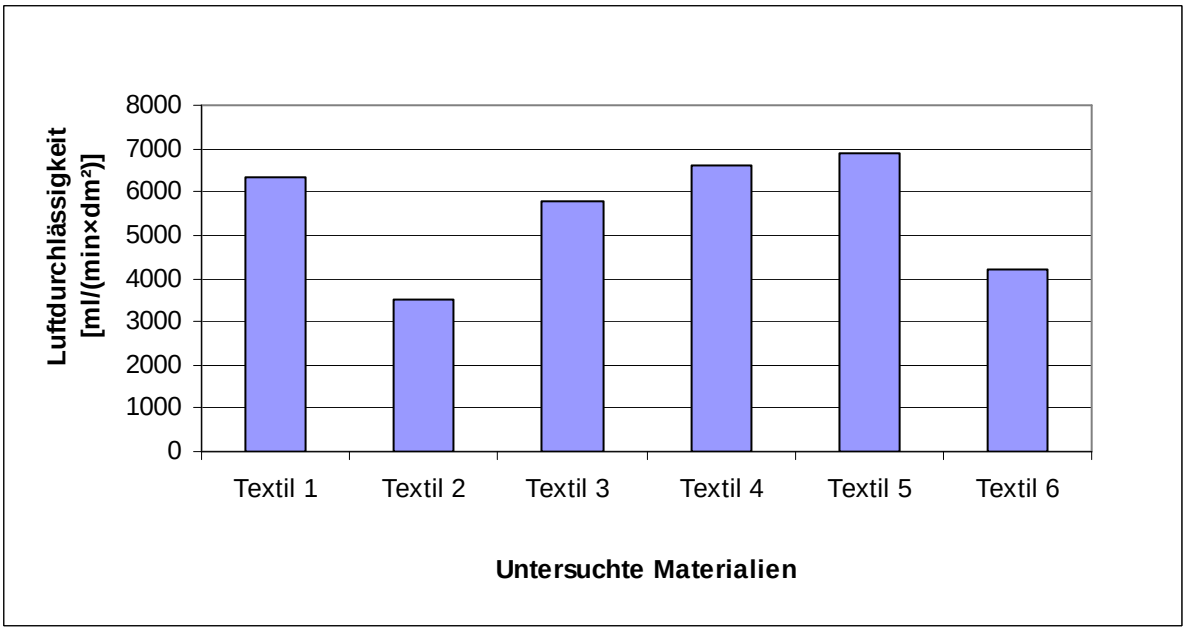


Abb. 2.12: Luftdurchlässigkeit der untersuchten Materialien

Aus Abbildung 2.12 ist zu erkennen, dass die homogene und geschlossene Oberfläche von Textil 2 dessen Luftdurchlässigkeit im Vergleich zu den Textilien 1, 3 und 4 um bis zu 47 % reduzierte. Bei sonst gleicher Noppenstruktur wies Textil 1 im Gegensatz zu diesem, aufgrund seines durchbrochenen Musters mit 6.355 ml/(min·dm²) eine viel höhere Luftdurchlässigkeit auf als Textil 2. Textil 3 zeigte im Vergleich zu Textil 1 eine geringere Luftdurchlässigkeit, wobei die stärkere Verformung von Textil 1 und die damit zusammenhängenden größeren Öffnungen (vgl. Tabelle 2.3, Kap. 2.3.1) sich demnach, wenn auch nur geringfügig, auf die Luftdurchlässigkeit auswirkten. Textil 4 zeigte unter den Noppengewirken mit rund 6.600 ml/(min·dm²) die höchste Luftdurchlässigkeit, was sich vor allem durch die gleichmäßigere Noppenstruktur begründen ließ.

Die insgesamt höchste Luftdurchlässigkeit besaß mit fast 7.000 ml/(min·dm²) Textil 5, da es bedingt durch seine großen Waben am offensten gestaltet ist. Dahingegen weist Textil 6 mit einer Luftdurchlässigkeit von 4.210 ml/(min·dm²), aufgrund dessen dichterer Wabenstruktur die zweitschlechteste Luftdurchlässigkeit von allen auf. Textil 2 besaß aufgrund der geringen Porengröße die niedrigste Luftdurchlässigkeit.

Werden Luftdurchlässigkeit und Porengröße gegenübergestellt, lässt sich folgender Zusammenhang erkennen (Abb. 2.13): Mit zunehmender Größe der Durchbrüche nimmt die Luftdurchlässigkeit des Materials zu. Jedoch erwiesen sich die größeren Noppen für die Prüfung der Luftdurchlässigkeit mit dem Prüfgerät FX3300 als hinderlich, da diese von dem Prüfkopf teilweise zusammengedrückt wurden. Dies zeigte auch der Vergleich von Textil 1 und 4: Denn während Textil 1 die größten Durchbrüche von 3,63 mm² aufwies, besaß es nur die zweitgrößte Luftdurchlässigkeit nach Textil 4. Die Messunsicherheiten nahmen demnach mit geringerer Noppenhöhe ab.

In Abbildung 2.13 ist der Zusammenhang zwischen Porengrößen und Luftdurchlässigkeit graphisch wiedergegeben.

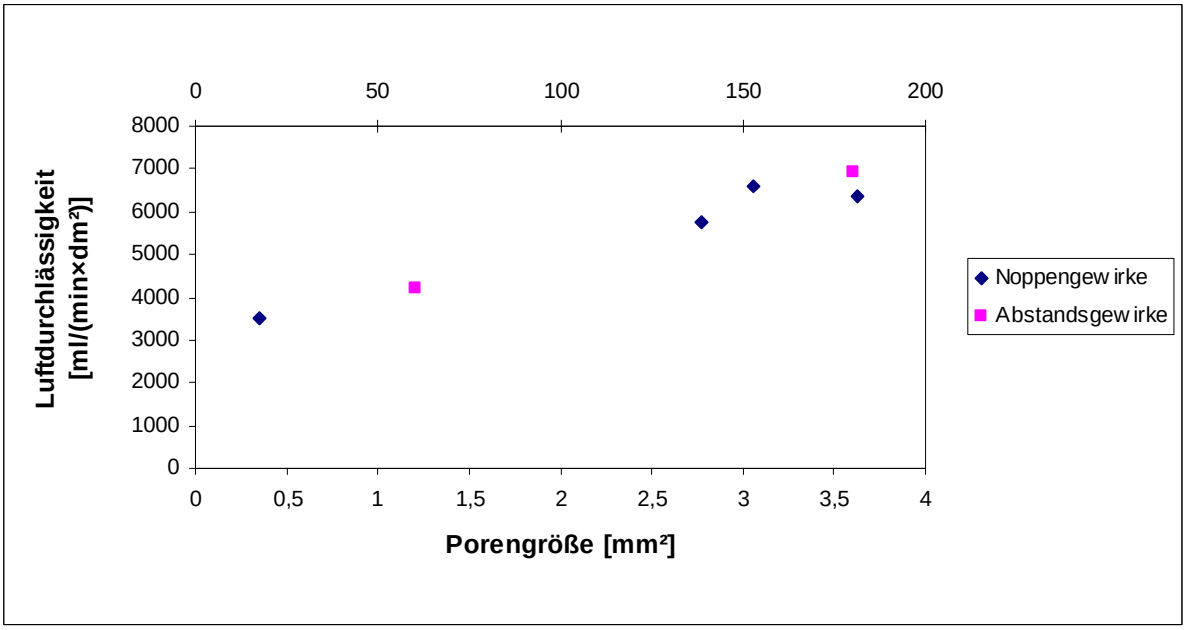


Abb. 2.13: Zusammenhang von Luftdurchlässigkeit und Porengröße

2.4.3 Wasseraufnahme und Wasserabgabe

Um eine Aussage darüber treffen zu können, wie wasseraufnahmefähig ein Textil ist und wie gut es dieses wieder abgibt, wurde die Wasseraufnahme nach DIN 53 923 durchgeführt und die Wasserabgabe anhand einer entwickelten Vorrichtung ermittelt.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in nachfolgender Abbildung 2.14 dargestellt.

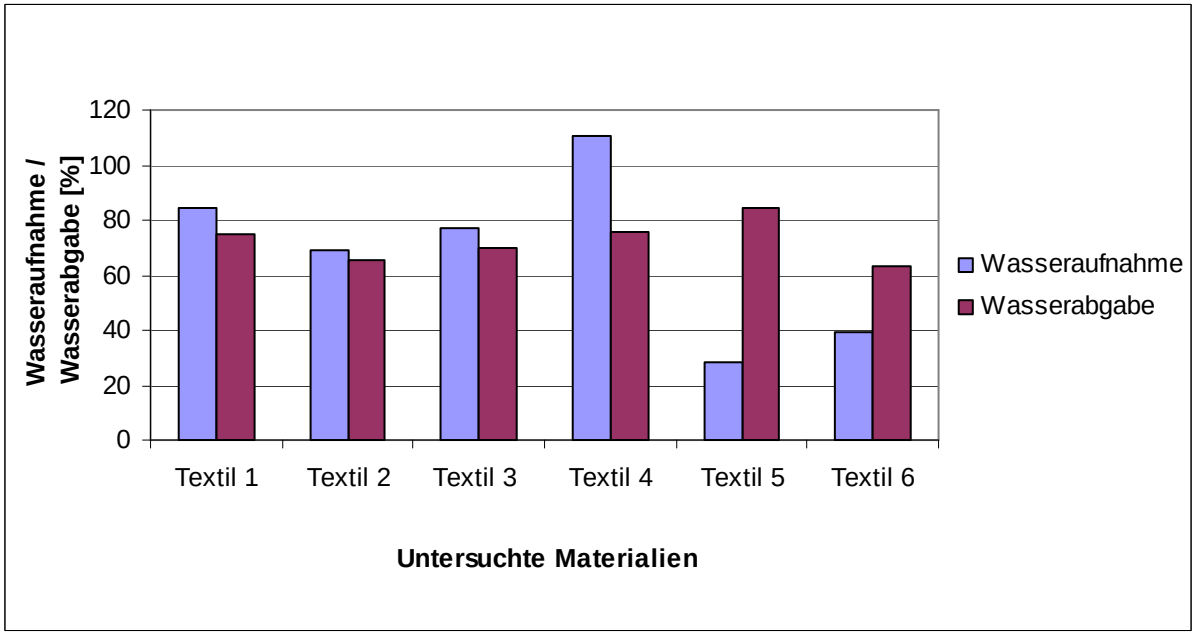


Abb. 2.14: Ergebnisse der Wasseraufnahme und Wasserabgabe

Wie aus der Abbildung 2.14 zu entnehmen ist, war das Wasseraufnahmevermögen der Noppengewirke (Textil 1-4) höher als das der Abstandsgewirke (Textil 5-6). Ursache hierfür war neben der Oberfläche und Struktur des Materials, besonders die Kapillarwirkung der Fasern. Die Multifilamente der Noppengewirke bewirkten aufgrund der Kapillarkräfte zwischen den einzelnen Filamenten eine höhere Aufnahmekapazität, wodurch das Wasser in den Zwischenräumen der Multifilamente eingelagert wurde.

Die geringste Aufnahmekapazität unter allen untersuchten Textilien besaß mit 29 % das Textil 5. Da es die offenste Struktur aufwies und vollständig aus Monofilamenten bestand, welche die Tropfenansammlung bzw. Wassereinlagerung behindern, wurde die Wasseraufnahme beeinträchtigt. In diesem Zusammenhang besaß es ein hohes Wasserabgabevermögen - mit über 80 % das höchste von allen. Im Gegensatz dazu konnte Textil 6 aufgrund der verarbeiteten Multifilamente in den textilen Flächen und der dichteren Wabenstruktur mehr Wasser aufnehmen und behalten.

Mit 110 % wies Textil 4 die höchste Wasseraufnahme von allen untersuchten Textilien auf. Die gleichmäßige Poren- und Noppenstruktur wirkten sich hierbei positiv auf die Wasseraufnahme aus, da das Wasser sich in den Poren gut halten konnte. Gleichzeitig zeigte es mit 76 % ein gutes Wasserabgabevermögen, d.h. ein Großteil des aufgenommenen Wassers wurde wieder abgegeben. Die homogene Struktur von Textil 2 und die großen Durchbrüche der Textilien 1 und 3 wirkten sich hingegen ungünstig

auf die Wasseraufnahme aus. Das Textil 2 besaß mit 66 % die geringste Wasserabgabe unter den Noppengewirken.

2.4.4 Berstfestigkeit

Die Textilien wurden zur Beurteilung ihrer mechanischen Belastbarkeit mittels Berst- und Wölbversuch getestet. Abbildung 2.15 stellt die Ergebnisse für Berstfestigkeit und Wölbhöhe gegenüber.

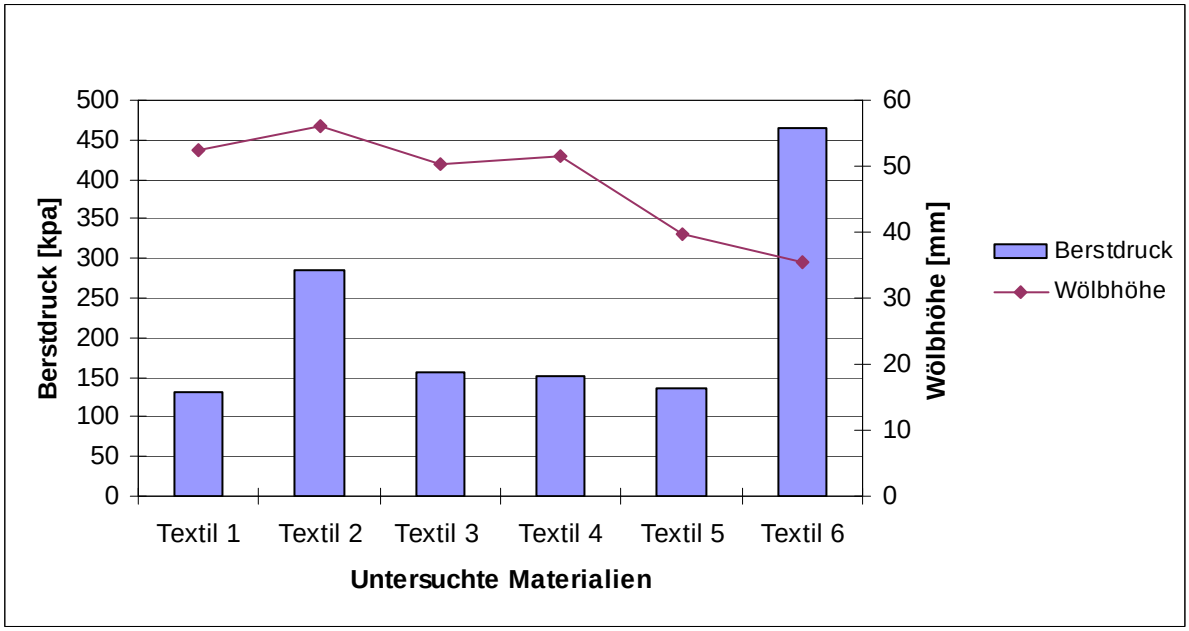


Abb. 2.15: Ergebnisse des Berst- und Wölbversuchs

Es wird deutlich, dass für die untersuchten Noppengewirke (Textil 1-4) bis zum Bersten der Textilproben ein stärkeres Wölben erforderlich war als es für die Abstandsgewirke (Textil 5-6) der Fall ist. Dabei weist Textil 2 mit 56 mm die größte Wölbhöhe auf, wie auch den höchsten Berstdruck (285 kPa). Textil 2 war, bedingt durch dessen Bindungsstruktur dehnbarer als die übrigen Noppengewirke.

Demzufolge musste eine höhere Kraft aufgewendet und das Textil weiter gewölbt werden, um es zum Bersten zu bringen. Die übrigen Noppengewirke 1, 3 und 4 besaßen aufgrund ihres gleichen Rohmaterials eine ähnliche Berstfestigkeit.

Textil 6 zeigte mit 463 kPa den höchsten Berstdruck aller untersuchten Materialien bei der gleichzeitig geringsten Wölbhöhe von 35 mm, d.h. obwohl sich das Textil nicht stark aufwölben ließ, musste eine hohe Kraft bis zum Bersten aufgewendet werden. Im Gegensatz hierzu borst Textil 5 schon unter einem Druck von 149 kPa, wobei es eine größere Wölbhöhe erreichte als Textil 6.

2.4.5 Zugfestigkeit

In Abbildung 2.16 ist die für das Befestigen der Nebelfängertextilien in der Nebelfängerkonstruktion bedeutsame Zugfestigkeit der untersuchten Materialien in Längs- und Querrichtung dargestellt.

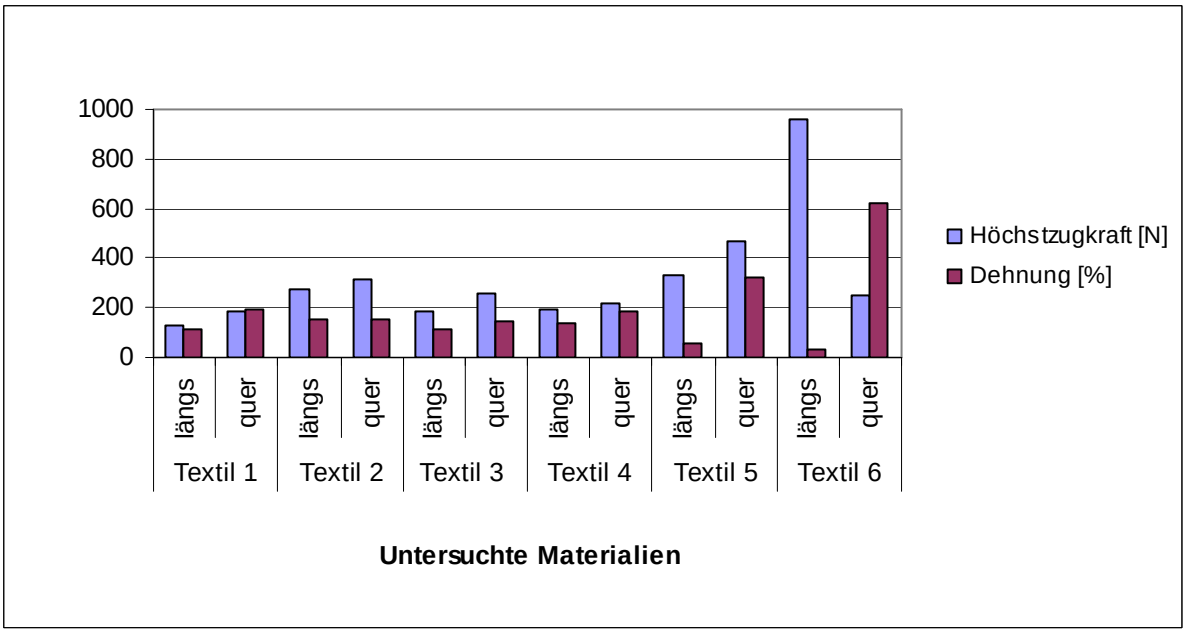


Abb. 2.16: Ergebnisse des Zugversuches

Allgemein wiesen die untersuchten Abstandsgewirke im Vergleich zu den Noppengewirken deutlich höhere Zugfestigkeiten auf. Der Grund hierfür war in dem höheren Materialeinsatz, bedingt durch die Dreidimensionalität der Abstandsgewirke und deren Herstellungsart zu sehen. D.h. die Bindungen der Kettengewirke waren stabiler bzw. weniger elastisch als die der Kuliergewirke. Dabei war die Festigkeit der Textilproben stark von der untersuchten Materialrichtung abhängig.

Da in Querrichtung die einzelnen Waben nacheinander auseinander gezogen werden bis zum eigentlichen Bruch der Probe, kann das Verhalten hierbei nicht als eine echte Dehnung angesehen werden.

Innerhalb der Noppengewirke besaß Textil 2 sowohl in Längs- als auch in Querrichtung die größte Höchstzugkraft, wobei Textil 1 hingegen die geringste Höchstzugkraft aufwies. Generell können die Noppengewirke in Querrichtung als zugfester angesehen werden. Hierbei waren die Unterschiede in Längs- und Querrichtung hinsichtlich Zugfestigkeit bei Textil 4 am geringsten.

2.5 Ergebnisse der Grundlagentests in der Nebelkammer

Im Rahmen der Untersuchungen wurden diverse Versuche zur Ermittlung der zu gewinnenden Wassermenge von Textilien durchgeführt. Hierbei wurden durchschnittliche Wassermengen ermittelt, der Einfluss von strukturellen und textilphysikalischen Parametern auf die Wassermenge analysiert und darüber hinaus, längerfristige Versuche anhand ausgewählter Textilien vorgenommen.

2.5.1 Gewonnene Wassermengen in Screening-Versuchen

Zunächst soll die durchschnittlich gewonnene Wassermenge der untersuchten Textilien veranschaulicht werden. Aus den durchgeführten Screening-Versuchen wurden in Abhängigkeit der Materialrichtungen hierfür die Mittelwerte gebildet, welche in Abbildung 2.17 dargestellt sind. Dargestellt sind die durchschnittlich gewonnenen Wassermengen der untersuchten Materialien 1 bis 6 und des Vergleichsmaterials 1 (Folienbändchennetz) gegenüber.

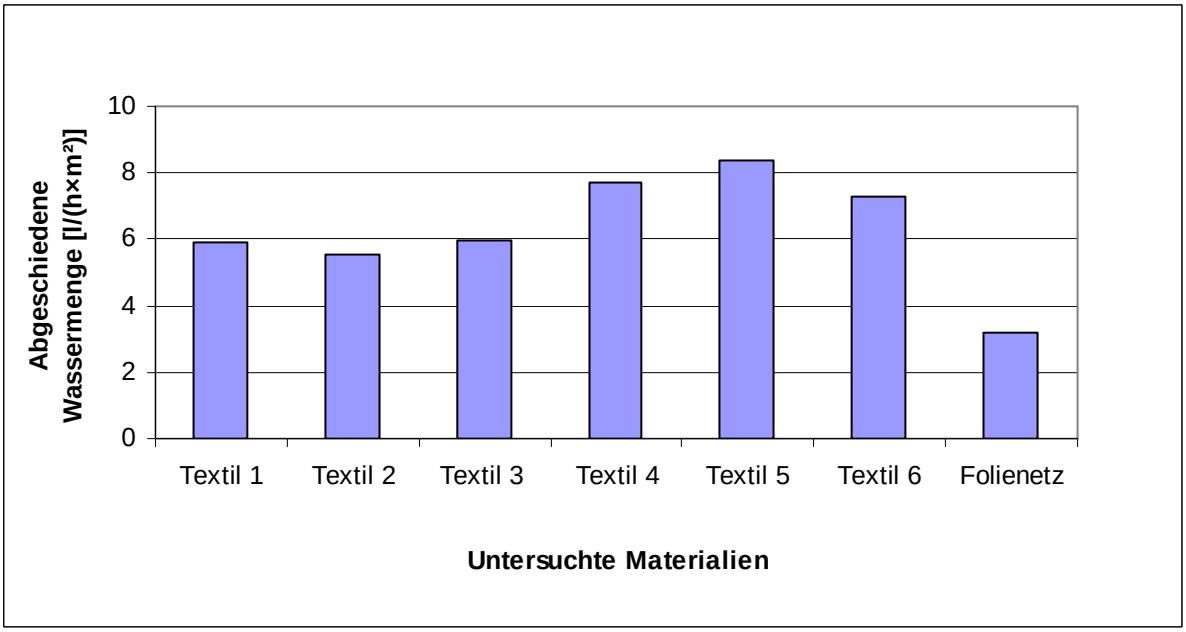


Abb. 2.17: Durchschnittlich gewonnene Wassermenge aller Textilien

Während die bisher zum Einsatz kommenden Foliennetze lediglich ca. drei Liter Wasser je Stunde und Quadratmeter abschieden, konnten mit den dreidimensionalen Textilien und den Noppengewirken wesentlich größere Wassermengen gewonnen werden.

Die Versuche zeigten, dass die mit den Abstandsgewirken zu gewinnende Wassermenge höher war als die der Noppengewirke. Dabei schied Textil 5 mit

durchschnittlich 8,4 l/(h·m²) die größte Menge Wasser von allen untersuchten Textilien ab. Im Vergleich zu den Foliennetzen konnte damit rund 180% mehr Wasser gewonnen werden.

Innerhalb der Gruppe der Noppengewirke konnte mit Textil 4 das meiste Wasser gewonnen werden, wobei es mit 7,7 l/(h·m²) im Durchschnitt rund 8 % weniger Wasser abschied als Textil 5 und ca. 5 % mehr als Textil 6. Mit Textil 2 konnte unter allen Materialien mit 5,4 l/(h·m²) das wenigste Wasser gewonnen werden.

2.5.2 Einfluss der Textilstruktur auf die Wassermenge

Nachdem die durchschnittlich gewonnene Wassermenge der untersuchten Materialien bestimmt war, wurde im Folgenden der Einfluss der Textilstruktur auf die Abscheidung der Wassermenge näher betrachtet.

Hierfür wurde der Einfluss der Textilausrichtung untersucht. Bezogen auf die Noppengewirke bedeutete dies, dass sie jeweils in Längsrichtung und in Querrichtung untersucht wurden, wobei senkrecht verlaufende Maschenstäbchen als Längsrichtung (entspricht dem regulären, horizontalen Maschenverlauf) und waagerecht verlaufende Maschenstäbchen als Querrichtung (senkrechter Maschenverlauf) definiert wurden. Die Abstandsgewirke wurden ebenso in zwei verschiedenen Materialrichtungen getestet: Die Längsrichtung der Abstandsgewirke entsprach dabei dem senkrechten Fadenlauf, mit senkrecht ausgerichteten Waben, die Wabenkanten verliefen dabei senkrecht und die Wabenspitzen waren vertikal ausgerichtet. In Querrichtung waren die Waben der Abstandsgewirke dementsprechend waagerecht angeordnet.

Aus dem nachfolgenden Diagramm (Abb. 2.18) wird der Einfluss der Materialausrichtung auf die abgeschiedene Wassermenge deutlich.

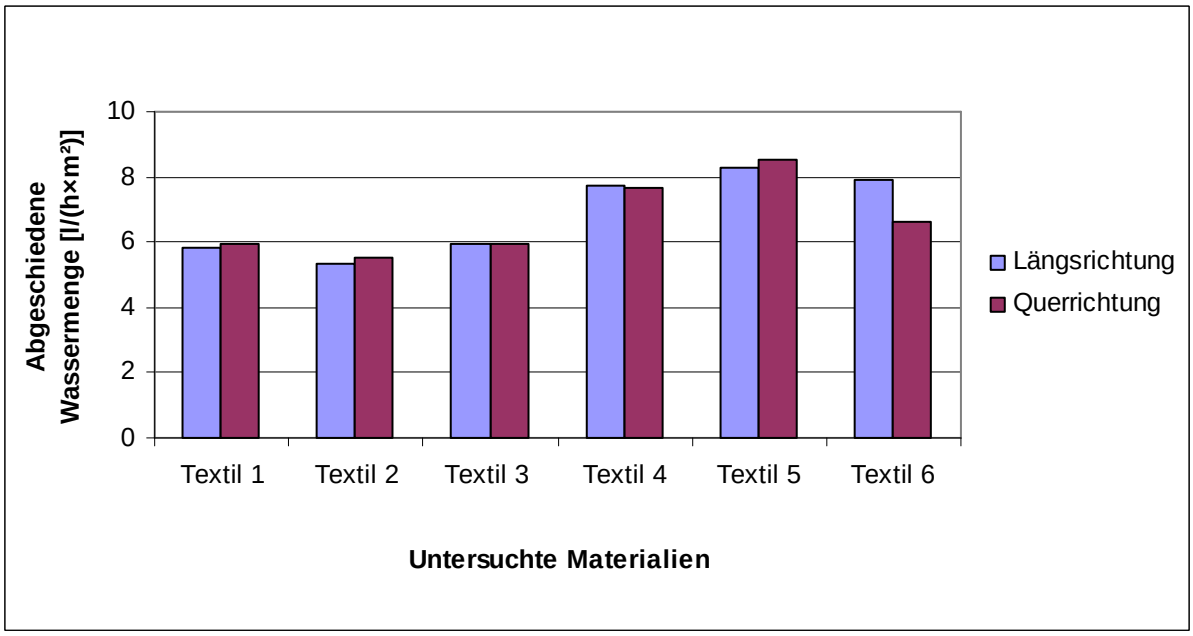


Abb. 2.18: Gewonnene Wassermenge unterschiedlicher Materialrichtungen

Wie aus Abbildung 2.18 ersichtlich wird, beeinflusste die Materialausrichtung die abgeschiedene Wassermenge. So schied das Abstandstextil 6 beispielsweise in Längsrichtung mit 7,9 l/(h·m²) und damit rund 16 % mehr Wasser ab als in Querrichtung mit 6,6 l/(h·m²). Demnach wirkte sich die senkrechte Wabenanordnung bei Textil 6 positiv auf die Wassermenge aus, wohingegen sich für Textil 5 nur geringfügige Unterschiede ergaben. Bei den Noppengewirken wurde der Einfluss der Materialausrichtung auf die abgeschiedene Wassermenge im Vergleich zu Textil 5 weniger deutlich.

Des Weiteren wurde für die Textilien 1 bis 4 der Einfluss der Noppenrichtung zur Nebelströmung betrachtet. Dabei waren die Noppen der Textilien entweder der Nebelströmung entgegen gerichtet (als „Noppen vorn“ bezeichnet) oder von ihr weg (“Noppen hinten“) gerichtet.

Aus Abbildung 2.19 lässt sich ein Einfluss der Noppenrichtung auf die gewonnene Wassermenge feststellen. Im Allgemeinen ließ sich mit zur Nebelströmung hin gerichteten Noppen (Noppen vorn) durchschnittlich rund 9 % mehr Wasser gewinnen als mit entgegen der Nebelströmung gerichteten Noppen.

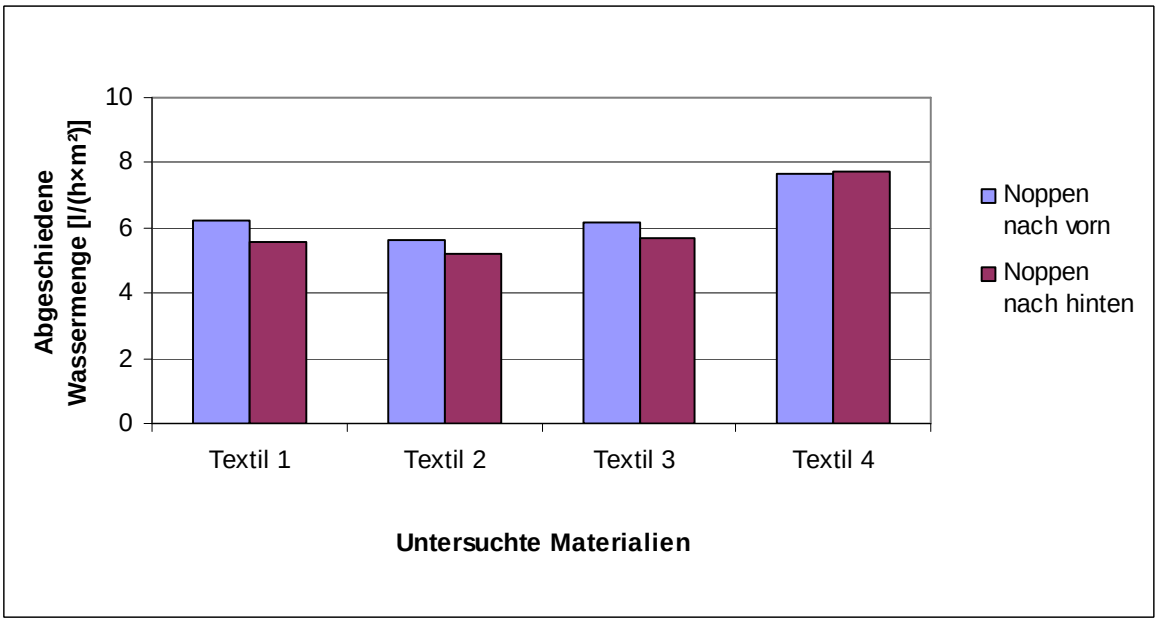


Abb. 2.19: Einfluss der Noppenrichtung auf die gewonnene Wassermenge

Die abgeschiedene Wassermenge des zweidimensionalen Rohmaterials betrug rund 6 l/(h·m²). Verglichen mit dem Rohmaterial konnte nur mit Textil 4 mehr Wasser gewonnen werden. Die Textilien 1 und 3 schieden hingegen annähernd gleich viel Wasser wie das Rohmaterial ab.

Wie groß der Einfluss der Noppen der Textilien 1 bis 4 im Vergleich zum unverformten Rohmaterial der Noppengewirke generell war, wird nachfolgend erläutert und in Abbildung 2.20 dargestellt werden. Dargestellt ist die Wassermenge in Abhängigkeit der Höhe der zur Nebelströmung ausgerichteten Noppen.

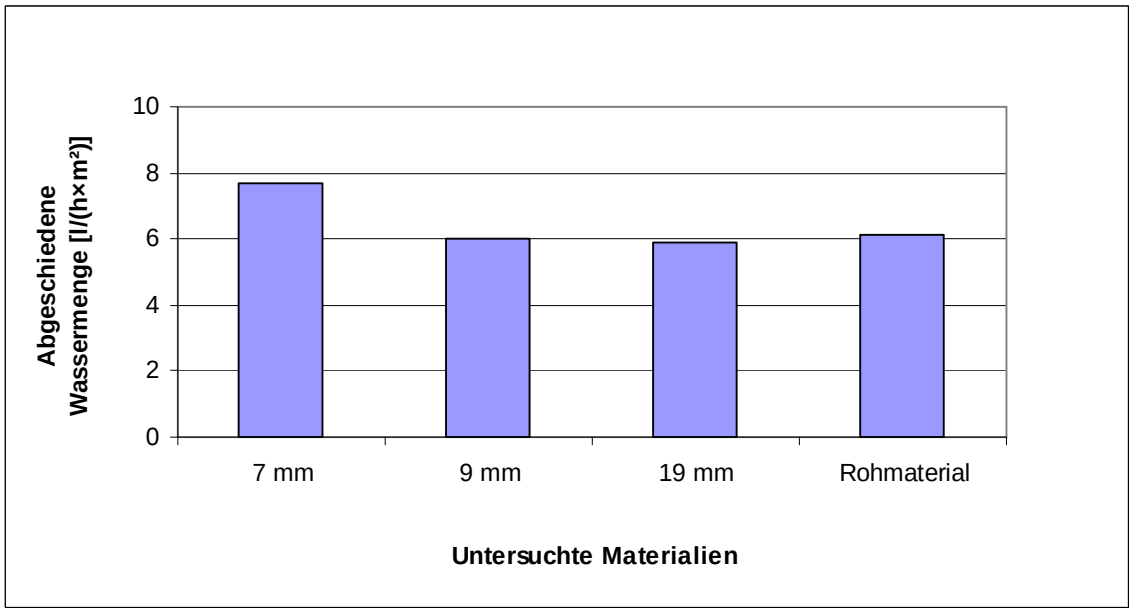


Abb. 2.20: Einfluss der Noppenhöhe auf die gewonnene Wassermenge

Anhand der unterschiedlichen Noppenhöhen ließ sich eine günstige Wirkung von geringerer Noppenhöhe auf die gewonnene Wassermenge feststellen (Abb. 2.20): Mit der der geringsten Noppenhöhe ließ sich das meiste Wasser abschieden (fast 30 % mehr als das Rohmaterial). Zu große Verformungen hingegen scheinen sich negativ auf die gewonnene Wassermenge auszuwirken, da diese dem hindurchströmenden Nebel aufgrund der großen Durchbrüche, vor allem an den Noppenflächen, weniger Fläche zum Abscheiden bietet und stattdessen mehr Nebel durch die Öffnungen hindurch strömen lässt.

Abschließend soll der Einfluss der Porengröße auf die Wassermenge analysiert werden. Abbildung 2.21 zeigt, dass bei sonst gleichen Strukturparametern, die durchbrochene Struktur von Textil 1 höhere zu gewinnende Wassermenge ermöglichte als die homogene Struktur von Textil 2 (rund 9 %). Textil 4 weiste mit relativ großen Durchbrüchen die höchste Wassermenge unter den Noppengewirken auf. Der Vergleich von Textil 5 und 6 belegt ebenfalls den Zusammenhang von zunehmender Wassermenge zu steigender Porengröße: Textil 5 mit doppelt so großen Poren wie Textil 6 scheidete ca. 13 % mehr Wasser ab (Abb. 2.22).

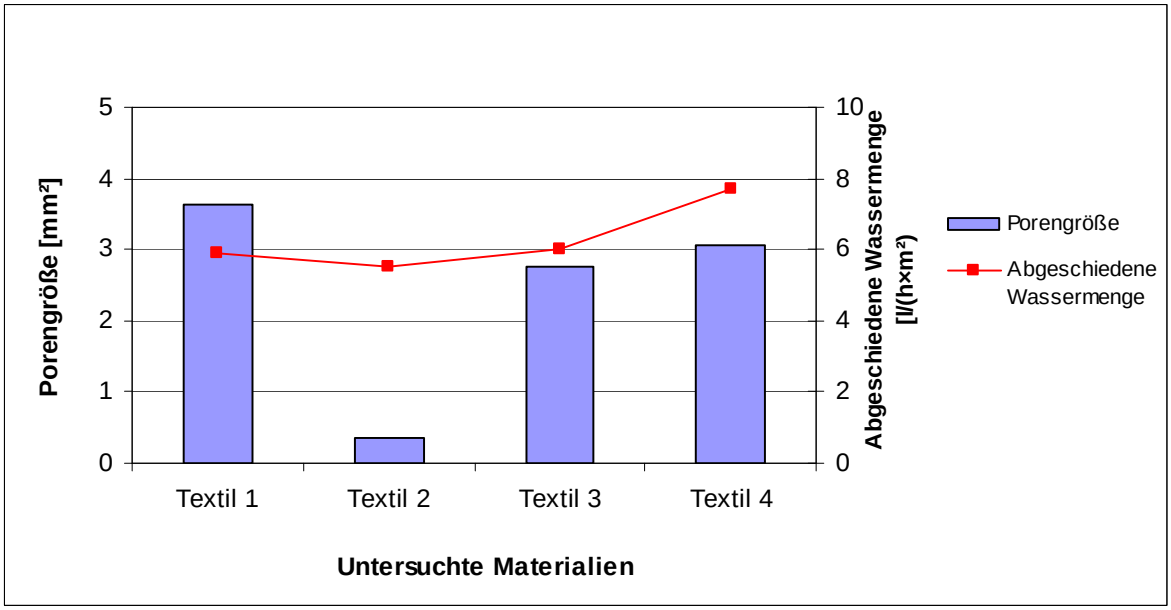


Abb. 2.21: Einfluss der Porengröße der Noppengewirke auf die gewonnene Wassermenge

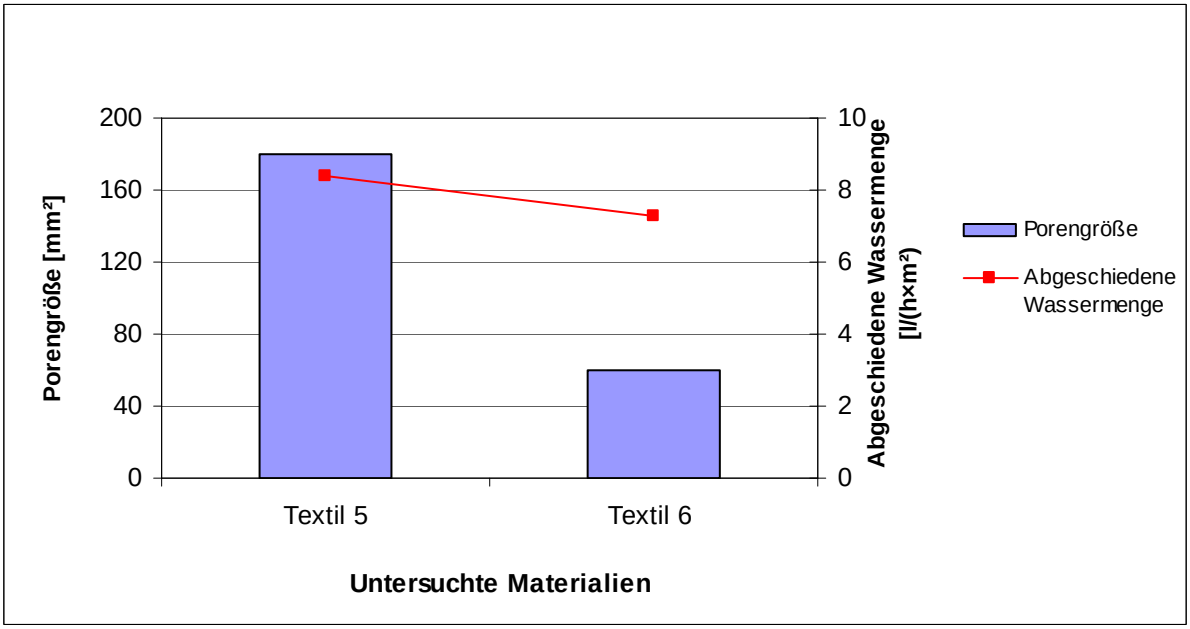


Abb. 2.22: Einfluss der Porengröße der Abstandsgewirke auf die gewonnene Wassermenge

2.5.3 Einfluss textilphysikalischer Parameter auf die Wassermenge

Nachdem die verwendeten Textilien auf ihre textilphysikalischen Eigenschaften und ihre Wasserabscheidung aus dem Nebel untersucht wurden, sollten nunmehr Zusammenhänge aus diesen aufgezeigt werden. Im Folgenden soll daher auf das Wasseraufnahme und -abgabeverhalten sowie die Luftdurchlässigkeit bzw. Porengröße und deren Einfluss auf die gewinnbare Wassermenge eingegangen werden. Die Prüfverfahren können aus der Tabelle 2.1 (vgl. Kap. 2.2) entnommen werden.

Der Zusammenhang zwischen beiden Größen kann dadurch gewonnen werden, dass die gewinnbare bzw. abgeschiedene Wassermenge der untersuchten Textilien auf deren Wasseraufnahme und Wasserabgabe bezogen wird.

In Abbildung 2.23 wird der Einfluss des Wasserabscheideverhaltens (Wasseraufnahme und Wasserabgabe) der untersuchten Textilien auf die gewonnene Wassermenge dargestellt.

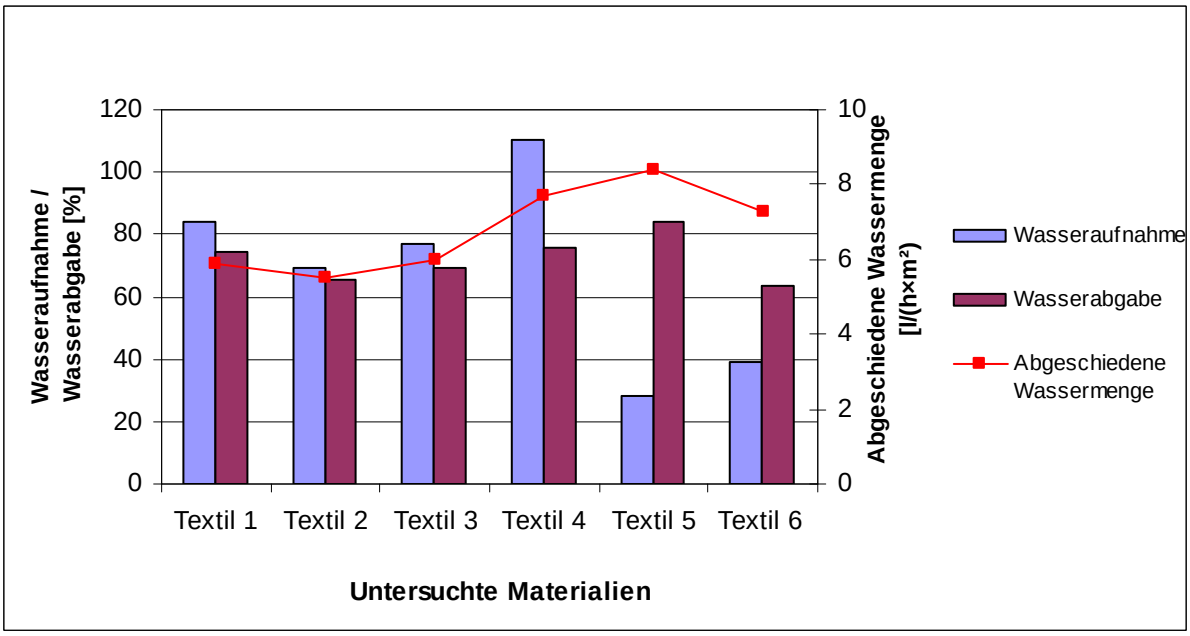


Abb. 2.23: Gewonnene Wassermenge in Bezug auf Wasseraufnahme und Wasserabgabe

Die Abbildung 2.23 zeigt, dass sich eine Kombination von geringer Wasseraufnahme und gutem Wasserabgabevermögen günstig auf die abgeschiedene, also gewonnene Wassermenge auswirkte. Die Wasseraufnahmen der Abstandsgewirke Textil 5 und 6 unterschieden sich um etwa 10 %, wobei diese im Vergleich zu den Noppengewirken 1 bis 4 sehr gering waren. Während Textil 5 ein sehr hohes Wasserabgabevermögen aufwies und daher in den Screening-Versuchen eine höhere Wassermenge erzielte, zeichnete sich Textil 6 durch ein geringeres Wasserabgabevermögen aus. Ein hohes Wasserabgabevermögen beeinflusst daher positiv die abgeschiedene Wassermenge.

Neben dem Wasserabscheideverhalten ist eine hohe Luftdurchlässigkeit für die zu gewinnende Wassermenge von Bedeutung wie die Ergebnisse in der Abbildung 2.24, aber auch die Wasserabscheidung von luftundurchlässigen Folien, welche in vorherigen Forschungsarbeiten untersucht wurden, zeigen.

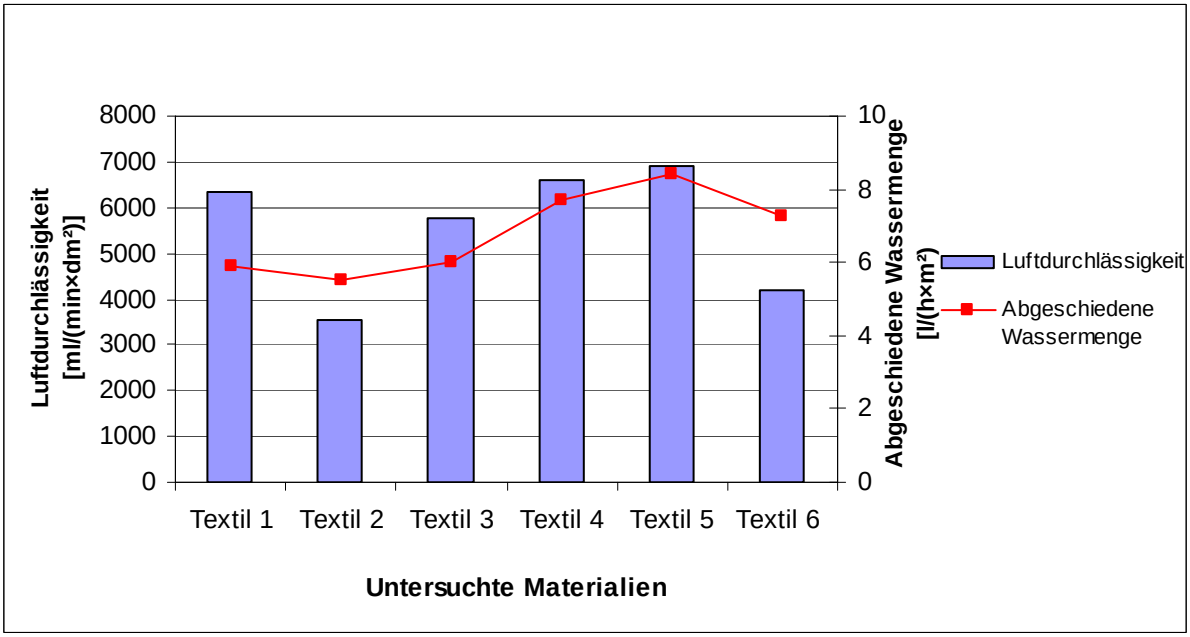


Abb. 2.24: Gewonnene Wassermenge in Bezug zur Luftdurchlässigkeit

Die Abbildung 2.24 zeigt, dass mit zunehmender Luftdurchlässigkeit der Textilien (bestimmt ausgehend von der Porengröße des Textils) die gewonnene Wassermenge zunahm. Der Effekt beruht darauf, dass die ankommende Nebelaerosole an luftundurchlässigen Materialien wie an einer Wand abprallen und somit nicht abgeschieden werden können. In diesem Zusammenhang gibt die Abbildung 2.24 zu erkennen, dass bei sonst gleichen Strukturparametern, die durchbrochene und luftdurchlässigere Struktur von Textil 1 eine höhere gewonnen Wassermenge bewirkte als Textil 2. Die abgeschiedene Wassermenge von Textil 4 bei einer Luftdurchlässigkeit von rund 6.600 ml/(min·dm²) war verglichen mit den übrigen Noppengewirken am größten. Textil 5 besaß die höchste Luftdurchlässigkeit von 6.907 ml/(min·dm²) und scheidete am meisten Wasser von allen ab. Im Vergleich dazu scheidete Textil 6 bei einer deutlich geringeren Luftdurchlässigkeit weniger Wasser ab als Textil 5.

Um den Einfluss der Luftdurchlässigkeit exakter definieren zu können, wurden Versuche an Textil 5 mit verschiedener Luftdurchlässigkeit durchgeführt. Hierzu wurde Textil 5 im unfixierten Zustand auf unterschiedliche Wabengrößen (ausgedrückt über die Wabenbreite) in der Benebelungskonstruktion getestet. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe können der Abbildung 2.25 entnommen werden.

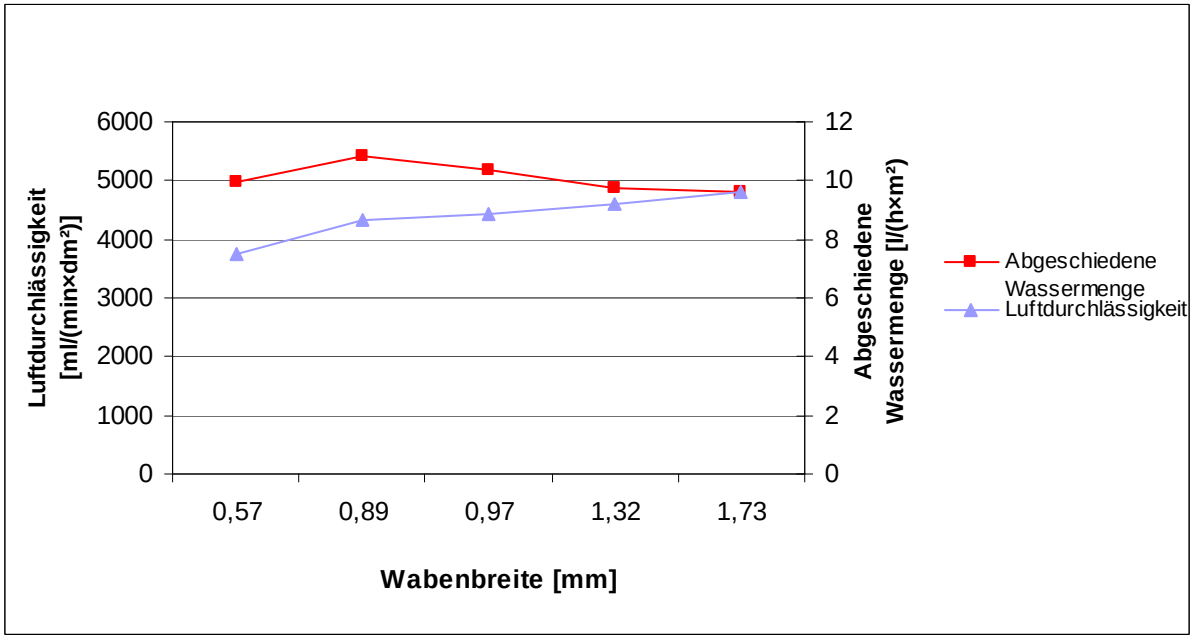


Abb. 2.25: Einfluss der Luftdurchlässigkeit auf die abgeschiedene Wassermenge an Textil 5

Wie aus Abbildung 2.25 ist zu erkennen ist, nimmt die abgeschiedene Wassermenge mit steigender Wabengröße und somit steigender Luftdurchlässigkeit zunächst zu. Das meiste Wasser konnte bei einer Wabenbreite von rund 9 mm bei einer Luftdurchlässigkeit von 4.323 ml/(min·dm²) gewonnen werden. Ab einer Luftdurchlässigkeit von durchschnittlich 4.423 ml/(min·dm²) (entspricht einer Wabengröße von etwa 10 mm) nahm die abgeschiedene Wassermenge jedoch ab, denn während mit steigender Luftdurchlässigkeit der Effekt des Abprallens der Aerosole abnimmt und mehr Nebelaerosole ans Textil gelangen, kann durch die größeren Öffnungen auch mehr Nebel hindurch ziehen und nicht abgeschieden werden.

Die Veränderung der Wabengrößen geht dabei mit einer abnehmenden Zahl der Waben, bezogen auf die Benebelungsfläche und somit mit einer Verringerung der Materialdicke einher, wodurch der Nebelströmung weniger Material zum Auftreffen und Abscheiden geboten wird.

2.5.4 Gewonnene Wassermenge im Dauerversuch

Anhand der bisher beschriebenen Versuche sollte die allgemeine Eignung der verwendeten Materialien für den langfristigen Einsatz als Nebelfänger ermittelt werden. Im Folgenden soll eine Aussage über die Praxistauglichkeit der in den bisherigen Versuchsreihen besten Textilien getroffen werden.

Dementsprechend wurden Dauerversuche an Abstandsgewirken (Textil 5 und 6) und dem Textil 4 mit Noppenstruktur, welche sich in den vorherigen Versuchen als effektivste erwiesen hatten, sowie zum Vergleich dazu, an einem bisher in der Praxis eingesetzten Standardmaterial in Form eines Folienbändchennetzes durchgeführt. Nachfolgend ist in Abbildung 2.26 die abgeschiedene Wassermenge der Textilien über acht Stunden dargestellt.

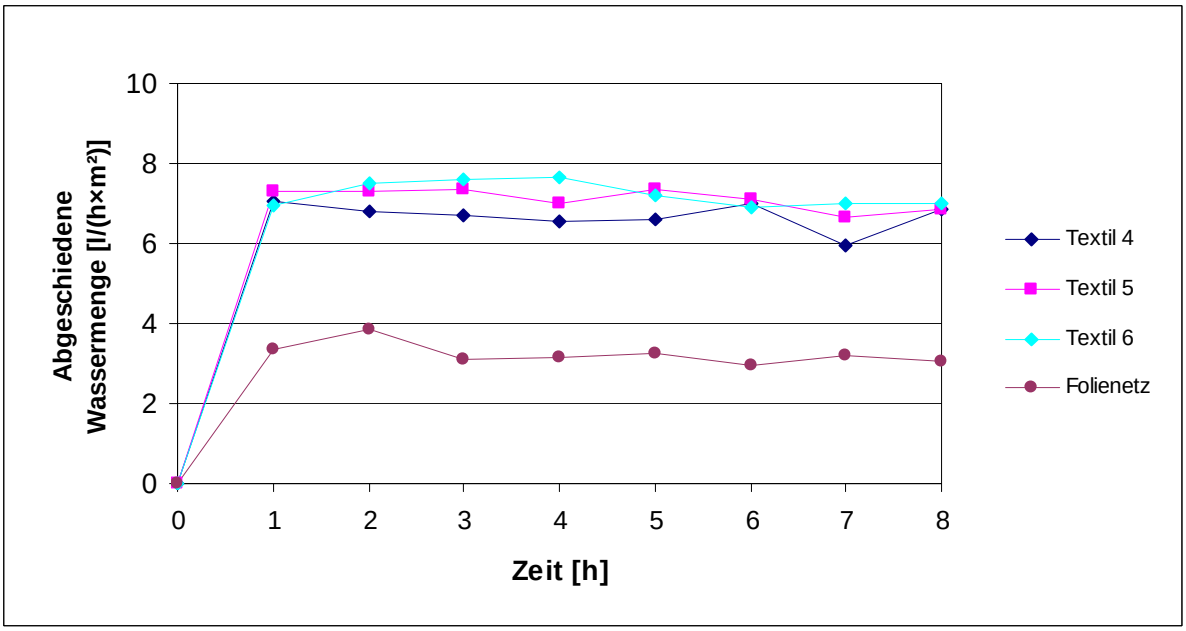


Abb. 2.26: Gewonnene Wassermenge im Dauerversuch

Wie die Abbildung 2.26 zeigt, sind die entwickelten Textilien 4, 5 und 6 geeignet über einen längeren Zeitraum Wasser zu gewinnen. Die untersuchten Abstandsgewirke 5 und 6 wiesen dabei höhere Werte für die abgeschiedene Wassermenge auf als das Noppengewirke Nr. 4. Es wird deutlich, dass die Textilien 5 und 6 einen annähernd gleichen Verlauf haben und sich mit durchschnittlich 7,1 und 7,2 l/h·m² nicht wesentlich von einander unterschieden. Textil 4 schied mit rund 6,7 l/hm² ca. 7 % weniger Wasser ab als die Abstandsgewirke. Verglichen mit den Kurzzeitversuchen (Screening-Versuche) schieden die untersuchten Textilien 4 und 5 weniger Wasser ab (rund 15%), Textil 6 erreichte hingegen annähernd die gleiche Wassermenge.

Zwar wiesen die untersuchten Textilien in ihrem Verlauf keine großen Schwankungen auf, es lässt sich aber ein leichter Abwärtstrend über die Versuchsdauer erkennen, welcher sich aus den Versuchbedingungen ergab: Im abgedichteten Versuchsraum stellte sich über die lange Dauer der Benebelung ein stehender Nebel zwischen dem Nebelgenerator und dem textilen Nebelfänger ein. Dieser behinderte die

nachkommende Nebelströmung, wodurch weniger Nebelaerosole am Textil ankamen. Bei den Screening-Versuchen trat dieser Effekt nicht so stark auf, da sich der Nebel zwischen den Versuchsreihen und während der Abtropfzeit auflöste.

In Abbildung 2.27 ist der Verlauf der gewonnenen Wassermenge in den ersten 60 Minuten des Versuches dargestellt.

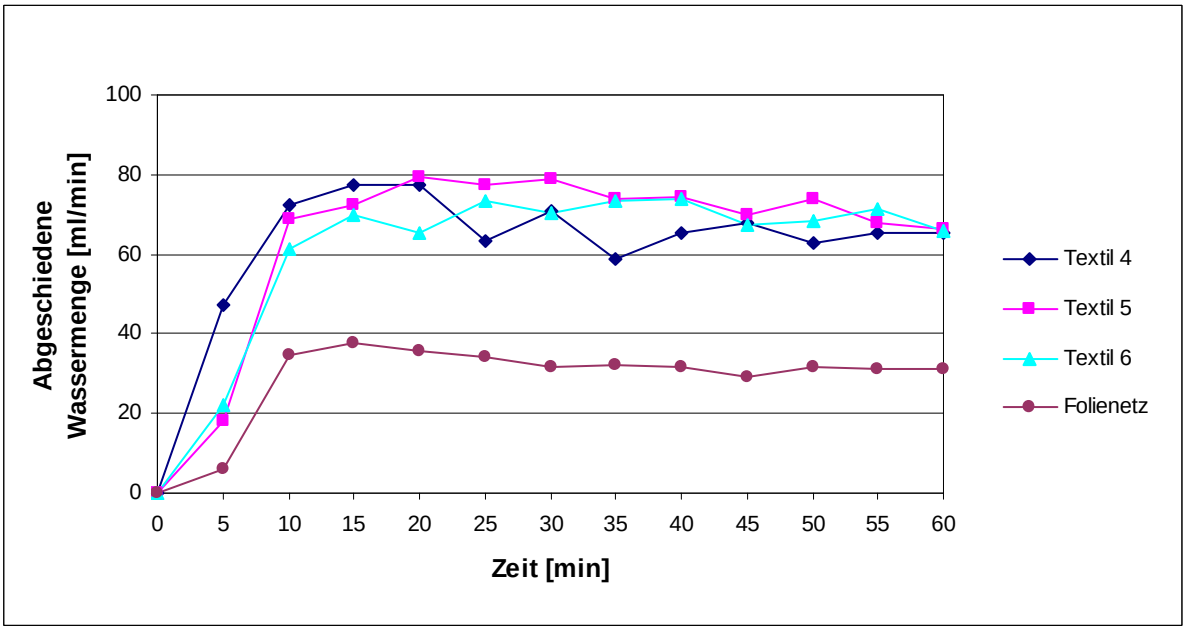


Abb. 2.27: Abscheideverhalten innerhalb der ersten Stunde

Der Verlauf ist durch einen anfänglichen Anstieg der Wassermenge gekennzeichnet. Ursache für diesen Anstieg sind die anfangs kleinen Nebeltropfen auf den texilen Fasern, die durch ständig nachkommenden Nebel zunächst zu großen Tropfen anwachsen müssen (Koaleszenz) bis sie schließlich die entsprechende Größe erreicht haben, die ein Abfließen der Tropfen bewirkt. Bereits nach einer Anpassungszeit von rund 20 Minuten ist der Verlauf der abgeschiedenen Wassermenge relativ konstant. Es sei darauf hingewiesen, dass Abweichungen innerhalb des Verlaufes durch Messungenauigkeiten, die Zeimessung und der abgeschiedene Wassermenge zustande kamen.

2.6 Einfluss des Benetzungsverhaltens auf die gewonnene Wassermenge

Anhand der Benetzungseigenschaften von Fasern und/oder Textilien lässt sich eine Aussage über deren Verhalten gegenüber Wasser treffen. Um die Wasseraufnahme und Wasserabgabe der untersuchten Textilien so zu verändern, dass sich diese positiv auf die zu gewinnende Wassermenge auswirkt, wurden sowohl

Hydrophobausrüstungen als auch Hydrophilausrüstungen ausgewählt. Verwendet wurden die Textilien 4, 5 und 6 in dem sie mittels Tauchverfahren in einem geeigneten Behälter und anschließender Thermofixierung in einem Trockenofen ausgerüstet wurden.

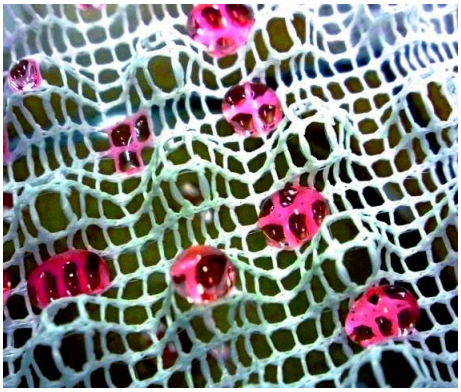
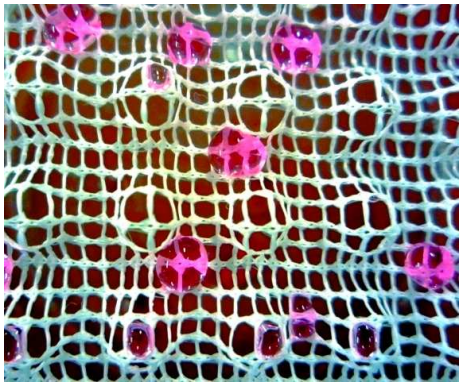
2.6.1 Hydrophobausrüstung

Das Ziel der Hydrophobierung der Textilien ist die Steigerung der gewonnenen Wassermenge durch ein verbessertes Ablaufverhalten. Die Ausrüstung erfolgte hierbei anhand der folgenden Ausrüstungen:

Ausrüstung A: auf Basis von Paraffin und Zirkoniumsalz

Ausrüstung B: Silikonhaltig, Sol-Gel-Prozess basiert

Um die erzielten wasserabweisenden Eigenschaften zu veranschaulichen, wurden zu Vergleichszwecken auf das unausgerüstete sowie das ausgerüstete Textil 4 mittels Pipette einzelne Wassertropfen aufgebracht. Zur Veranschaulichung der veränderten Oberflächeneigenschaften dienen die Bildaufnahmen in der nachstehenden Tabelle 2.6, welche Textil 4 unausgerüstet und ausgerüstet zeigen.

Unausgerüstet	
Ausrüstung A 	Ausrüstung B 

Tab. 2.6: Hydrophobierung von textile Nebelfänger

Aus den Aufnahmen in der Tabelle 2.6 ist deutlich ein Unterschied zwischen dem unausgerüsteten Textil 4 und den verschieden hydrophob ausgerüsteten Textilien 4 zu sehen. Das Textil 4 zeigte zwar bereits unausgerüstet leichte wasserabweisende Eigenschaften aufgrund der Materialeigenschaften von Polyester. Die auf das unausgerüstete Textil aufgebrachte Flüssigkeit spreitete und sickerte jedoch teilweise in das Textil und blieb an der Unterseite des Textils in den Öffnungen hängen. Wurde Flüssigkeit hingegen auf die hydrophobierten Textilien gegeben, bildeten sich runde Tropfen, welche auf dem Textil liegen blieben und in Schräglage abrollten. Zwischen den einzelnen Ausrüstungen waren keine Unterschiede erkennbar.

Analog der unter Kapitel 2.1.1.1 beschrieben Versuchsdurchführung wurden die Textilien benebelt und deren gewonnene Wassermenge ermittelt. Folgende Abbildung 2.28 stellt die Ergebnisse dieser Versuchsreihe dar.

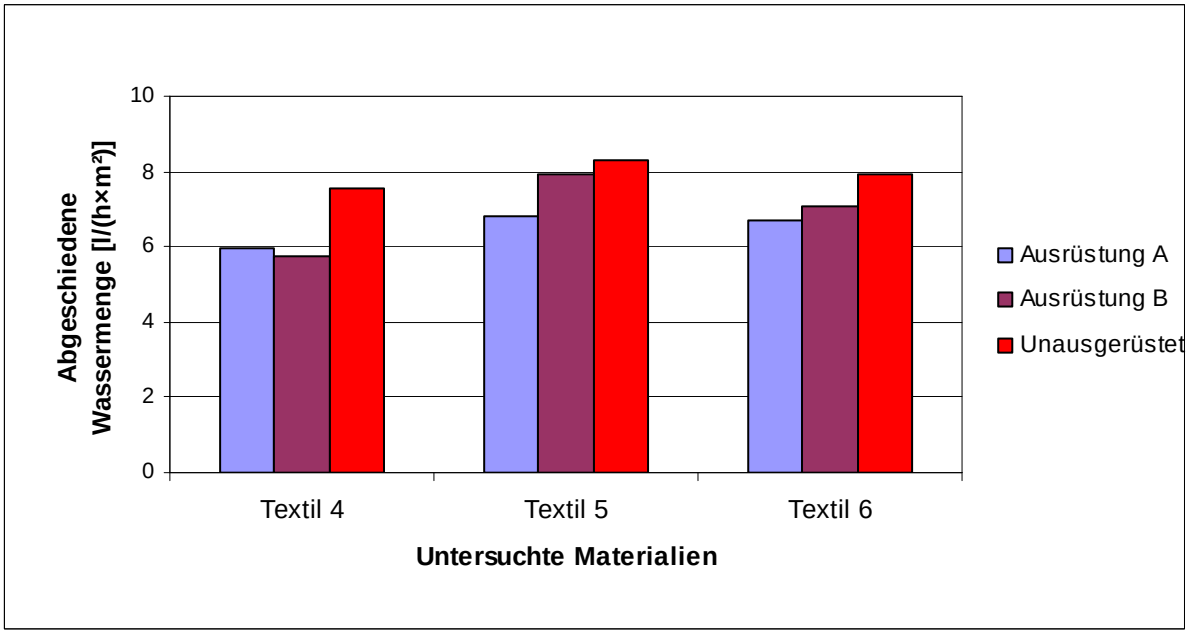


Abb. 2.28: Gewonnene Wassermenge hydrophob ausgerüsteter Textilien

Wie aus Abbildung 2.28 zu erkennen ist, wirkten sich die verbesserten wasserabweisenden Eigenschaften nicht positiv auf die gewonnene Wassermenge aus. Alle hydrophob ausgerüsteten Textilien schieden, unabhängig davon welche Ausrüstung verwendet wurde, weniger Wasser ab als die unausgerüsteten Textilien (bis zu 24 % weniger bei Textil 4). Das behandelte Textil 5 schied mit 6,8 l/h·m² am meisten Wasser unter den untersuchten Textilien mit Ausrüstung A ab. Textil 4 schied unter Verwendung von Ausrüstung B am wenigsten Wasser ab (5,8 l/h·m²). Prinzipiell ließen

sich bei den Abstandsgewirken 5 und 6 mit Ausrüstung B höhere Wassermengen erzielen als mit Ausrüstung A.

Die Annahme, dass die Hydrophobierung der Textilien aufgrund der verbesserten Ablaufeigenschaften die zu gewinnende Wassermenge steigert, hat sich damit nicht bestätigt. Gründe hierfür sind in den für das Anhaften und Abscheiden der Nebelaerosole erforderlichen Wechselwirkungen zwischen der textilen Oberfläche und dem Wasser bzw. den Aerosolen zu sehen, welche durch die Hydrophobierung verringert wurden. Aufgrund der überwiegenden Kohäsionskräfte der Nebeltropfen bleiben weniger Tropfen an dem Textil hängen, wodurch weniger Wasser gewonnen werden kann.

In Anlehnung an eine frühere Theorie von *Parker* mit hydrophilen Hökern und hydrophobem Grund wurde Textil 4 nur teilweise hydrophob ausgerüstet: Während die Noppen weiterhin unausgerüstet bleiben und das Wasser anziehen sollen, wurde der Warengrund hydrophobiert, um das Ablaufen des Wassers zu verbessern und so die zu gewinnende Wassermenge zu steigern.

Für diese Versuchsreihe wurde Textil 4 auf einen mit Hydrophobausrüstung getränkten Filzstoff derart gedrückt, dass die Ausrüstung lediglich in den Warengrund übertragen, nicht aber bis in die Noppen aufgesaugt wurde. Auf diese Weise wurde Textil 4 mit den Ausrüstungen A und B behandelt, wobei die Ausrüstungen rot angefärbt wurden, um die aufgesaugte Menge sichtbar zu machen. Die geeignete Ausrüstung für diese Versuche wurde anschließend anhand eines Saugversuches ausgewählt. Nachfolgende Abbildung 2.29 zeigt an jeweils drei durchgeführten Saugversuchen, dass sich die Ausrüstung A als günstiger erwies, da die Noppen auch nach fünf Minuten nahezu ungefärbt blieben und nur der Warengrund eingefärbt war. Im Gegensatz dazu zeigt das mit Ausrüstung B behandelte Textil bereits nach wenigen Minuten Verfärbungen an den Noppen, was darauf hinweist, dass mehr Ausrüstung von den Noppen aufgesaugt wurde.

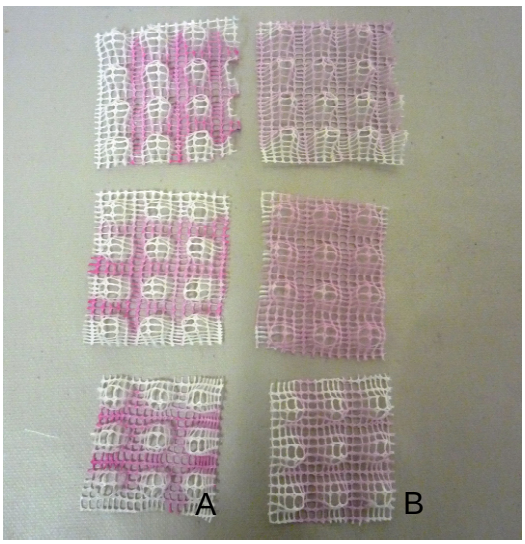


Abb. 2.29: Saugversuche mit Hydrophobausrüstung an Textil 4

Das so ausgerüstete Textil 4 wurde in Kurzzeitversuchen benebelt und die gewonnene Wassermenge berechnet. Die nachfolgende Abbildung 2.30 stellt das komplett ausgerüstete Textil 4 und das am Warengrund ausgerüstete dem unausgerüsteten Textil gegenüber. Es wird deutlich, dass sich auch die Ausrüstung des Warengrundes im Vergleich zum unausgerüsteten Textil als ungünstig auf die abgeschiedene Wassermenge auswirkte.

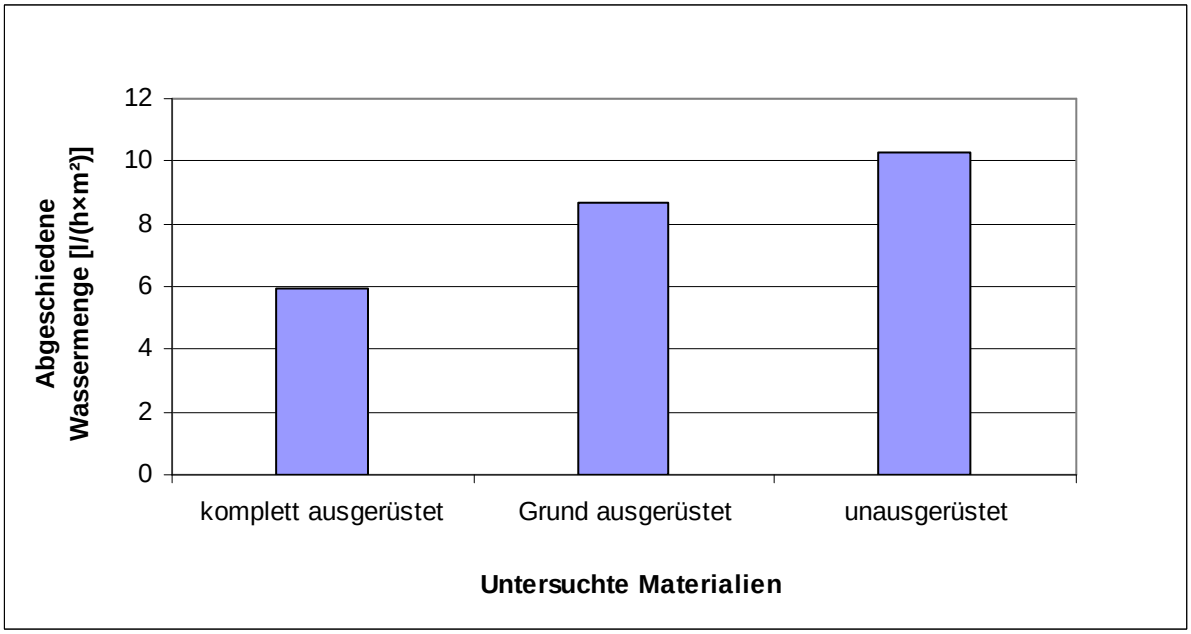


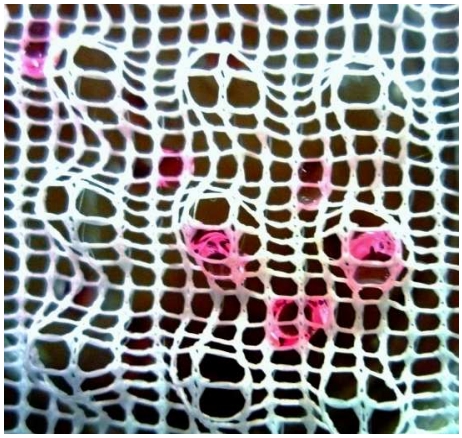
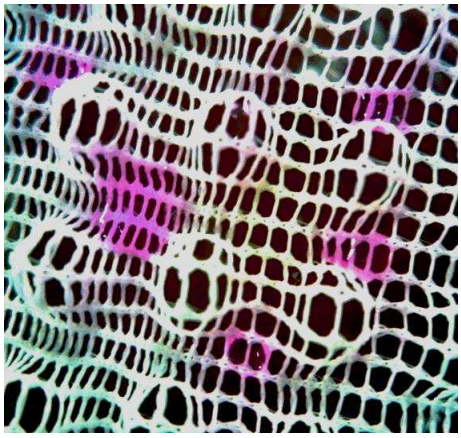
Abb. 2.30: Gewonnene Wassermenge des teilweise hydrophobierten Textils 4

2.6.2 Hydrophilausrüstung

Nachdem sich die Verbesserung der wasserabweisenden Eigenschaften als ungünstig für die zu gewinnende Wassermenge herausstellte, wurde ferner die Verbesserung der Wasseraufnahme durch Hydrophillierung und deren Einfluss auf die abgeschiedene Wassermenge untersucht. Die Erhöhung der Wasseraufnahme sollte sich hierbei positiv auf die gewonnene Wassermenge auswirken, da aufgrund der verbesserten Wechselwirkungen zwischen den Textilien und den Nebelaerosolen mehr Wassertropfen angezogen und somit abgeschieden werden sollten.

Die Ausrüstung der Textilien erfolgte analog zur Hydrophobausrüstung in Form eines Tauchverfahrens mit anschließender Thermofixierung. Die Hydrophillierung der Textilien 4, 5 und 6 erfolgte mittels verschiedener SiO_2-basierter Ausrüstungen.

Wie auch für die hydrophobierten Textilien wird zunächst der erzielte Effekt anhand von Bildaufnahmen von Textil 7 in der folgenden Tabelle 2.7 veranschaulicht.

Unausgerüstet	
Ausrüstung C 	Ausrüstung D 

Tab. 2.7: Hydrophilausrüstung der Textilien

Die Tabelle 2.7 macht deutlich, dass die aufgebrachten Tropfen stark spreiteten und an der Unterseite des Textils hängen blieben. Es wurden keine runden Tropfen ausgebildet, wie es bei den hydrophoben Textilien der Fall war (Tab. 2.6).
Nachfolgende Abbildung 2.31 zeigt die Ergebnisse der gewonnenen Wassermenge in Abhängigkeit der Ausrüstung verglichen mit unausgerüsteten Textilien.

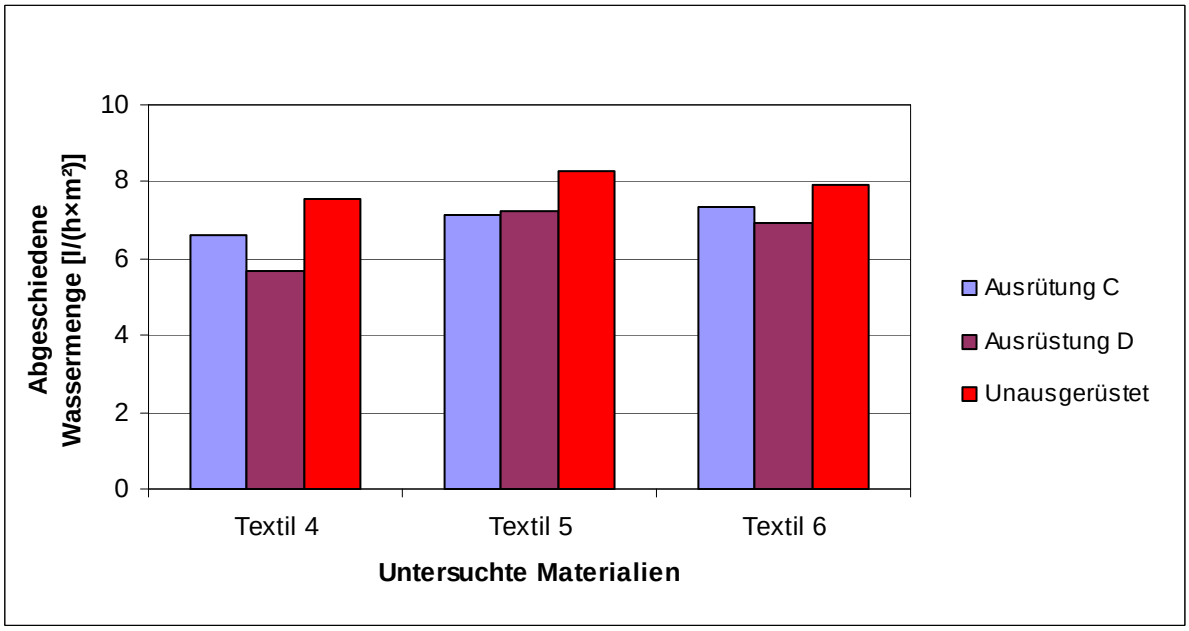


Abb. 2.31: Gewonnene Wassermenge hydrophil ausgerüsteter Textilien

Verglichen mit den unausgerüsteten Textilien zeigt die Hydrophilausrüstung eine negative Wirkung auf die gewonnene Wassermenge. Das mit Ausrüstung D behandelte Textil 4 lieferte mit rund 5,7 l/(h·m²) die schlechtesten, das C-ausgerüstete Textil 6 mit 7,3 l/(h·m²) die besten Ergebnisse mit einer Ausrüstung bezüglich der gewonnenen Wassermenge. Entgegen der Annahme einer Steigerung der Wassermenge durch Verbesserung des Wasseraufnahmevermögens, schieden die hydrophilen Textilien bis zu 25 % (Textil 4) weniger Wasser ab als die unausgerüsteten Textilien. Zwar wurden die Wechselwirkungen zwischen den Textilien und den Nebelaerosolen erhöht, doch könnte dies auch dazu geführt haben, dass das Wasser schlechter aus dem Textil abfließt und an der Struktur haften blieb.

2.7 Untersuchungen zum Ablaufverhalten entwickelter Textilien

In diesem Kapitel soll auf das Ablaufverhalten des Wassers auf den untersuchten Textilien, welche als Abscheidekörper für die Nebelaerosole angesehen werden, eingegangen werden.

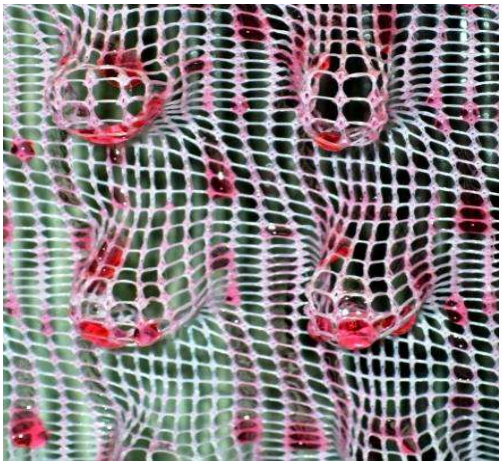
Die Abscheidung der Nebelaerosole am Textil erfolgt wie bereits im vorangegangenen Kapitel 2.5.4 beschrieben, durch die Koaleszenz kleiner Nebeltropfen zu großen Tropfen. Wie das Wasser schließlich abfließen wird, hängt letztlich von den textilen Materialien und deren Struktur ab.

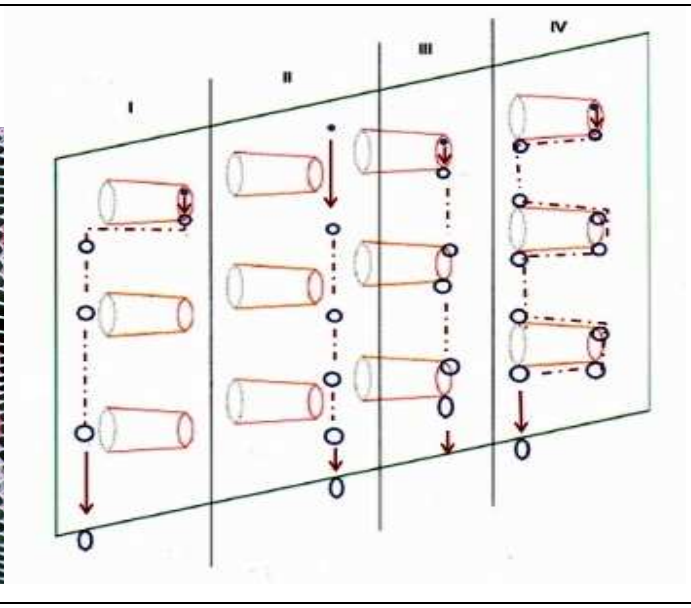
Über das Ablaufverhalten sollen Rückschlüsse auf die gewonnene Wassermenge gezogen werden. Auf den folgenden Seiten werden daher das unterschiedliche Ablaufverhalten der Wassertropfen auf den Textilien veranschaulicht und erläutert. Zur Verdeutlichung des Ablaufverhaltens wurden die untersuchten Textilien teilweise mit roter Farbstofflösung benebelt.

Generell unterscheidet sich das Ablaufverhalten der Noppengewirke von dem der Abstandsgewirke. Die Abscheidung der Materialien eins bis vier erfolgt an der, zwar verformten, aber trotzdem zweidimensionalen, Textiloberfläche, wobei die Noppen der Materialien 1 bis 4 als zusätzliches Hindernis aufgefasst werden können, die der erzeugte Nebel umströmen muss. Demzufolge entspricht die Abscheidung im übertragenen Sinne einer Oberflächenfiltration. Im Gegensatz dazu, kann die Abscheidung der Materialien 5 und 6 als Tiefenfiltration angesehen werden, da deren großes Hohlraumvolumen eine Einlagerung der Partikel ins Innere ermöglicht und diese somit auch im Inneren des durchströmten Textils abgeschieden werden.

Im Folgenden soll auf das Ablaufverhalten aller entwickelten und untersuchten Textilien 1 bis 6 eingegangen werden.

- **Ablaufverhalten Textil 1**





Tab. 2.8: Ablaufverhalten Textil 1

Die Tabelle 2.8 zeigt das Ablaufverhalten von Textil 1. Die Unterteilung in I, II, III, und IV grenzt hierbei die unterschiedlichen Varianten für das Ablaufen des Wassers an den Noppengewirken ab.

Zunächst erfolgt das Auftreffen und Ansammeln der Nebeltropfen für alle Noppengewirke an der gesamten benebelten Fläche, d.h. sowohl am Warengrund als auch an den Noppen und hier besonders an den Flächen der Noppen. Haben die Tropfen dann die notwendige Größe erreicht, beginnen sie abzulaufen.

Allgemein kann das Ablaufen des Wassers an den Noppengewirke auf zwei verschiedene Arten erfolgen: Am Warengrund, d.h. auf den unverformten Bereichen der Noppengewirke, oder über die Noppen der Textilien.

Größtenteils erfolgt das Ablaufen der Nebeltropfen am Warengrund (I und II). Dabei können die Nebeltropfen entweder direkt am Warengrund (nach Ansammlung der Tropfen auf diesem) abfließen oder von den Noppen zum Warengrund geleitet werden.

Das Ablaufen der Tropfen vom Warengrund erfolgt dabei im Wesentlichen entlang der Noppen (I), d.h. am Rand der Noppen. Seltener fließen die Tropfen, wie aus (II) zu erkennen, mittig der Noppen ab. Je nach Größe können die Tropfen, bezogen auf ihre horizontale Ausdehnung, über ein oder mehrere Maschenstäbchen (Längsrichtung) bzw. Maschenreihen (Querrichtung) ablaufen.

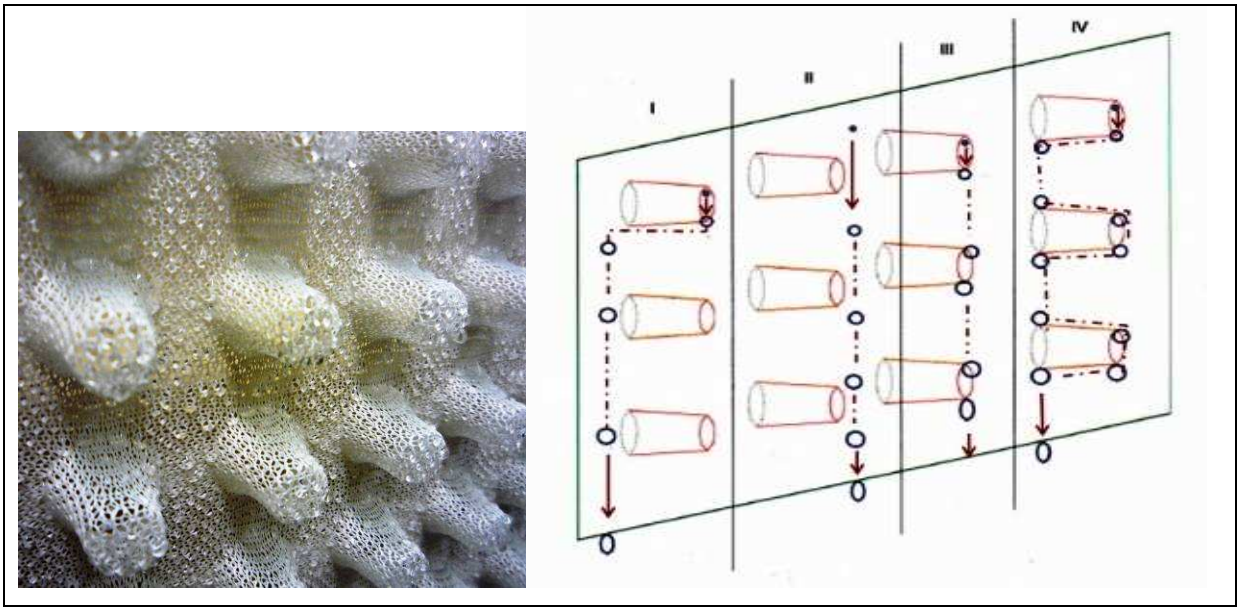
Das Ablaufverhalten über die Noppen kann zum Einen durch das Abtropfen des Wassers von einer Noppe zur Nächsten (III) beschrieben werden; und zum Anderen

durch das Ablaufen der Tropfen um die Noppen herum zur nächsten Noppe dieser Noppenreihe (IV), d.h. vom Warengrund zur Noppenfläche und wieder zurück usw. Dabei tritt letzteres Verhalten vergleichsweise selten auf. Im Vergleich zum Ablaufverhalten am Warengrund vollzieht sich das Abtropfen deutlich langsamer.

Im Laufe einer Messung nimmt das Abtropfen von einer zur nächsten Noppen ab, stattdessen erfolgt das Abfließen der Tropfen mehr am Warengrund.

Da sich das Ablaufen der Nebeltropfen von Textil 1 wie auch der übrigen Noppengewirke, für beide Materialrichtungen gleich verhält, ist keine getrennte Betrachtung des Ablaufverhaltens für Längs- und Querrichtung erforderlich.

- **Ablaufverhalten Textil 2**



Tab. 2.9: Ablaufverhalten von Textil 2

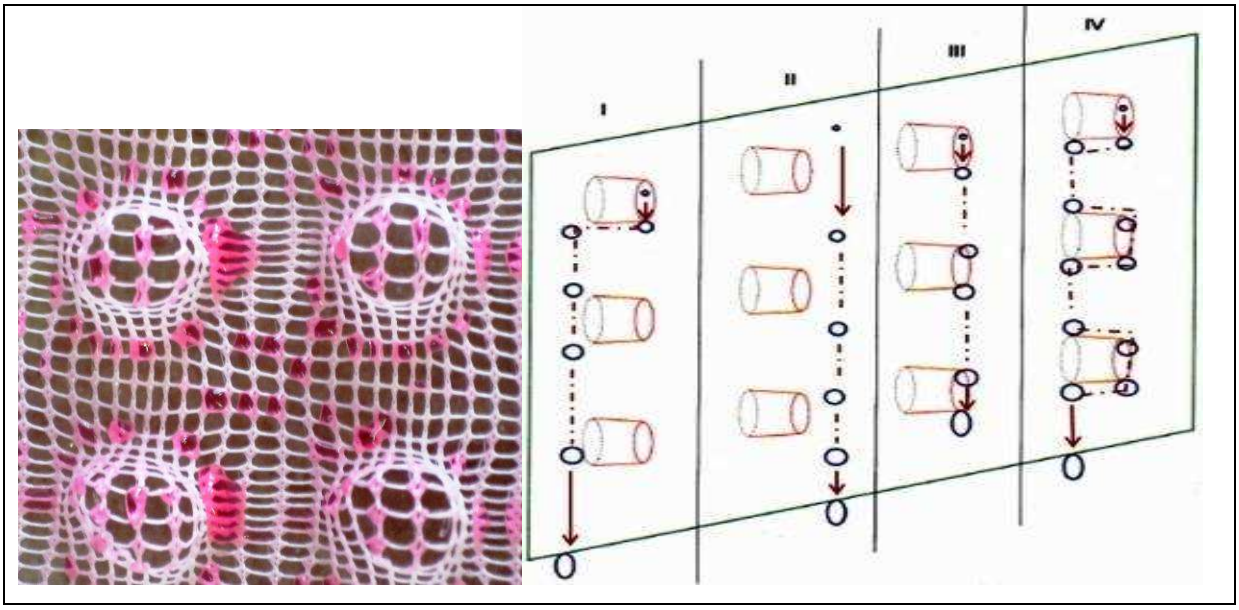
Aus vorangegangener Tabelle 2.9 wird das Ablaufverhalten von Textil 2 deutlich. Es erfolgt zunächst eine Ansammlung von Tropfen an den Noppenflächen und dem Warengrund. Das Ablaufen der Nebeltropfen erfolgt ebenso wie bei Textil 1 am Warengrund (I und II) sowie über die Noppen (III und IV).

Im Unterschied zu Textil 1 fließen die Tropfen weniger entlang der Noppen ab (I), sondern vielmehr über die gesamte Grundfläche (II). Wie auch bei Textil 1 findet das Abtropfen von einer Noppe zur Nächsten statt (III).

Des Weiteren laufen Tropfen, besonders in den ersten Minuten der Messung, um die Noppen ab (IV), d.h. Warengrund-Noppenfläche-Warengrund.

Im Laufe einer Messung verteilt sich das Wasser in der Textilstruktur so, dass eine Art „Filmbildung“ eintritt, d.h. die Poren des Textils werden mit Wasser gefüllt. Dementsprechend wird die Zahl der an der Textiloberfläche sichtbaren Tropfen weniger und der Effekt des Ablaufens um die Noppen und des Abtropfens nimmt ab.
Ein weiterer auftretender Effekt ist das Sammeln des Wassers in den Noppen. Aufgrund des dichteren Warenbildes bleiben häufig Tropfen in den Noppen liegen, die erst durch das Hinzukommen weiterer Tropfen ablaufen.

- **Ablaufverhalten Textil 3**



Tab. 2.10: Ablaufverhalten Textil 3

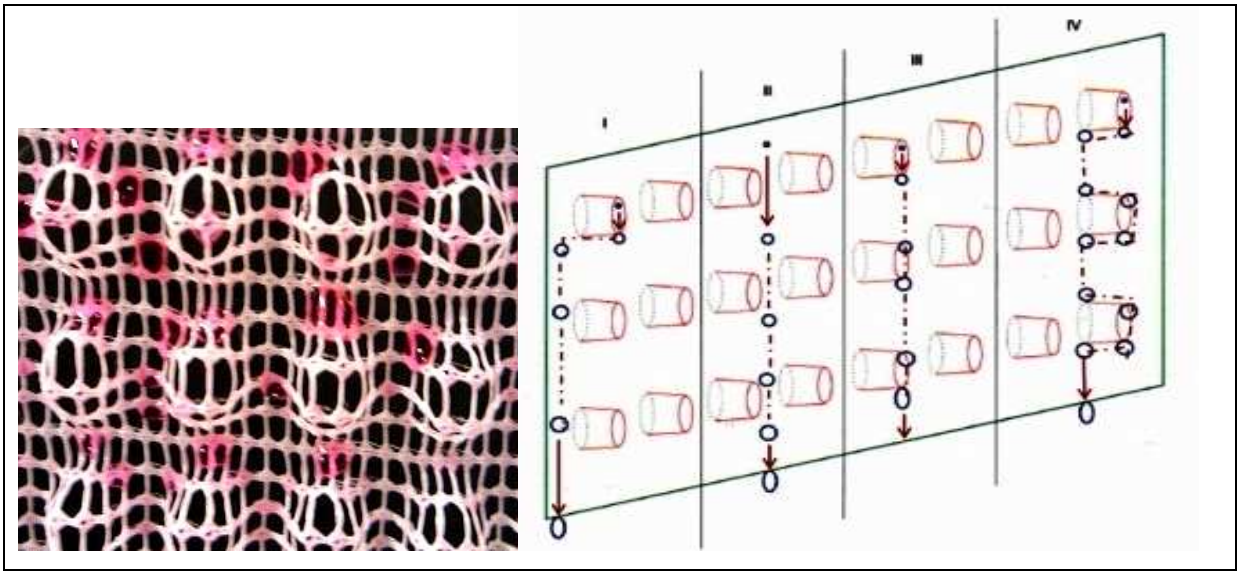
Wie aus Tabelle 2.10 ersichtlich, ist das Ablaufverhalten von Textil 3, aufgrund der nahezu gleichen Material- und Noppenstruktur, identisch mit dem Verhalten von Textil 1: Neben der Ansammlung von Tropfen an den Noppenflächen und dem Warengrund erfolgt das Ablaufen der Nebeltropfen am Warengrund (I und II) sowie über die Noppen (III und IV).
Dabei laufen die Tropfen im Wesentlich entlang der Noppen (I) und kaum mittig der Noppen (II) ab. Abhängig von der Tropfengröße können die Tropfen ebenso über ein oder mehrere Maschenstäbchen bzw. Maschenreihen ablaufen.
Das Abtropfen des Wassers von einer Noppe zur Nächsten (III) findet, ebenso wie das Ablaufen der Tropfen, um die Noppen zur nächsten Noppe dieser Noppenreihe (IV), vergleichsweise selten statt. Es überwiegt das Ablaufverhalten am Warengrund, welches sich deutlich schneller vollzieht.

- **Ablaufverhalten Textil 4**

Wie bei den bisher beschriebenen Noppengewirken sammeln sich auch bei Textil 4 die Tropfen an der benebelten Oberfläche sowohl am Warengrund als auch auf den Noppenflächen. Analog zu Textil 1 und 3 können sich die Tropfen dabei in Abhängigkeit ihrer Größe über ein oder mehrere Maschenstäbchen bzw. Maschenreihen erstrecken.

Das Ablaufverhalten ist überwiegend vom Ablaufen der Tropfen am Warengrund gekennzeichnet. Die ablaufenden Tropfen nehmen dabei in Abhängigkeit ihrer Größe teilweise den gesamten Raum zwischen den Noppen ein. Ist dies nicht der Fall, ist eine Unterscheidung des Abfließens der Tropfen entlang der Noppen und des Abfließens mittig zwischen zwei Noppen möglich.

Das Ablaufverhalten über die Noppen ist hauptsächlich vom Ablaufen der Tropfen um die Noppe gekennzeichnet, d. h. die Tropfen fließen von einer Noppe über den Warengrund zur darunter liegenden Noppe dieser Reihe. Während dieses Verhalten vergleichsweise häufig auftritt, findet das Abtropfen von einer zur nächsten Noppe relativ selten statt. In nachfolgende Tabelle 2.11 zeigt das Ablaufverhalten von Textil 4.

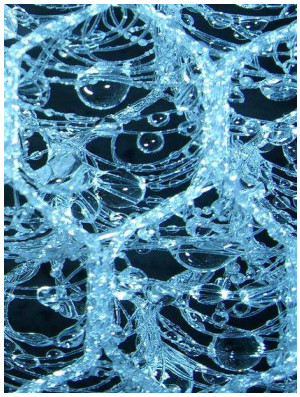
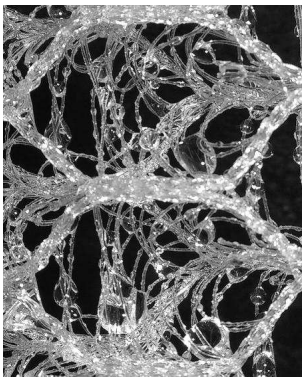
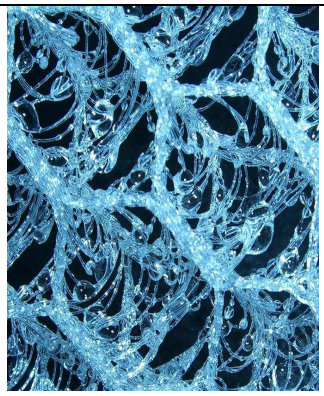
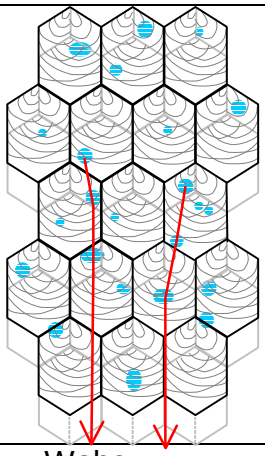
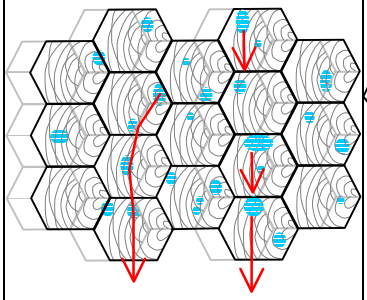
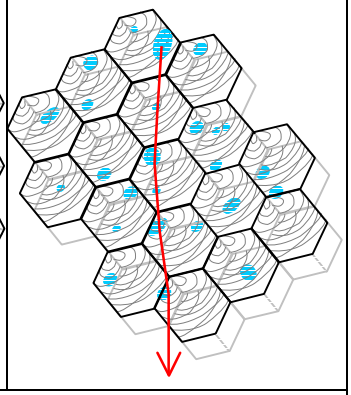
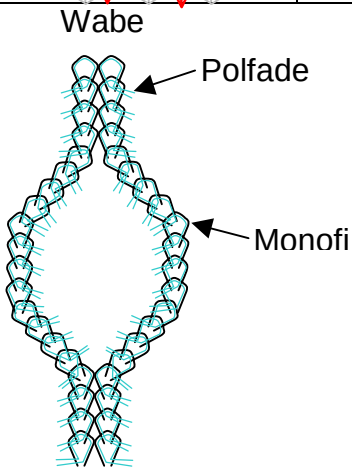
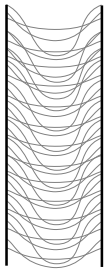
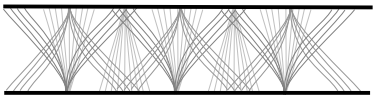


Tab. 2.1: Ablaufverhalten von Textil 4

- **Ablaufverhalten Textil 5**

Während die Noppengewirke dem Auftreffen der Nebeltropfen eine zweidimensionale Oberfläche bieten, werden die Nebeltropfen bei Abstandsgewirken auch in der dritten Dimension gesammelt und abgeschieden. Es sammeln sich also Nebeltropfen sowohl an den beiden textilen Oberflächen, als auch an den Polfäden. Durch Koaleszenz wachsen die Tröpfchen weiter an, bis sie schließlich die zum Ablaufen notwendige Größe erreicht haben.

In nachfolgender Tabelle 2.12 ist das Ablaufverhalten von Textil 5 veranschaulicht.

Bilder			
Ablauf-verhalten			
Struktur-analyse			
Rot besprüht			

Tab. 2.12: Ablaufverhalten von Textil 5

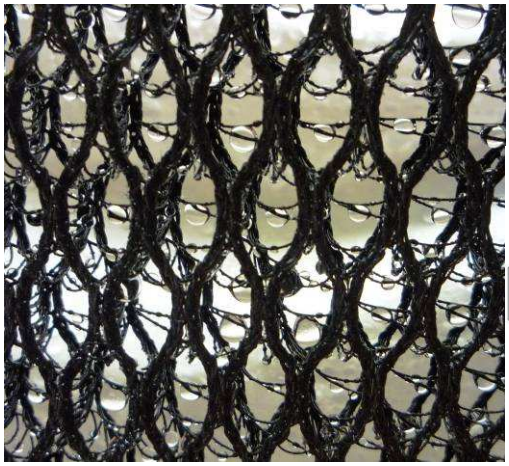
Wie die Aufnahmen in der Tabelle 2.12 zeigen, erfolgt die Aerosolabscheidung der Tröpfchen an der Oberfläche (Wabenstruktur) des Textils wie auch an den Polfäden. An den Polfäden ist sehr gut zu erkennen, wie die kleinen Tröpfchen an ihnen haften bleiben. Die Überkreuzung einiger Fäden bietet eine größere Angriffsfläche für die ankommenden Aerosole. Sind die Tropfen groß genug, „hangeln“ sie sich von Polfaden zu Polfaden nach unten ab. An der Längs- und Diagonalstruktur laufen die meisten Tropfen im Inneren ab, im Gegensatz zur Querstruktur, wo die Tropfen von den überkreuzten Polfäden zur Wabenstruktur geleitet werden und dort von Wabe zu Wabe abtropfen.

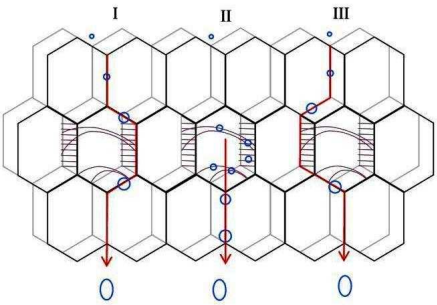
Eine offenporige Struktur wird durch größere Waben bestimmt und unterscheidet sich damit von den anderen Strukturen.

- **Ablaufverhalten Textil 6**

Analog zu Textil 5 sammeln sich auch bei Textil 6 zunächst die Tropfen an den Textilflächen und den Polfäden, ebenso wie die Abscheidung an den Oberflächen (Bereich I und III) und den Polfäden (II) erfolgt. Während die Polfäden von Textil 5 sich häufig überkreuzen, da die Waben des Textils versetzt zueinander angeordnet sind, verbinden die Polfäden von Textil 6 die hintereinander angeordneten Waben so, dass sie kaum im Anströmbereich des Nebels liegen. Daher treffen weniger Tropfen an den Polfäden auf. Jedoch leiten diese die Nebeltropfen zur vorderen oder hinteren Textilfläche.

Der Ablauf der Tropfen erfolgt ebenso entlang der Maschenstäbchen nach unten, wobei es in Querrichtung des Materials ebenfalls zu einer Unterbrechung des Ablaufens kommt. Die 7Tabelle 2.13 verdeutlicht das Ablaufverhalten von Textil 6.





Tab. 2.13: Ablaufverhalten von Textil 6

2.8 Untersuchungsergebnisse an alternativen Konstruktionen

Um einer ankommenden Nebelströmung einen richtungsunabhängigen Abscheidekörper zu bieten und um eine Abscheidung von Wasser aus jeder beliebigen Richtung gewährleisten zu können, wurde eine zylinderförmige Nebelfängerkonstruktion (vgl. Abb. 2.3 in Kap. 2.1.2.1) entwickelt und getestet. Für die Versuchsreihen mit dieser Konstruktion wurden die bewährten Textilien 4, 5 und 6 ausgewählt.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Benebelung der unterschiedlichen Textilien in der Zylinderkonstruktion gegenübergestellt (Abb. 2.32).

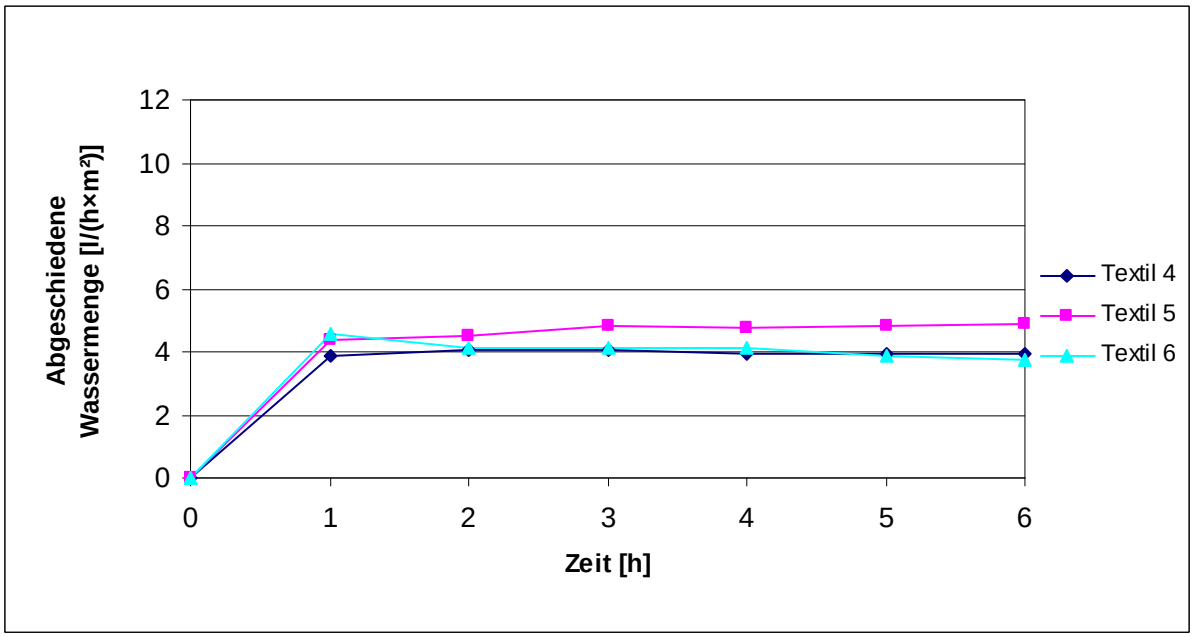


Abb. 2.32: Gewonnene Wassermenge an zylindrisch geformte Nebelfänger

Wie aus Abbildung 2.32 ersichtlich wird, scheidete Textil 5 innerhalb der untersuchten Textilien mit durchschnittlich 4,7 l/(h·m²) das meiste Wasser ab. Während die gewonnene Wassermenge von Textil 4 in den Dauerversuchen geringer als die der zweidimensionalen Konstruktion war, konnte mit Textil 4 in der Zylinderkonstruktion soviel Wasser gewonnen (3,9 l/(h·m²)) werden wie mit Textil 6 (4 l/(h·m²)). Mit Textil 5 kann somit rund 17 % mehr Wasser als mit Textil 4 und 6 gewonnen werden.

Die Ergebnisse belegen die prinzipielle Tauglichkeit der Textilien in einer solchen zylinderförmigen Nebelfängerkonstruktion. Insgesamt konnte jedoch weniger Wasser gewonnen werden als mit einer flächigen Konstruktion. Daher wurden flächige Kollektoren in den Feldversuchen eingesetzt.

2.9 Feldversuche auf der Wüstenforschungsstation Gobabeb in Namiba

Im Rahmen des Projekts wurden langzeitige Feldversuche vom September 2008 bis Dezember 2010 zur Erprobung der entwickelten Textilien in der Wüste Namib in Namibia durchführt. Die Namib ist eine der trockensten Orte der Erde. Die Pflanzen- und Tierwelt hat sich an die extreme Trockenheit angepasst und faszinierende Mechanismen entwickelt, um das wenige Wasser im Nebel zu fangen und zu nutzen.

Ziel der Feldversuche war:

- der Aufbau von robusten Nebelfanganlagen,
- die Testung der neu entwickelten Nebelfangtextilien samt Peripherie und
- die Begleitung des parallel arbeitenden Biologenteams der Universität Tübingen.

Die kontinuierliche Überwachung und Betreuung der Feldversuche erfolgte durch Mitarbeiter der Forschungsstation Gobabeb.

2.9.1 Standortwahl und Aufbau der Kollektoren

Folgende Nebelfangkollektoren wurden nach Absprache mit der Stationsleitung aufgebaut:

Standort Forschungsstation (Abb. 2.33):

- 2 Kollektoren innerhalb der Forschungsstation. Hier konnten vorhandene Rahmensysteme aus Aluminium aus dem Materiallager aufgebaut und verwendet werden. Der Standort gilt als sicher im Sinne des Vandalismus, es kommen jedoch weniger Nebelereignisse vor.
- 1 baugleicher Alurahmen der Station war mit einem schwarzen Raschelnetz schon seit Jahren als Demonstrationsanlage bespannt. Diese wurde wieder in Betrieb genommen, dem Nebel ausgerichtet und das Textil als Referenz verwendet.
- Der Aufbau erfolgte über einbetonierte Standrohre.

Standort Düne (Abb. 2.34):

- 1 Anlage aus Edelstahl/Stahl des ITV wurde jenseits des Kuisebtals am Fuß einer Düne aufgebaut. Hier steht auch die Wetterstation und das Messfeld der Tübinger Biologen. Die Nebelereignisse treten hier öfters auf.
- Der Aufbau erfolgte über einen speziellen Sandfuß, der eingegraben wurde.

Standort Savanne (Abb. 2.35):

- 6 Anlagen aus Edelstahl/Stahl wurden jenseits des Kuisebtals auf einer weiten Hochebene installiert. Auch hier treten die Nebel öfters auf.
- Der Aufbau erfolgte über Erdlöcher, die teilweise in einen angewitterten Granitfels gegraben werden mussten.

Abb. 2.33: Standort Station

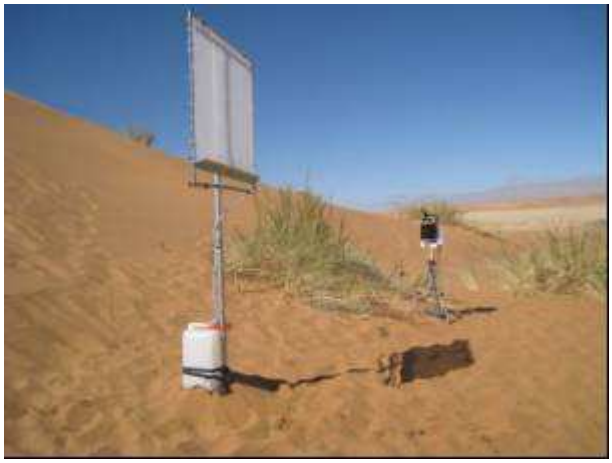
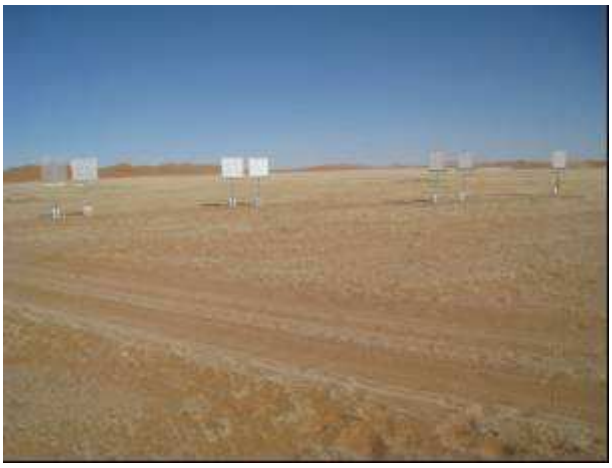


Abb. 2.34: Standort Düne



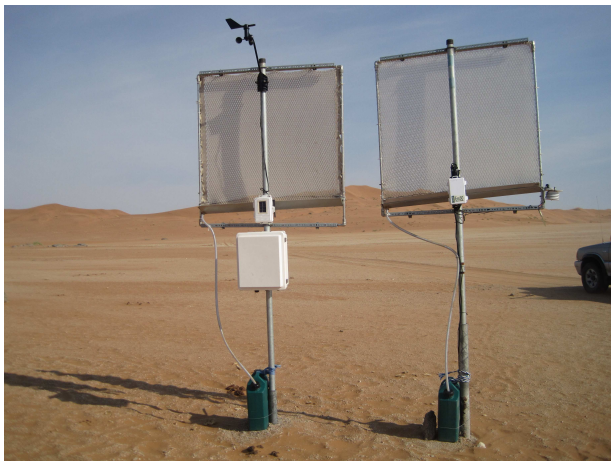


Abb. 2.35: Standort Savanne

2.9.2 Gewonnene Wassermengen

Die Abbildung 2.36 zeigt exemplarisch für das Textil 5 (PET-Abstandsgewirke) die durchschnittlich gewonnene monatliche Wassermenge vom Beginn der Aufstellung (September 2008) bis Juni 2009 an den Standorten „Station“, „Wanderdüne“ sowie „Savanne“. Die Bestimmung der Wassermenge erfolgte durch das Personal der Station.

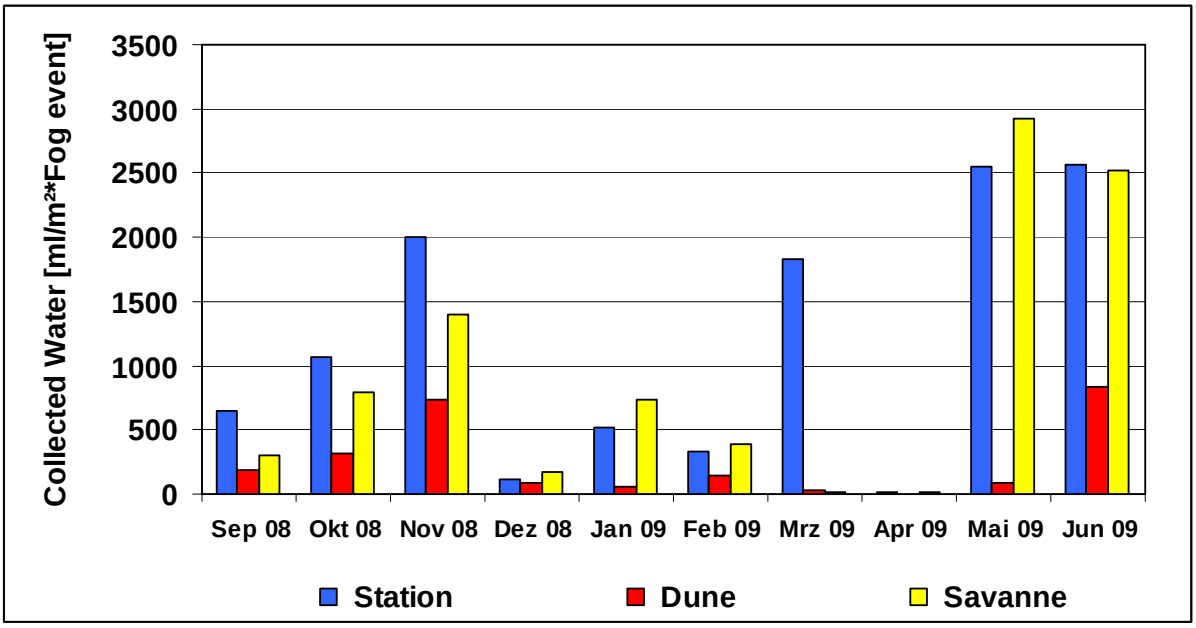


Abb. 2.36: Gewonnene Wassermenge für das Textil 5 in der Wüste Namib

Die Ergebnisse in der Abbildung 2.36 geben zu erkennen, dass die Abscheidemenge von den durch die Jahreszeit bedingten Nebelereignissen abhängt. Zudem schwankt die Nebelintensität an jedem Standort sehr stark. Das hatte zur Folge, dass die Kollektoren auch unterschiedliche Wassermengen abschieden.

Die folgende Abbildung 2.37 zeigt exemplarisch für jeweils einen Tag in den Quartaten I-III des Jahres 2010 die gewonnenen Wassermengen für die eingesetzten Textilien 4 bis 6 und im Vergleich dazu für ein PE-Folienbändchen als Stand der Technik (vgl. Tab. 2.1 in Kap. 2.1.1).

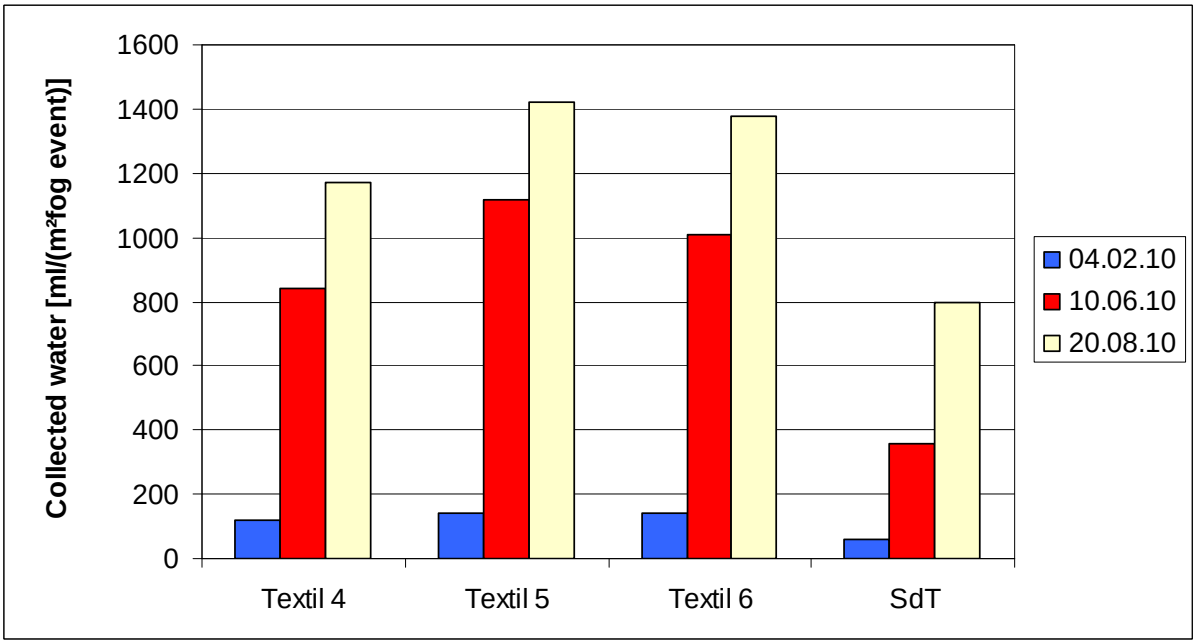


Abb. 2.37: Gewonnne Wassermenge der Textilien 4-6 und des Standes der Technik (SdT) in Namib

Die Abbbildung 2.37 gibt zu erkennen, dass durch Einsatz der entwickelten Nebelfängertextilien 4 bis 6 prinzipiell höhere Erträge erzielt werden können als mit dem Stand der Technik. Ferner zeigten die Feldversuche, dass mit den Abstandsgewirke (Textil 5-6) mehr Wasser gewonnen werden kann als mit der Noppenstruktur (Textil 4).
Insgesamt ergaben die Feldversuche mit den innvativen Textilien eine im Durchschnitt zwei- bis dreifach höhere Wasserausbeute als mit den bisher für diesen Zweck eingesetzten Materialien (Folienbändchen).
Die textilphysikalische Untersuchungen der eingesetzten Textilien ergaben, dass nach einer Einsatzzeit von 14 Monaten die Festigkeit der Nebelfänger aufgrund der extremen Witterungsbedungnen (u.a. UV-Strahlung, mechanische Belastung durch sandkornhaltige Winde bis 100 km/h) um die Hälfte (in Längsrichtung) bzw. zwei Drittel (in Querrichtung) abnahm. Grund ist unter anderem, dass für die hier entwickelten textilen Werkstoffe noch keine besonders UV-beständigen Fasen verwendet wurden. Dies ist technisch jedoch möglich.

2.9 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse

- **Wirtschaftliche Verwertungsmöglichkeiten**

Während der Laufzeit des Projektes wurden konkrete Verwertungsmöglichkeiten ausgearbeitet. Des Weiteren ergaben sich potentielle Verwertungen durch von außen an die Projektpartner herangetragene Kooperationsvorschläge. Dieses Interesse basierte auf der außerordentlich hohen Performance der bereits erstellten Prototypen, die auf den verschiedenen Grundlagenuntersuchungen basierten und in entsprechenden Vorträgen und Fachpublikationen bekannt gemacht wurden. Die bislang bereits bestehenden Prototypen demonstrieren gleichzeitig die hohen Erfolgsaussichten für eine breite und erfolgreiche Umsetzung der Projektergebnisse. Der hohe Bedarf an nebelauskämmenden Konstrukten wurde im Bericht geschildert und dürfte mittelfristig noch ansteigen.
Bereits während der Laufzeit gab es Patentanmeldungen. Es ist auf jeden Fall mit Produktweiterentwicklungen zu rechnen, die z.B. den wartungsfreien Einsatz, die einfache Bedienbarkeit sowie die Zuverlässigkeit der Produkte betreffen. Verschiedene Entwürfe liegen bereits vor. Die bislang erzielten Ansätze und Prototypen wurden zu verschiedenen Gelegenheiten öffentlich präsentiert, z.B. im Rahmen von Meetings und Messen&Ausstellungen sowie Kongressen.

Die Verbreitung der Ergebnisse sowie die Vorstellung von Funktionsmustern stieß bis dato auf ein sehr großes Interesse im breiten Publikum, auch Radio und TV. Es war dem ITV Denkendorf damit möglich, neue Kontakte zur Industrie aufzubauen und bestehende zu vertiefen. Das Interesse der Industrie fiel dabei nicht nur auf den Einsatz der Textilien zur Gewinnung von Wasser aus Nebel z.B. in Madagaskar (konkrete Anfrage), sondern auch auf andere potenzielle Anwendungsfelder, die aufbauend auf den bisher entwickelten Textilien erschlossen werden können. Aktuell laufen hier z.B. Vorversuche für die Abscheidung von Aerosolen aus der Abluft von industriellen Waschanlagen. Das ITV Denkendorf ist zuversichtlich, dass neue Entwicklungen in den nächsten 2-3 Jahren daraus hervorgehen werden.

Diese Ergebnisse lassen spätestens innerhalb der nächsten kommenden Jahre Produkte und Materialien erwarten, die sicher sehr gute Marktchancen haben werden. Für die anvisierten Materialgruppen bzw. Materialien werden insbesondere inländische mittelständische Unternehmen profitieren. Von zentraler Bedeutung wird dabei eine Verzahnung von Forschung und industrieller Entwicklung sein.

- **Wissenschaftliche Verwertungsmöglichkeiten/Erfolgsaussichten**

Die innerhalb dieses Projektes durchgeführte bionische Grundlagenforschung ergab eine Reihe von Ergebnissen und Ansätzen, die sowohl für die in diesem Projekt angestrebte Anwendung von Bedeutung sind, als auch sehr wahrscheinlich für andere Anwendungsmöglichkeiten (z.B. Filtertechnik). Die Untersuchungen an den biologischen Vorbildern ergaben neue Einblicke und Erkenntnisse in das Zusammenspiel von Oberfläche, „Aerosolfang“ und Tropfenverhalten. Insbesondere mündeten die Studien in der Erstellung eines theoretischen Modelles, welches das Haft- und Abtropfverhalten von Tropfen an faserförmigen Strukturen beschreibt.
Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden und werden vorwiegend auf Konferenzen und Ausstellungen präsentiert, aber auch bei Lehrveranstaltungen dargestellt (insbesondere bei Vorlesungen zum Thema Bionik). Vorträge auf Fachveranstaltungen wurden bereits gehalten als auch Fachartikel veröffentlicht. Eine Reihe von weiteren Publikationen zu dieser Thematik ist in Arbeit, so dass die Gesamtergebnisse auch auf diesem Wege kurzfristig der Wissenschaft und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass die Ergebnisse sowohl in geeigneter Weise weiter verwertet werden, als auch als Entwicklungskern im Rahmen von bewährten Netzwerkkooperationen dienen werden. Daneben werden auch im Rahmen dieses Projektthemas weitere industrielle Kooperationen angestrebt. Weiter werden die wissenschaftlichen Ansätze im Bereich von Forschung und Lehre von Interesse sein, bezüglich weiterer Anstrengungen in der Grundlagenforschung, die auch die studentische Ausbildung mit einbezieht. Ein weiterer Transfer in die Wissenschaft wird durch geeignete Publikationen erfolgen.

2.10 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es liegen keine Erkenntnisse auf dem Einsatzgebiet von dreidimensionalen Masschenwaren zur Gewinnung von Trinkwasser aus Nebel vor. Die Teilnahme auf der Fachkonferenz „Dew and Fog“ in 2010 in Münster zeigte hierzu keine neuen Erkenntnisse. Jedoch wurde der Bedarf an neuen Materialien für das Nebelernten als auch für verbesserte Nebelmesstechniken erkannt.

2.11 Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Verbreitung der Ergebnisse durch das ITV Denkendorf erfolgte über Workshops bzw. Arbeitskreise wie z.B. das Kompetenzzentrum Technische Textilien sowie über

- Vorträge:
    - Sarsour, J.; Stegmaier, T.; Linke, M.; Planck, H.: “Bionic development of textile materials for harvesting water from fog”. 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Münster, 29.07.2010.
    - Sarsour, J.; Stegmaier, T.; Linke, M.; Planck, H.: „Bionische Entwicklung textiler Materialien, um Wasser aus Nebel zu gewinnen“. TechTextil Symposium, Frankfurt, 16-18.06.2009.
    - Sarsour, J.; Linke, M.; Stegmaier, T.; Planck, H.: „Bionische Entwicklung textiler Flächengebilde zur Wassergewinnung aus Nebel“. Bionik-Kongress: Patente aus der Natur, Bremen, 07.11.2008.
    - Sarsour, J.; Linke, M.; Stegmaier, T.; Planck, H.: „Bionisch inspirierte hocheffektive Feinst-Tropfenabscheidung“. BMBF-Projektforum Biotechnologie auf der BIOTECHNICA, Hannover, 07.10.2008.

- o Sarsour, J.; Stegmaier, T.; Linke, M.; Planck, H.: „Biologisch inspirierte textile Flächengebilde für die Wasserwirtschaft“. Denkendorfer Symposium: Bionik und faserbasierte Werkstoffe, Denkendorf, 19.05.2010.
- o Sarsour, J.; Stegmaier, T.; Linke, M.; Planck, H.: „Innovative technical textiles for water management”. Euro-Mediterranean Conference on Technical Textiles and Innovation in the Euro-Mediterranean Region, Brüssel, 11.03.2010.
- o Stegmaier, T.; Planck, H.: „Potentiale der Bionik für faserbasierte Werkstoffe, Netzwerke, Potentiale, Entwicklungen, Produkte“. 7. Textilveredlertagung des Verein Deutscher Textilveredlungsfachleute e.V., VDTF, Baden-Baden, 21.-22.05.2009.

- Ausbildung:
  - o Sarsour, J.: “Bionische Entwicklung textiler Flächengebilde zur Wassergewinnung aus Nebel“. Vorlesung im Rahmen der Ringvorlesung „Bionik“ an der Universität Stuttgart, 29.06.2009.
  - o Stegmaier, T.: “Materialien für das Textile Bauen“. Gastvorlesung in der Seminarreihe „Neue Gebäudehüllen aus Kunststoffen“ des Instituts für Baugestaltung, Baukonstruktion und Entwerfen, Universität Karlsruhe, 17.12.2008.
- Publikationen:
  - o Sarsour, J.; Stegmaier, T.; Linke, M.; Planck, H: „Wassergewinnung mit 3D-Gewirken - eine Nacht-und-Nebel-Aktion mit Erfolg“. Fachzeitschrift Kettenwirkpraxis, 3/2009, S. 24-26.
  - o Sarsour, J.; Stegmaier, T.; Linke, M.; Planck, H.: “Bionische Entwicklung textiler Flächengebilde zur Wassergewinnung aus Nebel“. Buchbeitrag in Antonia B. Kesel & Doris Zehren (Eds) „Bionik: Patente aus der Natur“. Bionik-Innovations-Centrum Bremen, 2009, p. 82-89.
  - o Stegmaier, T.; Sarsour, J.: “Das kostbare Nass – Bionische Nebelgewinnung aus Nebel“. Buchbeitrag in J. Weintz (Hrsg.) „Spektrum - Bionik Vorbild in Leben und Technik“. Verlag: Wissen Media Verlag, ISBN 978-3577162098, 2008.
  - o Stegmaier, T.; Sarsour, J.; Linke, M.; Planck, H.: „Bionische Entwicklung textiler Flächengebilde zur Wassergewinnung aus Nebel“, Vortragsband zum Bionik-Kongress „Patente aus der Natur“, Bremen, 07.-08.11.2008.

  - Sarsour, J.; Stegmaier, T.; Linke, M.; Planck, H.: “Bionic development of textile materials for harvesting water from fog”. Tagungsband, 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Münster, 29.07.2010.
  - Sarsour, J.; Stegmaier, T.; Linke, M.; Planck, H.: „Bionische Entwicklung textiler Materialien, um Wasser aus Nebel zu gewinnen“. Tagungs-CD, TechTextil Symposium, Frankfurt, 16-18.06.2009.
  - Stegmaier, T.; Planck, H.: „Potentiale der Bionik für faserbasierte Werkstoffe, Netzwerke, Potentiale, Entwicklungen, Produkte“. Tagungs-CD, 7. Textilveredlertagung des Verein Deutscher Textilveredlungsfachleute e.V., VDTF, Baden-Baden, 21.-22.05.2009.
  - Sarsour, J.; Stegmaier, T.; Linke, M.; Planck, H.: „Biologisch inspirierte textile Flächengebilde für die Wasserwirtschaft“. Tagungs-CD, Denkendorfer Symposium: Bionik und faserbasierte Werkstoffe, Denkendorf, 19.05.2010.
- Rundfunkbeitrag:
  - Sarsour, J.; Stegmaier, T.; Linke, M.: „High-Tex für Nebelfänger“. Leonardo - Wissenschaft und mehr, Sendedatum: 03.11.2009, WDR 5.
- und Messeauftritte:
  - Industriemesse in Hannover mit Demonstrator (20.-24.04.2009)
  - Fachmesse TechTextil in Frankfurt mit Demonstrator (16.-18.06.2009).

Die Verbreitung der Ergebnisse sowie die Vorstellung von Funktionsmustern stieß bis dato auf ein sehr großes Interesse im breiten Publikum. Es war dem ITV Denkendorf damit möglich, neue Kontakte zur Industrie aufzubauen und bestehende zu vertiefen. Das Interesse der Industrie fiel dabei nicht nur auf den Einsatz der Textilien zur Gewinnung von Wasser aus Nebel z.B. in Madagaskar (konkrete Anfrage), sondern auch auf andere potenzielle Anwendungsfelder, die aufbauend auf den bisher entwickelten Textilien erschlossen werden können. Aktuell laufen hier z.B. Vorversuche für die Abscheidung von Aerosolen aus der Abluft von industriellen Waschmaschinen. Das ITV Denkendorf ist zuversichtlich, dass neue Entwicklungen daraus hervorgehen werden.

2.12 Diskussion der Ergebnisse und Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt umfasste die Entwicklung textiler Materialien für den Einsatz als Nebelfängertextilien sowie der gesamten Nebelfangsysteme. Diese sollten Wasser aus durch sie hindurch strömenden Nebel gewinnen, indem sie Nebelaerosole an ihrer Oberfläche aufnehmen und abscheiden. Bei den entwickelten und analysierten Textilien handelte es sich um Kuliergewirke, die durch Verformung eine noppenartige Struktur aufweisen, und um zwei sehr offenporige Abstandsgewirke. Neben der Ermittlung der Abscheidemengen der verwendeten Materialien wurden die Textilien hinsichtlich ihrer textilphysikalischen Parameter untersucht als auch deren Einfluss auf die Nebeltropfenabscheidung ermittelt. Zur Ermittlung der Praxistauglichkeit der Textilien erfolgten darüber hinaus Dauerversuche von über acht Stunden im Labormaßstab. Abschließend wurden die Abscheidemechanismen der Textilien und ihr Benetzungsverhalten anhand verschiedener Ausrüstungen analysiert. Neben einer zweidimensionalen Konstruktion für die Nebelfängertextilien wurde eine dreidimensionale Konstruktion entwickelt und die Wassergewinnung der Textilien unter deren Verwendung untersucht.

Die Versuchsergebnisse geben Aufschluss, dass die textilen Parameter maßgeblich Einfluss auf die Auswahl eines geeigneten Nebelfängertextils hat. So sind die textilphysikalischen Parameter der untersuchten Textilien für die gewonnene Wassermenge, aber auch für die Konstruktion der Nebelfängeranlage und deren Beständigkeit von Bedeutung.

Die textilphysikalischen Prüfungen ergaben, dass die entwickelten und untersuchten Textilien 4 (Noppengewirke), 5 und 6 (beide Abstandsgewirke) besonders für den Einsatz als Nebelfänger geeignet sind. Für Textil 4 spricht beispielsweise das niedrige Flächengewicht des Textils, welches eine leichtere und somit kostengünstigere Konstruktion der Nebelfängeranlage ermöglicht. Während das Flächengewicht von Textil 4 bei lediglich 161 g/m² lag, wiesen die Abstandsgewirke mit 377 g/m² (Textil 5) und 618 g/m² (Textil 6) deutlich höhere Flächengewichte auf.

Im Zusammenhang mit dem Flächengewicht ist auch die Wasseraufnahme von Bedeutung, da die Aufnahme von Wasser durch das Textil mit einer Erhöhung der Flächenmasse einhergehen kann, was bei der mechanischen Konzipierung der Nebelfängeranlage hinsichtlich der wirkenden Kräfte zu berücksichtigen ist. So zeigte das Textil 4 ein relativ hohes Wasseraufnahme und -abgabevermögen, wohin gegen die

Abstandsgewirke sich durch ihr niedriges Wasseraufnahmevermögen auszeichnen. Das günstige Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten der Abstandsgewirke wirkte sich günstig auf die Konstruktion der Nebelfängeranlage aus, da die Flächenmasse der eingesetzten Textilien durch das gewonnene Wasser nicht wesentlich erhöht wurde.

Von großer Bedeutung ist, neben den Flächengewichten und den hydrodynamischen Eigenschaften, die mechanische Festigkeit der Textilien. Sie müssen zumeist extreme Bedingungen von Wind, Sonne und Sturm, denen Nebelfänger ausgesetzt sind, standhalten. Während für das Einspannen der Textilien in den Kollektor die Zugfestigkeit der Materialien von Bedeutung ist, liefert die untersuchte Berstfestigkeit eine generelle Aussage über die mechanische Belastbarkeit der Textilien unter multiaxialer Belastung und somit auch über deren Beständigkeit bei ausgesetzter Nebelströmung. Sowohl Zugversuche als auch die Ermittlung der Berstfestigkeit ergaben ausreichend hohe Festigkeiten aller Abstandsgewirke.

Für den Einsatz als Nebelfänger ist auch die Luftdurchlässigkeit der untersuchten Textilien relevant. Eine hohe Luftdurchlässigkeit des eingesetzten Nebelfängertextils verhindert eine Zerstörung der Nebelfängeranlage und/oder eine Beschädigung des Textils bei Stürmen oder Orkanen. Wir konnten, dass mit zunehmender Porengröße der Textilien auch erwartungsgemäß die Luftdurchlässigkeit der untersuchten Textilien steigt. Dementsprechend besaß Textil 2 die geringste Luftdurchlässigkeit und Textil 5 die höchste. Das Textil 4 weist unter den Noppengewirken mit der zweithöchsten Porengröße die höchste Luftdurchlässigkeit auf. Auch die hohen Luftdurchlässigkeiten von Textil 4 und 5 sprachen demnach für deren Einsatz als Nebelfänger.

Wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen war die Ermittlung der abgeschiedenen Wassermenge der untersuchten Textilien. Dabei wurden zunächst im Technikum des ITV die Wechselwirkungen der Textilstruktur dem Benetzungsverhalten und der abgeschiedenen Wassermenge gegenübergestellt. Während mit herkömmlichen, aktuell in der Praxis eingesetzten Folienbändchengewirken rund 3 $l/(h \cdot m^2)$ Wasser gewonnen werden konnte, erwiesen sich die Abstandsgewirke sowie das Noppengewirke 4 deutlich effektiver. Mit teilweise mehr als 8 $l/(h \cdot m^2)$ schieden die Abstandsgewirke und das Noppengewirke 4 mehr als die doppelte Menge Wasser ab. Dabei konnte festgestellt werden, dass für eine hohe abgeschiedene Wassermenge die Kombination aus geringer Materialwasseraufnahme und hoher Wasserabgabe von Vorteil ist, wie es für die untersuchten Abstandsgewirke zutrifft. Zudem konnte ein Zusammenhang zwischen zunehmender Luftdurchlässigkeit zu steigender gewonnenen

Wassermenge aufgezeigt werden. Anhand von Textil 5 (offenstes Gewirke) wurde jedoch festgestellt, dass die positive Wirkung einer hohen Luftdurchlässigkeit begrenzt ist, d.h. zu hohe Luftdurchlässigkeiten bewirken einen sinkenden Ertrag, da mehr Nebel durch die großen Textilöffnungen ungenutzt strömen kann und somit verloren geht.
Die in den Screening-Versuchen ergiebigsten Textilien 4, 5, 6 zeigten auch in den Dauerversuchen gute Ergebnisse. Dabei schied Textil 6 nahezu gleich viel Wasser ab wie Textil 5. Textil 4 erwies sich in dieser Versuchsreihe ebenso als geeignet.
Um schließlich eine Aussage über den Einfluss des Benetzungsverhaltens auf die abgeschieden Wassermenge treffen zu können, wurden die in den Screeing-Versuchen besten Textilien sowohl hydrophob als auch hydrophil mit Dünnstbeschichtungen ausgerüstet und anschließend benebelt. Dabei zeigte sich, dass beide Ausrüstungsarten negative Auswirkungen auf die abgeschiedene Wassermenge haben. Mit den Versuchen, Textil 4 in Anlehnung an eine frühere Theorie, nur teilweise auszurüsten, konnte ebenso keine Steigerung der abgeschiedenen Wassermenge erzielt werden.
Hinsichtlich der Anwendungsaufführung und der Einspannung der Textilien erfolgten anschließend Entwicklungsarbeiten. Dazu wurde neben den flächigen Konstruktionen auch eine zylinderförmige Nebelfängerkonstruktion gebaut und die abgeschiedene Wassermenge der Textilien 4, 5 und 6 in dieser untersucht. Hierbei wurde die prinzipielle Funktionstauglichkeit eines solchen Nebelfängers belegt und die Eignung der Textilien in einer solchen bestätigt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Nutzung der dritten Dimension in Form von Abstandsgewirken optimal für die Gewinnung von Wasser aus Nebel ist, wobei beide untersuchten Abstandsgewirke (Textil 5 und 6) sehr gut geeignet sind. Im Vergleich zu Textil 5 ist Textil 6 deutlich preiswerter, erfordert aber aufgrund des höheren Flächengewichts und der größeren Wasseraufnahmekapazität eine robustere Nebelfängerkonstruktion. Demgegenüber ist für Textil 4, bedingt durch seine textilphysikalischen Eigenschaften, eine solche robuste Konstruktion nicht erforderlich. Dieses Noppengewirke ist zudem deutlich preiswerter in der Herstellung als die Abstandsgewirke und hinsichtlich der gewonnen Wassermenge durchaus effektiv. Somit stehen für verschiedene mechanische Konstruktionen und Anforderungn 3 neu entwickelte Materialien zur Verfügung, die eine hohe Abscheideleistung der Nebelaerosole von bis zu 80% ermöglichen und gleichzeitig orkanfest sind.

Teilvorhaben 2: Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen

3.1 Durchgeführte Arbeiten 84
3.2 Material und Methoden 84
3.3 Vergleich der Nebelernte 2-dimensionaler Testobjekte und ..... eines biologischen Objektes 87
3.4 Benebelungsversuche Spindelobjekte und Kiefernzweige 91
3.5 Kontaktwinkelmessungen 93
3.6 Messung der Nebelernte bei verschiedenen Pinus-Arten 95
3.7 Ermittlung der Interception efficiency 97
3.8 Anwendung eines theoretischen Modelles zur Beschreibung ..... der Tropfengröße auf nebelerntende Strukturen 102
3.9 Untersuchungen der Oberflächen von Kiefernnadeln 104
3.10 Zusammenfassung der Ergebnisse des Teilprojektes 104

3.1 Durchgeführte Arbeiten

Die hier dargestellten Arbeiten hatten zum Ziel, die Nebelernte natürlicher Systeme zu untersuchen, darzustellen und die aufgefundenen Prinzipien auf ihren möglichen Nutzen für technische Übertragungen zu evaluieren. Die Arbeiten konzentrierten sich im wesentlichen auf pflanzliche Oberflächen. Hier gibt es verschiedene Ökosysteme und Arten, denen eine hohe Fähigkeit zur Nebelabscheidung nachgesagt wird. Jedoch sind die Kenntnisse der zugrundeliegenden Wirkprinzipien oftmals noch spärlich.

3.2 Material und Methoden

Die Studien wurden durchgeführt an verschiedenen Arten von Pinus (Kiefer), Myrica arborea, sowie diversen Arten von Tillandsien. Kiefernwäldern wird eine hohe Kapazität zur Auskämmung von Nebel nachgesagt (siehe Abb. 3.1).

Abb.: 3.1:
Links: Pfützenbildung unter einer Kanarenkiefer nach einem Nebelereignis auf Teneriffa. Zu beachten ist, dass sich Feuchtigkeit am Boden nur innerhalb der Abtropfregion der Krone bildet (Aufnahme: Michaela Grein, Uni Tübingen). Rechts oben: Detaildarstellung der Wasseransammlung unterhalb des Baumes. Rechts unten: Nahaufnahme eines langnadeligen Zweiges von *Pinus canariensis* (Botanischer Garten der Universität Tübingen).

Die Fähigkeit zur Auskämmung von Nebel sollte ansteigen mit 1) der Niederschlagsarmut einer Region sowie 2) mit der Häufigkeit von Nebelereignissen dort.

Diese Verhältnisse sind durchaus auf den Kanarischen Inseln gegeben. Nebelereignisse und tiefhängende Wolken können dort regional zum Wassereintrag beitragen, wenngleich die absoluten Mengen stark standortabhängig sind. Konsequenterweise wurden 2 kanarischen Arten (*P. canariensis, M. arborea*) betrachtet. Beide sind durch Gewächshausmaterial lokal verfügbar. Im Falle von *Pinus* erfolgte ein Vergleich zwischen der Kanarenkiefer und anderer Arten, bei denen ein Vorteil durch Nebelernte nicht erwartet wird. Ferner wurden einige Versuche mit Tillandsien durchgeführt, die sich ausschließlich mit Wasser versorgen, dass durch die Blätter „eingefangen“ wird.

Zur Untersuchung der Nebelernte von pflanzlichen Organismen kamen diverse Methoden zum Einsatz, die kombiniert angewendet wurden.

Benebelungsversuche unter kontrollierten Bedingungen

1. Hierfür wurden verschiedene Nebelgeneratoren verwendet. Zum einen kam auch in diesem Teilprojekt der Nebulo der Fa. Igeba zum Einsatz (siehe Abschnitt 2.1.2.1). Ferner wurde ein handelsüblicher Luftbefeuchter benutzt, dessen Tropfengrößenspektrum im Bereich des natürlichen Nebels liegt. Die Versuche dienten zum einen zur Beobachtung des Tropfenverhaltens auf der Oberfläche. Zum anderen wurde das Nebelerntevermögen getestet, indem die Rate der Nebelernte während des Versuches gravimetrisch (durch Wiegen) ermittelt wurde.
2. Licht- und Elektronenmikroskopie (REM)

   Zur Untersuchung der betreffenden Oberflächen wurden lichtmikroskopische und REM-Studien durchgeführt. Hierfür wurden Stereomikroskope und das am IFG vorhandene REM verwendet (LEO Model 1450 VP (Variable Pressure), LEO Electron Microscopy Ltd, Clifton Road, U.K.).
3. Kontaktwinkelmessung

   Zur Feststellung des apparenten Kontaktwinkels wurde das DCAT 11 tensiometer (DataPhysics Instruments, Filderstadt) verwendet, welches am ITV zur Verfügung steht. Dieses Gerät eignet sich vorzüglich zur Ermittlung des Kontaktwinkels an zylindrischen Objekten, da der rückschreitende und fortschreitende Kontaktwinkel während eines Eintauchversuches ermittelt wird.
4. Theoretische Studien zum Tropfenverhalten auf Oberflächen

   Während der Arbeiten wurden zahlreiche Beobachtungen zum Tropfenverhalten auf den betrachteten Oberflächen gemacht. Da Koaleszenz und Abtropfen für

eine effiziente Nebelernte (vor allem bei kurzzeitigen Ereignissen) eine nicht unwesentliche Rolle spielt, wurden theoretische Analysen zum Tropfenverhalten erstellt.

Versuchsaufbauten

Für die Messungen des Nebelniederschlags an Pflanzen im Gewächshaus wurde nach der Testphase der Geräte ein Trägersystem konstruiert, das es ermöglicht Pflanzen oder Pflanzenteile so einzuspannen, dass möglichst keine Träger über und unter den zu messenden Objekten verlaufen. Hierfür dient ein U-förmiges Gestell mit einer Höhe von 1,5 m und einer Breite von 1 m (siehe Abb. 3.2) in dem die Pflanzen mit Hilfe dünner Nylonfäden eingespannt werden können.

Abb. 3.2:
Links: Gestell aus zwei vertikalen Seitenträgern zum Einspannen von Objekten. Die hier abgebildete Schablone (20x20 cm) aus Kunststoff ist mit diagonal überkreuzten Nylonfäden verspannt. Auf dem Boden befindet sich das Auffanggefäß für den abgefangenen von rechts mit ca. 1 m/s anströmenden Nebel. Rechts: Im Vordergrund das Kaltnebelgerät; im Hintergrund das Gestell zum Einspannen der Messobjekte (hier leer) und der Mast mit den meteorologischen Messinstrumenten; links im Bild ist der angeschlossene Datenlogger.

Die zu untersuchenden Pflanzen bzw. Messobjekte werden in einer Höhe von ca. 1 m über dem Boden eingespannt und von einem Kaltnebelgerät mit definiertem Tropfengrößenspektrum benebelt (siehe Abb. 3.2). Der abgefangene Nebel wird über einen Nylonfaden, der von der tiefsten Stelle des zu messenden Objektes herabhängt in ein Auffanggefäß geleitet. Hierdurch wird ein Abdriften frei fallender Tropfen durch den Windstrom weitgehend verhindert. Die Benebelung wird mit definierten Distanzen zwischen dem Messobjekt und der Nebelquelle über eine Dauer von 20 Minuten durchgeführt, wobei die Niederschlagsmessung erst im tropfnassen Zustand des Messobjektes beginnt. Die Menge des abgefangenen Nebels wird nach der Benebelung

über eine elektrische Laborwaage bestimmt und in Volumen / Fläche und Zeit [l/m²·h] umgerechnet.

3.3 Vergleich der Nebelernte 2-dimensionaler Testobjekte und eines biologischen Objektes

In Vorversuchen wurden die Messmethoden zunächst für 2-dimensionale Objekte getestet und an die jeweiligen Erfordernisse angepasst. Hierzu wurde mit 2-dimensionalen künstlichen Messobjekten aus Kunststoff begonnen (siehe Abb. 3.3). Ziel dieser ersten Studien war es, für 2-dimensionale Objekte die Bedeutung der Gesamtfläche und der Architektur der Gesamtfläche zu eruieren und Erfahrungen mit dem Messstand zu sammeln. Nachdem Erfahrungswerte bezüglich der Messungen und des Verhaltens der Objekte vorlagen, wurde mit den ersten biologischen Objekten begonnen. Diese konzentrieren sich zunächst auf Bäume und Sträucher der Nebelwaldzone der Kanarischen Inseln, da diese in früheren Untersuchungen immer wieder mit dem Effekt des „Auskämmens von Nebel“ in Verbindung gebracht werden. Es sollen folgende Pflanzen und Pflanzenteile in bezug auf ihr Vermögen, Nebel auszukämmen, untersucht werden: *Erica arborea*, *Erica scoparia*, *Pinus canariensis*, *Laurus azorica*.

Der Nebel wird mit einem Kaltnebelgerät, Nebulo, Fa. IGEBA Gerätebau GmbH, 87478 Weitnau, erzeugt (s.o.). Der Nebel strömt mit einer hohen Geschwindigkeit aus der Düse. Die Geschwindigkeit und die Querschnittsfläche der Nebelströmung (und damit die Tröpfchendichte) ändern sich mit dem Abstand vom Nebulo. Um die exakte Windgeschwindigkeit des anströmenden Nebels bei unterschiedlichen Abständen der Testobjekte vom Gerät zu ermitteln, wurde vor der eigentlichen Nebelniederschlagsmessungen nur das Anemometer in das Zentrum des Nebelstroms gestellt und bei verschiedenen Distanzen zur Nebelquelle gemessen. Im Gewächshaus können diese einmalig ermittelten Windgeschwindigkeiten dann als konstante Parameter betrachtet werden. Gemessen wurde die Windgeschwindigkeit des anströmenden Nebels bei verschieden Distanzen zwischen 1 und 6 Metern (Abb. 3.4).

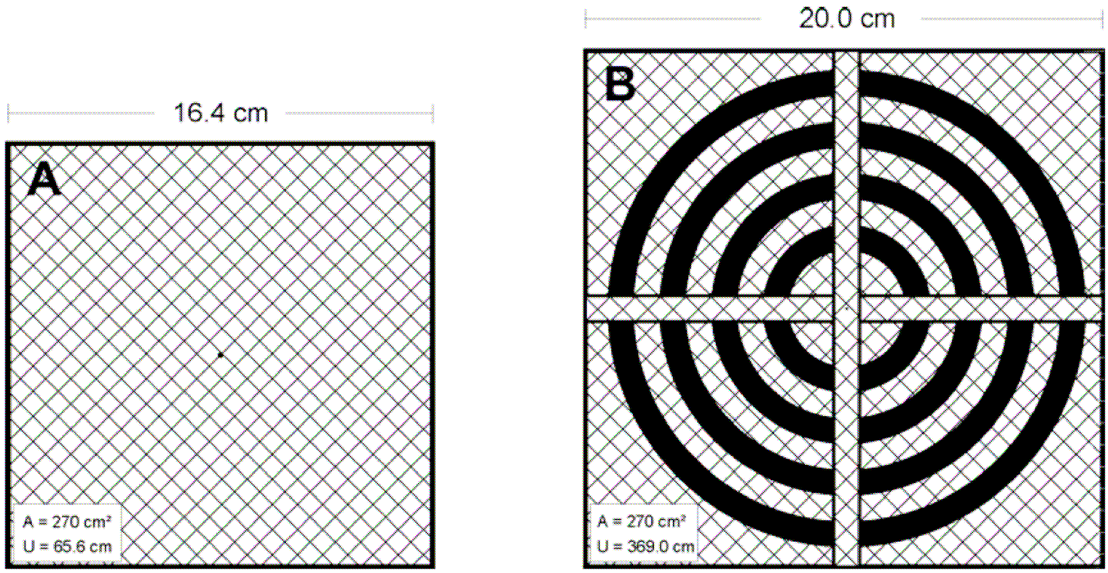


Abb. 3.3:
Darstellung der 2-dimensionalen, artefiziellen Testobjekte. Zwei Kunststoffschablonen wurden variiert, zum einen als einfaches Quadrat (A) und zum anderen als Quadrat mit herausgeschnittenen Kreissegmenten (B); die kreuzschraffierten Flächen entsprechen den Grundflächen, die schwarzen Kreisflächen wurden herausgeschnitten. A entspricht der Gesamtfläche der Schablonen und U gibt die Gesamtlänge der Kanten des Objektes an.

Grundsätzlich gibt es 2 Parameter, die bei gegebener Nebelanströmung und sonstigen Umweltbedingungen die Abscheideleistung beeinflussen: 1) die Oberflächeneigenschaften des Materiales (z.B. Kontaktwinkel) und 2) die räumliche Anordnung des Materiales (siehe Bericht des ITV Denkendorf zum Verhalten von Textilien mit ausgeprägter dritter Dimension). So hat die Gesamtlänge der Umrisskanten angeströmter Objekte einen erheblichen Einfluss auf die Menge des abgefangenen Nebelniederschlags. Um diesen Effekt in einem ersten Testversuch zu quantifizieren und um eine Vergleichsbasis für biologische Objekte und für die textilen Konstruktionen des ITV Denkendorf zu schaffen, wurden die bereits weiter oben beschriebenen zweidimensionalen Schablonen aus Kunststoff mit definierten Kantenlängen und Flächen hergestellt. Beide Schablonen haben eine Grundfläche von 270 cm², jedoch unterschiedliche Kantenlängen von 66 bzw. 369 cm (Abb. 3.3). Der Kontaktwinkel beträgt ca. 90°. Die Schablonen wurden nacheinander in einer Aufhängungsvorrichtung eingespannt und jeweils 20 Minuten mit einer Windgeschwindigkeit von ca. 1 m/s (entspricht einer Distanz 4 m zur Nebelquelle) benebelt (Abb. 3.4 und 3.5). Die Abscheideleistung beider Modelle ist in Tabelle 1 dargestellt.

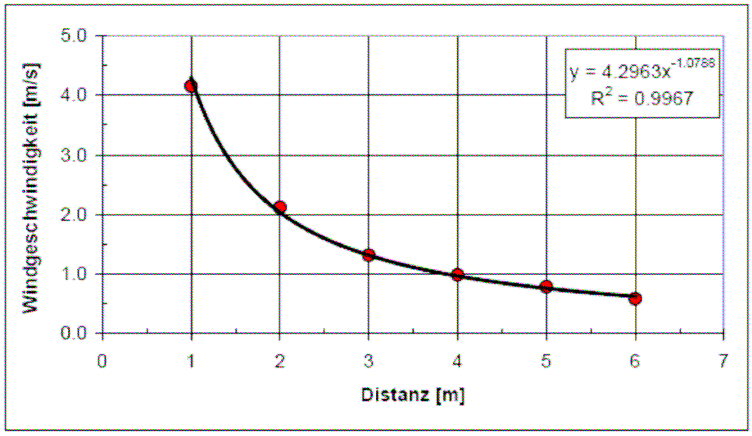


Abb. 3.4: Windgeschwindigkeit des anströmenden Nebels in Abhängigkeit zur Distanz der Nebelquelle.

Abb. 3.5: Benebelung der Schablone A aus 4 m Abstand im Meßstand.

Die Daten in Tabelle 1 zeigen, daß die Abscheideleistung bei Modell B mehr als doppelt so hoch ist wie für Modell A, wohingegen sich die Gesamtfläche beider Modelle nur um den Faktor 1.48 unterscheidet (400 cm^2 zu 270 cm^2). Dieser einfache Versuch demonstriert, daß neben der Erhöhung der Gesamtfläche auch die Struktur und Architektur des Objektes von Bedeutung ist.

Parameter	Schablone A	Schablone B	Erica arborea
Fläche[cm²]	270	270	?
Kantenlänge [cm]	65.6	369.0	?
Kante/Fläche	0.24	1.37	?
Distanz zur Nebelquelle [m]	4	4	4
Windgeschw. [m/s]	0.98	0.98	0.98
Nebeldauer [min]	20	20	20
abgefangene Wassermenge [g]	12.5	27.7	90.8
abgefangene Wassermenge [l / m2 h]	1.39	3.08	?

Tab. 1: Messergebnisse zu den Benebelungsversuchen.

In einem ersten Versuch an Pflanzenteilen wurde der Nebelniederschlag an *Erica arborea* gemessen. Diese Art kommt in den Nebelwäldern der Kanarischen Inseln vor. Auch hier wurde wie schon bei den beiden Schablonen aus Kunststoff in einem Abstand von 4 m zur Nebelquelle und bei 20-minütiger Benebelung gemessen (vergl. Tabelle 1 und Abbildung 3.5). Die genaue Fläche ist hier nicht so genau bestimmbar wie für die Quadratstrukturen, da der Zweig mit seiner nadelförmigen Belaubung einen nicht so regelmäßigen Umriss hat. Zudem weist die Benadelung eine dreidimensionale Struktur auf, die schwer mit derjenigen der Quadratstruktur vergleichbar ist. Die maximale Länge des Zweiges beträgt 58 cm, während an der breitesten Stelle eine Weite von 14 cm gemessen wurde. Die Umrißfläche beträgt 808 cm^2. Die in Tabelle 1 enthaltenen Daten weisen darauf hin, daß der Zweig von *Erica arborea* bezüglich der Abscheideleistung leicht effektiver ist als das Testobjekt B.

Abb. 3.6: Ein Zweig von *Erica arborea* (Pfeil) im Teststand.

Die Verteilung von Material über eine Fläche nimmt - neben den Oberflächeneigenschaften - maßgeblich Einfluss auf die Abscheideleistung pro Gesamtfläche eines Objektes (= gesamte Umrißfläche, entspricht für Modell B 20x20 cm). Das Ergebnis von *Erica arborea* dürfte mit dem Vorhandensein der dritten Dimension in diesem Objekt zusammenhängen (siehe Bericht des ITV Denkendorf bezüglich der Effizienz dreidimensionaler Strukturen).

In den darauffolgenden Versuchen wurden intensiv Kiefern untersucht, wobei hier insbesondere die Kanarenkiefer von Interesse war. Angestrebt war ein Vergleich zwischen verschiedenen Kiefernarten bezüglich Nebelernte, Architektur der Benadelung und Oberflächeneigenschaften. Biologische Objekte weisen eine hohe Variabiliät bezüglich verschiedener Parameter auf. So ist beispielsweise die Anzahl der Nadeln an Zweigen von *Pinus* unterschiedlich. Um standardisierte Daten zu erhalten, die als Grundlage für ein entsprechendes planvolles weiteres Vorgehen bei biologischen Objekten dienen sollten, wurden artefizielle Objekte, die die Grundstruktur eines Pinuszweiges aufweisen, bezüglich ihrer Abscheideleistung vermessen (Abb. 3.7). Die Ergebnisse stellen auch eine wichtige zusätzliche Informationsquelle für die technischen Konstrukte dar.

3.4 Benebelungsversuche Spindelobjekte und Kiefernzweige

Als wichtigstes Standardobjekt bewährte sich die sogenannte „Borstenspindel“. Hierbei handelt es sich um eine zentrale Achse, an der senkrecht Kunststoffborsten befestigt sind. Dieses Objekt stellt eine Abstraktion eines Pinuszweiges dar (siehe Abb. 3.7). Dieses Objekt wurde nun in unterschiedlichen Positionen bezüglich seiner Nebelernte vermessen. Folgende Positionsvariationen wurden beobachtet: Kippung der Spindel von 0° - 90° (90° entspr. vertikale Orientierung der Bo rsten), sowie die gleiche Messreihe ohne Borsten, um den Einfluss der Spindelachse auf das Ergebnis zu erhalten.

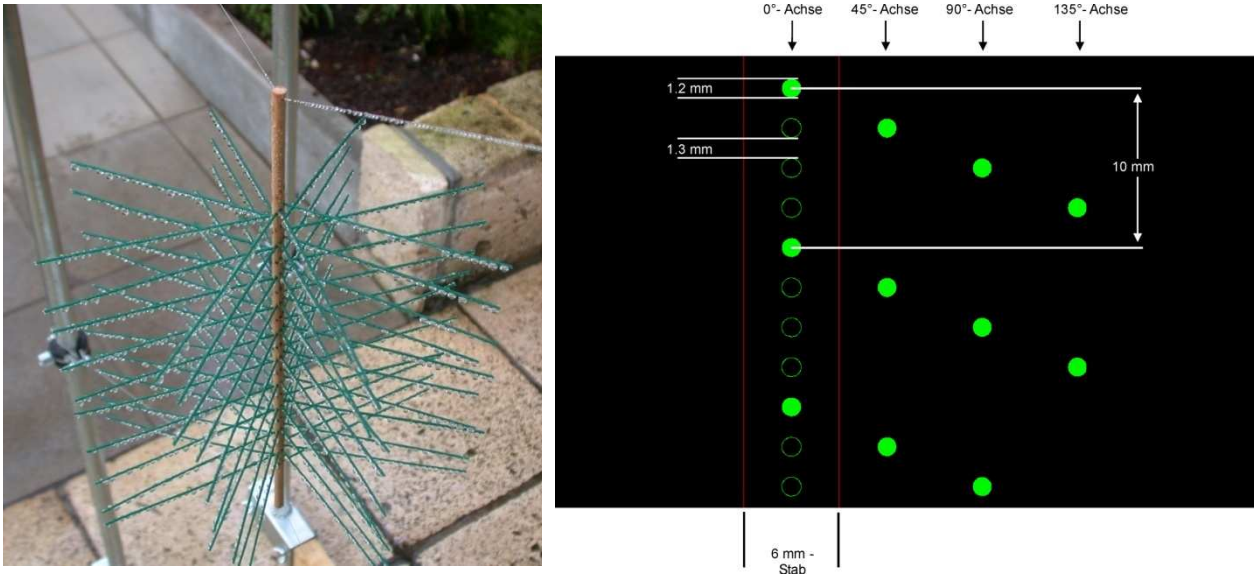


Abb. 3.7: Die „Borstenspindel“ als standardisiertes Modell eines *Pinus*-Zweiges. Links: Die Borstenspindel im Teststand. Rechts: Abmasse der Borstenspindel. Die Zeichnung zeigt, wie die Borsten (grüne Kreise) entlang der Spindel (Achse) angebracht sind.

Die Ergebnisse (Abb. 3.8) zeigen, dass der Neigungsgrad das Ernteergebnis signifikant beeinflusst. Für das Objekt mit Borsten ist das Ernteergebnis maximal bei 0° (= Borsten horizontal) und bei nahe 90° (= Borsten vertikal). Dies bedeutet, dass sowohl für artifizielle Objekte als auch für biologische Objekte die Position im Raum signifikant ist.

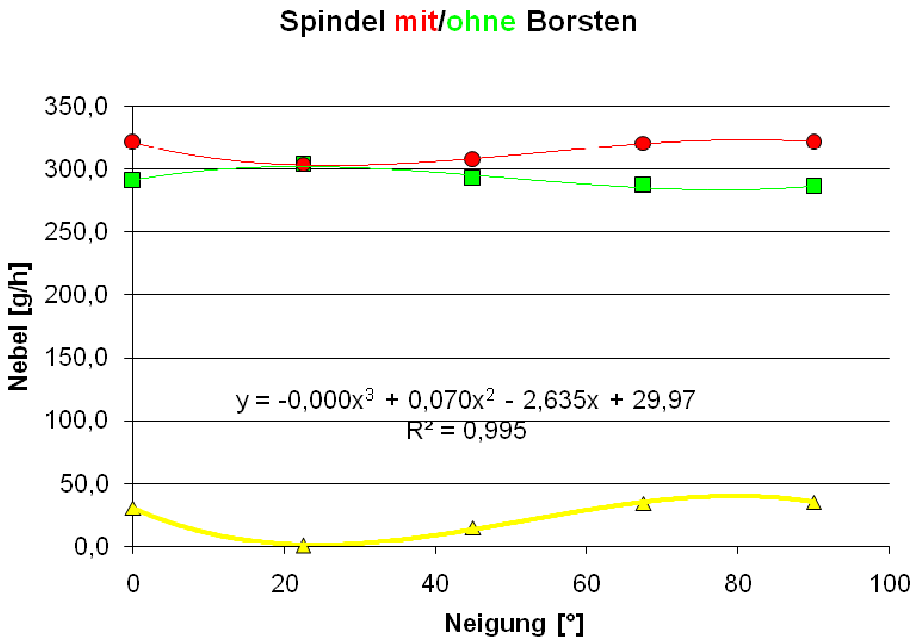


Abb. 3.8: Ergebnisse der Nebelernte der „Borstenspindel“ nach verschiedenen Variationen des Neigungswinkels und des Aufbaues (mit und ohne Borsten). Die gelbe Kurve im unteren Bereich des Diagramms stellt die Nebelernte der Borsten alleine dar.

		Wasser	_+/-	Differenz advancing-receding
Stipagrostis sabulicola				
	advancing	98,3	4,7	42,5
	receding	55,8	9,4	
	mean	78,7	23,1	
Pinus montezumae	advancing	88,8	5,0	66,2
	receding	22,6	9,3	
	mean	55,7	34,7	
Pinus wallichiana	advancing	97,6	2,5	61,2
	receding	36,4	3,4	
	mean	67,0	31,5	
Pinus canariensis (normal)	advancing	104,5	24,3	51,5
	receding	53,1	23,0	
	mean	78,8	35,0	
Pinus canariensis (blau)	advancing	128,3	4,4	26,2
	receding	102,1	11,8	
	mean	115,2	16,0	
P. sylvestra	advancing	98,933	5,0	46,901
	receding	52,032	1,4	
	mean	75,4825		
P. pinaster	advancing	76,127	4	32,675
	receding	43,452	1,9	
	mean	59,7895		
Spindelborsten	advancing	91,87	3,3	25,16
	receding	66,63	5	
	mean	79,2050	14,0	

Tab. 2:
Kontaktwinkel der verschiedenen betrachteten Objekte. Diese beinhalten mehrere Arten von Pinus (Kiefer), die im artefiziellen Objekt verwendeten Borsten sowie das Wüstengras Stipagrostis sabulicola, das ebenfalls ein Nebelernter ist. Zu *Pinus canariensis* ist zu bemerken, dass diese Art 2 Typen von Nadeln ausbildet: blaue Primärnadeln und grüne Sekundärnadeln. Die blauen Nadeln sind durch Wachse bereift und hydrophob.

3.5 Kontaktwinkelmessungen

Der Einfluss der Neigung ist der Wirkung der Schwerkraft auf die sich bildenden Tropfen zuzuschreiben. Ein geneigtes Objekt lässt nämlich Tropfen abrollen, während ein horizontal gelagertes Objekt Tropfen abfallen lässt. In diesem Zusammenhang sind die Oberflächeneigenschaften von wesentlicher Bedeutung. Tabelle 2 zeigt die gemessenen Kontaktwinkel verschiedener biologischer Objekte und der verwendeten Borstenspindeln. Bei den Ergebnisse fällt auf, dass das die biologischen Objekte in der

Regel 1) nicht hydrophob sind und 2) eine relativ hohe Kontaktwinkelhysterese aufweisen (= Differenz zwischen fortschreitendem und rückschreitendem Kontaktwinkel). Eine hohe Kontaktwinkelhysterese bedeutet, dass Tropfen stark an einem Objekt haften können, d.h. erst dann abfallen oder abrollen, wenn sie relativ groß sind. Bei dem einzigen hydrophoben Objekt handelt es sich um die blau bereiften Nadeln von *P. canariensis*, die in der Regel nur an Neuausschlägen erscheinen, d.h. an Zweigen, die nach Achsenbeschädigung aussprießen. Der Grund dafür ist unbekannt.
Tatsächlich unterscheidet sich das Tropfenmuster der blauen Nadeln bei Benebelung von demjenigen der normalen grünen Nadeln . Bei den blauen Nadeln perlen permanent kleine Tropfen ab, da die relativ geringe Kontaktwinkelhystere und die Hydrophobizität zu einem wasserabweisenden Verhalten führen. lösen sich permanent kleine Tropfen. Aber auch bei den nicht hydrophoben Arten unterscheiden sich die Tropfenmuster. Zwar bilden sich bei allen nicht hydrophoben *Pinus*-Nadeln relativ große Tropfen, aber das Verhalten der Tropfen ist unterschiedlich. So bilden sich bei den grünen Nadeln von *P. canariensis* viele Tropfen lang der Achse während bei P. sylvestris oftmals ein einziger Tropfen am Nadelende erscheint (siehe Abb. 3.8). Die Gründe hierfür sind in den Oberflächeneigenschaften zu suchen wie später noch erläutert wird.

Abb. 3.8: Sich durch einen Nebelstrom bildende Tropfen an *Pinus canariensis* (links) und an *Pinus sylvestris* (rechts).

Im folgenden wird die Nebelernte der einzelnen *Pinus*-Arten quantitativ untersucht.

3.6 Messung der Nebelernte bei verschiedenen Pinus-Arten

Zur weiteren Analyse der Nebelernte von mutmaßlich nebelerntenden Pflanzenarten vor dem Hintergrund der bisherigen Ergebnisse wurden verschiedene Pinus-Arten auf ihre Fähigkeit zur Nebelabscheidung untersucht. Die Messungen fanden wiederum an dem oben und im letzten Zwischenbericht beschriebenen Teststand statt. Zu den Versuchen ist anzumerken, dass angestrebt wurde, die abgefangene Nebelmenge im Hinblick auf die biologische Varianz der Pflanzenarten und –Individuen (z.B. Nadelmenge, Nadellänge, Nadelbreite etc.) zu charakterisieren und zu quantifizieren.
Um einen Eindruck von der Abscheideleistung einzelner Nadeln zu erhalten, wurden Nadeln in Gruppen über Reagenzgläsern untersucht (Abb. 3.9).

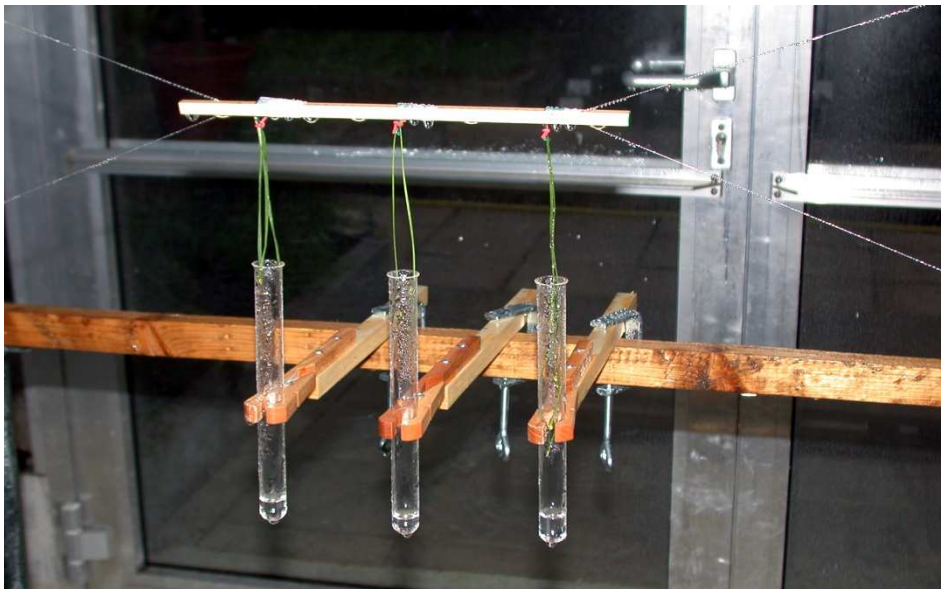


Abb. 3.9: Abbildung des Reagenzglasversuches, bei dem die Abscheideleistung einzelner Nadeln ermittelt wurde.

Die Ergebnisse zur Abscheidung der Einzelnadeln sind in verschiedenen Tabellen dargestellt. Tabelle 3 zeigt die Abscheideleistung dreier Pinus-Arten, darunter grüne Nadeln von *P. canariensis*.

Reagenzgläser		Menge []
links	P. sylvestris	11,7 g
mitte	P. wallichiana	11,3 g
rechts	P. canariensis	12,6 g

Tab. 3:
Mittelwerte der Ergebnisse der Nebelernte von Einzelnadeln dreier verschiedener *Pinus*-Arten (Messzeit jeweils 1 Stunde). Die Orientierung in diesem Versuch besteht in einer vertikalen Positionierung der Nadeln

Im Einzelnadelversuch ergibt sich in der Regel bei *P. canariensis* eine höhere Nebelausbeute. Zur weiteren Analyse wurden benadelte Zweige verwendet. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass sich Nadeldimensionen und Nadeldichte bei verschiedenen Arten unterschiedlich sind. Um festzustellen, ob sich die Nadeln in ihrer Abscheideleistung unterscheiden, muss die Nebelernte also auf entsprechende Parameter bezogen werden. Tabelle 4 zeigt die Mittelwerte für eine Reihe von Untersuchungen an *Pinus sylvestris* und *Pinus canariensis* (beide Nadeltypen).

		Pinus sylvestris	P. canariensis (blaue Nadeln)	P. canariensis (grüne Nadeln)
Nebel pro Stunde und Nadellänge	[g/h*m]	9,6	6,2	7,0
Nebel pro Stunde und Nassgewicht	[g/h*g]	12,8	18,4	18,0
Nebel pro Stunde und Trockengewicht	[g/h*g]	43,6	-	53,6

Tab. 4: Abscheideleistung von Zweigen von *Pinus sylvestris* und den 2 Nadeltypen von *Pinus canariensis*, bezogen auf unterschiedliche Zweigparameter.

Da *P. slyvestris* viel breitere Nadeln besitzt als *P. canariensis* dürfte der Bezug der Nebelernte auf Nadellänge weniger über den Unterschied zur Abscheideleistung aussagen als der Bezug auf Nass- oder Trockengewicht des Gesamtzweiges. In diesem Falle würde auch dieser Versuch eine höhere Abscheideleistung von *P. canariensis* bestätigen. Die bis zu diesem Punkt erfolgten Untersuchungen lassen sich bezüglich ihrer Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

Trotz hoher Varianz scheint *P. canariensis* in der Tat eine höhere Abscheideleistung aufzuweisen als andere Pinus-Arten.

- Der Grund hierfür dürfte im Verhalten der Tropfen liegen, die sich an den Nadeln bilden. Es erscheint so zu sein, daß es vorteilhaft ist, wenn sich große Tropfen möglichst lange halten können, unabhängig von der Orientierung der Objekte.
- Ein wesentlicher Faktor für die Tropfengröße ist die Differenz zwischen fortschreitendem und rückschreitendem Kontaktwinkel.

P. canariensis verfügt darüber hinaus über sehr lange Nadeln (Abb. 3.10). Da die Architektur eine große Rolle spielt, ist bislang noch nicht geklärt, inwieweit Oberflächeneffekte an den Unterschieden mitwirken. Hierfür wird im folgenden die Interception efficiency bestimmt.

Abb. 3.10:
Zweig von P. canariensis. Deutlich zu erkennen sind die ausgesprochen langen Nadeln.

3.7 Ermittlung der Interception efficiency

Um weitere Informationen bezüglich möglicher Oberflächeneffekte zu erhalten, und diese von der architektonischen Komponente der Fähigkeit zur Nebelernte zu trennen, wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, wobei wiederum artefizielle Objekte mit biologischen Objekten verglichen wurden. Hierzu muss die sogenannte interception efficiency ermittelt werden. Dies ist die Nebelernterate pro Oberfläche. Es stellt sich nun das Problem, dass bei pflanzlichen Systemen immer die architektonische Anordnung zu beachten ist, da die an einem Zweig befindlichen Einzelnadeln zusammen das Nebelerntesystem bilden. Hierbei wurde so vorgegangen, dass die betrachteten Modell architektonisch möglichst standardisiert wurden.

Anstatt die Objekte in einer Spindel anzuordnen, wurden Einzelobjekte in Blumensteckschaum fixiert (Abb. 3.11) und diese Anordnung in den Nebelstrahl verbracht. Der Grund dafür bestand in der Beobachtung, dass die Spindel selber Nebel abfängt und so das Gesamtergebnis beeinträchtigt (siehe oben). Es wurden 2 Orientierungen systematisch untersucht: senkrechte Orientierung und waagerechte Orientierung. Bei den Objekten handelte es sich wiederum um handelsübliche Besenborsten aus Kunststoff, diverse Pinus-Arten und ein Borstengras (*Stipagrostis sabulicola*). Bezüglich der biologischen Objekte wurden in der Regel 40 verschiedene Individuen pro Art untersucht, da biologisches Material in der Regel eine gewisse Varianz aufweist.

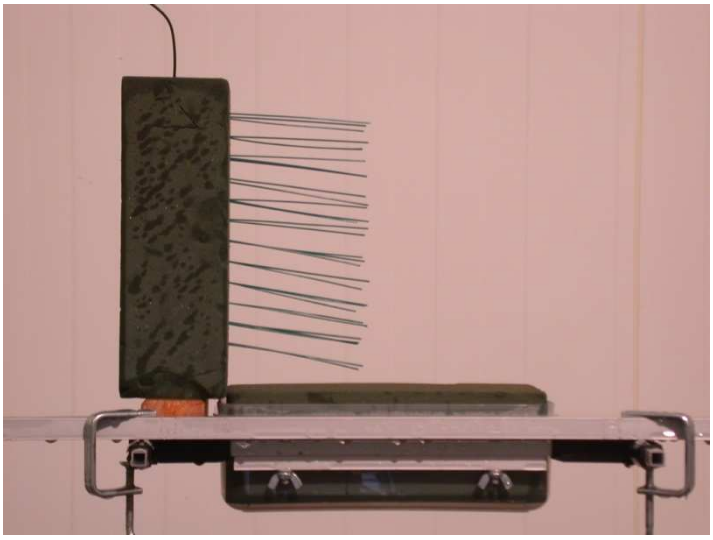


Abb. 3.11:
Versuchsanordnung: Die zu messenden Elemente sind in Blumensteckschaum fest eingebracht. Die hier gezeigte Anordnung wird für den Fall „waagerechte Orientierung“ verwendet, wobei der Winkel von 90° durch eine entsprechende Kippung noc h fein eingestellt wird.

Die Abbildung 3.12 zeigt die Interception efficiency (im folgenden IE genannt, = g geernteter Nebel pro Stunde und cm^2 Blattoberfläche) für senkrechte und waagerechte Orientierung verschiedener Objekte. Es ist deutlich zu sehen, dass – mit einer Ausnahme – die waagerechte Orientierung deutlich mehr Nebelernte erzeugt als die senkrechte Orientierung. IE korreliert in verschiedener Weise mit dem Kontaktwinkel α (Abb. 3.13). Für die senkrechte Orientierung ergibt sich eine gewisse Korrelation mit α, insbesondere mit dem fortschreitenden Kontaktwinkel. Für die waagerechte Orientierung ist keine deutliche Korrelation aufzufinden. Der Grund hierfür besteht darin, dass der Tropfen bei senkrechter Orientierung sich entlang der Objektoberfläche bewegen muss. Bei waagerechter Orientierung erfolgt keine Bewegung, sondern nur ein Abtropfen. Die Abhängigkeit von α ist hier wesentlich geringer.

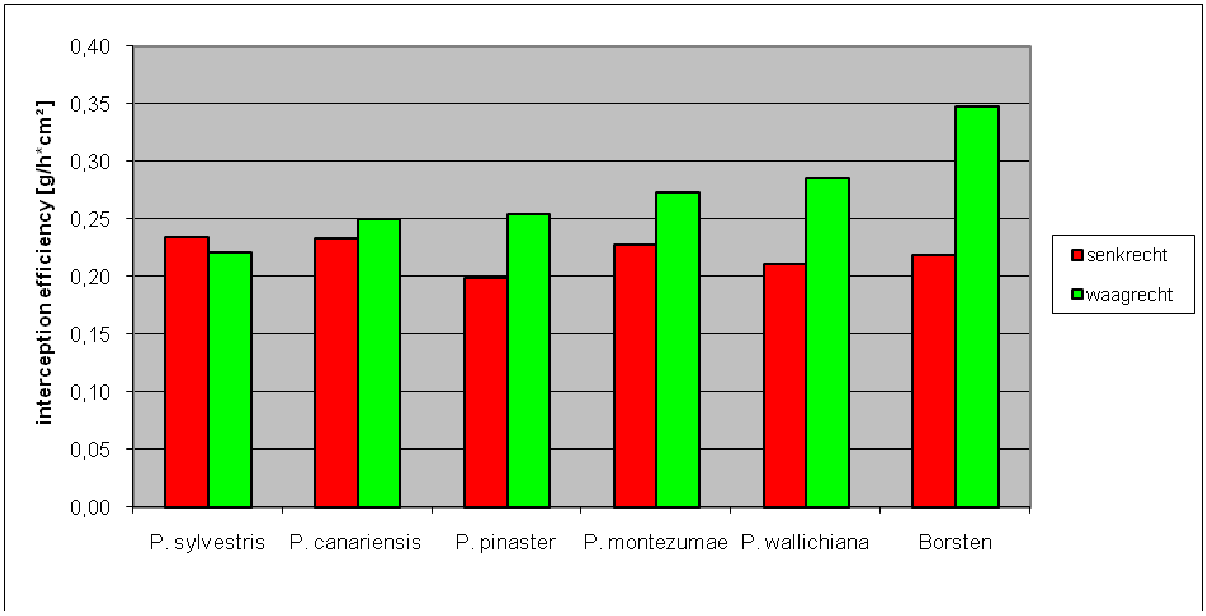


Abb. 3.12: Interception efficiency für die verschiedenen Objekte. Rot: Senkrechte Orientierung. Grün: Waagerechte Orientierung.

Korrelationskoeffizient r	**Kontaktwinkel**			
interception efficiency - Kontaktwinkel	K-advancing	K-receeding	K-mean	K-difference
interception efficiency senkrecht	0.76	0.12	0.46	0.36
interception efficiency waagrecht	-0.14	0.30	0.16	-0.37

Abb. 3.13: Grad der Korrelation der Interception efficiency mit dem Kontaktwinkel. Für die waagerechte Orientierung ist keine systematische Abhängigkeit vom Kontaktwinkel zu beobachten.

Die bisherigen Ergebnisse zur Interception efficiency zeigen für die senkrechte Orientierung keine signifikanten Unterschiede für die Pinusnadeln und das artefizielle Vergleichsobjekt. Für die waagerechte Orientierung erscheint das artefizielle Objekt die höchste IE aufzuweisen. Zur weiteren Analyse der Daten wurden verschiedene Korrelationsmuster gesucht. Wie erwartet, ergab sich ein starker Zusammenhang zwischen IE und Objektfläche (Abb. 3.13).

Nebelernte in Menge pro Zeiteinheit und Objektoberfläche sind linear miteinander korreliert. Relativ weite Abstände von der Ideallinie sind für *Pinus pinaster* in der senkrechten Orientierung und für die Borsten in der waagerechten Orientierung zu beobachten. Insgesamt zeigt die erwartete Abhängigkeit der Nebelernte von der Objektoberfläche an, dass die Messprozedur recht korrekte Daten liefert.

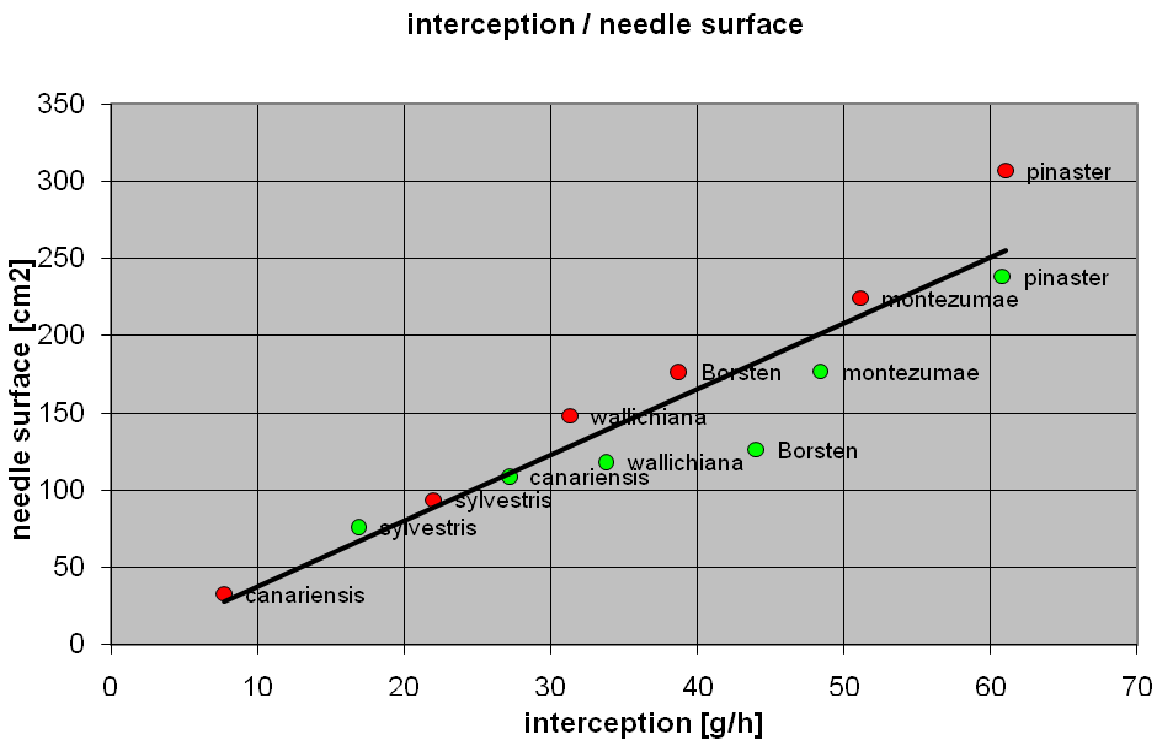


Abb. 3.13: Korrelation zwischen Oberfläche und Nebelernte. Rot: Senkrechte Orientierung. Grün: Waagerechte Orientierung.

Die erzielten Ergebnisse bezüglich der IE lassen sich sehr wahrscheinlich tatsächlich teilweise durch das Tropfenverhalten am Objekt erklären: erreicht das Objekt die Bildung großer Tropfen während der Erntephase, so ist die Interception efficiency etwas höher, als wenn bereits kleine und sehr kleine Tropfen das Objekt durch Abtropfen oder Abrollen verlassen. Dies ist durch Beobachtung zu dokumentieren. Führt man z.B. eine zeitliche Erfassung des Abtropfverhaltens verschiedener Objekte durch, so ergeben sich Unterschiede in der Abtropfrate (Abb. 3.14). Diese Abtropfraten sind stark beeinflusst von der Endgröße, die Tropfen erreichen, bevor sie sich vom Objekt lösen (Abb. 3.15). Hydrophobe Objekte (in diesem Beispiel die blau bereifte Nadelform von *Pinus canariensis*) zeichnen sich durch unregelmäßigen Abgang kleinerer Tropfen aus (Abb. 3.14 und 3.15). Abb. 3.15 zeigt die geringe Kontaktfläche eines Tropfens mit dem Objekt, verursacht durch den hohen Kontaktwinkel. Dies führt zu einem unregelmäßigen Abgang kleinerer Tropfen, und zu einer geringeren Nebelernterate.

Der Grund für den positiven Einfluss der erzielbaren Tropfengröße ist sehr wahrscheinlich darin zu sehen, dass die hängenden Tropfen selber effiziente Aerosolsammler sind. Je mehr Tropfen an einem nebelerntenden Gebilde hängen, desto höher die IE.

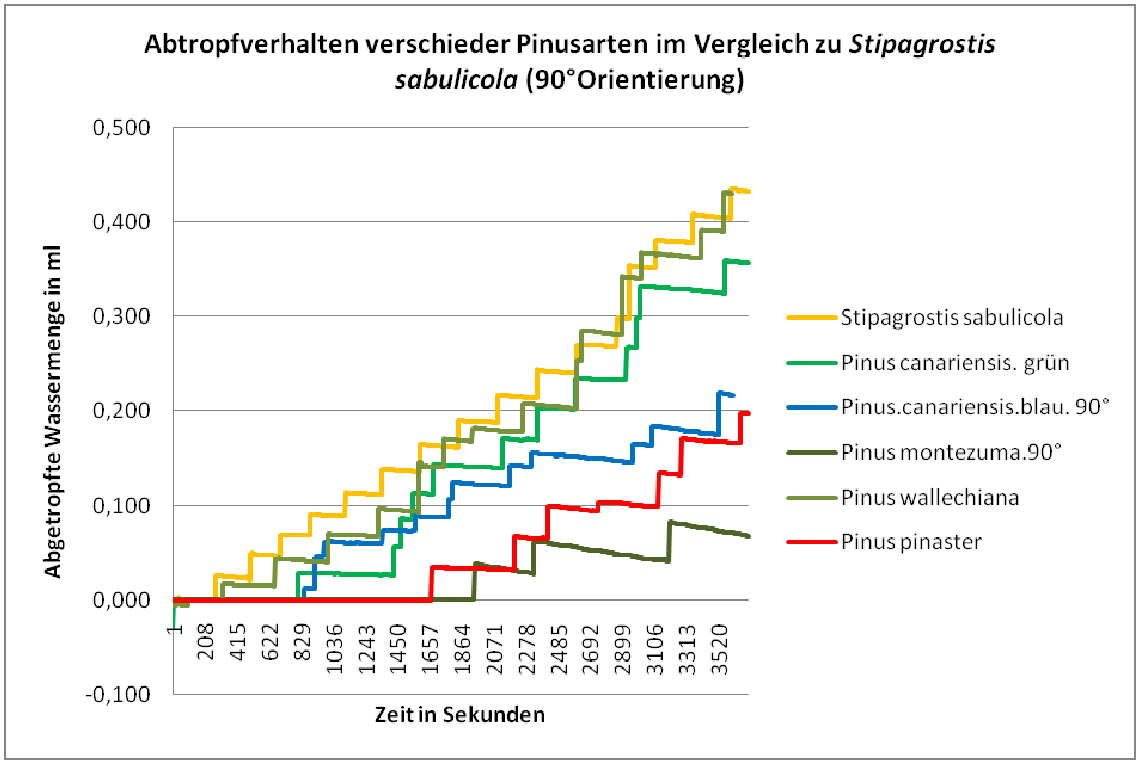


Abb. 3.14: Abtropfverhalten verschiedener Pinusarten und des Borstengrases, alle in waagerechter Orientierung.

Abb. 3.15: „Hängende Tropfen“ an waagerecht orientierten Nadeln. Links: *Pinus canariensis*, normale Nadelform. Rechts: *Pinus canariensis*, blau bereifte und damit hydrophobe Nadelform.

Die bis jetzt beschriebenen Ergebnisse lassen sich sehr wahrscheinlich dazu verwenden, die für nebelerntende Textilien verwendeten Konstruktionen weiter zu optimieren. Insbesondere günstig wären demnach Fasern, die „möglichst große Tropfen wachsen lassen“. In einer zusätzlichen Versuchsreihe wurden Fasern auf die gleiche Weise untersucht wie die biologischen Objekte und die Spindelmodelle. Tatsächlich wurden Unterschiede zu den entstehenden Tropfengrößen bei diversen Fasern gefunden, die zur Zeit für die Prototypen verwendet werden (Abb. 3.16). Gemäß dieser Ergebnisse sollte die Faser PES0.9 insbesondere für nebelfangende Textilien geeignet sein.

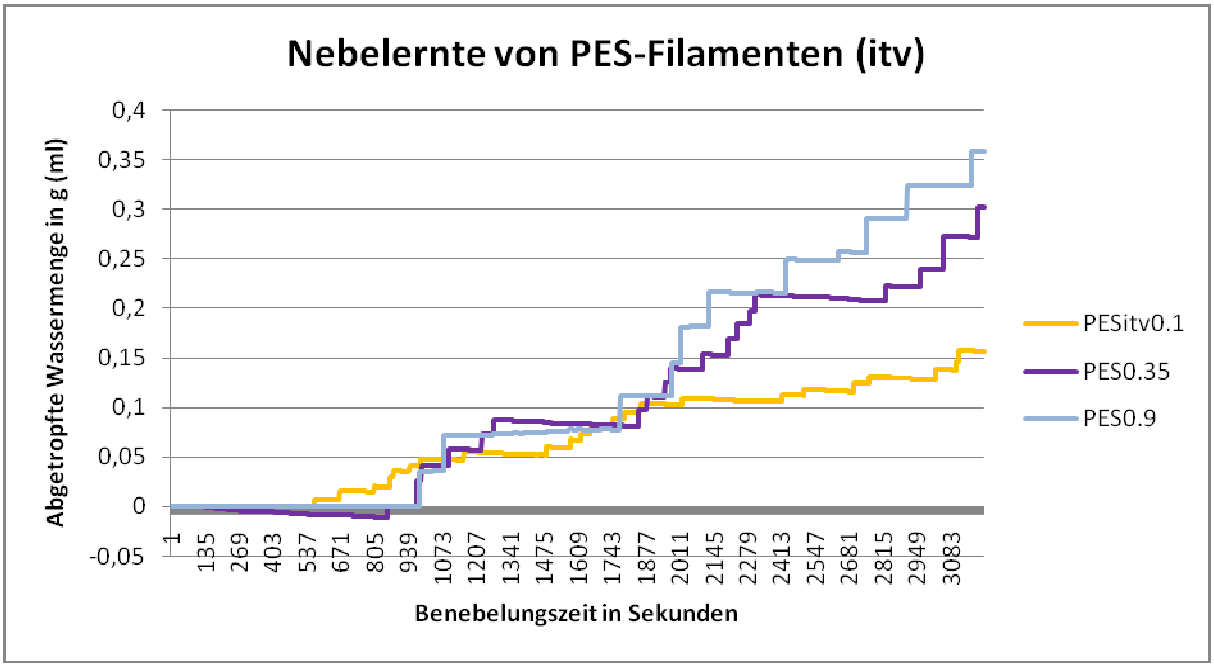


Abb. 3.16: Nebelernte verschiedener PES-Filamente, die zur Herstellung von nebelerntenden Textilien verwendet werden.

3.8 Anwendung eines theoretischen Modelles zur Beschreibung der Tropfengröße auf nebelerntende Strukturen

Während der Versuche wurde beobachtet, dass die Nebelernte eventuell von der maximal möglichen Größe abfallender Tropfen abhängt. Um dies und den Einfluss des Neigungswinkels auf die Aerosolernte genauer zu analysieren, wurde ein theoretisches Modell erstellt. Dieses Modell berechnet die maximal mögliche Tropfengröße abhängig vom Kontaktwinkel des Materiales und vom Neigungswinkel (Manuskript zur Veröffentlichung eingereicht bei „Pure and Applied Geophysics“). Kontaktwinkel liegen ja durch Messungen in Zusammenarbeit mit dem ITV Denkendorf vor (siehe Tabelle 2). Diese Werte wurden in das Modell eingesetzt. Abb. 3.17 zeigt die Ergebnisse für einige der in Tabelle 2 enthaltenen Strukturen bezüglich der maximal möglichen Tropfengröße bei verschiedenen Neigungswinkeln, wie sie vom Modell errechnet werden.

Aus den bislang aufgeführten Ergebnissen und Beobachtungen wurde eine erste Arbeitshypothese aufgestellt, nach der es für ein nebelfangendes Objekt bezüglich der Ernteausbeute günstig ist, wenn die Tropfen vor Abfallen und Abrollen möglichst groß werden können. Die mutmaßlich nebelerntende *Pinus canariensis* neigt zur Bildung zahlreicher großen Tropfen, während dies bei *Pinus sylvestris* nicht der Fall ist.

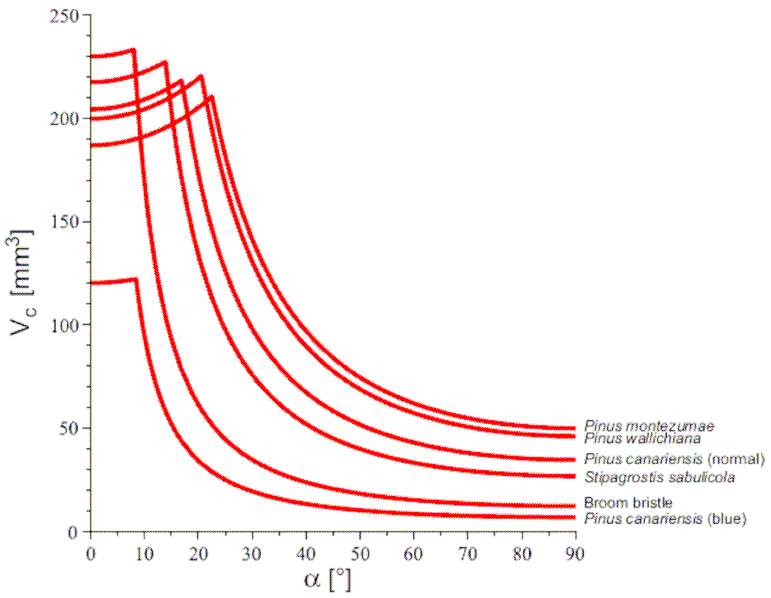


Abb. 3.17:
Ergebnisse eines theoretischen Modelles, das die maximal mögliche Größe von Tropfen berechnet, die bei einem bestimmten Neigungswinkel und Materialkontaktwinkel gerade noch an der nebelerntenden Struktur haften können. Der Neigungswinkel 0° entspricht horizontaler Position, während der Neigungwinkel 90° hier vertik aler Position entspricht. Am Maximum der Kurven ändert sich der Separationsmodus des Tropfens vom Abfallen zum Abrollen.

Gemäß dieses Modelles sollten sich an waagerecht orientierten Objekten Tropfengrößen in folgender aufsteigender Reihenfolge bilden: *Pinus canariensis* hydrophob, *Pinus montezuma, Pinus wallichiana, Pinus canariensis* normal, Borstengras.

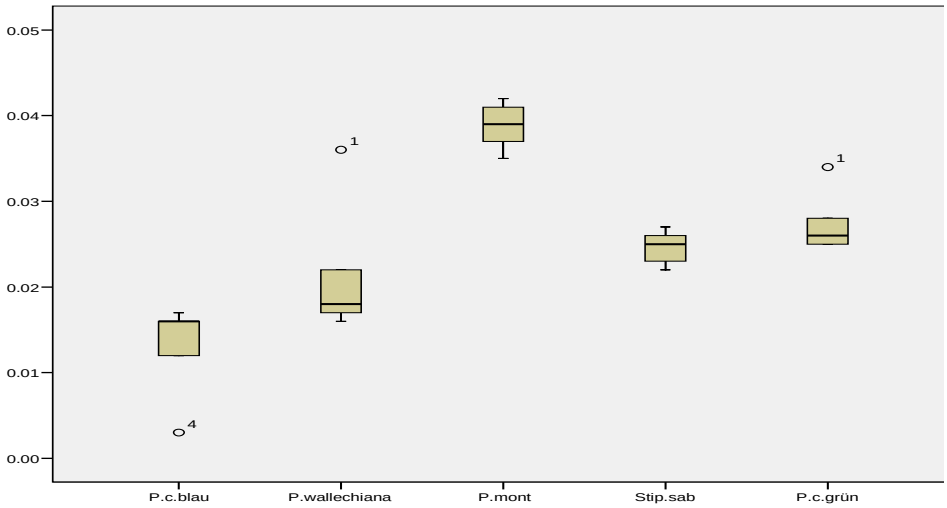


Abb. 3.18: Tropfengrößen in ml von Nadeln verschiedenr Pinusarten und des Borstengrases. Die Daten sind als Box-Whisker-Plot dargestellt, wobei die Box das 50%-Quartil bedeutet, der waagerechte Strich den Median und die Balken die Gesamtvarianz.

Die in Abb. 3.18 aufgeführten gemessenen Tropfengrößen stimmen teilweise mit den Modellergebnisse überein. So ist die geringe Tropfengröße der hydrophoben Struktur

richtig wiedergegeben. *P. montezuma* dagegen erzielt viel größere Tropfen als durch das Modell berechnet. Hier ist jedoch anzumerken, dass Pinus-Nadeln Strukturen auf der Oberfläche besitzen, die Effekte ergeben, die nicht durch das Modell berücksichtigt werden können. Die übrigen Arten kommen in ihrem Verhalten den Modellergebnissen nahe. Um mögliche Einflüsse von Oberflächenstrukturen zu eruieren, wurden die Oberflächen der Nadeln genauer untersucht.

3.9 Untersuchungen der Oberflächen von Kiefernnadeln

Untersuchungen der Nadeln der verschiedenen Kiefernarten zeigte tatsächlich, dass hier substantielle Unterschiede vorliegen. Diese betreffen zum einen die Ausgestaltung der Stomata, der Gasaustauschporen. Die Stomata sind unterhalb einer kaminförmigen Öffnung positioniert, die auf allen Aufnahmen gut zu sehen ist. Diese Öffnungen, und damit die Stomata, sind gebändert angeordnet, und zwar parallel zur Längsachse der Nadeln. Die Poren sind stärker verwachst, so dass die Bänderungen im optischen System als weißliche Streifen zu erkennen sind (Abb. 3.19). Bei einigen Arten, wie *P. sylvestris*, ist die Kaminöffnung zusätzlich von feinen Wachskristallen umgeben. Dies fehlt interessanterweise bei nebelerntenden Arten, wie *P. canariensis* (Abb. 3.19).
Eine weitere Struktur ist durch widerhakenähnliche Ornamente gegeben, die seitlich an den Nadeln entspringen. Diese Strukturen sind besonders ausgeprägt bei *P. canariensis.* Bei vielen Arten sind sie vorhanden, aber unauffälliger (Abb. 3.19). *Pinus sylvestris* besitzt keine Widerhaken. Ferner sind flache Rillen in Längsrichtung der Nadeln bei vielen Arten erkennbar. Diese Strukturen sind sehr wahrscheinlich mit verantwortlich für die Kontaktwinkelhysterese und damit das gute Anhaften von Tropfen an den Nadeln. Dies gilt jedoch nicht für den blauen Nadeltyp von *P. canariensis*: hier sorgt die hydrophobe Wachsschicht für eine geringe Kontaktwinkelhysterese und Hydrophobie.

3.10 Zusammenfassung der Ergebnisse des Teilprojektes

- Die Nebelernte ist zwar für zylindrische Objekte stark mit der Oberfläche korreliert. Jedoch zeigen Abweichungen von der Ideallinie den Einfluss weiterer Faktoren an.
- Die Nebelernte bezogen auf die Oberfläche, als IE ausgedrückt, hängt zumindest teilweise mit der möglichen Tropfengröße zusammen, die sich während der Nebelernte an der Struktur bilden kann.

- Die in dieser Projektphase erzielten Ergebnisse weisen darauf hin, dass waagerecht orientierte Strukturen besonders hohe IE erzielen.
- Die Ergebnisse lassen sich teilweise erfolgreich mit dem theoretischen Modell zur Beschreibung der Tropfengröße erklären.
- Die Studien eignen sich auch zur Identifizierung besonders geeigneter Filamente zur Herstellung von Prototypen.

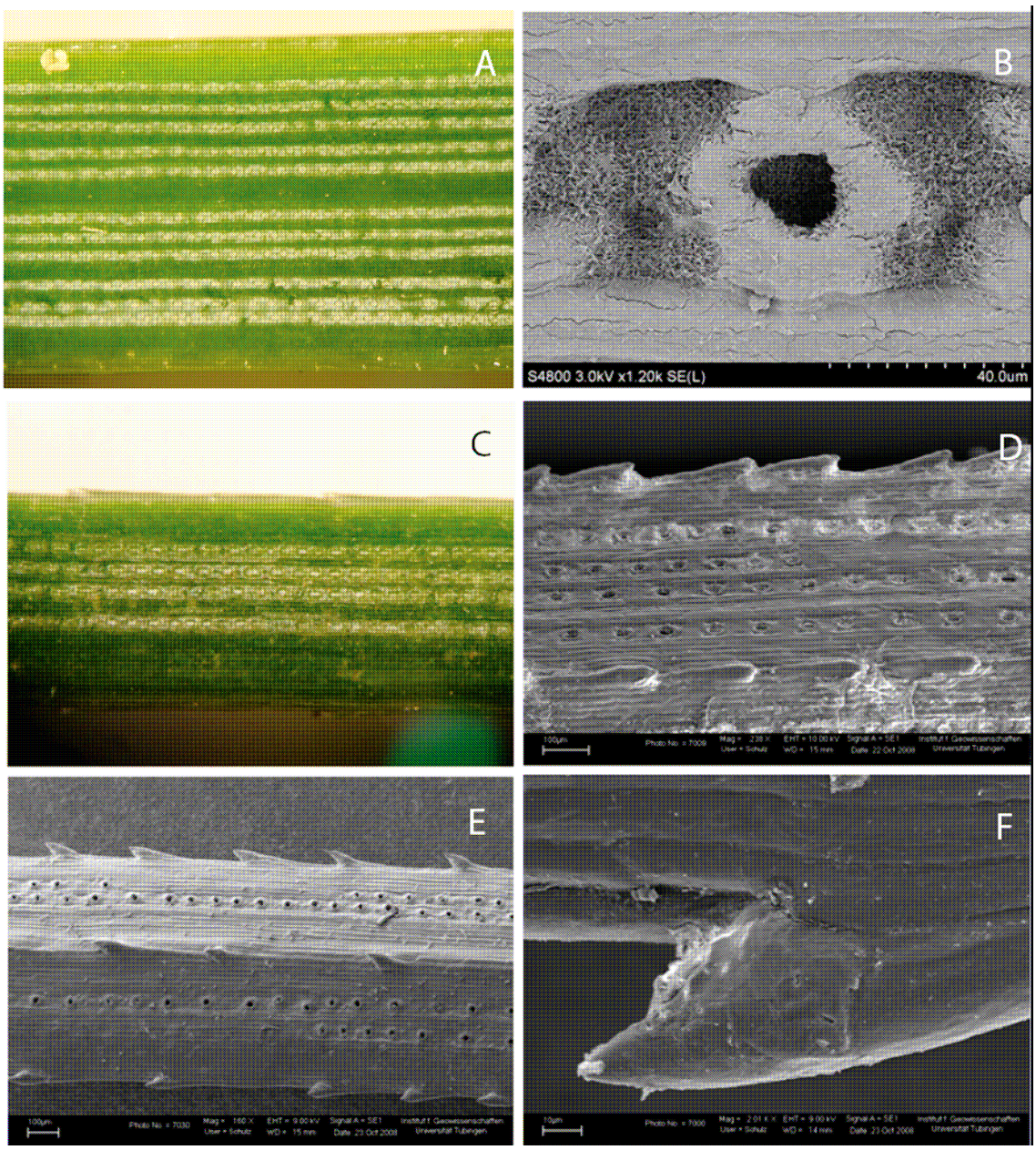


Abb. 3.19: Mikroskopische Aufnahmen der Nadeln verschiedener Kiefernarten, die in diese Projekt untersucht wurden. A, B: *Pinus sylvestris*. A: Nahaufnahme, die die längsgerichteten Bänder der Stomata (= Gasaustauschporen) zeigt. B: REM-Aufnahme einer Stoma, das von Wachskristallen umgeben ist. C, D: *Pinus wallichiana*. C: Nahaufnahme, die die Stomabänder zeigt, sowie widerhakenähnliche Strukturen. D: REM-Aufnahme, die die Widerhaken deutlicher zeigt, sowie die Stomata, die hier über keinerlei Wachskristalle verfügen. E, F: *Pinus canariensis* (grüner Nadeltyp). E: REM-Aufnahme eins Übersichtsbildes, das stärker ausgeprägten Widerhaken zeigt, sowie auch hier Stomabänder. Die Stomata zeigen auch hier keine Wachskristalle. F: Detailaufnahme eines Hakens. Bei allen Nadeln sind außerdem längsgerichtete Riefen zu erkennen.

Teilvorhaben 3: Fa. Mattes & Ammann (Meßstetten)

4.1 Entwicklung und Bereitstellung von Fasermaterialien ..... und Flächengebilden 108
4.1.1 Auswahl und Entwicklung der textilen Fasermaterialien 108
4.1.2 Konstruktion der textilen Fläche 108
4.1.2.1 Anforderungsprofil 108
4.1.2.2 Textile Flächen mit ausgeprägter dritten Dismension 109
4.1.2.3 Funktionalisierung textiler Oberflächen 115
4.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse 116
4.3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 117
4.4 Veröffentlichung der Ergebnisse 117

4.1 Entwicklung und Bereitstellung von Fasermaterialien und Flächengebilden

4.1.1 Auswahl und Entwicklung der textilen Fasermaterialien

Die Recherche, Analyse und Auswahl der textilen Fasermaterialien umfasste die Beschaffung von geeigneten Fasern und Garnen, die konstruktive Auslegung der Maschenware im Hinblick auf die Bindung und Veredlung, die Erstellung von Produktionsplänen in der Musterfertigung, die Programmierung der Maschinen, Bestückung und Fertigung sowie die Veredlung bei einem Lohnunternehmen.

Aufbauend auf den Informationen in den intensiven Arbeitstreffen wurden von der Fa. Mattes&Ammann in Absprachen mit dem ITV Denkendorf zahlreiche Abstandsgestricke und Gewirke aus Polyester hergestellt. Nach Ansicht der Fa. Mattes&Ammann eignet sich Polyester von den verfügbaren Fasermaterialien am Besten für die geplante Anwendung. Für Polyester spricht u.a. die Materialeigenschaften, das Verarbeitungsverhalten, das Preisniveau sowie die guten Möglichkeiten zur Oberflächenfunktionalisierung.

4.1.2 Konstruktion der textilen Fläche

4.1.2.1 Anforderungsprofil

Zunächst wurde in Abstimmung mit dem ITV Denkendorf ein Anforderungsprofil an die zu entwickelnden textilen Strukturen mit folgenden Spezifikationen definiert:

- Materialeigenschaften (Fasern/Textilgebilde)
  - Geringes Flächengewicht
  - ausreichende Flexibilität für den Transport
  - Große volumenspezifische Oberfläche
  - Hohe Luftdurchlässigkeit für die Orkanfestigkeit
  - Geringe Neigung zu Biofouling (synthetische Fasern)
  - Physikalisch/chemische Stabilität (UV, Witterung, Alterungsbeständigkeit)
  - Lebensmitteltauglich für die Trinkwassergewinnung
- Anwendungseigenschaften
  - Einfacher Einbau des textiles Materiales in der Gesamtkonstruktion
  - Geringe Wartungsanfälligkeit
- Möglichkeit der Funktionalisierung der Textiloberfläche
- Wasserabscheideverhalten
  - Geringes Wasseraufnahmevermögen
  - hohe Abscheidung an Wasser bzw. schnellstmögliche Ableitung des abgeschiedenen Wassers

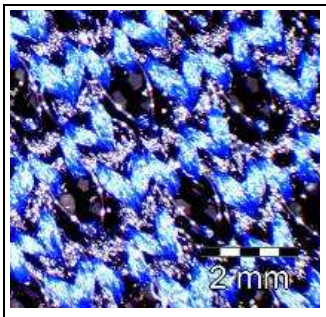
- Mechanische Stabilität
  - Hohe Höchstzugkraft, Höchstzugkraftdehnung, (E-Modul)
  - Steifigkeit der Gesamtkonstruktion
- Wirtschaftliche Aspekte
  - Kostengünstige Fertigung bei hohen Stückzahlen
  - Ausreichend lange Lebensdauer

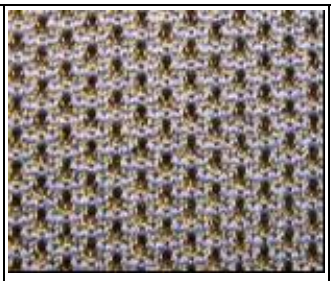
4.1.2.2 Textile Flächen mit ausgeprägter dritten Dismension

Nach Auswahl des Fasermaterials und der Definition des Anforderungsprofils schloss sich ein intensiver Informationsaustausch mit den Wissenschaftlern aus Denkendorf für die Herstellung von Textilien mit kleiner Fläche mit mehreren konstruktiven Varianten an. Die Bewertung der Vorschläge zur Textilkonstruktion der Wissenschaftler erfolgte im Hinblick auf die technische Machbarkeit der verfügbaren Faserwerkstoffe, der verfügbaren Maschinentechnik für die Maschenwarenherstellung als auch der anschließenden Ausrüstung. Erprobt werden Musterfertigungen auf Kettenwirkmaschinen, Rundwirkmaschinen, Rundstrick-maschinen mit Variation der Garne (glatt oder texturiert), Variation der Ausrüstung (Stuhlroh oder veredelt).

In einer ersten Entwicklungsphase wurde bei der Fa. Mattes&Ammann nach der Erstellung eines Produktionsplanes eine Wirkmaschine umgerüstet, mit entsprechenden Garnen aus Polyester bestückt und die Maschine entsprechend programmiert.

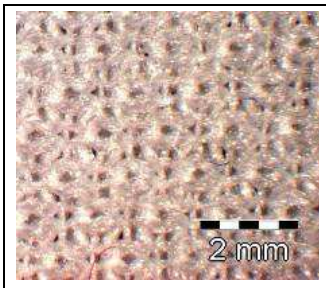
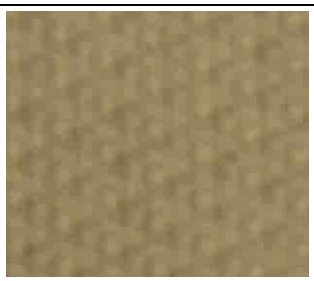
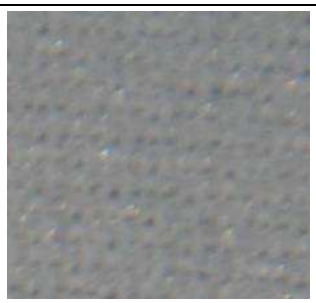
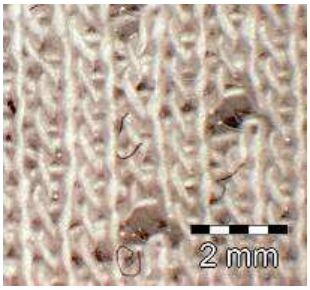
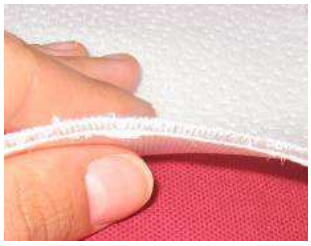
Die folgende Tabelle 4.1 zeigt exemplarisch neu entwickelte Strukturen. Die Besonderheit der Gewirke/Gestricke lag darin, dass diese auf der einen Seite sehr feinmaschig und der anderen Seite offenmaschig gefertigt waren.





Abstandstextil I

Materialzusammensetzung:	100% Polyester
Flächengewicht:	232 g/m²
Dicke:	3,1 mm
Luftdurchlässigkeit:	2.242 l/min*dm²

			
Abstandstextil II Materialzusammensetzung: 100% Polyester Flächengewicht: 299 g/m² Dicke: 3,1 mm Luftdurchlässigkeit: 1.130 l/min*dm²			
			
Abstandstextil III Materialzusammensetzung: 47% Lyocell, 53% Polyester Flächengewicht: 300 g/m² Dicke: 2,7 mm Luftdurchlässigkeit: 1.530 l/min*dm²			

Tab. 4.1: Materialtabelle ausgewählter Bemusterungen

Die Textilien wurden dem ITV Denkendorf für Vorversuche zur Verfügung gestellt. Die Untersuchungen zeigten jedoch v.a. aufgrund der niedrigen Luftdurchlässigkeit keine zufriedenstellende Ergebnise.

In einer zweiten Entwicklungsphase wurden dann zwei offenere strukturierte Maschenwaren hergestellt und dem ITV Denkendorf für Feldversuche (Start September 2008) in Namibia zur Verfügung gestellt. Es handelte sich dabei um folgende Textilien:

- Abstandsgestrick: Polyester, Deckseiten Multifilamente, Abstandsfäden Monofilamente, Dichte 3 mm.
- Abstandsgewirk: Polyester, Schußgarne aus Monofilamenten, Grund- und Polgarne aus Multifilamente, Dichte 12 mm.

Die nachstehende Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen die Maschenwaren bei Feldversuchen in Namibia.

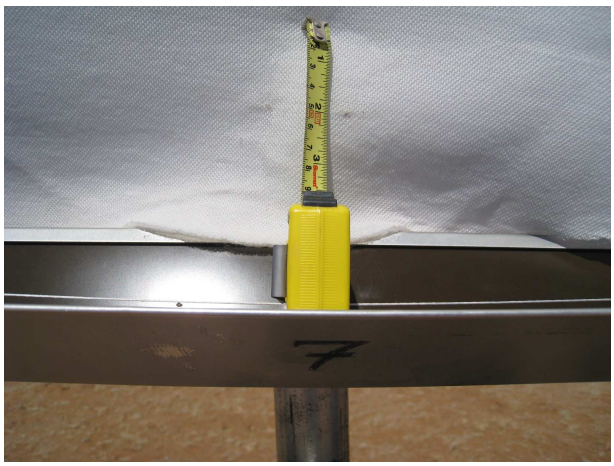


Abb. 4.1: Abstandsgestrick

Abb. 4.2: Abstandsgewirke

Die Maschenwaren zeigten bei den Feldversuchen in Namibia die in der Abbildung 4.3 dargestellten Ergebnisse. Dargestellt sind die flächenbezogene, gewonnene Wassermenge pro Nebelereignis.

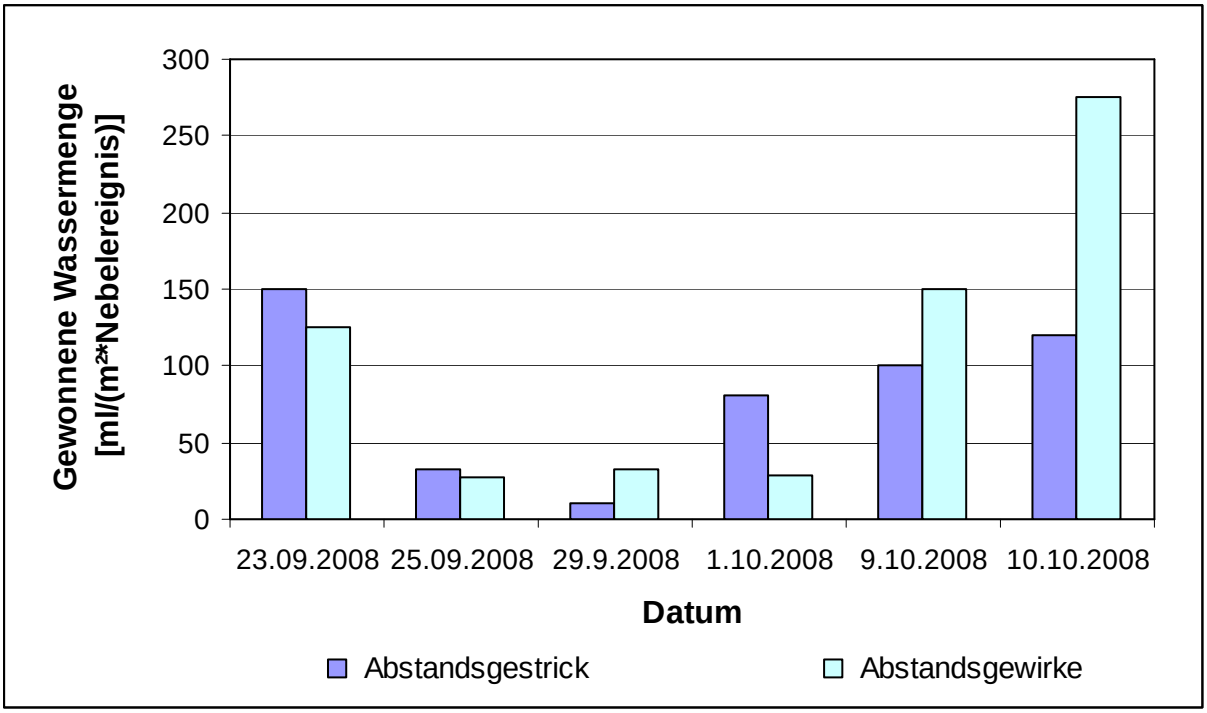


Abb. 4.3: Maschenwaren in Feldversuchen

Die Abbildung 4.3 gibt gut zu erkennen, dass mit dem Abstandsgestrick und -gewirke Wasser aus Nebel gewonnen werden konnte. Leider lag die Nebelernte für das Abstandsgestrick für diesen Zeitraum mit 7 bis 45 % und für das Abstandsgewirke mit

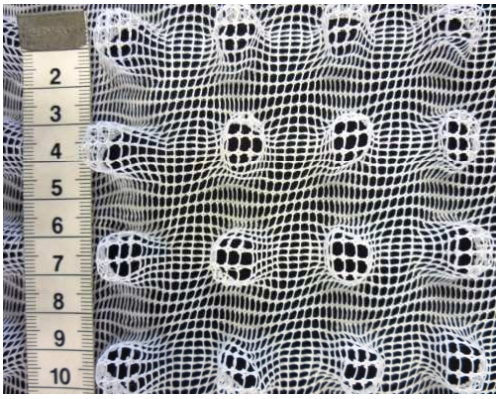
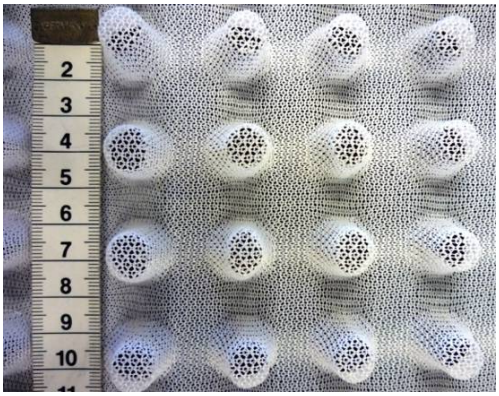
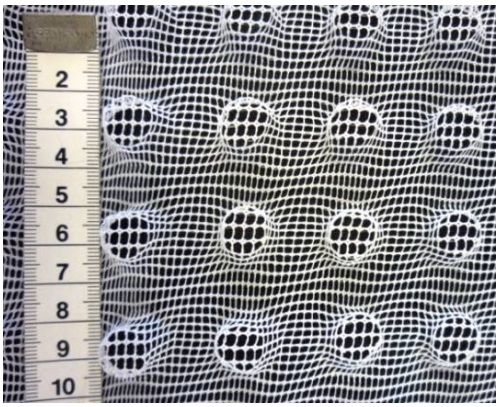
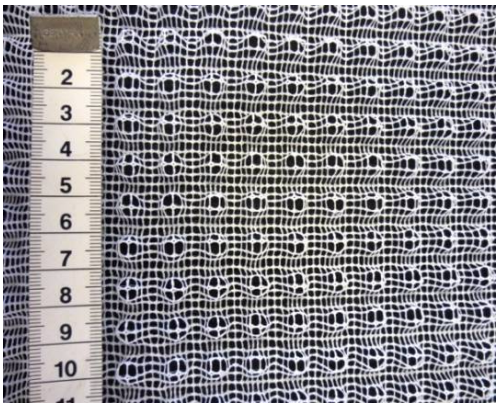
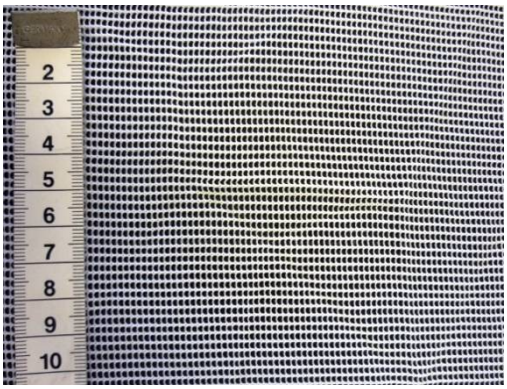
11 bis 38 % unterhalb eines Referenzmaterials („Textil 5“, vgl. Teilvorhaben 1 des ITV Denkendorf). Aus diesem Grunde wurden die Feldversuche mit diesen beiden Maschenwaren im November 2009 eingestellt.

Zur Verbesserung des Nebelertrages bei hoher Luftdurchlässigkeit wurde in einer dritten Entwicklungsphase die Entwicklung eines neuen Flächengebildes mit dreidimensionaler Noppenstruktur begonnen. Hintergrund für die Entwicklung war der Versuch einen dreidimensionalen Nebelfänger zu entwickeln, welcher preisgünstiger als die zuvor (auch in den Feldversuchen) eingesetzten Maschenwaren ist mit gleichzeitig verbesserten Nebelernteeigenschaften.

In nachstehenden Tabelle 4.2 sind die neu hergestellten noppigen Flächengebilde dargestellt. Bei diesen Materialien handelt es sich um Maschenwaren (Art.-Nr. 49718) aus Polyester-Multifilamenten, die nach der Flächenbildung mittels eines speziellen Tiefziehverfahrens zu einer Art Noppenstruktur verformt wurden. Durch einen anschließenden Fixiervorgang konnte die Noppenstruktur der verformten Kuliergewirke aufrecht erhalten werden. Aufgrund der unterschiedlichen Strukturparameter bzw. Konstruktionsmerkmale unterschieden sich die Noppengewirke in ihrer Geometrie, wie die Bilder in der Tabelle 4.2 wiedergeben.

Für die Entwicklung wurden besondere dehnbare Fasern recherchiert (POY), besorgt und eingesetzt, die diese Verformung und Thermofixierung überhaupt ermöglichen. Diese Fasern waren nicht vollständig verstreckt, so dass hier Reserven für die Dehnung und Fixierbarkeit vorhanden waren, ohne dass das Textil beim Tiefziehprozess zerstört wurde.

Verschiedene Dichten der Maschenware wurden auf Versuchsmaschinen hergestellt und im Tiefziehprozess deren Form fixiert.

 Textil 1: PET-Noppengewirke	 Textil 2: PET-Noppengewirke
 Textil 3: PET-Noppengewirke	 Textil 4: PET-Noppengewirke
 Rohware der Noppengewirke (PET)	

Tab. 4.2: Tiefgezogene Maschenwaren der Fa. Mattes & Ammann

Die neu entwickelten Textilien zeichneten sich - wie in Tabelle 4.2 dargestellt - durch ihre ausgeprägten, als Noppen bezeichneten Verformungen aus, welche ein signifikantes Unterscheidungsmerkmal der Textilien darstellten. Dabei unterschieden sich die Materialien sowohl in der Noppenzahl je Flächeneinheit als auch in ihrer Noppenhöhe.

Die Noppenzahl wird durch die sogenannte Rastergröße des Materials bestimmt. Die Rastergröße bezeichnet den Abstand zwischen den Noppen angegeben in Millimetern, ausgehend vom Zentrum der Noppen. Die entwickelten Materialien ließen sich somit der Größe des Rasters nach in zwei Gruppen einteilen:

- Rastergröße 28 mm und
- Rastergröße 12 mm.

Die Anzahl der Noppen wird aus der Zahl der Noppen auf 200 mm in Längsrichtung multipliziert mit der Zahl der Noppen auf 200 mm in Querrichtung ermittelt und auf eine Noppenanzahl pro m² hochgerechnet. Die Messung der Bezugslängen erfolgt dabei beginnend am Ende einer Noppe.

Die Noppenhöhe der Textilien beschreibt, wie stark das Ausgangsmaterial verformt wurde und stellt dabei den Abstand zwischen der am stärksten verformten Stelle und dem unverformten Grundmaterial dar. Die Noppenhöhe ergibt sich aus dem Tiefziehwerkzeug des Herstellers. Abbildung 4.4 veranschaulicht die beschriebene Noppenstruktur.

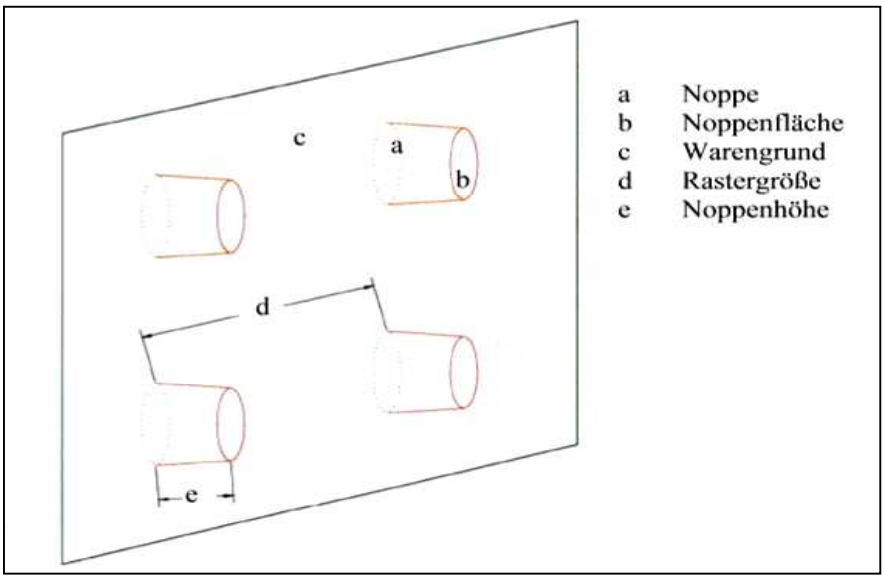
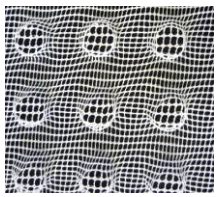
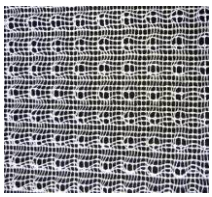


Abb. 4.4: Veranschaulichung der Noppenstruktur

In der Tabelle 4.3 sind die untersuchten Textilien mit ihren wesentlichen Konstruktionsmerkmalen (Noppenstruktur und Porenstruktur) aufgeführt.

Material / Parameter	Textil 1	Textil 2	Textil 3 	Textil 4 
Rastergröße [mm]	28	28	28	12
Noppenanzahl / m²	1.225	1.225	1.225	7.225
Noppenhöhe [mm]	19	19	9	7
Warenbild / Porengröße [mm²]	Durchbrochen 3,63	Homogen 0,35	Durchbrochen 2,77	Durchbrochen 3,06

Tab. 4.3: Strukturparameter der Noppengewirke

Alle Noppengewirke wiesen eine Rechts/Links-Bindung auf, welche somit auf den Warenseiten jeweils nur rechte oder nur linke Maschen zeigen. Die Herstellung solcher Maschenwaren erfolgt auf Einnadel-barrigen Wirkmaschinen.

Die hergestellten Materialien wurden dem ITV Denkendorf übergeben und im ITV-Technikum aber auch in der Wüste Namib in Feldversuchen hinsichtlich der Wassergewinnung aus Nebel untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind ausführlich im Teilbericht 1 des ITV dargestellt.

4.1.2.3 Funktionalisierung textiler Oberflächen

Um die Wechselwirkung der Bindungspunkte im Hinblick auf die Tropfensammlung und der Wasserführung zur Sammelstelle zu optimieren, wurden Maschenwaren mit sehr guter Luftdurchlässigkeit funktionalisiert. Hierfür wurden das Tauchverfahren mittels Abquetschwalzen verwendet (Abb. 4.5).

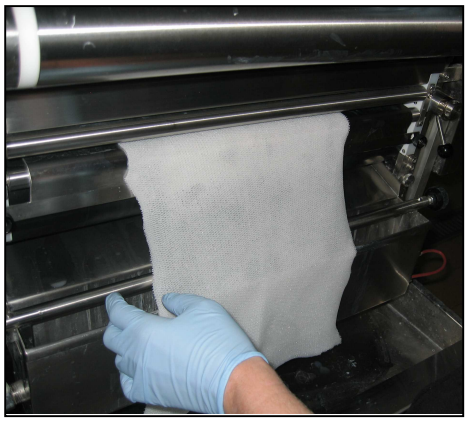


Abb. 4.5: Tauchverfahren mittels Abquetschwalzen

Die zu behandelnden Textilien wurden zuerst gewaschen, um vorhandene Avivagen zu entfernen. Anschließend wurden sie bei 100°C getrocknet. Dann wurden die textilen Flächen mit folgender Ausrüstung versehen:

- Ausrüstung A: auf Basis von Paraffin und Zirkoniumsalz
- Ausrüstung B: silikonhaltig, Sol-Gel-Prozess basiert

Die überschüssige Beschichtungsmasse wurde mittels Walzen eines HVF-Foulards bei einem Druck von 2 bar abgequetscht. Über den Walzendruck konnte die Auftragsmenge eingestellt werden: Je höher der Druck, desto geringer die Auftragsmenge. Die beschichteten Prüflinge wurden anschließend fünf Minuten bei 100 °C und zwei Minuten bei 140°C thermofixiert. Dabei wurde darauf geachtet, daß die Noppen nicht in Mitleidenschaft gezogen wurden.

Anhand der Benetzungseigenschaften von Textilien lässt sich prinzipiell eine Aussage über deren Verhalten gegenüber Wasser treffen. Um die Wasseraufnahme und Wasserabgabe der untersuchten Textilien so zu verändern, dass sich diese positiv auf die zu gewinnenden Wassermenge auswirkt, wurden sowohl Hydrophobausrüstungen als auch Hydrophilausrüstungen ausgewählt. Die untersuchten Textilien wurden nach dem Foulardieren einer Thermofixierung in einem Trockenofen ausgesetzt.
Die ausgerüsteten Textilmuster wurden zusammen mit Originalmuster dem ITV Denkendorf für Tests zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse sind aus dem ITV-Bericht (Teilvorhaben 1) zu entnehmen.

4.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Erfolgsaussichten des Projektes einschließlich Zeithorizont bis zum marktgängigen Produkt können derzeit nur sehr schwer eingeschätzt werden. Fakt ist, dass mit den bis dato entwickelten 3-D-Textilien eine um den Faktor 1,6 bis 3 höhere Nebelabscheidung gegenüber Standardmaterialien bzw. einfachen Netzen erreicht werden kann. Wäre es möglich durch eine Serienfertigung einen Preis von 2-3 €/m² zu erreichen, so wäre aus unserer Sicht die Marktfähigkeit gegeben - auch wenn die bisherigen Materialien günstiger sind, jedoch bei wesentlich geringerer Effizienz und auch Materialbeständigkeit.
Der Markt für Nebelfänger erscheint allen Partnern gerade weil es keine verkaufsfähigen Systeme gibt, welche sich durchgesetzt haben, als noch sehr offen. Mattes & Ammann sieht weltweit die Chance die Marktlücke schließen zu können. Wir

erhoffen uns mit den neuen Produkten eine Steigerung des Umsatzes von mehreren Tausend Meter Textil in der ersten Zeit nach dem Projekt und dann rasch ansteigend. Entsprechend können wir dann neue Mitarbeiter für die Fertigung einstellen.

Die technische Verwertung der Ergebnisse zur Herstellung in der Gewirke- und Gestrickproduktion soll im Haus Mattes&Ammann verbleiben, da M&A das Projekt von Beginn an begleitet hat. Mit dem Erschließen neuer Geschäftsfelder im Ausland erwarten wir im Hause nicht nur eine Sicherung von Arbeitsplätzen, sondern auch eine Schaffung von neuen Arbeitsplätzen, wovon der traditionelle Textilstandort Deutschland profitieren wird.

Für andere Wirtschaftszweige können wir dies nicht abschätzen, jedoch sind auch hier Markthoffnungen da - insbesondere in industriellen Filtrationsprozessen der Aerosol-Gasabscheidung.

4.3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es liegen der Fa. Mattes&Ammann keine Ergebnisse anderer Stellen vor.

4.4 Veröffentlichung der Ergebnisse

Die wissenchaftliche Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgte im Rahmen von Veröffentlichungen und Vorträgen durch das ITV Denkendorf und der Universität Tübingen.

Teilvorhaben 4: Fa. Solarenergie Stefanakis (Elsheim-Stadecken)

5.1 Anforderungen an Nebelfängerkollektoren im Hinblick auf biologische Erkenntnisse 120

5.2 Entwicklung, Konstruktion und Erprobung von Kollektorsystemen 121

5.2.1 Untersuchungen zum Einsatz von kühlenden Kondensationsflächen 121

5.2.2 Konstruktionsvarianten für Nebelfänger 122

5.3 Erprobung in Feldversuchen 126

5.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse 132

5.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 133

5.6 Veröffentlichung der Ergebnisse 133

5.1 Anforderungen an Nebelfängerkollektoren im Hinblick auf biologische Erkenntnisse

Das erste Arbeitspaket der Solarenergie Stefanakis konzentrierte sich auf die Beschreibung der grundsätzlichen Anforderungen für das Gesamtsystem. Im Zusammenarbeit mit dem ITV Denkendorf wurden drei Bereiche identifiziert, welche beim Aufbau des Gesamtsystems von entscheidender Bedeutung sind: Die Material- und Konstruktionseigenschaften sowie die wirtschaftlichen Aspekte. Hinsichtlich der Entwicklung und dem Bau der Nebelfängerkollektoren musste darauf geachtet werden, dass alle drei Bereiche in gleicher Weise Beachtung finden. Unter dieser Prämisse waren für den Kollektorbau folgende technische Anforderungen zu berücksichtigen:

- Hohe Langzeitstabilität,
- hohe mechanische und thermische Belastbarkeit,
- hohe Wetterfestigkeit bzw. Witterungsbeständigkeit,
- einfache Montagemöglichkeit, d.h. einfache Konstruktion und umkomplizierter Aufbau,
- wartungsarm

Anhand von Klimadaten aus der Wüstenstation Gobabeb in Namibia, aber auch aus der Hochebene im Zentrum von Kreta, wurden zunächst die spezifischen Betriebsbedingungen (Temperaturen von ca. 5 bis 30°C (Kreta, Abb. 5.1) bzw. 60 ℃ (Namib), Strahlungsintensitäten von etwa 800 bis 900 W/m², Windgeschwindigkeiten von bis zu 100 km/h) definiert, um die Konstruktionsanforderungen danach auszulegen. Die Klimadaten weiterer Standorte auf Kreta (Gortys, Tympaki, Zaros) wurden erfasst und ausgewertet.

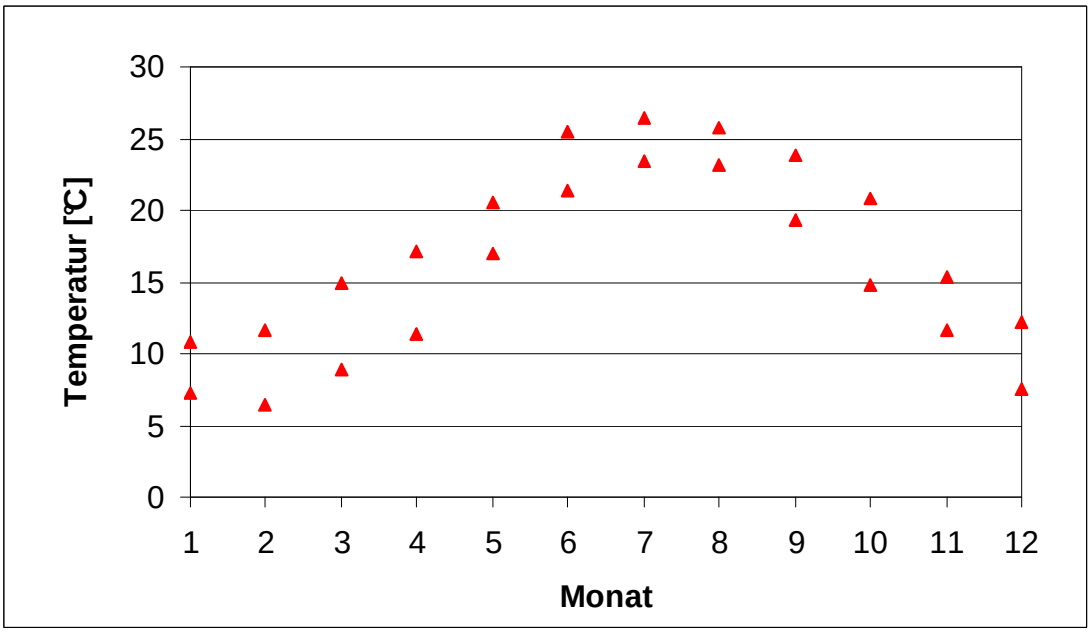


Abb. 5.1: Mittlere monatliche Temperatur in der Region Niko Kazantzaki Astrakous auf Kreta (Tag/Nacht)

5.2 Entwicklung, Konstruktion und Erprobung von Kollektorsystemen

5.2.1 Untersuchungen zum Einsatz von kühlenden Kondensationsflächen

Zu Beginn der Entwickungsarbeiten wurde von der Solarenergie Stefanakis geklärt, ob bei der Entwicklung eines Gesamtsystemes kühlende Kondensationsflächen zu berücksichtigen und realisieren sind oder nicht. Im Technikum der Fa. Solarenergie Stefanakis wurden daher Versuche zur Abscheidung von (künstlichen) Nebeltröpfchen an kühlenden bzw. wärmenden Flächen durchgeführt.

Hierfür wurde in einer Probenhalterung eine wasserdurchströmte und temperierte Platte eingesetzt, welche von einer Nebelströmung umströmt wurde. Der Abstand des Nebelaustrittes zur Platte betrug 30 cm. Als Nebelgenerator wurde das Gerät Junior Fog der Fa. Korner in Stuttgart eingesetzt. Dieses Gerät erzeugt Aerosole mit einem Durchmesser von 4 bis 16 µm (im Mittel ca. 8 µm).

Während den Versuchen wurde die Oberflächentemperatur der Platte kontinuierlich variiert und der Zeitpunkt bis zur Tropfenbildung auf der Kondensatplatte bestimmt. Die Abbildung 5.2 gibt das Ergebnis dieser Versuche wieder.

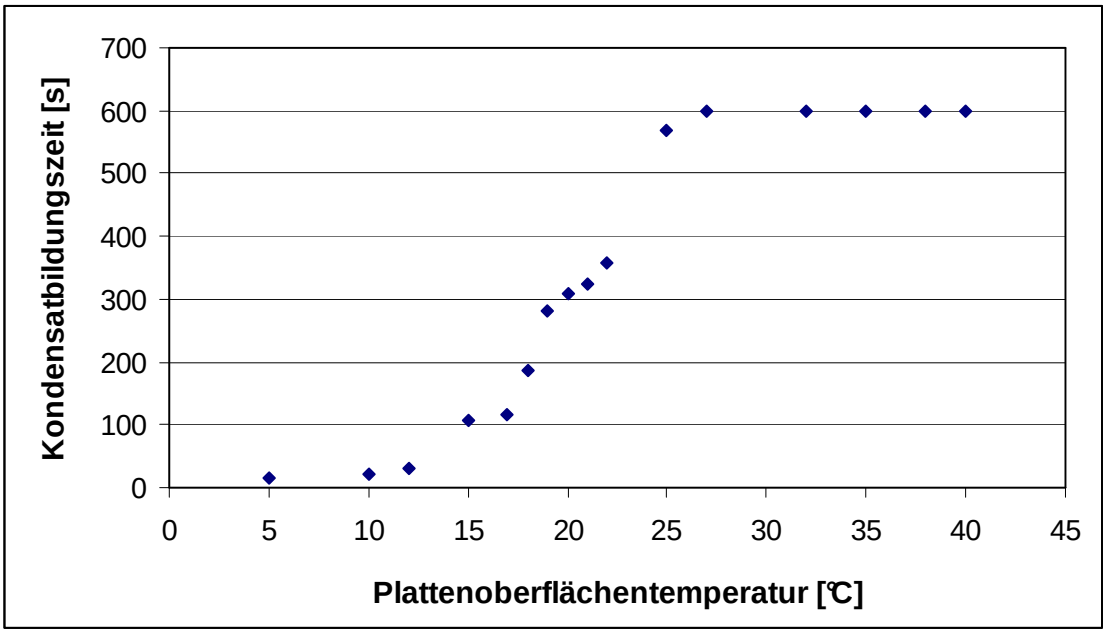


Abb. 5.2: Kondensatbildungszeit in Abhängigkeit von der Plattenoberflächentemperatur

Die Abbildung 5.2 macht deutlich, dass bis zu einer Temperatur von etwa 25°C die Kondensationszeit fast kontinuierlich zunahm. Eine Abkühlung der Plattenoberfläche bei Raum- bzw. Umgebungstemperaturen oberhalb 20-25°C ist demnach für eine schnellere Kondensatbildung sinnvoll.

Da der Nebelanfall im ersten Anwendungsfall, der Wüste Namib, in der Regel in Morgenstunden bei Temperaturen von unter 15°C vorliegt, ist demnach für diesen Fall eine Abkühlung nicht notwendig. Für den zweiten Anwendungsfall, Kreta, macht eine Abkühlung der Nebelfängeroberfläche in den Monaten Mai bis September (vgl. Abb. 5.1) sicherlich Sinn. Hierfür hätte jedoch eine kontinuierlich Zuführung von elektrischer Energie sichergestellt werden müssen, was im Rahmen des Projektes nicht möglich war.

5.2.2 Konstruktionsvarianten für Nebelfänger

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Konstruktionsvarianten für die Aufstellung der innovativen textilien Nebelfänger entwickelt, die im Folgenden beschrieben werden, und aufgebaut. Bei der Konzeptionierung musste darauf geachtet werden, dass die Gehäuse bzw. kraftaufnehmende Elemente entsprechend in ihrer Ausführung steif, verwindungs- und formstabil dimensioniert sind und entsprechend gebaut werden. Im Hinblick auf eine einfache Montage wurden verschiedene Komponenten (Edelstahlträger, Ablaufrinne, Befestigungen) so gefertigt, dass sie ohne großen

Aufwand und Einsatz von Spezialwerkzeugen für den Transport nach Namibia und/oder Kreta in Teile zerlegt und in einer Tasche mit einer Länge von ca. 1,2 m verstaut werden konnten. Des Weiteren wurde eine einfache, aber auch sehr robuste Klemmvorrichtung zur Fixierung der unterschiedlichen Gewirke der Fa. Mattes&Ammann realisiert. Das Gewicht eines Kollektors lag bei lediglich unter 4 kg. Vor Ort konnten die Rahmen für die Feldversuche anschließend wieder zusammengebaut werden.

Im Folgenden sind beide realisierten Kollektorvarianten dargestellt:

- **Kollektorvariante 1:**

Beim ersten System handelte sich dabei um eine Rohrkonstruktion mit Ablaufrinne und einer einfachen Textilbefestigung mit speziellen UV-witterungsstabilen Kabelbindern aus Polyamid 6.6 (PA66W). Die Bildaufnahmen in der Abbildung 5.3 zeigen die Konstruktion. Die rechteckige Projektionsfläche lag bei 1 m².

Abb. 5.3: Realisierte Kollektorvariante I

Da im Hinblick auf einen großflächigen Aufbau der Nebelkollektoren punktuelle Belastungen am Textil bei Windlast zu vermeiden waren, wurde nach intensiver Diskussion mit dem ITV Denkendorf die Befestigung der Textilien in den Rahmen weiterentwickelt, um eine flächige Klemmvorrichtung bzw. Fixierung der textilen Flächengebilde zu ermöglichen. Gleichzeitig sollte eine Ableitung des am Textils abgeschiedenen Wassers zum Sammelbehälter am Boden möglichst ohne Verluste erfolgen. Die folgende Abbildung 5.4 zeigt die realisierte, flächige Randeinfassung der Textilien mit Befestigungsösen. Die Abbildung 5.5 gibt die untere Abstandsgewirke-Randeinfassung mit Wasserleitsystem wieder.

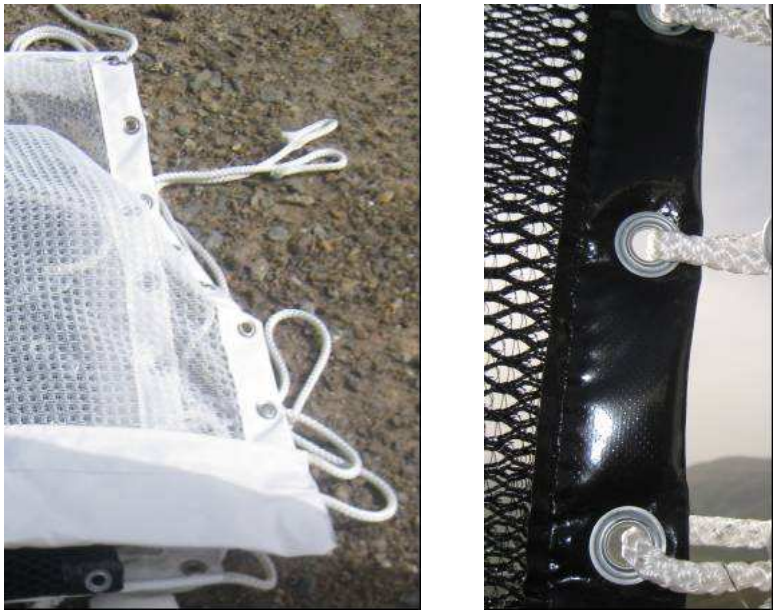


Abb. 5.4: Seitliche Randeinfassung der Nebelfänger

Abb. 5.5: Untere Randeinfassung der Nebelfänger – ausgebildet als integrierte Ablaufrinne

- **Kollektorvariante 2:**

Nach Diskussion mit dem ITV Denkendorf wurden von Solarenergie Stefanakis zwei weitere Modelle von Nebelkollektoren konzipiert und gebaut, in welche die Textilien zur Fixierung lediglich eingeklemmt werden müssen. Hiervon versprach man sich einen schnelleren und unkomplizierteren Einbau der Textilien. Zunächst wurde im Rahmen der Entwicklungsarbeit ein kleiner Kollektor (Projektionsfläche 0,25 m²) hergestellt, welcher in der Abbildung 5.6 wiedergegeben ist. Hierfür wurde eine viereckige U-Profilkonstruktion mit einem Y-förmigen Basiselement gestaltet, welche eine günstige Flüssigkeitsführung des abgeschiedenen Wassers ermöglichen sollte. Zur Ableitung des abgeschiedenen Wassers vom schrägen Ausschnitt an der Y-Basis in Richtung Boden bzw. Sammelbehälter wurde ein Steckelement gebaut, in welchem das Wasser abfloss. Für eine leichte Bespannung der Textilen wurde ein „Gegen-U-Profil“ in den vorgefertigten Rahmen eingesteckt (Abb. 5.7). Zwischen den beiden U-Profilen konnte das Textil dann windstabil eingeklemmt werden. Die Herstellung erfolgte auf CNC gesteuerten Stanz- und Biegemaschinen, die eine sehr hohe reproduzierbare Qualität erzeugen.

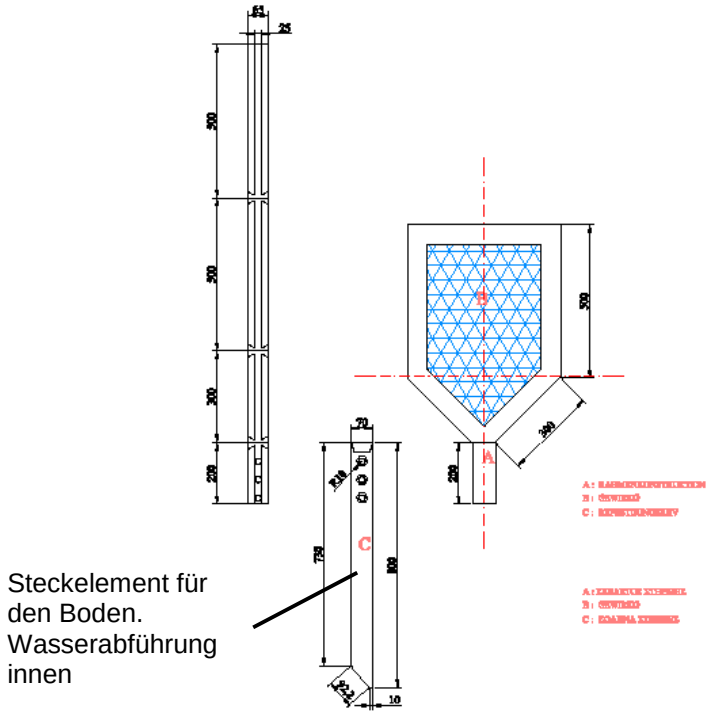


Abb. 5.6: Konstruktionszeichnung der Kollektorvariante 2 (U-Profil-Typ I, Projektionsfläche 0,25 m²)

Abb. 5.7: U-Profil und Gegenstück für den Aufbau der Kollektorvariante 2

Neben dem kleineren Kollektorprototyp wurde ferner für größere Felder eine größere Rahmenkonstruktion mit einer Textilprojektionsfläche von 1 m² konstruiert (Abb. 5.8).

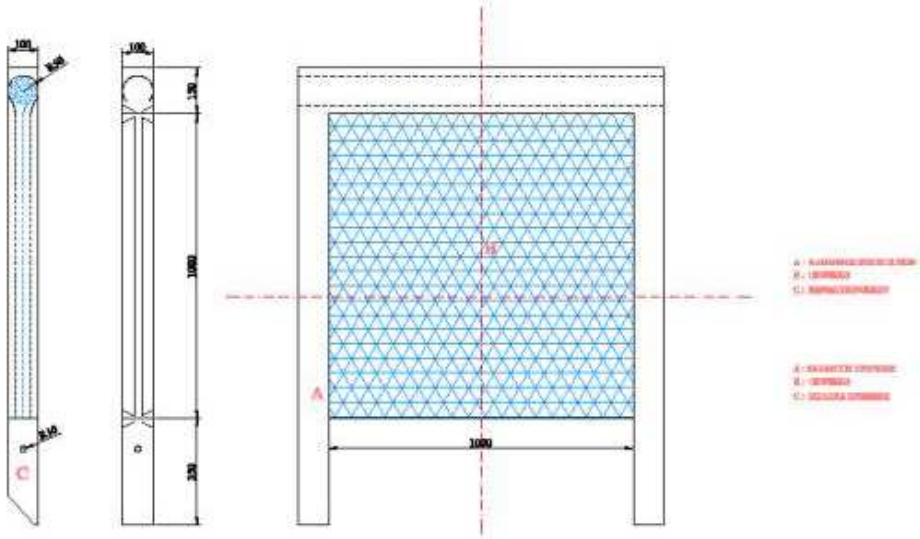


Abb. 5.8: Konstruktionszeichnung eines Kollektorprototypen (U-Profil-Typ II, Projektionsfläche 1,0 m²)

5.3 Erprobung in Feldversuchen

Die beiden realisierten Kollektorvarianten wurden in Feldversuchen aufgebaut und eingesetzt. Um ein möglichst breites Spektrum erfassen zu können, wurden die Kollektoren einerseits in der Wüste Namib in Namibia unter Leitung des ITV Denkendorf (Abb. 5.9; vgl. Teilvorhaben 1) und andereseits unter Leitung der Solarenergie Stefanakis auf der Insel Kreta eingesetzt.

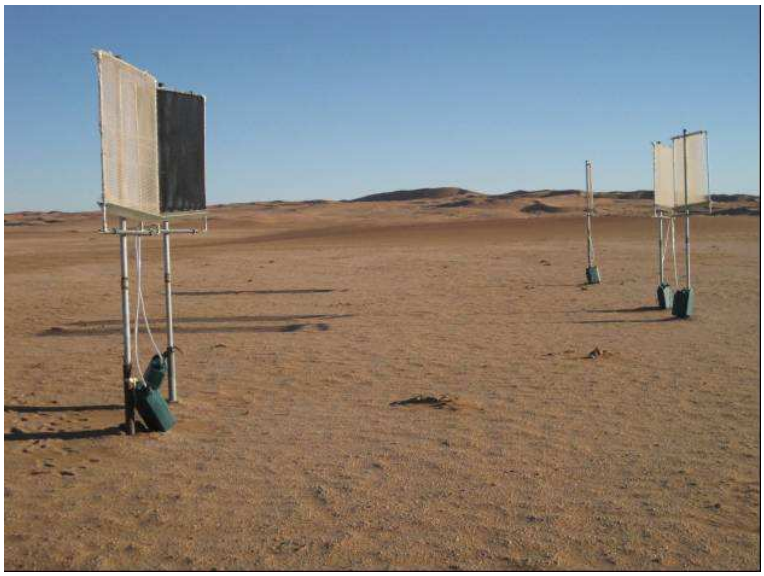


Abb. 5.9: Kollektorvariante 1 - Nebelfänger in der Wüste Namib (Namibia)

- **Standortbestimmung auf der Insel Kreta**

Der landwirtschaftliche Anbau auf der Insel Kreta wird derzeit und vor allem in Zukunft durch das knappe Wasserangebot limitiert. Wasser in Form von Luftfeuchte steht jedoch auf den Berghöhen, welche die weitaus größte Fläche der Insel belegen, in den meisten Monaten des Jahres zur Verfügung. Dieser kondensiert in der Nacht oder wird durch feinen Nebel vom Meer hereingetragen, wie die Abbildung 5.10 wiedergibt.

Abb. 5.10: Blick auf Nebelschwaden aus Sicht der Hochebene bei Ano Vianos (gegen 17 Uhr Ortszeit)

Für den Aufbau der realisierten Kollektorprototypen wurde zunächst ein geeigneter Standort ermittelt. Hierfür wurde mit dem für die Wasserversorgung auf Kreta verantwortliche Ministerium (Water Directorate of Hellenic Republic) Kontakt

aufgenommen, wo ein Empfang des Direktors Dr. Bouloukakis stattfand. Die Behörde zeigte sich sehr interessiert und bekräftige auch ihr höchstes Interesse für die Nebelernte als eine sehr nachhaltige Alternative zur Meerwasserentsalzung.

Nach Rücksprache über die geologischen Bedingungen auf Kreta wurde über das Ministerium und nach einer Kontaktaufnahme mit dem Bürgermeister Dr. Kladakis der Standort Ano Vianos (Abb. 5.11) auf einer Hochebene in den Bergen vereinbart, welcher in der Regel hohe Nebelereignisse aufweist.

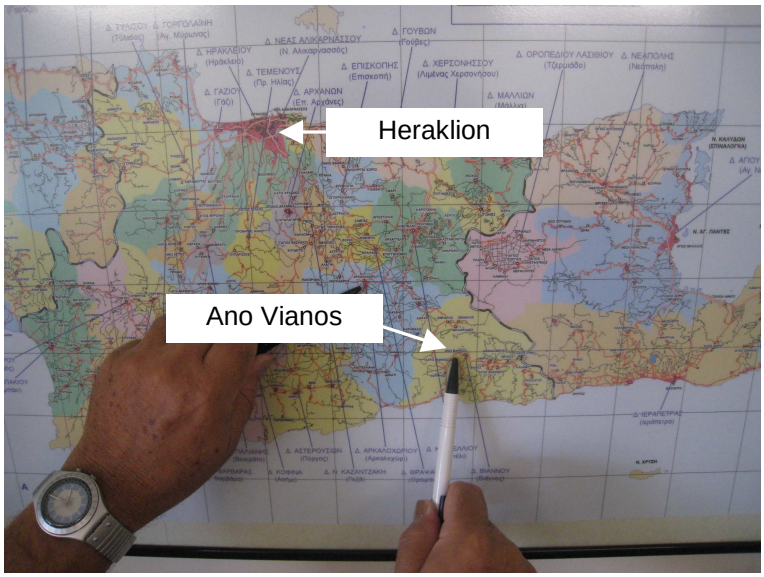


Abb. 5.11: Nebelfängerstandort Ano Vianos auf Kreta

Ein Besuch vor Ort zeigte jedoch, dass das Aufstellen der gebauten Kollektoren an der südwestlichen Flanke des Diktigebirges (Abb. 5.12) aufgrund der sehr hohen Windgeschwindigkeiten eine Herausforderung darstellt. Das gegenseitige Interesse wurde dabei jedoch gefestigt zur Installation von Kollektoren, die entsprechend orkanfest ausgelegt werden mussten.

Abb. 5.12: Nebelfängeraufstellungort auf der Hochebene bei Ano Vianos

- **Feldversuche mit der Kollektorvariante 1**

Nach der Fertigung der Stahlbaus mit Schweißen und Aufbringen des Korrosionsschutzes erfolgte der Aufbau von großflächigen Kollektoren (Variante 1). Die Abbildung 5.13 zeigt Bildaufnahmen während der Aufbauphase. Im Rahmen dessen erfolgten nachstehende Maßnahmen:

- Besichtigung des Aufbauortes,
- Evaluierung der örtlichen Windverhältnisse und erwarteten Nebelrichtungen,
- Transport der Masten an die Versuchsstation,
- Organisation der Tiefbauarbeiten mit Bagger,
- Aufstellung der Masten, Verfestigung, Betonierung, Verfüllung,
- Verspannung der Masten mit Drahtseilen,
- Aufspannen der Netze,
- Aufspannen der integrierten Wasserrinnen und
- Befestigung von Wasserfangbehältern.

Aufgebaut wurden Nebelkolloktoren mit 3 verschiedenen Textilvarianten (Textil 4 bis 6, vgl. Teilvorhaben 1, ITV Denkendorf) mit einer Fläche von jeweils 4 m², in einer Höhe von ca. 4 m und mit integrierter Wasserablaufrinne (Abb. 5.13).

Abb. 5.13: Aufbau der Nebelfänger auf der Hochebene bei Ano Vianos

Die Abbildung 5.14 zeigt die fertiggestellten Kollektoren. Von links nach rechts sind zu sehen: Noppengewirke (Textil 4), schwarzes Abstandsgewirke (Textil 6), weißes Abstandsgewirke (Textil 5) und rote Sammelbehälter.

Abb. 5.14: Nebelfänger auf der Hochebene bei Ano Vianos

Die Abbildung 5.15 zeigt die Nebelfänger nach dem Aufbau. Gut zu erkennen ist der extrem starke Wind an der Gebirgsflanke, welcher die Textilien stark belastete.

Abb. 5.15: Windbelastung bei Feldversuchen auf der Hochebene bei Ano Vianos

In der folgenden Abbildung 5.16 sind ausgewählte Ergebnisse von jeweilige Nebelereignisse der Feldversuche dargestellt.

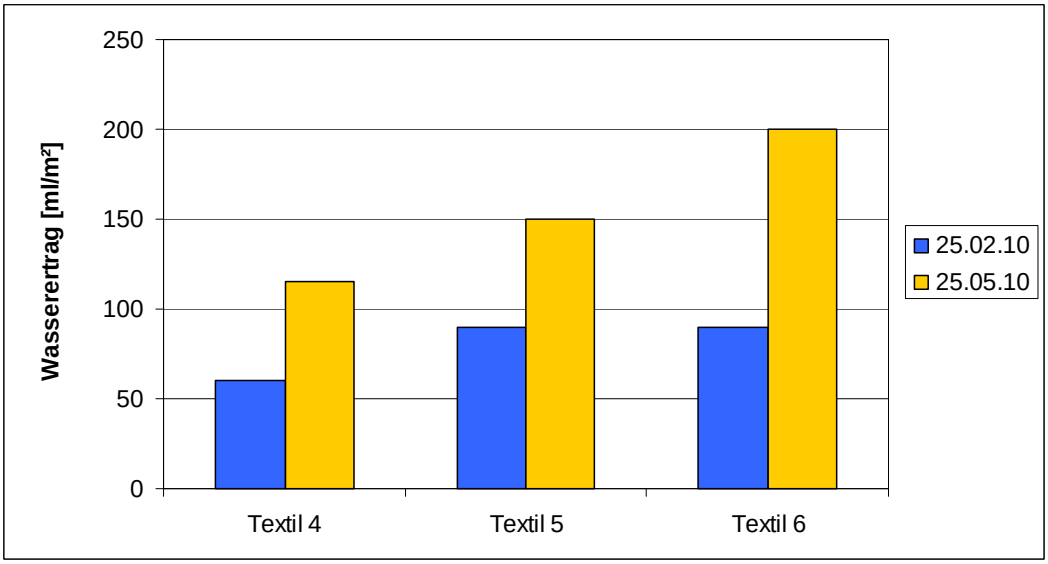


Abb. 5.16: Nebelerträge aus den Feldversuchen in Kreta

- **Feldversuche mit der Kollektorvariante 2**

Neben den großflächigen Kollektorvariante 1 wurde die Kollektorvariante 2 mit dem effektiven Textil (Nr. 6, vgl. Abb. 5.16) in der Region Niko Kazantzaki Astrakous aufgebaut und zur Bewässerung von Pflanzen eingesetzt (Abb. 5.17). Leider verliefen diese Versuche trotz eines Ertrages von etwa 30 ml/m² nicht zufriedenstellend, da die Blechrahmenkonstruktionen nach einem halben Jahr deutliche Zeichen von Korrosion an den Biegepunkten aufwiesen und daher abgebaut werden mussten.

Abb. 5.17: Kollektorvariante 2 (mit „Textil 6“) an einer Pflanzenwurzel in Niko Kazantzaki Astrakous

5.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Fa. Solarenergie Stefanakis aus Stadecken-Elsheim ist aktuell auf dem Markt der Herstellung und des Vertriebes von Sonnenkollektoren (einschließlich Peripherie) beheimatet und ist derzeit sehr daran interessiert, sein Portfolio zu erweitern um zu expandieren. Die Firma Solarenergie Stefanakis sieht, nicht nur aufgrund der Herkunft des Firmengründers aus Kreta und weitreihender Kontakte dorthin, einen sehr großen Markt für Nebelfänger auf Kreta, was die Firma bei Gesprächen mit hohen Vertretern aus der Politik immer bestätigt wurde. Angesichts dieses und zweifelsohne auch weltweiten Marktes strebt die Fa. Solarenergie Stefanakis an, den Know-how-Vorsprung, welcher sich aus dem Projekt ergeben wird zu nutzen, um Nebelfängerkollektoren herstellen zu können. Hierfür besitzt die Solarenergie auch die technischen Voraussetzungen mit einer gut ausgestatteten und ausgebildeten Werkstatt in Stadecken-Elsheim, aber auch auf Kreta in deren Hauptstadt Heraklion. Die Herstellung der Nebelfänger soll durch Solarenergie Stefanakis in Deutschland aber auch in Kreta für den griechischen Markt erfolgen. Die Textilien hierfür werden vom Projektpartner Mattes&Ammann erworben. Das ITV Denkendorf wird aufgrund seiner eingereichten Patente (DE102008042069A1, WO002010028957A1) an der Verwertung beteiligt..

Die aktuelle Zeitplanung sieht vor, zur Rheinland-Pfalz-Ausstellung im März 2011 oder spätestens im März 2012 die Kollektoren präsentieren zu können. Ab Mitte 2011 sind dann erste Verkäufe geplant, wobei zunächst Kunden in Griechenland (vorwiegend Kreta), anschließend auch in Afrika (Namibia, Südafrika und/oder Eritrea, Madagaskar) bedient werden sollen. Aktuell gibt es eine Anfrage aus Chile. Zu allen diesen Ländern bestehen bereits Kontakte über das ITV Denkendorf und/oder aus der laufenden Geschäftstätigkeit.

Bereits während des Projekts wurde ein Mitarbeiter eingestellt, weitere ein Neuanstellungen sind für das Jahr 2011 geplant um die notwendigen Fertigungskapazitäten bereitstellen zu können.

Der Zeithorizont für eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse ist derzeit noch nicht vollständig abzuschätzen. Der Gesamtpreis pro m² wird hier die zentrale Rolle spielen. Das Unternehmen strebt bei einer Serienproduktion einen Kollektorpreis (Rahmen) von ≤5 Euro/m² an, um konkurrenzfähig zu sein. Der Preis der derzeitig auf dem Markt angebotenen, robusten Kollektorrahmen liegt etwa ≥5 Euro. Es sollte dabei

jedoch hingewiesen werden, dass durch die innovativen Textilien ein Alleinstellungsmerkmal vorliegt, um höhere Erträge erzielen zu können.
Die folgende Tabelle 5.1 enthält zusammenfassend die an die aktuelle Zeitplanung angepassten Umsatzziele der Solarenergie Stefanakis.

	2011/12	**2012/13**	**2013/14**
Stück / Jahr	300	600	1.000
Umsatz in Mio. €	0,1	0,2	0,3

Tab. 5.1: Umsatzziele der Solarenergie für Nebelkollektoren

5.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es liegen der Solarenergie Stefanakis keine Ergebnisse anderer Stellen vor.

5.6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Die wissenchaftliche Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgte im Rahmen von Veröffentlichungen und Vorträgen durch das ITV Denkendorf und der Universität Tübingen. Ferner erfolgte in der renomierten griechischen Zeitschrift Stigmes folgende Veröffentlchung:

- J. Stefanakis: Eine geheime Nebelfalle auf den Hügeln von Psiloritis. Stigmes (GR), 112, 2010.

Die Vorstellung der Nebelkollektoren erfolgte auf der Hannover Messe 2010 (Gemeinschaftsstand BIOKON). Weitere Produktvorstellungen sind vor allem auf Ausstellungen der Industrie- und Handelskammer in Rheinland-Pfalz und Griechenland vorgesehen.

Wir möchten uns abschließend noch ausdrücklich beim Projektträger Karlsruhe (PTKA-BWP) vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) für die hilfreiche Unterstützung des Förderantrags und für die unbürokratische Betreuung bedanken.