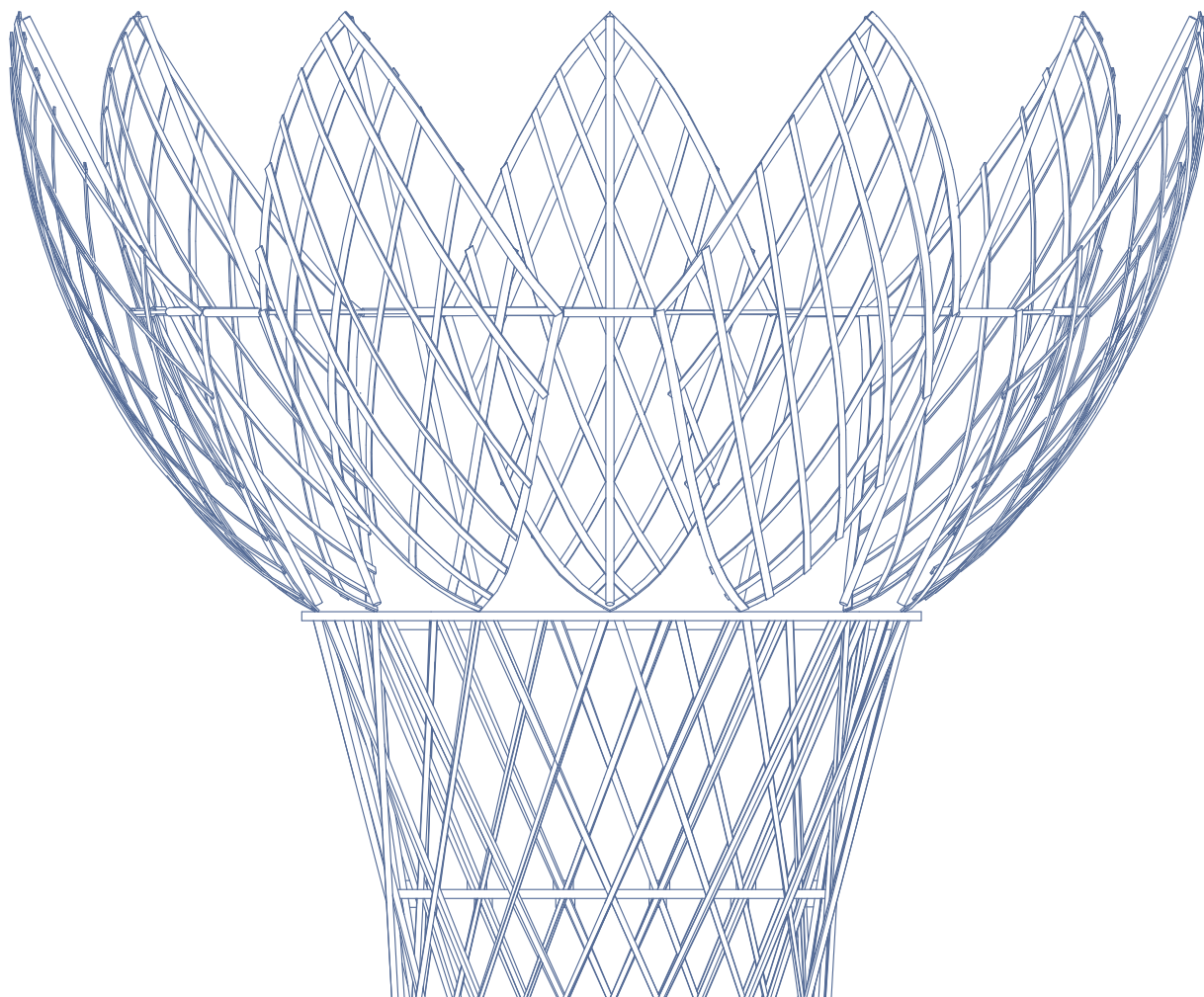


PaWaGeNu

Passive Wassergewinnung und -nutzung
zur Kühlung der Stadt Wien

Stefanie Fridrich





TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

DIPLOMARBEIT

PaWaGeNu

Passive Wassergewinnung und -nutzung zur Kühlung
der Stadt Wien

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
einer Diplom-Ingenieurin
unter der Leitung

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Peter Bauer
E259-02 Institut für Architekturwissenschaften,
Abteilung für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Stefanie Fridrich

11934275

Wien, am 11.04.2022

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit soll es um die Entwicklung von einem passiven und zugleich nachhaltigen System gehen, das als Äquivalent für den Einsatz von Anlagen, die künstlichen Sprühnebel mit Hilfe von Pumpen erzeugen, dienen kann. Denn diese finden während der immer heißer werdenden Sommermonate immer häufiger Verwendung, vor allem zur Kühlung des städtischen Raumes und deren Bewohner_innen.

Das dafür verwendete Prinzip soll auf der passiven Gewinnung von Wasser aus der Atmosphäre in Form von Nebel und Tau in der Nacht und während der frühen Morgenstunden dienen. Der dadurch gewonnene Wasserertrag soll dann ebenfalls passiv durch Verdunstungskühlung zur Senkung der hohen, sommerlichen Temperaturen genutzt werden.

Das biomimetische Denken, von gegenwärtig lebenden Spezies und deren Strategien zu lernen und mit dem Ziel nachzuahmen, neue Lebensweisen zu schaffen, die die aktuelle große Design-Herausforderungen unter Berücksichtigung des Lebens auf der Erde, ist dabei der ausschlaggebende Punkt.

Abstract

This diploma thesis aims to develop a passive and at the same time sustainable system that can serve as an equivalent for the use of systems that generate artificial spray mist with the help of pumps. These are used more and more frequently during the increasingly hot summer months, especially for cooling urban spaces and their inhabitants.

This principle is based on the passive extraction of water from the atmosphere in the form of fog and dew at night in addition to periods during the early morning hours. The resulting water yield is then also to be used passively through evaporative cooling to reduce the high summer temperatures.

Biomimetic thinking, learning from currently living species and their strategies and imitating them to create new ways of living that address the current major design challenges, taking into account life on Earth, is the crucial point here.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
Einleitung	8
Methodik	
Aufbau der Arbeit	
Teil I - Grundlagen	10
I.I Allgemeines	
Wasser	11
Definition Wasser	
Allgemeine Wasserressourcen	
Einflüsse und deren Auswirkungen auf die Wasserressourcen	
Wetter und Klima	16
Definition Wetter und Klima	
Physikalische Zustandsgrößen von Wetter und Klima	
Wetterphänomen Nebel	
Wetterphänomen Tau	
Biomimikry	23
Definition Biomimikry	
Unterschied zu anderen bioinspirierten „Design-Arten“	
I.II Wassergewinnung	
Biomimikry-Strategien der Wassergewinnung in der Natur	26
Strategie der Schwarzkäfer	
Strategie der Spinnen	
Strategie der Buschgräser	
Technologische Gewinnung von atmosphärischem Wasser	31
Ernte von atmosphärischem Nebel	
Generelles Prinzip	

Netzarten und deren Vergleich	
Effizienz der Nebelkollektoren	
Design der Nebelkollektoren	
Studien zur Oberflächenbenetzbarkeit von Netzen	
Optimierung von Nebelkollektoren	
Ernte von atmosphärischem Tau	
Referenzen zur passiven Wassergewinnung	51
Fog Collector	
CloudFisher	
Warka Tower	
Lokalisierung, Klima und Effizienz im Vergleich	

I.III Kühlung

Biomimikry / Biomimetische Strategien der Kühlung in der Natur	61
Strategie der Schwarzschnauze-Präriehunde	
Strategie der Termiten	
Technologische Kühlung der Luft	64
Vernakuläre Kühlung	
Adiabate Kühlung	
Referenzen zur passiven Kühlung	68
EXPO Dubai 2020 - Österreich Pavillon	
CoolAnt	

Teil II - Standort 72

Wasserressourcen Wien	74
Allgemeine klimatische Bedingungen Wien	74
Temperatur Wien, allgemein	
Luftfeuchtigkeit Wien, allgemein	
Vergleich und Rückschlüsse	

Spezifische Gegebenheiten der Lokalisierung

Infrastruktur

Klimatische Bedingungen

Temperatur

Wind

Schatten

Teil III - Entwurf 84

Konzept 85

Materialisierung 86

Zonierungsprinzip 88

Gestaltung der Zonen 90

Fazit und Ausblick 104

Teil V - Anhang

Literaturverzeichnis 106

Abbildungsverzeichnis 115

Wetter- und Klimadaten Referenzen 121

Wetter- und Klimadaten Wien, allgemein 124

Wetter- und Klimadaten Wien, Christian-Broda-Platz 125

Einleitung

Wien stellt vor allem während der Sommermonate ein attraktives Reiseziel dar, da es ein großes Angebot an Freizeitmöglichkeiten bietet.

Nach wenigen Stunden Aufenthalt wird jedoch schnell klar, dass die Temperaturen eine Herausforderung für alle lebenden Organismen sind. Die Stadt Wien wirkt dem durch die Aufstellung von vielen frei zugänglichen Trinkbrunnen oder von Sprühnebelanlagen entgegen und bietet Orte zum Abkühlen. Der Gedanke ist überaus angemessen, vor allem wenn man bedenkt, dass das Wasser in Wien keine Mangelware ist. Dennoch ist aber die Art und Weise der Umsetzung durch die Verwendung von elektrischen Pumpen, die die Wassermassen über die Sprühnebelanlagen verteilen, nicht besonders nachhaltig.

Kaum ein Wort ist so um die Weltgegangen wie der Begriff »Nachhaltigkeit«. Nachhaltigkeit ist stark mit Klimawandel, dem Verbrauch von Ressourcen und dem allumfassenden Verändern der Weltoberfläche durch den Menschen verbunden. Damit ist aber auch Diese Themen sind

zu einem festen Bestandteil einer ganzen Generation geworden. Es ist beinahe unumgänglich, sich dieser Problematik zu stellen. Damit ist aber auch eine Art Unstimmigkeit verbunden, denn wer von allem genug zur Verfügung hat, sieht die Notwendigkeit nachhaltig zu leben nicht als wirklich dringlich an.

Diese Arbeit befasst sich mit genau diesen Themen und soll eine mögliche Lösung am Beispiel von Wien dafür darstellen. Wien hat wie gesagt kein Problem mit der Wasserversorgung, dennoch bietet sich präventiv an Lösungen zu arbeiten, die die Erhaltung dieses Zustandes auf ein Maximum erhöht. Lösungen, die von der Natur lernen, sich deren Prinzipien zu Nutze machen und so unter Verwendung von recycelten Materialien einen vollkommen passiven, naturbetriebenen Ansätze enthalten.

Methodik

Die vorwiegende Analysemethode war auf Grund der vorherrschenden Covid-19-Pandemie die Internetrecherche, wodurch Daten in Form von Zeitungsberichten, Fachartikeln, Büchern, aber auch studentischen Arbeiten gewonnen werden konnte.

Da der Großteil der Fachliteratur zu den Thematiken in Englisch verfasst ist, wurde weitestgehend versucht gleichwertige deutsche Übersetzungen für englische Fachbegriffe zu finden. Zum besseren Verständnis ist aber auch der englische Originalwortlaut aufgeführt.

Bei der Ausarbeitung der Entwurfskomponente wurden viele verschiedene Ansätze durch die Verwendung von physischen Modellen verfolgt. Auf deren Grundlage konnten einige wichtige Entscheidungen getroffen werden. Aber auch die dreidimensionale Modellierung war ein Teil der Entwurfsmethodik.

Aufbau der Arbeit

Der erste Teil der Arbeit »Grundlagen« befasst sich mit drei Interessengebieten, der Wassergewinnung, der Kühlung sowie allgemeinen Informationen, die mit den Themen in Zusammenhang stehen. Gestützt werden diese Informationen durch die Einbindung von Referenzbeispielen. Mit diesem umfangreichen Baustein wird eine Basis mit allen Angaben geschaffen, die für die nachfolgenden Abschnitte vorausgesetzt werden und deshalb von enormer Wichtigkeit sind.

Im zweiten Teil »Standort« werden die genauen Gegebenheiten für die gewählte Lokalisierung analysiert. Aufgezeigt werden dabei Informationen über klimatische Bedingungen und infrastrukturelle Gegebenheiten.

Der dritte Teil »Entwurf« stellt eine Interpretation dar, alle Erkenntnisse aus den vorherigen Teilen zusammenzufassen und einen Entwurf daraus zu entwickeln.

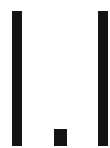
I

Grundlagen

Wasser wird immer knapper, weshalb ein effektiver Schutz sowie der schonende Umgang mit dieser Ressource zur Erhaltung der biologischen Vielfalt zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Die Menschheit kann jedoch auch mit dem Wissen, wie Wasser effizient der Atmosphäre entzogen werden kann, diesem Phänomen aktiv entgegenwirken.

Im Folgenden ersten Teil der Arbeit werden alle relevanten Grundlagen, die mit der Wassergewinnung und der -nutzung zur aktiven Kühlung in Zusammenhang stehen und von Bedeutung sind, erfasst. Zu Beginn werden allgemeine Punkte erläutert. Da die Arbeit im Wesentlichen zwei Themengebiete behandelt, wurde der weitere Inhalt zum besseren Verständnis in die beiden Bereiche »I.II Wassergewinnung« und »I.III Kühlung« eingeteilt. Diese Aufteilung ist auch im weiteren Verlauf der Arbeit immer wieder zu finden.



Wasser

Wasser bildet das Fundament allen Lebens.¹ Dies ist auch der Grund, warum kein Rohstoff so bedeutsam ist wie Wasser und weshalb der Zugang zu sauberem Trinkwasser eines von vielen Menschenrechten ist.²

Wasser bietet in verschiedenen Volumina, von kleinen Bächen bishin zu weitläufigen Meeren, einen Lebensraum für eine Reihe von Pflanzen und Tieren und ist damit auch für den Naturhaushalt ein elementarer Baustein.³ Die Menschheit nutzt Wasser auf vielfältige Weise, wie für die Ernährung, die tägliche Hygiene oder Freizeitaktivitäten, aber auch als Energiequelle und Transportmedium, weswegen es auch einen wichtigen Wirtschaftsfaktor bildet.⁴

Was Wasser genau ist, über welche Ressourcen die Erde verfügt und wie diese darauf verteilt sind, ebenso wie die Einflüsse und deren Auswirkungen darauf, werden im weiteren Verlauf erarbeitet.



Abb. 1: Leitsatz von Viva con Agua



Abb. 2: Lebenselixier Wasser

¹ vgl. Umwelt Bundesamt, o. D.
² vgl. Mittal und Bahners, 2017
³ vgl. Umwelt Bundesamt, o. D.
⁴ ebd.

Definition Wasser

Wasser ist eine chemische Verbindung und besteht aus den beiden Elementen Sauerstoff, Elementsymbol O, und Wasserstoff, Elementsymbol H.⁵

Es handelt sich um den einzigen existierenden Stoff, der in der Natur in beträchtlichen Mengen in den drei klassischen Aggregatzuständen vorkommt.⁶ Der Begriff Wasser wird dabei vorwiegend für den flüssigen Zustand verwendet, Eis für den festen, gefrorenen Zustand und Wasserdampf für den gasförmigen Zustand.⁷

Im Allgemeinen ist Wasser als Reinstoff eine transparente und nahezu farblose Flüssigkeit, die zudem noch geschmacks- und geruchlos ist.⁸ Als Reinstoff kommt Wasser jedoch in der Natur nicht vor, da sich praktisch immer Verunreinigungen, wenn auch meist in kaum messbaren Konzentrationen, finden lassen.⁹

5 vgl. chemie.de, *Wasser*, o. D.

6 vgl. chemie.de, *Eigenschaften des Wassers*, o. D.

7 vgl. chemie.de, *Wasser*, o. D.

8 vgl. chemie.de, *Eigenschaften des Wassers*, o. D.

9 ebd.

Allgemeine Wasserressourcen

Da über zwei Drittel der Erdoberfläche mit Wasser bedeckt sind, ist es nicht verwunderlich, dass die Erde aus dem Weltall aus blau schimmert.¹⁰ Diese knapp 71 % der Fläche, siehe Abb. 3, bieten Raum für ein Volumen von 1.386 Milliarden m³.¹¹ 97,5 % davon macht das Salzwasser der Meere und Ozeane aus, lediglich die kleine Restmenge ist Süßwasser, welches wiederum zum größten Teil in fester Form in Gletschern, Schnee und Eis gebunden ist.¹² Somit bleiben nur mehr 0,4 % der vorhandenen Wasserressourcen übrig, die fre nutzbar sind und die Basis für alles Leben an Land bilden, welches wir Menschen uns mit Tieren und Pflanzen teilen.¹³

Das Süßwasser enthält auch den Wasserdampf in der Luft mit einer Gesamtmenge von 15 Billionen Litern, der selbst in den entlegensten und trockensten Arealen vorkommt.¹⁴ Die nutzbaren Vorräte sind jedoch zeitlich und räumlich unregelmäßig verteilt, sodass es von einem Jahr zum anderen zu erheblichen Schwankungen zwischen trockenen und feuchten Klimazonen sowie zwischen nassen und trockenen Jahreszeiten kommen kann.¹⁵ Es gibt aller-

10 vgl. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, o. D.

11 vgl. chemie.de, *Wasser*, o. D.

12 vgl. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, o. D.

13 ebd.

14 vgl. Wang et al., 2021

15 vgl. Morichi et al., 2018

dings einige Länder und Regionen, in denen das Süßwasser einen dauerhaften extremen Mangel darstellt, sodass es dort zu großer Trockenheit kommt.¹⁶ Vielerorts ist es aber nicht nur die vorhandene Wasserknappheit, die den Lebewesen das Leben erschwert, häufig ist das gegebene Wasser durch hochgradige Verschmutzungen ungenießbar.¹⁷ Daraus lässt sich schließen, dass bei den meisten landwirtschaftlichen Praktiken, auch in trockenen Bereichen, nicht Land das begrenzende Element ist,

sondern Wasser.¹⁸

Der Hauptteil des Süßwassers aus unterirdischen Grundwasserleitungen kann jedoch den Großteil der Weltbevölkerung mit ausreichend Flüssigkeit versorgen.¹⁹

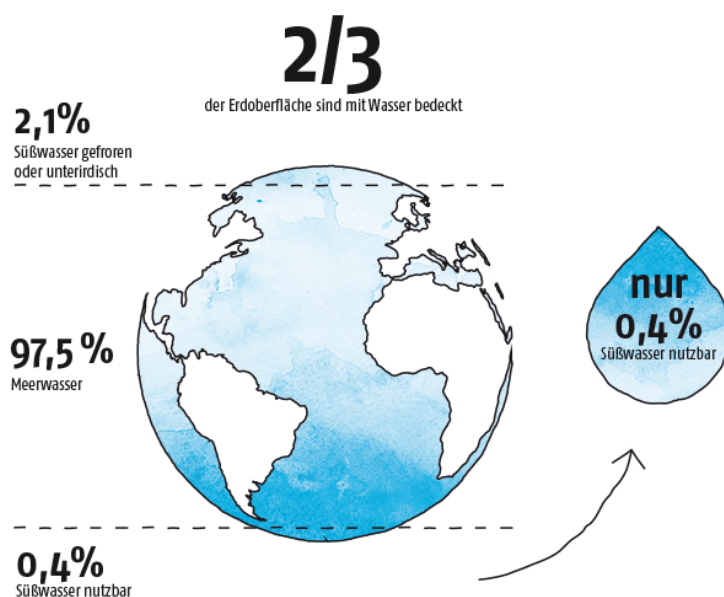


Abb. 3: Verteilung der Wasserressourcen auf der Erde

¹⁶ vgl. Wang et al., 2021

¹⁷ vgl. Mittal und Banners, 2017

¹⁸ vgl. Morichi et al., 2018

¹⁹ vgl. Schiermeier, 2014

Einflüsse und deren Auswirkungen auf die Wasserressourcen

Es gibt eine Menge Faktoren, die die Wassernachfrage entscheidend beeinflussen.²⁰ Hierbei sind vor allem die Politik der Nahrungsmittel- und Energiesicherheit, makroökonomische Abläufe, wie die Globalisierung des Handels sowie der steigende Wasserverbrauch zu nennen.²¹ Jedoch sind die gravierendsten Belastungen für die Wasserressourcen im Zusammenhang mit dem Bevölkerungswachstum und der Urbanisierung zu sehen.²² Im Januar 2022 umfasste die Weltbevölkerung etwa 7,95 Milliarden Menschen und laut UN, oder auch Vereinte Nationen, ist damit zu rechnen, dass diese bis 2050 auf 9,7 Milliarden ansteigen wird.²³ Ein solcher Anstieg verursacht große Unsicherheiten hinsichtlich der für die Gesamtheit an Menschen, aber für alle anderen Organismen, benötigten Wassermenge.²⁴ Diese Ungewissheiten werden durch die Konsequenzen des Klimawandels zusätzlich erhöht, da er sich sowohl auf die Wasserressourcen als auch auf den Wasserbedarf für alle Nutzungen direkt auswirkt.²⁵ Wenn sich die globalen

Temperaturen erhöhen wird mehr Wasser aus der Atmosphäre aufgenommen, wodurch die Luftfeuchtigkeit ebenfalls ansteigt und so zu einer zusätzlichen Erwärmung führt.²⁶ Dieser Prozess wird als »Wasserdampf-Rückkopplung« bezeichnet.²⁷

Die Erwärmung führt dazu, dass immer mehr Menschen der Bevölkerung unter einem extremen Trinkwassermangel leiden werden.²⁸ Sogar Industrieländer werden auf lange Sicht nicht davon verschont bleiben.²⁹ Heute schon verfügen rund 4,5 Milliarden Menschen über unzureichende sanitäre Einrichtungen sowie saubere Wasserquellen, weitere 2,2 Milliarden Menschen haben überhaupt keinen Zugang zu Wasser.³⁰

Derartige Mängel, die häufig durch die Verunreinigung mit menschlichen als auch tierischen Abfällen verursacht werden, begünstigen Gesundheitsprobleme wie die Ausbreitung von Krankheiten und haben schwerwiegende Auswirkungen auf die Bevölkerung.³¹ Viele Menschen sterben

20 vgl. Morichi et al., 2018
21 ebd.
22 ebd.
23 vgl. Wikipedia, 2022
24 vgl. Morichi et al., 2018
25 ebd.

26 vgl. The Biomimicry Institute, *The Beetles That Drink Water From Air - Darkling beetles*, 2017
27 ebd.
28 vgl. Schiermeier, 2014
29 vgl. Jarimi et al., 2020
30 ebd.
31 vgl. The Biomimicry Institute, *Lightweight Water Collection System Inspired by Darkling Beetles*, 2017

jährlich an Durchfall oder anderen Erkrankungen wie Unterernährung, Lungenentzündung oder Malaria.³²

Aber auch die Beschaffung von vorhandenem Wasser wird zunehmend schwieriger, gefährlicher, teurer und komplizierter.³³ Mancherorts kommt es sogar schon zu schweren Konflikten zwischen Ländern, da sie um die immer geringer werdene Ressource konkurrieren.³⁴

Es wurden schon viele Maßnahmen zur Abschwächung der Prozesse des Klimawandels entwickelt, jedoch konzentrieren sich diese vorwiegend auf die Verringerung des Energieverbrauches und der Kohlenstoffemission und weniger um die zunehmenden hydrologischen Schwierigkeiten.³⁵ Energie und Wasser sind untrennbar miteinander verbunden.³⁶ Alle Energie- und Stromquellen benötigen Wasser und umgekehrt wird Energie benötigt, um die Wasserressourcen durch Pumpen, Transport oder Aufbereitung für den uneingeschränkten Gebrauch und auch Verbrauch für Menschen verfügbar zu machen.³⁷ Die-

se wechselseitige Abhängigkeit wird als »Wasser-Energie-Nexus« bezeichnet.³⁸

³² ebd.

³³ ebd.

³⁴ vgl. Jarimi et al., 2020

³⁵ vgl. Morichi et al., 2018

³⁶ ebd.

³⁷ ebd.

³⁸ ebd.

Wetter und Klima

Die Erde wird von der Sonne mit Energie versorgt, die sie anschließend wieder an das Weltall abgibt.³⁹ Stehen die eingestrahlte und die wieder abgegebene Energiemenge im Gleichgewicht herrscht auf der Erde permanent die gleiche Temperatur.⁴⁰ Ändert sich die Zusammensetzung der Atmosphäre, beeinflusst das diese Strahlungsprozesse und es kann zu einer Verschiebung der Balance zwischen Sonne und Erde kommen, die im Weiteren eine Abweichung der mittleren Temperatur auf der Erde verursacht.⁴¹ Die Konsequenz von einer solchen Entwicklung ist der schon zuvor erwähnte Klimawandel.

Da der Großteil der Arbeit auf zwei meteorologischen Phänomenen aufbaut, handelt der nachfolgende Teil schwerpunktmäßig die Themen Klima und Wetter. Neben der Definition werden zudem Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede herausgearbeitet und bestimmte physikalische Zustandsgrößen genauer erläutert.



Abb. 4: Klimaphänomen Nebel



Abb. 5: Klimaphänomen Regen

³⁹ vgl. Ecodesign Kit, o. D.

⁴⁰ ebd.

⁴¹ ebd.

Definition Wetter und Klima

Der Ursprung des Begriffs Klima liegt in dem griechischen Wort »klimatos«, das Neigung bedeutet, und zwar die Neigung der Erdachse gegen die Ebene, auf der sich ihre Umlaufbahn um die Sonne befindet.⁴²

Das Klima definiert den Zustand des Klimasystems, welches sich aus verschiedenen Komponenten zusammensetzt, die in stetigem Austausch von Energie und Masse über bestimmte Flüsse sind und eine energetische Ausgewogenheit beabsichtigen.⁴³ Die Einzelteile des Klimasystems sind die fünf Sphären, wie etwa die Atmosphäre oder die Troposphäre, und deren Austausch von Energie und Masse erfolgt unter anderem über Strahlung, Wind, Verdunstung oder Niederschlag.⁴⁴ Diese Vorgänge werden durch den Energiefluss der Sonne und der unterschiedlichen Verteilung der beiden Faktoren auf der Erde reguliert.⁴⁵ Beschrieben wird das Klima über die Erfassung von Zustandsgrößen, wie etwa Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Wind, und Flussgrößen, wie beispielsweise Strahlung, Verdunstung und Niederschlag.⁴⁶

Für den internationalen Vergleich der Klimadaten wurden sogenannte Klimanormalperioden festgelegt, die jeweils einen Zeitraum von 30 Jahren umfassen und diesen beschreiben.⁴⁷

Das Wetter hingegen fasst die Zustandsgrößen im Unterschied dazu in einem verhältnismäßig kurzen Zeitraum von Stunden bis hin zu wenigen Wochen zusammen.⁴⁸

Die Abläufe des Wetters finden in der unteren der fünf Sphären, der Troposphäre, statt, und werden ebenfalls mit den Zustandsgrößen Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind u.a. an einem bestimmten Ort oder Gebiet beschrieben.⁴⁹ Abschließend ist festzuhalten, dass das Klima eine Art Zusammenfassung der einzelnen Wetterdaten darstellt.⁵⁰

42 vgl. Deutscher Wetterdienst, *Klima*, o. D.

43 vgl. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, o. D.

44 ebd.

45 ebd.

46 ebd.

47 ebd.

48 ebd.

49 vgl. Deutscher Wetterdienst, *Wetter*, o. D.

50 vgl. Deutscher Wetterdienst, *Klima*, o. D.

Physikalische Zustandsgrößen von Wetter und Klima

Wie bei der Definition von Wetter und Klima schon beschrieben, werden diese anhand von bestimmten Zustandsgrößen gemessen. Im Folgenden wird nur auf die Zustandsgrößen eingegangen, die für das bessere Verständnis dieser Arbeit von Bedeutung sind.

Luftdruck

Beim Luftdruck handelt es sich um den Druck, der von der Masse der Luft unter Wirkung der Erdanziehung ausgeübt wird.⁵¹ Definiert wird der Luftdruck über das Gewicht der Luftsäule pro Flächeneinheit vom Boden der Erde bis zur äußersten Grenze der Sphären und beträgt in Meereshöhe 1.013,25 hPa.⁵² Mit zunehmender Höhe oberhalb des Meeresspiegels verlangsamt sich die Druckaufnahme und es kommt zu einem Druckabfall.⁵³

Taupunkt

Der Taupunkt oder eher die Temperatur, die diesen definiert, gehören zu den Parametern der Luftfeuchtigkeit.⁵⁴ Er bezeichnet den Teil der Luft, der unter konstantem Druck und Dampfgehalt abgekühlt wird,

wodurch Sättigung eintritt, ohne dass es zu einer Erhöhung oder Verringerung des Wasserdampfes kommt.⁵⁵

Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit, in der Literatur auch häufig mit RH, aus dem Englischen *relative humidity*, abgekürzt, gibt den prozentualen Anteil vom Dampfdruck des sich in der Luft befindenden Wassers und des Sättigungsdampfdrucks bei einer bestimmten Temperatur an.⁵⁶ Beträgt die RH 100 % bedeutet das, dass der Wasserdampf in der Luft seinen maximalen Sättigungszustand erreicht hat.⁵⁷ Mit der relativen Luftfeuchtigkeit kann also der Wassergehalt quantitativ in Prozent bestimmt werden.⁵⁸

Absolute Luftfeuchtigkeit

Die absolute Luftfeuchtigkeit oder Feuchte gibt Auskunft über den Gehalt an Wasserdampf in einem definierten Luftvolumen und wird deshalb in g/m³ angegeben.⁵⁹ Im Vergleich zur relativen Luftfeuchtigkeit ist die absolute Feuchte nicht von der Temperatur abhängig.⁶⁰

51 vgl. Deutscher Wetterdienst, *Luftdruck*, o. D.

52 ebd.

53 ebd.

54 vgl. Deutscher Wetterdienst, *Taupunkt*, o. D.

55 vgl. Grecco et al., 2017

56 vgl. Wang et al., 2021

57 ebd.

58 ebd.

59 vgl. Deutscher Wetterdienst, *Absolut Feuchte*, o. D.

60 ebd.

Um die physikalischen Zustandsgrößen im weiteren Verlauf der Arbeit auch korrekt einbeziehen zu können, sind folgende Zusammenhänge von Bedeutung.

Für die Ermittlung der absoluten Luftfeuchtigkeit kann das Carrier-Diagramm verwendet werden, wofür Werte für Temperatur, Taupunkttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit bekannt sein müssen. All diese Größen stehen in direkter Verbindung mit dem Luftdruck, der wie beschrie-

ben je nach Höhenlage unterschiedlich ausfällt.⁶¹

Der Quotient von Gleichung [1] aus Luftdruck in Meereshöhe und dem Druck in gegebener Höhenlage ist ein Korrekturfaktor, der genutzt werden kann um die relative Luftfeuchtigkeit für die korrekte Verwendung des Carrier-Diagramms mit Gleichung [2] umrechnen zu können.⁶²

$$k = \frac{p_1}{p_2}$$

k	Korrekturfaktor
p_1	Luftdruck bei 0 m ü.M.
p_2	Luftdruck bei gegebener Höhenlage

Gleichung [1]

$$\varphi_{neu} = \frac{\varphi_{alt}}{k}$$

φ_{neu}	relative Luftfeuchtigkeit für Carrier-Diagramm mit gegebener Höhenlage
φ_{alt}	relative Luftfeuchtigkeit bei gegebener Höhenlage

Gleichung [2]

⁶¹ vgl. Deutscher Wetterdienst, Luftdruck, o. D.

⁶² vgl. Siemens, o. D.

Wetterphänomen Nebel

Nebel ist eines von vielen Wetterphänomenen, der sich durch die atmosphärischen Gegebenheiten ausbilden kann.⁶³

Je nach Fachrichtung gab es lange Zeit eine große Bandbreite an Definitionen für Nebel, wobei die am häufigsten verwendete besagt, dass man von Nebel spricht, wenn die horizontale Sichtweite weniger als 1.000 m beträgt.⁶⁴ Da diese Beschreibung allerdings nicht sonderlich präzise ist und die Sicht auch auf Grund von anderen Umständen, wie beispielsweise starkem Niederschlag, beeinträchtigt sein kann, fügte man noch eine Erweiterung an.⁶⁵ Diese formuliert eine Voraussetzung, welche besagt, dass der Nebel aus Wolkentröpfchen in der Luft besteht, die kleiner als 200 µm sind.⁶⁶

Prinzipiell ist Nebel also eine Wolke mit physischem Kontakt zur Erdoberfläche, die Potential hat ihren Beobachter einzuhüllen und unter extremen Umständen kann diese Hülle sogar so dicht ausfallen, dass das Gefühl entstehen kann von flüssiger statt gasförmiger Materie umgehen zu sein.⁶⁷ Ist dies der Fall, kann ein Kubikmeter Nebel bis zu einem halben Gramm

flüssiges Wasser enthalten.⁶⁸ Dennoch ist die Größe der Tröpfchen so gering, dass sie sich nicht schnell absetzen können und eine Fallgeschwindigkeit von weniger als 1 cm/s bis 5 cm/s besitzen, die gering genug ist, um den Fallwinkel in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit zu verändern, sodass die Wassertröpfchen auch bei minimalem Wind horizontal bewegt werden.⁶⁹

Zu Nebelbildung kommt es, wenn sich die Luft bis zum Taupunkt abkühlt, der unter »Physikalische Zustandsgrößen« genauer erläutert wurde.⁷⁰ Durch die warme Sonneneinstrahlung verdunstet untertags Wasser, welches sich dann als Wasserdampf in der Luft befindet.⁷¹ Sobald die Umgebungstemperatur jedoch wieder sinkt und die Luft abkühlt, hat das zur Auswirkung, dass der Wasserdampf wieder zu Mikrometer großen, flüssigen Tröpfchen kondensiert.⁷² Weil der Boden jedoch als erstes stark auskühlt und die darüber liegende Luft stärker abkühlt, kann der bodennahe Nebel oft sehr ausdauernd sein.⁷³

63 vgl. Tureček, 2021

64 vgl. Eugster, 2008

65 ebd.

66 ebd.

67 ebd.

68 vgl. Schiermeier, 2014

69 vgl. Morichi et al., 2018

70 vgl. WetterOnline, o. D.

71 ebd.

72 ebd.

73 ebd.

Die Eigenschaften von Nebel fallen je nach Entstehungsprozess immer anders aus, wobei deren Unterscheidung häufig sehr schwierig sein kann, da sie auch zeitgleich auftreten können.⁷⁴ Grundsätzlich lassen sich mehrere Nebeltypen definieren, die nach Entstehungsprozess oder der geografischen Bezeichnung für den Ort der Nebelentstehung benannt sind.⁷⁵

Im Rahmen dieser Arbeit werden jedoch nur die relevanten Nebelarten thematisiert.

Zum einen ist das der Strahlungs- oder auch Abkühlungsnebel. Dieser entsteht, wenn sich bei klarem Nachthimmel und windstiller Lage der Boden rasch auskühlt, sodass die Temperatur bis zum Taupunkt sinkt und der Wasserdampf in der Luft direkt am Boden kondensiert.⁷⁶

Zum anderen ist das der Advektionsnebel, der auftritt, wenn Windfeuchte und relativ warme Luft durch relativ stetigen Wind über eine kältere Oberfläche geweht werden.⁷⁷

Eine weitere Typologie stellt Verdunstungs- oder auch Niederschlagsnebel dar, der im Sommer beispielsweise nach kur-

zen Regenschauern auftritt, wenn Regentropfen in eine bodennahe und kalte Luftmasse fallen und es zu deren Verdunstung kommt.⁷⁸

Erwähnenswert ist zu dem noch Mischungsnebel, bei dem sich warme und kalte Luft vermischen, sodass es zu deren Sättigung oder sogar Übersättigung kommt und sich, sobald die Luft zur Feuchtesättigung abkühlt, Kondensat bildet.⁷⁹

74 vgl. Morichi et al., 2018

75 vgl. Eugster, 2008

76 vgl. WetterOnline, o. D.

77 ebd.

78 ebd.

79 ebd.

Wetterphänomen Tau

Als Tauscheinungen werden diejenigen abgesetzten Niederschläge definiert, die durch Kondensation, also den Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Zustand des Wasserdampfes in der Luft, am Erdboden oder bodennahen Gegenständen entstehen, wenn Boden oder Objekt eine Temperatur besitzen, die sich unterhalb der Taupunkttemperatur befindet.⁸⁰ Die so an Oberflächen entstandenen Wassertropfchen werden als Tau bezeichnet und unterscheiden sich von Nebel, da dieser nicht an der Außenseite von Objekten entsteht, sondern durch Kondensation in der Luft.⁸¹

Ähnlich wie Nebel lässt sich jedoch auch Tau in zwei verschiedene Arten unterteilen.

Die erste Kategorie ist Strahlungstau, der sich bildet, wenn sich Wasserdampf erst an der Erdoberfläche oder der Hülle von Objekten absetzt, nachdem deren Temperaturen auf Grund der nächtlichen Ausstrahlung unter den Taupunkt der Umgebungsluft gesunken ist.⁸²

Die zweite Art nennt sich Advektionstau und entsteht, wenn nach einem kühleren

Zeitraum feuchtwarme Luft durch den Wind herangetragen wird, deren Taupunkttemperatur über der Temperatur liegt, die die umströmten Gegenstände haben.⁸³

Strahlungstau präferiert vorwiegend horizontale Flächen, wohingegen Advektionstau die vertikale Ebene bevorzugt.⁸⁴

Advektionstau kann wesentlich intensiver ausfallen als Strahlungstau, weil die Übersättigung bedeutend stärker sein kann, was bei Gegenständen mit hohen Wärmekapazitäten nochmal erhöht werden kann, weil diese sich langsamer erwärmen.⁸⁵

80 vgl. Deutscher Wetterdienst, Tauscheinungen, o. D.

81 vgl. wetter.de, 2014

82 vgl. Deutscher Wetterdienst, Tauscheinungen, o. D.

83 ebd.

84 ebd.

85 ebd.

Biomimikry

Biomimikry ist ein anerkannter bioinspirierter Ansatz, der biologische Prinzipien bewusst nachahmt und umsetzt, um Lösungsansätze zu finden, die diesen Grundlagen entsprechen.⁸⁶

Im Folgenden wird der Begriff genauer erklärt und die Unterschiede zu anderen bioinspirierten Design-Arten erläutert. In anschließenden Teilen der Arbeit werden genauere Beispiele genannt.

„What I’ve found can be very useful about biomimicry is you can start off with a story about a biological organism that does something pretty fantastic, and then you can show how you can translate that solution into something that suits human needs.“⁸⁷

Michael Pawlyn

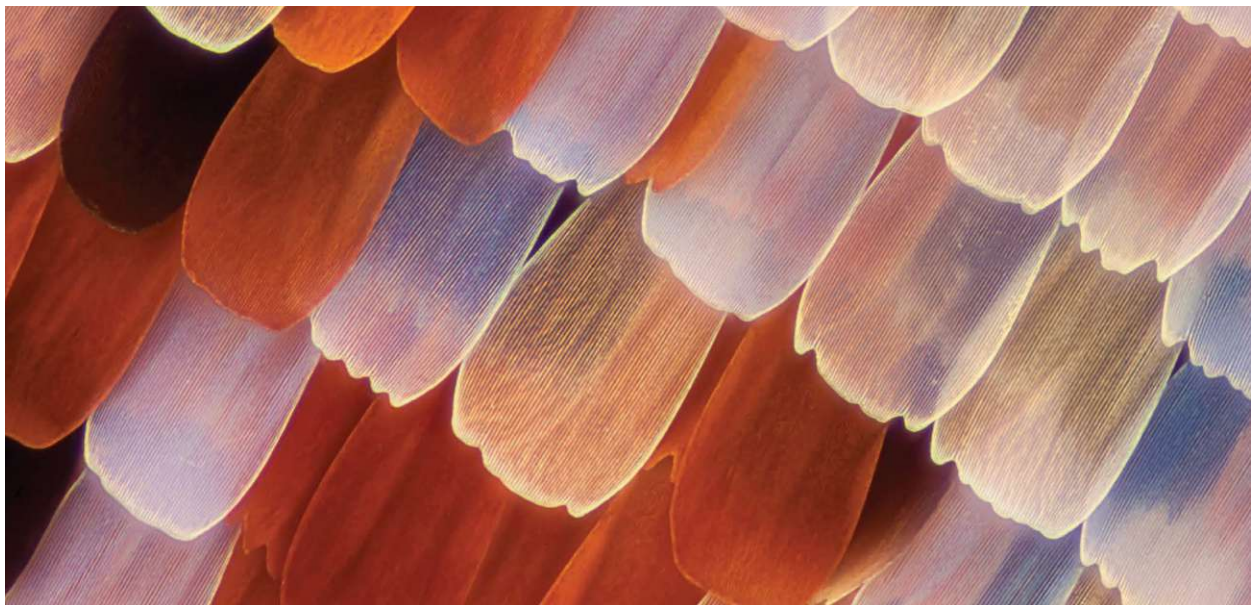


Abb. 6: Makroaufnahme von Schmetterlingsflügel I

⁸⁶ vgl. Bennett, 2015

⁸⁷ The Biomimicry Institute, Biomimicry, Climate Change & Architecture: an interview with Michael Pawlyn, 2017

Definition Biomimikry

Wie schon angedeutet ist Biomimikry eine Praxis, die von den gegenwärtig lebenden Spezies und deren Strategien lernt und diese mit dem Ziel nachahmt, Produkte, Prozesse und Vorgehensweisen, also neue Lebensweisen zu schaffen, die die aktuell größten Design-Herausforderungen nachhaltig und unter Berücksichtigung mit dem Leben auf der Erde lösen.⁸⁸

Da die Menschheit und die Erde abge-spannt sind und viele Menschen deshalb den Glauben an eine Lösung der Klima-krise und deren negativen Effekte auf die Ökosysteme der Welt verlieren, soll Bio-mimikry Hoffnung geben und die Natur als Mentor mit dem Wissen nutzen, dass die Antworten für diese Herausforderun-gen bereits existieren, für die Menschheit zugänglich sind und von den vielen heute noch lebenden Arten bestätigt werden.⁸⁹

Zirkuläres Denken, Nachhaltigkeit und re-generatives Design bedeuten, dass her-gestellte Objekte sich zu einer Kraft zu-sammenschließen, die Luft, Wasser und Boden wieder aufbauen, anstatt sie nach und nach zu zerstören.⁹⁰ Die Strategien von Lebewesen, die bereits seit Jahrtau-

senden existieren und Erfolge erzielen, müssen nicht neu erfunden werden.⁹¹ Viel-mehr muss ihrer Philosophie dahingehend analysiert und verstanden werden, wie sie und das Leben funktionieren, wie man sie anpassen und letzten Endes Designs schaffen kann, die fortlaufend unterstüt-zen und günstigere Lebensbedingungen schaffen.⁹² Biomimikry bedeutet die Natur für das wertzuschätzen, was von ihr gelernt werden kann, nicht für das, was extrahiert, geerntet oder domestiziert werden kann.⁹³ Sie bedeutet aber auch zu verstehen, dass die Menschheit auch ein Teil der Natur ist, ein Teil der miteinander verbundenen Sys-teme des Lebens.⁹⁴

⁸⁸ vgl. The Biomimicry Institute, *Biomimicry*, o. D.

⁸⁹ ebd.

⁹⁰ ebd.

⁹¹ ebd.

⁹² ebd.

⁹³ ebd.

⁹⁴ ebd.

Unterschied zu anderen bioinspirierten Design-Arten

Bioinspiriertes Design ist die Bezeichnung, die generell als Oberkategorie für Design- und Ingenieursansätze anerkannt wird, die die Biologie als Ressource für Lösungen nutzt.⁹⁵

Ein häufiger Irrtum innerhalb der Familie des bioinspirierten Designs ist die Verwechslung von Biomorphismus mit Biomimikry, da Biomorphismus sich auf Designs bezieht, die visuell Bestandteilen des Lebens ähneln, aber meist nicht wie diese funktionieren.⁹⁶ Es ist elementar zu erkennen, dass das naturbasierte Aussehen, das bei auf Biomimikry basierenden Entwürfen durchaus als Resultat der Inspiration durch die ursprünglichen Lebewesen vorkommen kann, allein kein verlässlicher Indikator für biomimetisches Design ist, sondern einzig und allein deren Funktion.⁹⁷

Ein ähnliches Phänomen findet man bei Biomimikry und Bioutilisation. Sie bezieht sich auf die Nutzung von biologischen Materialien oder lebenden Organismen im Design oder der Technologie, wie beispielsweise die Verwendung von Bäumen in Form von Holz für Möbel oder eine mit Pflanzen bestückte, lebende Wand, die

neben einem angenehmen Erscheinungsbild auch noch die Luft reinigen kann.⁹⁸ Da Bioutilisation also durchaus positive Eigenschaften besitzt, kommt es, ebenso wie schon bei Biomorphismus beschrieben, durchaus vor, dass sich biomimetische Designs diese Qualitäten zunutze machen.⁹⁹ Ein bedeutender Unterschied zwischen Biomimikry und anderen bioinspirierten Design-Arten ist die Hervorhebung des Lebens sowie die Nachahmung von regenerativen Lösungen, die lebende Organismen für spezielle funktionale Herausforderungen haben.¹⁰⁰ Die Bionik bedient sich ebenfalls daran, allerdings mit dem Unterschied, dass sie versucht Einzellösungen zu entwickeln und Biomimikry sich auf ein ganzes System bezieht.¹⁰¹

⁹⁵ vgl. The Biomimicry Institute, *Biomimicry*, o. D.

⁹⁶ ebd.

⁹⁷ ebd.

⁹⁸ ebd.

⁹⁹ ebd.

¹⁰⁰ ebd.

¹⁰¹ vgl. as, 2019



Biomimikry-Strategien der Wassergewinnung in der Natur

In niederschlagsarmen und ariden Gebieten mit hohem Aufkommen von Nebel sind Lebewesen, um zu überleben und sich zu vermehren, auf die Abscheidung von Feuchtigkeit aus der Luft angewiesen und haben auf Grund dessen funktionell-morphologische Strategien entwickelt.¹⁰² Zahlreiche Pflanzen und Tiere verfügen unabhängig voneinander über verschiedene solcher Fähigkeiten und Strukturen um Wasser aus Nebel zu gewinnen, sowie zu speichern, und dadurch ihren Bedarf decken zu können.¹⁰³ Das Verständnis dieser Schlüsselprinzipien und -strategien kann als Hilfe und Inspiration für die Entwicklung von ökonomischen Materialien und Techniken von großer Bedeutung sein.¹⁰⁴

Nachfolgend werden drei Strategien beschrieben, die für den weiteren Verlauf und das Verständnis der Arbeit von Bedeutung sind.

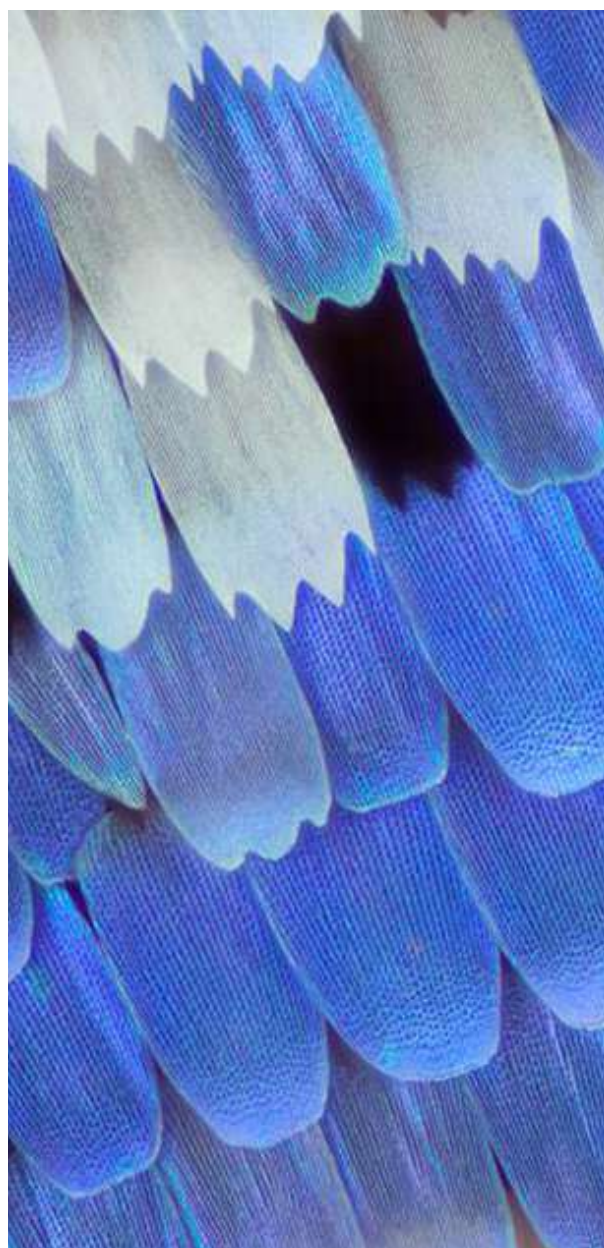


Abb. 7: Makroaufnahme von Schmetterlingsflügel II

¹⁰² vgl. Mittal und Bahners, 2017

¹⁰³ ebd.

¹⁰⁴ vgl. Wang et al., 2021

Strategie der Schwarzkäfer

Vor zwanzig Jahren entdeckten die Naturwissenschaftler Andrew Parker und Chris Lawrence die Überlebensfähigkeit von Schwarzkäfern.¹⁰⁵ Sie gehören zur Familie der Tenebrionidae, von der viele Arten in der Namib-Wüste an der Südküste Afrikas in einem der trockensten Habitate der Welt leben und in der Lage sind, das benötigte Wasser aus Tau und Nebel zu gewinnen.¹⁰⁶ Neben Parker und Lawrence wurden die Insekten auch noch von einigen anderen Forschern untersucht, die he-

rausfinden wollten, welche Bedeutung die Struktur sowie die Chemie und das Verhalten der Tiere beim Sammeln von Wasser aus der Luft haben.¹⁰⁷ Ergebnis dieser Arbeiten war, dass die Oberfläche der Käfer, die mit einer zufälligen Anordnung von speziellen Spitzen und Höckern sowie Mikrorillen mit $\approx 0,5$ mm im Durchmesser und in Abständen von 0,5 - 1,5 mm bedeckt ist wie Abb. 9 zeigt, die trotz des sehr geringen jährlichen Niederschlags von nur 12 mm das Sammeln von atmosphä-



Abb. 8: Schwarzkäfer in der typischen Haltung zum Auffangen von Nebeltröpfchen

¹⁰⁵ vgl. Wang et al., 2021

¹⁰⁶ vgl. The Biomimicry Institute, The Beetles That Drink Water
From Air - Darkling beetles, 2017

¹⁰⁷ ebd.

rischem Wasser möglich macht.¹⁰⁸ Dabei begünstigen diese Beschaffenheiten auf den gehärteten Vorderflügeln, dass Wassertropfen auf ihren weniger hydrophilen, sprich wasseranziehenden Noppen absorbieren, und sich so lange zusammenfügen, bis eine kritische Größe erreicht ist und die Tropfen die Haftung verlieren und schließlich entlang der hydrophoben, also wasserabweisenden Schale hinunter zum Mund des Käfers rollen.¹⁰⁹ Diese Kombination aus hydrophilen und hydrophoben Bereichen der vorkommenden Strukturen kann die Effizienz beim Auffangen von Nebel und Tau erhöhen.¹¹⁰

Durch eine weitere Beobachtung, dass bestimmte Käferarten sich in den nebligen Wind stellen und ihr Hinterteil in die Luft heben, was auch als Nebel-Sonnenbade-Verhalten bekannt ist, ließ sie die Annahme treffen, dass diese Verhaltensweise für eine gelungene Wasseraufnahme aus der Luft ebenso von Bedeutung ist wie die Beschaffenheit ihrer Körperoberfläche, siehe Abb. 8.¹¹¹

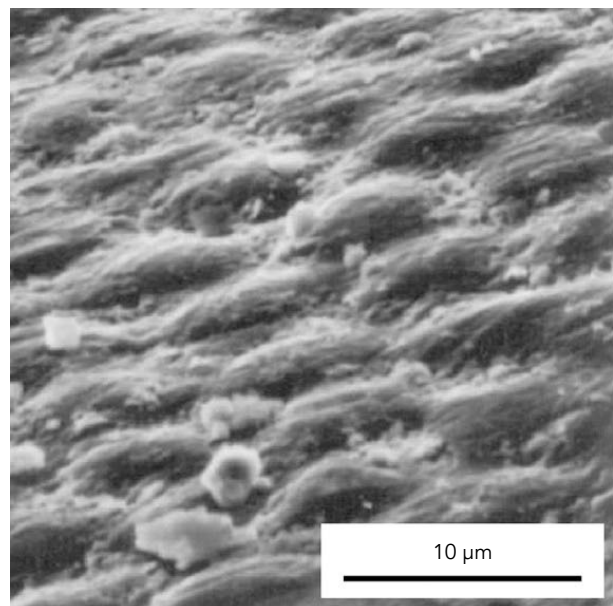


Abb. 9: REM-Aufnahme von charakteristischer mikrostruktureller Oberfläche

108 vgl. Jarimi et al., 2020

109 vgl. Mittal und Bahners, 2017

110 vgl. The Biomimicry Institute, The Beetles That Drink Water From Air - Darkling beetles, 2017

111 ebd.

Strategie der Spinnen

Spinnen verwenden ihre Netzte hauptsächlich um ihre Beute zu fassen, an nebligen Morgenden kann man jedoch auch kleine, gefangene Wassertröpfchen darin erkennen.¹¹²

Manche Spinnen, wie beispielsweise Federfußspinnen, lat. *Uloborus*, nutzen ihre Netzte hingegen bewusst zum Sammeln von Wasser. (Jarimi, Powell and Riffat 2020) Einige Forscher fanden heraus, dass Spinnengewebe auf Grund der im Netz enthaltenen periodischen Spindelknoten fähig sind mit einer beachtlichen Effizienz Wasser aus der feuchten Luft zu ernten.¹¹³ Diese Knoten bestehen aus zufälligen Nanofibrillen, die durch ihre raue Oberfläche einen verstärkten Effekt auf die Benetzbarkeit der Fasern haben und durch Verbindungen aus ausgerichteten Nanofibrillen voneinander getrennt sind, deren Oberfläche glatter ist, siehe Abb. 10.¹¹⁴ Die Strukturzusammensetzung hat auch Auswirkungen auf den scheinbaren Wasserkontaktwinkel, aus dem Englischen *apparent water contact angle*, der an den Spindelknoten kleiner ist als bei den Fasern, und die Oberflächenenergie, die hin-

gegen an den Knoten größer ist.¹¹⁵

Wegen den Unterschieden zwischen Spindelknoten und Fäden ist es möglich, dass es zu einer spontanen Bewegung der Wassertropfen in Richtung der Knoten kommt.¹¹⁶ Genauer gesagt wird diese Regung durch die Antriebskraft gefördert, die sich aus dem Druckgradienten und der strukturellen Anisotropie der Oberfläche ergibt.¹¹⁷

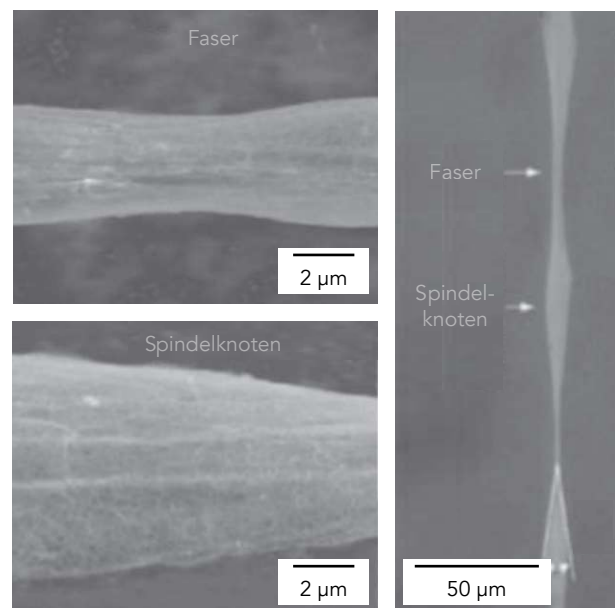


Abb. 10: REM-Aufnahme von Spindelfaser

¹¹² vgl. Wang et al., 2021

¹¹³ ebd.

¹¹⁴ ebd.

¹¹⁵ ebd.

¹¹⁶ ebd.

¹¹⁷ vgl. Jarimi et al., 2020

Strategie der Buschgräser

Pflanzen sind den Schwankungen ihres natürlichen Umfeldes direkt ausgesetzt und können nicht wie Tiere oder Menschen ohne weiteres ihre Position ändern und haben deshalb eine Vielzahl an Mechanismen entwickelt, um mit den anhaltenden Veränderungen, vor allem in Bezug auf die Wasserversorgung, zurechtzukommen.¹¹⁸ Die grünen Gewächse können Wasser aus dem Erdboden aufnehmen, durch Absorption können sie es aber auch mit Hilfe von unterschiedlichen Prinzipien über ihre Oberfläche gewinnen.¹¹⁹ Ein Buschgras aus der Namib-Düne, *Stipagrostis sabulicola*, ist auf Grund seiner extrem trockenen und regenfreien Umgebung sehr abhängig von der Entstehung von Nebel.¹²⁰ Es ist die einzige Pflanzenart, die es über einen langen Zeitraum des Niederschlagsmangels hinweg trotz ihrer flachen Wurzeln geschafft hat zu überleben.¹²¹ Grund hierfür kann nur die erfolgreiche Aufnahme von Wasser über seine Oberfläche aus der Luft oder aus Nebel sein.¹²²

Das Gras besitzt lange Blätter, die eine dreidimensionale Struktur ausbilden, die als eine Art Siebelement oder Kamm für

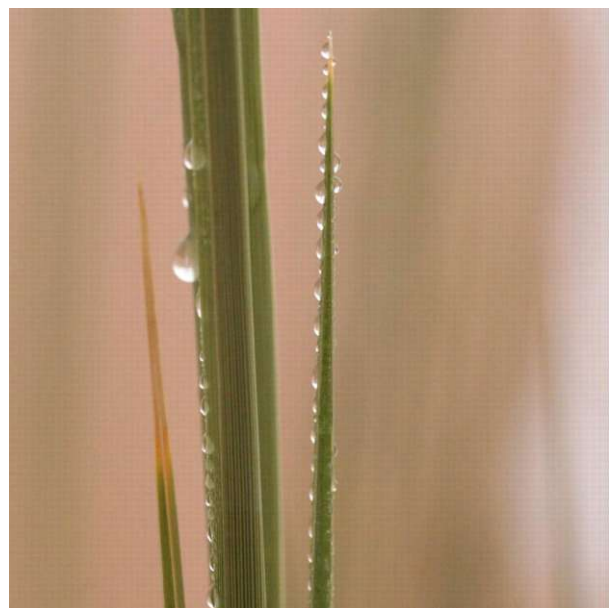


Abb. 11: Buschgras mit Wassertröpfchen

Wassertröpfchen funktioniert und so zu einer effektiven Wassergewinnung beiträgt.¹²³ Über die kegelartige Form der hydrophilen Blätter, die in ihrer Dreidimensionalität unter anderem auch Rillen ausbilden, können die Tröpfchen hinunter zu den Wurzeln gelangen und diese so mit ausreichend Wasser versorgen.¹²⁴

¹¹⁸ vgl. Mittal und Bahners, 2017

¹¹⁹ ebd.

¹²⁰ ebd.

¹²¹ ebd.

¹²² ebd.

¹²³ ebd.

¹²⁴ vgl. Jarimi et al., 2020

Technologische Gewinnung von atmosphärischem Wasser

Grundsätzlich lassen sich Systeme zur Wassergewinnung in Geräte einteilen, die externe Energie benötigen, mit Sonnenenergie betrieben werden oder passiv, vollkommen ohne zusätzliche Energie auskommen.¹²⁵ Eine zusätzliche Unterscheidung ergibt sich durch die Beschaffenheit des atmosphärischen Wassers, das geerntet werden soll.

Eine Möglichkeit ist die Sammlung von Wasser aus Nebel, also aus sichtbaren Wassertröpfchen oder Eiskristallen, die

sich, durch zusätzliche Feuchtigkeit der Luft oder fallende Umgebungstemperaturen, in der Luft an oder in Reichweite der Erdoberfläche befinden.¹²⁶

Die zweite Alternative ist die Gewinnung von Wasserdampf, der im Gegensatz zu Nebel nicht sichtbar ist und durch die Verdampfung von flüssigem Wasser oder der Sublimation von Eis zustande kommt.¹²⁷ Sobald der wässrige Dampf auf einer Fläche kondensiert, deren Temperatur sich unter der Taupunkttemperatur des atmo-

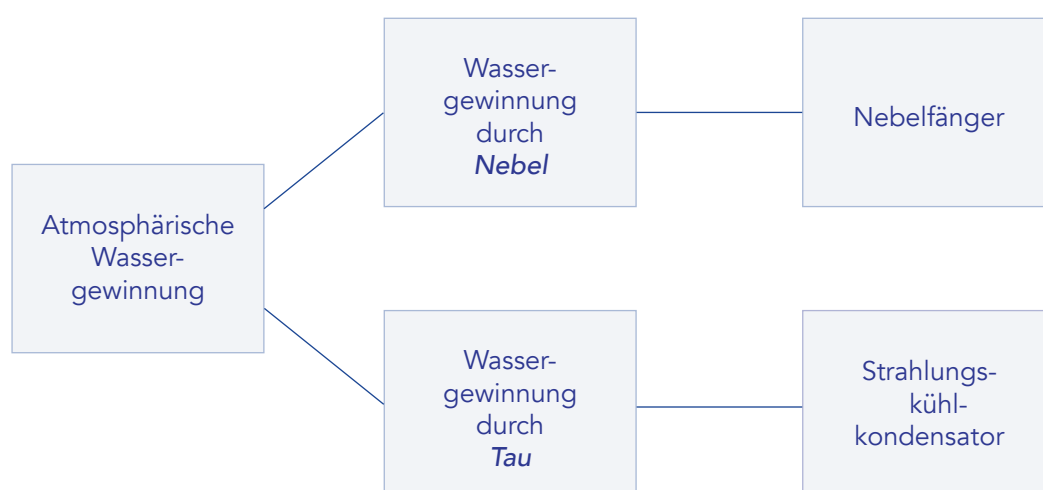


Abb. 12: Techniken zur atmosphärischen Wassergewinnung

125 vgl. Wang et al., 2021

126 vgl. Jarimi et al., 2020
 127 ebd.

sphärischen Wasserdampfes befindet, entsteht sogenanntes Tauwasser.¹²⁸

Um sich in Bezug auf die Neuerungen und Entwicklungen der Technologien zur Ernte von atmosphärischem Wasser aus Nebel und Tau besser austauschen und folglich auch das Verfahren bezüglich Potential und Grenzen zukünftig besser verstehen zu können, gibt es seit 1998 in einem Rhythmus von drei Jahren eine internationale Konferenz.¹²⁹

Im Folgenden werden die passiven Möglichkeiten zur Gewinnung von atmosphärischem Wasser genauer erläutert, wobei der Schwerpunkt in der Sammlung von Nebel zu finden ist.

¹²⁸ ebd.

¹²⁹ vgl. Klemm et al., 2012

Ernte von atmosphärischem Nebel

Aride und halbtrockene Gebiete in der Nähe der Ozeane sind dafür bekannt, dass es dort, wo sich die Wolken über dem Meer formen und von vorhandenen Windböen in Richtung Festland bewegt werden, zu Nebelbildung kommt.¹³⁰ Der Nebel entsteht aus den Wolken, wenn diese auf Oberflächen des Hochlands treffen, die sich nicht unweit von diesen Bereichen befinden.¹³¹

Die Ernte von atmosphärischem Nebel zur Gewinnung von sauberem Wasser hat in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung gewonnen, da es sich um ein unkompliziertes und nachhaltiges Verfahren handelt, das das Potential hat in einigen Weltgebieten wertvolles Wasser zu gewinnen.¹³²

Das erste Netz zur Sammlung von Nebel wurde bereits vor vielen Jahren gespannt. Bis heute wurde die Anwendung dieser Technik so oft vervielfacht, dass man auf fünf Kontinenten zahlreiche Projekte finden kann, die sich in ihrer Erfolgsquote jedoch stark unterscheiden.¹³³ Grund dafür ist vor allem die Verwendung von neuartigen Materialien für die Netze in manchen

Gebieten, die beispielsweise durch durchlässige Fasern oder die Dreidimensionalität des Netzes die Effektivität im Vergleich zu herkömmlichen Textilien bis zu fünffach steigern können.¹³⁴ Weil so Trinkwasser generiert werden kann, nutzen vor allem Menschen aus ärmeren Regionen Nebelkollektoren.¹³⁵ Jedoch gibt es auch einige gelungene Projekte in wohlhabenderen Arealen.¹³⁶

Im Folgenden wird das eben beschriebene generelle Prinzip zum Ernten des atmosphärischen Wassers ausführlich erläutert. Zudem werden die möglichen Designs und Netzarten genauer beschrieben und anschließend auf deren Effizienz, Oberflächenbenetzbarkeit und Optimierung analysiert.

¹³⁰ vgl. Jarimi et al., 2020

¹³¹ ebd.

¹³² vgl. Klemm et al., 2012

¹³³ ebd.

¹³⁴ vgl. Schiermeier, 2014

¹³⁵ vgl. Klemm et al., 2012

¹³⁶ ebd.

Generelles Prinzip

Das Prinzip zur Sammlung von Nebel hat eine lange Tradition und einen recht simplen Aufbau. Im Grunde basiert die Methode auf der Verwendung eines feinmaschigen Netzes, das über einen Rahmen gespannt wird.¹³⁷ So können Aerosole aus der Atmosphäre mit der Hilfe von Wind auf das Textil, das je nach Art eine mehr oder weniger hydrophile Oberfläche besitzt, getrieben werden.¹³⁸ Darauf können sie sich ablagern und bei kontinuierlicher Vernebelung durch die Ansammlung von

vielen kleinen Tröpfchen große Tropfen bilden, die ab einer gewissen Größe schwer genug sind, um die Adhäsion zu überwinden und durch die Schwerkraft am Textil hinunterrollen, siehe Abb. 13.¹³⁹ Am unteren Ende des Textils können die Tropfen in einer Vorrichtung, wie etwa einem Tank gesammelt und gelagert werden.¹⁴⁰

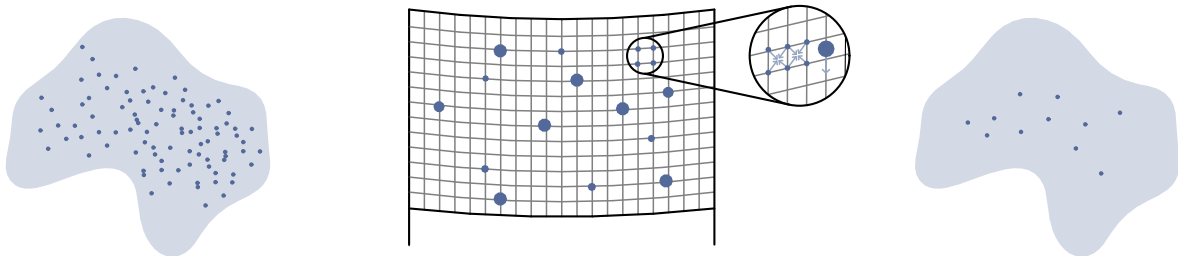


Abb. 13: Schema zur Gewinnung von atmosphärischem Nebel

137 vgl. Schiermeier, 2014

138 vgl. Mittal und Bahnert, 2017

139 ebd.

140 vgl. Schiermeier, 2014

Netzarten und deren Vergleich

Es gibt eine Vielzahl an Netzarten, die sich entweder in Gewebetyp oder Material unterscheiden. Da die Untersuchung des Gesamtumfangs den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, stehen im Folgenden nur drei Arten im Fokus und werden genauer beleuchtet.

Grundsätzlich lässt sich jedoch sagen, dass jede Netzvariante eine Balance in Hinblick auf deren Faser anstrebt.¹⁴¹ Diese soll trotz einer bestimmten Breite, keine zu große Barriere für den Wind darstellen und gleichzeitig eine hohe Effizienz bei der Sammlung von atmosphärischen Wasserteilchen erzielen.¹⁴² Und außerdem soll sie die Fähigkeit besitzen damit auch einen gewissen Teil der Oberfläche abdecken zu können.¹⁴³ Zudem sollte das Geflecht bei starkem Wind, Sonne und Nässe beständig und im Idealfall noch dazu sehr preiswert sein.¹⁴⁴

Das erste der drei Geflechte besteht aus einem Polypropylengewebe in Raschel-Bindung, siehe Abb. 14, und ist auf Grund seiner unproblematischen und kosten günstigen Beschaffung, da es unter an-

derem für die Beschattung von landwirtschaftlichen Kulturen verwendet wird, ein sehr begehrtes Material für Kollektoren.¹⁴⁵ Das Gewebe ist lebensmittelecht und für gewöhnlich schwarz, UV-beständig und besitzt einen Schattenkoeffizienten von 35 %.¹⁴⁶ Je nach Ausdehnungsgrad misst die Faserbreite 0,5 – 1,5 mm, durchschnittlich jedoch 1,0 mm, was Einfluss auf die tatsächlich bedeckte Fläche des Netzes hat, sodass diese auch 40 % betragen kann.¹⁴⁷ Die gewebten Maschen ergeben ein drei-



Abb. 14: Raschelnetz

¹⁴¹ vgl. Schemenauer und Cereceda, 1994

¹⁴² ebd.

¹⁴³ ebd.

¹⁴⁴ ebd.

¹⁴⁵ vgl. Jarimi et al., 2020

¹⁴⁶ ebd.

¹⁴⁷ ebd.

eckiges Muster, das einen Abstand von 1,3 cm zwischen den horizontalen Fäden aufweist. Durch diese Struktur läuft die Wasseransammlung und der -transport nach einem bestimmten Schema ab. Die kleinen Wassertröpfchen fließen entlang der Fasern zur Spitze des Dreiecks, von wo aus die größeren Tropfen durch die Schwerkraft bedingt nach unten fallen.

Das zweite Netz wurde vom Massachusetts Institute of Technology entwickelt und ist als MIT-14 bekannt. Das Besondere an diesem Geflecht ist die innovative hydrophobe Beschichtung aus einer chemischen Verbindung namens POSS-PEMA, was für Polyedrische oligomere Silsesquioxane und Phenylethylmalonamid steht.¹⁴⁸ Dieser Überzeug wurde entwickelt, um die Nebelsammelkapazität nachhaltig zu verbessern. Aufgetragen wurde das Substrat auf ein herkömmliches Edstahlgewebe von der Firma McMaster-Carr, das einen Drahtdurchmesser von 0,5 mm und mit einem Lochabstand von etwa 1,3 mm einen Schattenkoeffizienten von 49 % erzeugt.¹⁴⁹ Durch die vorgegebene Gitterstruktur läuft

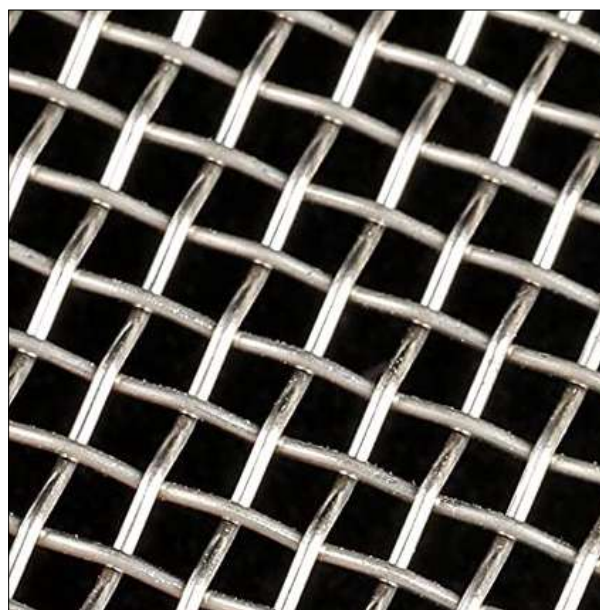


Abb. 15: MIT-14-Netz

die Wasseransammlung und der -transport ebenfalls nach einem vorgegebenen Prinzip ab. Anders als bei dem dreieckigen Aufbau des Raschelnetztes sammeln sich die Tröpfchen nicht in einem Eckpunkt, sondern verschmelzen im Zentrum der Masche und rollen anschließend am Netz hinunter.

Die dritte Netzart ist ein 3D-Netz, welches unter dem Namen FogHa-TiN bekannt ist und wurde vom Institut für Textil- und Ver-

¹⁴⁸ vgl. Fernandez et al., 2018

¹⁴⁹ ebd.

fahrenstechnik in Denkendorf entwickelt. Eine dritte Dimension und somit eine Erweiterung um eine Oberfläche erhält das Geflecht durch eine bestimmte Art des Webens, bei der ein sogenanntes Abstandsgewirke entsteht, das die Effizienz um ein vierfaches erhöhen kann.¹⁵⁰

Dieses Gewirke besitzt drei Schichten aus zwei unterschiedlich dicken Monofilamenten, welche ein 1,3 cm dickes Gewebe bilden.¹⁵¹ Die Außenflächen sind aus einem eher dünneren Garn in Wabenform ausgebildet, die überkreuzten Abstandsfäden, auch Polgarn genannt, bestehen allerdings aus dickerem Filament.¹⁵² Auch wenn der Nebel zu der wabenförmigen Außenfläche getrieben wird, werden die kleinen Wassertröpfchen bevorzugt auf dem Polgarn gesammelt, welche so die Oberfläche des Textils vergrößern und damit die Aufnahme von weiteren Wasserpunkten begünstigt.¹⁵³ Wenn sich die kleinen Wassertröpfchen zu einem Tropfen mit bestimmter Größe verschmelzen, verlieren sie ihre Haftung und werden durch die Schwerkraft von Abstandsfilament zu Abstandsfilament übertragen, was so aus-

sieht, als würden sie von einem Faden zum nächsten springen.¹⁵⁴ Die erwähnte Überkreuzung einiger Fäden, die die Oberfläche zusätzlich ausweiten, führen zu einer Querstruktur von der die Tropfen in Richtung der Außenflächen in Form von Waben gleiten, anstatt wie bei der diagonalen Anordnung wie beschrieben von Polgarn zu Polgarn fallen.¹⁵⁵

Das Gewirke lässt sich prinzipiell in zwei Ausrichtungen ausgehend von der Wabenstruktur verwenden, wobei allerdings



Abb. 16: FogHa-TiN-Netz

¹⁵⁰ vgl. Mittal und Banners, 2017

¹⁵¹ ebd.

¹⁵² ebd.

¹⁵³ ebd.

¹⁵⁴ ebd.

¹⁵⁵ ebd.

in mehreren Versuchsreihen untersucht und ermittelt wurde, dass die Variante 5 % effektiver ist, bei der die längere Seite sich in der Vertikalen befindet.¹⁵⁶

Trotz der Dicke des Gewebes ist es hochgradig luftdurchlässig und somit resistent gegen starken Wind, sodass es sogar bei Windgeschwindigkeiten von 120 km/h beständig bleibt.¹⁵⁷ Außerdem hat es eine hohe UV-Beständigkeit für extreme Sonneneinstrahlung, was eine lange Nutzungsdauer garantiert.¹⁵⁸

Durch seine hohe Anpassungsfähigkeit in Bezug auf seine Maschenstruktur findet das 3D-Geflecht, ebenso wie das Raschelnetz auch, noch in anderen Bereichen Verwendung, wie beispielsweise für technische Filtrationsanwendungen.¹⁵⁹

Vergleicht man nun die einzelnen Netze in ihrer Anwendung, lassen sich besondere Stärken und Schwächen der Maschenwerke erkennen.

Die Gegenüberstellung von dem Raschelnetz mit dem MIT-14-Gewebe bietet zum einen die Erkenntnis, dass beide Maschentypen bei niedrigen Windgeschwin-

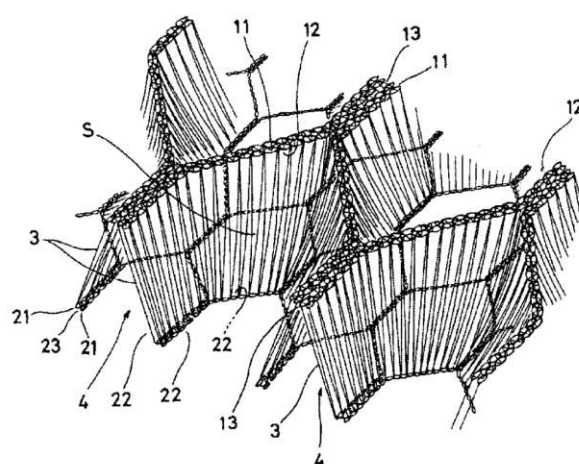


Abb. 17: Aufbau FogHa-Tin-Netz

digkeiten maximalen Erfolge erbringen.¹⁶⁰ Überraschend ist allerdings, dass das MIT-14-Netz bei stärkeren Windeinwirkungen bessere Resultate erzielt, da es dünnere Fasern und einen geringeren Schattenkoeffizienten besitzt.¹⁶¹ Es ist davon auszugehen, dass die Ursache dafür die Steifigkeit des Netzes ist, die bei höheren Windgeschwindigkeiten Verstopfungen der Maschen vorbeugen und als Folge dessen den Abfluss fördern kann.¹⁶² Die Beschichtung scheint für die Ergebnisse kein we-

¹⁵⁶ vgl. Fernandez et al., 2018

¹⁵⁷ vgl. Mittal und Banners, 2017

¹⁵⁸ ebd.

¹⁵⁹ ebd.

¹⁶⁰ vgl. Fernandez et al., 2018

¹⁶¹ ebd.

¹⁶² ebd.

sentlicher Faktor zu sein, da in mehreren Feldstudien unbeschichtete Netze ähnliche Erträge erbrachten.¹⁶³

Stellt man nun den Vergleich von Raschelnetz mit dem dreidimensionalen Abstandsgewirke FogHa-TiN an, sind ähnliche Resultate bei niedrigen Windgeschwindigkeiten zu registrieren.¹⁶⁴ Aber auch hier ist eine Auffälligkeit festzustellen. Das 3D-Netz scheint bei großen Windeinwirkungen gute Erträge zu erzielen, wohingegen es bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s weniger effektiv als sein Gegenspieler ist.¹⁶⁵ Dies scheint überraschend, da auch hier vermutet wurde, dass die vielen dünnen Monofilamente mehr Wasser sammeln können als die breiteren Bänder in Raschel-Bindung.¹⁶⁶ Das Ergebnis lässt sich aber durch die Vermutung stützen, dass die Dicke der Maschen in Kombination mit der Dicke des Netzes bei schwächerer Windeinwirkung eine Blockade ausbildet.¹⁶⁷ Wird dieses Hindernis bei steigender Windeinwirkung überwunden, stellt die Stärke des Netzes sogar ein Potential dar Wassertröpfchen, die eigentlich

durch den starken Wind wieder mitgerissen werden würden, aufzufangen und so die Effizienz des Ertrages zu verbessern.¹⁶⁸

163 ebd.
 164 ebd.
 165 ebd.
 166 ebd.
 167 ebd.

168 ebd.

174 ebd.

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{W}_{coll}''}{v_0 LWC}$$

η_{coll}	Kollektoreffizienz
$\dot{W}_{coll}''$	Wasserdurchflussmenge Rinne
v_0	ungestörte Windgeschwindigkeit
LWC	Flüssigwassergehalt

Gleichung [3]

$$\eta_{tot} = \frac{J}{LWC u_{\infty}}$$

η_{tot}	totale Kollektoreffizienz
J	Wasserfluss Rinne
LWC	Flüssigwassergehalt
u_{∞}	ungestörte Windgeschwindigkeit

Gleichung [4]

weitere Möglichkeit die Kollektoreffizienz unter Berücksichtigung von drei anderen Größen zu formulieren.¹⁷⁵

Die Auffangeffizienz η_{capt} , die den Anteil der Tröpfchen in der Kollisionsbahn definiert, die tatsächlich vom Netz gefangen werden, ist eine davon, ebenso wie der Wirkungsgrad der Abflusseffizienz η_{dr} , der den Anteil der Wassermenge darstellt, die vom Nebelkollektor gesammelt werden konnte und auch wirklich im Auffangsystem der Struktur ankommt.¹⁷⁶ Die dritte Größe ist die aerodynamische Auffangeffizienz η_{AC} , die den Anteil der ungestörten Tröpfchen, die theoretisch mit dem Netz kollidieren würden, beschreibt.¹⁷⁷ Unter Berücksichtigung dieser Faktoren lässt sich die Kollektoreffizienz η_{coll} auch durch die Gleichung [5] ausdrücken.

In der Literatur lassen sich auch für diese Formel andere Varianten finden. Gleichung [6] stellt eine Abwandlung zur Berechnung der Kollektoreffizienz, hier η_{tot} , dar, bei der die drei Komponenten noch einmal genauer definiert und aufgeteilt sind.

So lässt sich beispielsweise die aerodynamische Kollektoreffizienz η_{AC} , hier η_{ACE} genannt, durch das Verhältnis der Fläche des einströmenden Nebels A_∞ unter Einbezug des Feststoffanteils s und der Frontalfläche A des Kollektors beschreiben.¹⁷⁸ Die Auffangeffizienz η_{capt} lässt sich durch die Trägheitseinwirkung für ein Tröpfchen mit einem bestimmten Radius r als $d_\infty(r)/d$ und dem Maßanteil an flüssigem Wasser für Tröpfchen mit selbigem Radius r in einem bestimmten Intervall als $\int m(r) dr$ definieren.¹⁷⁹ Lediglich für η_{dr} , oder auch η_{drain} genannt, ist keine genauere Formel zu finden.

¹⁷⁵ vgl. Jarimi et al., 2020

¹⁷⁶ ebd.

¹⁷⁷ ebd.

¹⁷⁸ vgl. Azeem et al., 2020

¹⁷⁹ ebd.

$$\eta_{coll} = \eta_{capt} \eta_{dr} \eta_{AC}$$

η_{coll}	Kollektoreffizienz
η_{capt}	Auffangeffizienz <i>Anteil Tröpfchen in Kollisionsbahn, die von Netz gefangen werden</i>
η_{dr}	Abflusseffizienz <i>Anteil Tröpfchen, die von Netz gefangen werden und in Rinne landen</i>
η_{AC}	aerodynamische Kollektoreffizienz <i>Anteil Tröpfchen in ungestörtem Nebel, die mit Netz kollidieren würden</i>

Gleichung [5]

$$\eta_{tot} = \eta_{ACE} \eta_{capt} \eta_{drain}$$

$$= \left[\frac{A_{\infty} s}{A} \right] \left[\int_0^{\infty} \frac{d_{\infty}(r)}{d} m(r) dr \right] \eta_{drain}$$

η_{tot}	totale Kollektoreffizienz
η_{ACE}	aerodynamische Kollektoreffizienz
η_{capt}	Auffangeffizienz
η_{drain}	Abflusseffizienz
A_{∞}	Fläche an Nebel, durch A gefiltert
s	Feststoffanteil der Schicht
A	Frontalfläche
$\frac{d_{\infty}(r)}{d}$	Trägheitseinwirkung von Tropfen mit Radius r
$m(r) dr$	Flüssigwasseranteil von Tropfen mit Radius r

Gleichung [6]

Design der Nebelkollektoren

Der meistverbreitete Entwurf für Kollektoren, ein zylindrischer, 1,00 m hoher Fadenkollektor aus Teflon, wurde 1980 von R. E. Falconer und P. D. Folconer entworfen und musste vor jeder Nutzung aufwändig gereinigt werden.¹⁸⁰

Darauf aufbauend entwickelte J. Goodman im Jahre 1985 einen flachen Nebelsammler in der Größe von 1,00 m², der mit einem Nylonnetz bespannt ist, um die Sammeleffizienz im Vergleich zu den zylindrischen Kollektoren ihrer Vorgänger zu

analysieren.¹⁸¹ Ihre Erhebungen ergaben, dass flache Kollektoren dann effizienter sind, wenn es eine vorherrschende Richtung des Windes gibt, die einigermaßen konstant und ebenso dominant ist.¹⁸²

Bei den flachen Designs, die sich auf die Idee von J. Goodman stützen, wird das Netz in einen Rahmen gespannt, der meist von zwei Pfeilern getragen wird, und mit Seilen daran befestigt und aufgehängt.¹⁸³ Besonders wichtig ist bei dieser Variante, dass die Hauptwindrichtung durch vor-

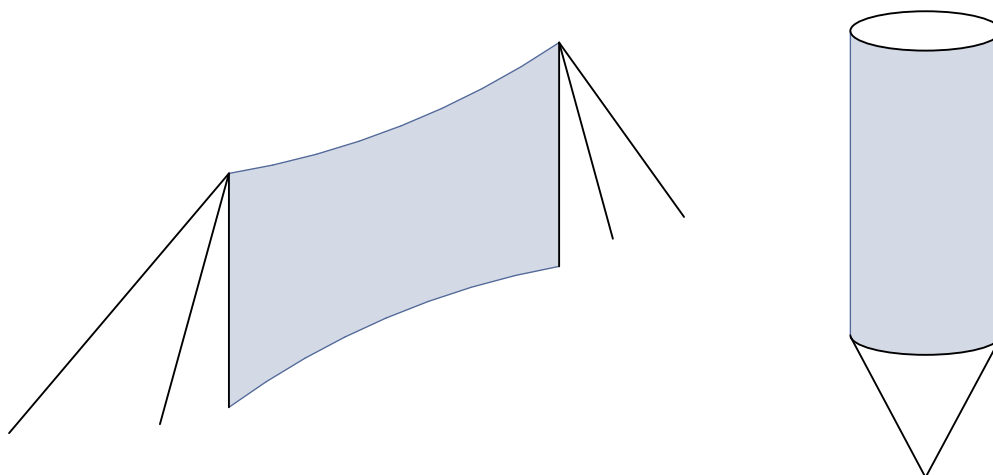


Abb. 18: Schema für zylinderförmige und planare Nebelkollektoren

180 vgl. Schemenauer und Cereceda, 1994

181 vgl. Fernandez et al., 2018

182 ebd.

183 vgl. Jarimi et al., 2020

herige Studien ermittelt wird, damit der Rahmen mit dem Netz senkrecht dazu aufgestellt werden kann.¹⁸⁴ Nur durch diese Art der Positionierung erhält das Netz den größtmöglichen Luftwiderstand und erzielt einen maximalen Wirkungsgrad.¹⁸⁵

Ist es aus bestimmten Gründen nicht möglich die notwendigen Untersuchungen durchzuführen oder gibt es mehr als nur eine Hauptwindrichtung kann aber getrost auf das traditionelle, zylindrische Design zurückgegriffen werden.

Die gängigsten Designs sind also die in flacher und rechteckiger, sowie zylindrischer Form. Zu nennen sind aber auch noch Nebelfänger in Gestalt von »Eiffel« oder »Harfe« in vertikaler und horizontaler Ausrichtung.¹⁸⁶

Auf diese Arten wird im Folgenden jedoch nicht weiter eingegangen.

¹⁸⁴ vgl. Schiermeier, 2014

¹⁸⁵ vgl. Regalado und Ritter, 2016

¹⁸⁶ vgl. Jarimi et al., 2020

Studien zur Oberflächenbenetzbarkeit von Netzen

In Hinblick auf die verschiedenen Formen, die ein Nebelkollektor einnehmen kann, wurde die Fähigkeit der Oberflächenbenetzbarkeit der Netze untersucht. Dafür wurden Netze in verschiedenen Neigungswinkeln angebracht und das Verhalten in Bezug auf das Laufverhalten der Tröpfchen auf den Geflechten und deren Verstopfung der Maschen analysiert.¹⁸⁷

Bei dem kleinsten Winkel von 15° konnte man beobachten, dass die bewegenden Tröpfchen einen sehr kleinen Radius und folglich auch ein kleines Volumen haben, siehe Abb. 19.¹⁸⁸ Die Neigung ist so gering, dass die Tröpfchen auf der Oberfläche sofort anfangen nach unten zu rollen.¹⁸⁹

Bei einer Schräglage von 25° bis 35° fällt auf, dass sich die Tröpfchen erst dann in Bewegung setzen, wenn ihr Volumen etwa das doppelte beträgt als bei einer Neigung von 15°.¹⁹⁰ Die Häufigkeit des Abtropfens ist bei diesen Winkeln unregelmäßig, nimmt jedoch mit zunehmender Schräge zu und hat dadurch Auswirkungen auf die Entwässerungseffizienz.¹⁹¹

Das Tröpfchenvolumen verdoppelt sich bei Neigungen zwischen 45° bis 55°er-

neut, siehe Abb. 21, hat aber auch zur Folge, dass sie sich langsam auf dem Netz bewegen oder im schlimmsten Falle die Maschen verstopfen und so keine Regung mehr stattfindet.¹⁹² Wird die Neigung der Geflechte weiter erhöht lässt sich feststellen, dass die Tropfen zuerst ebenfalls die Maschen verstopfen und anschließend auf Grund ihres Volumens direkt vom Netz fallen, sodass die Bewegung entlang des Netzes ausbleibt, wie in Abb. 22 zu sehen ist.¹⁹³ Bei noch stärker zunehmender Neigung ist keine Änderung im Laufverhalten oder des Verstopfungspotentiales festzustellen.

Es lässt sich also festhalten, dass die Schräglage des Netzes nur bis zu einem gewissen Winkel die Effizienz des Laufverhaltens und somit auch den Gesamtertrag erhöhen kann. Ist die Neigung größer als 55° wirkt sich das negativ auf die Auffangmenge aus, da die Tröpfchen schon bevor sie im Lagerbehälter ankommen vom Netz fallen.

¹⁸⁷ vgl. Ghosh et al., 2020

¹⁸⁸ ebd.

¹⁸⁹ ebd.

¹⁹⁰ ebd.

¹⁹¹ ebd.

¹⁹² ebd.

¹⁹³ ebd.

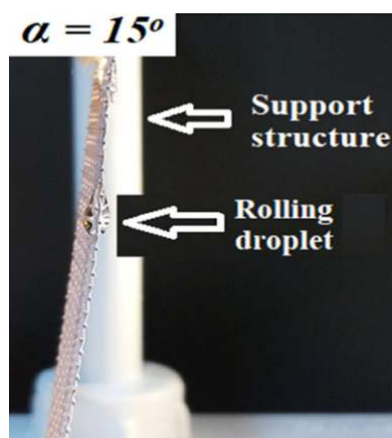


Abb. 19: Netz mit Neigung von 15°

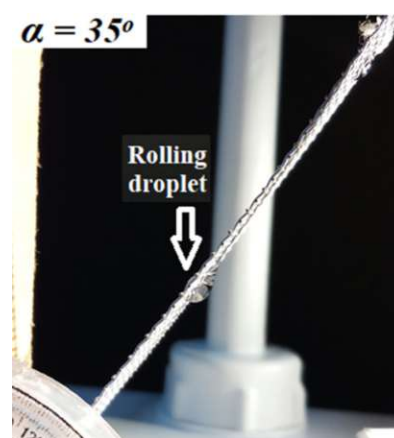


Abb. 20: Netz mit Neigung von 35°

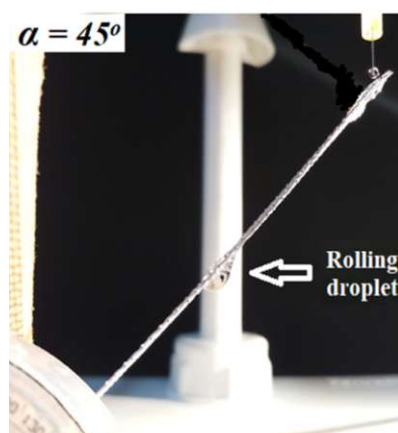


Abb. 21: Netz mit Neigung von 45°

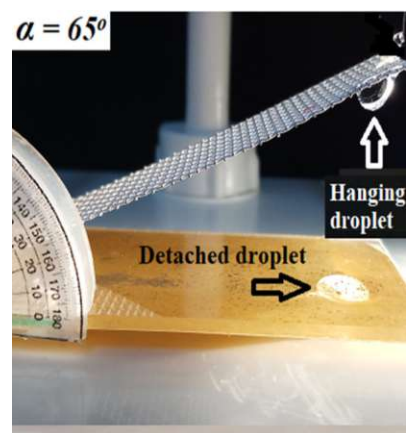


Abb. 22: Netz mit Neigung von 65°

von Nebelkollektoren ist die Veränderung der im Allgemeinen glatten Oberflächenbeschaffenheit von Geweben durch Ein- und/oder Auskerbungen auf mikrostruktureller Ebene.¹⁹⁸ Für diese Ausformung gibt es eine Reihe von Optionen. In einigen Studien wurde die Nachbildung der Oberflächenstruktur von Pflanzen wie etwa dem Mammutblatt, auch als *Gunnera manicata* bekannt, oder einer bestimmten Bambusart, genauer *Dendrocalamus giganteus*, untersucht.¹⁹⁹

Die Beschaffenheit der Blattaußenseite von Gunnera-Gewächse ist papilliert, konvex und mit nach innen führenden Kanälen versehen, die wiederum mit feinen, mikrometergroßen Härchen bestückt sind, siehe Abb. 23.²⁰⁰ Der Riesenbambus besitzt mikrofeine Rillen an seiner Oberfläche, die beispielsweise mit Hilfe von Schleifpapier erzeugt werden können.²⁰¹

Die Untersuchungen von Materialien mit bioinspirierten Beschaffenheiten haben gezeigt, dass sie die Effizienz um das Zweifache optimieren können.²⁰² Erwähnenswert ist aber, dass die rillenförmige Mikrostruktur jedoch die höchste Wirksamkeit

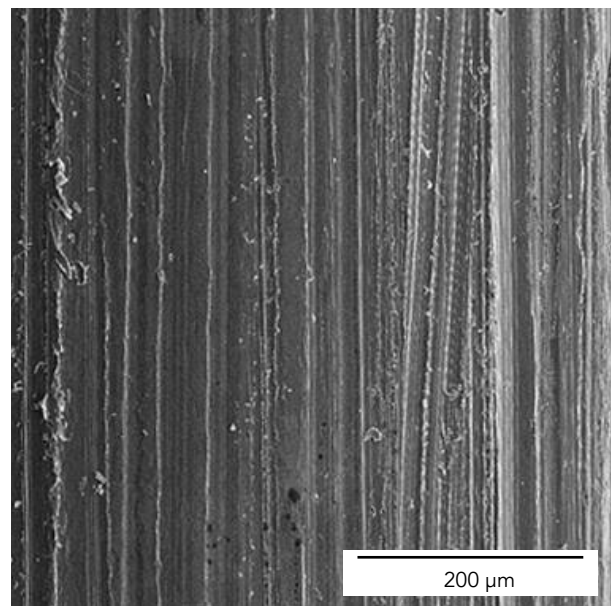


Abb. 24: REM-Aufnahme von gerillter Mikrostruktur erzielt, was auf die Fähigkeit der Verbesserung des Auffangens einer größeren Anzahl von Tröpfchen und einer effektiveren Drainage zurückzuführen ist.²⁰³ Die gerillte Oberfläche fängt viele Wassertröpfchen an den scharfen Ecken ein, die dann entlang der Rillen zum Auffangbehälter geleitet werden.²⁰⁴ Die Furchen ermöglichen zu dem eine höhere Abtropfgeschwindigkeit als glatte Hüllen, was die Fasern schneller wieder für nachkommende Wassertröpfchen verfügbar macht und auf Dauer einen höheren Wasserertrag zur Folge hat.²⁰⁵

198 vgl. Azad, 2016
199 vgl. Jarimi et al., 2020
200 vgl. Azad, 2016
201 ebd.
202 ebd.

203 ebd.
204 ebd.
205 ebd.

Ernte von atmosphärischem Tau

Wasserdampf ist wie schon erwähnt überall in der Atmosphäre zu finden, sodass genießbares Süßwasser eigentlich an fast jedem Ort auf der Welt durch Kondensation gewonnen werden kann.²⁰⁶ Dieses Tauwasser entsteht, wenn sich Wasserdampf an einer Oberfläche verflüchtigt, deren Temperatur unterhalb der Taupunkttemperatur liegt.²⁰⁷ Aus thermodynamischer Sicht ist dieser Prozess deutlich komplizierter als die Ernte von Nebel, da bei der Überführung von gasförmig zu flüssig eine erhebliche Menge an Wärme freigesetzt wird.²⁰⁸

Wie einleitend schon angemerkt können die Technologien zur Gewinnung von atmosphärischem Wasser auf drei Arten betrieben werden.

Ähnlich wie bei der Gewinnung von Nebel gibt es auch die Möglichkeit Tau passiv zu generieren, und zwar durch den Einsatz von Strahlungskühlkondensatoren.²⁰⁹ Für eine möglichst erfolgreiche Wasserausbeute wird hierfür allerdings eine hohe Luftfeuchtigkeit gebraucht.²¹⁰ Wenn diese jedoch nicht gegeben sein sollte, besteht die Möglichkeit Technologien, wie etwa

solar generierte Trocknungsmittel oder durch aktive Kühlkondensatoren verwenden zu können.²¹¹

Da diese Technologien hauptsächlich unter der Verwendung von durchgängigen und vollflächigen Struktur eingesetzt werden, wird im weiteren Verlauf nicht weiter Bezug dazu genommen.



Abb. 25: Strahlungskühlkondensator ETH Zürich

²⁰⁶ vgl. Jarimi et al., 2020

²⁰⁷ ebd.

²⁰⁸ ebd.

²⁰⁹ ebd.

²¹⁰ ebd.

²¹¹ ebd.

Referenzen zur passiven Wassergewinnung

Wie schon zuvor beschrieben gibt es eine große Zahl an Projekten, die sich mit der Sammlung von atmosphärischem Wasser befassen.

Die im Folgenden beschriebenen Arbeiten decken ein umfangreiches Feld an herkömmlich, traditionellen bis hin zu hochentwickelten Möglichkeiten ab, die heutzutage hauptsächlich Verwendung finden. Diese Referenzen sind größtenteils gut dokumentiert, sodass sie einen guten Einblick in das Ausmaß ihrer Wirksamkeit und Potentiale liefern. Auf Grundlage der im Weiteren beschriebenen Daten folgt am Ende dieses Unterpunktes noch ein Vergleich in Bezug auf die Lokalisierung, das dort vorherrschende Klima und sich der daraus ergebenden Effizienz der Nebelfänger.



Abb. 26: Teilausschnitt Warka Tower

Fog Collector

Die Kollektoren von FogQuest sind flache, vertikale Oberflächen, die kostengünstig und einfach auch von ungeschulten Personen zu konstruieren sind.²¹² Grundsätzlich lassen sich die Vorrichtungen in zwei Kategorien unterteilen.

Zum einen gibt es den Standart-Nebelkollector, kurz SFC aus dem Englischen von *Standard Fog Collector*, der vorwiegend in kleinen Versuchsstudien Einsatz findet, um potentielle Wassermenge unter bestimmten Bedingungen ermitteln zu können.²¹³ Zum anderen gibt es große Nebelkollectoren, kurz LFC ebenfalls aus dem Englischen von *Large Fog Collector*, die vorwiegend für die eigentliche Gewinnung von atmosphärischem Wasser genutzt werden.²¹⁴

Der SFC hat eine standartisierte Fläche von 1 x 1 m² und der LFC hat typischerweise die Maße 12 x 6 m, wobei sich das Netz nur in den oberen 4 m des Kollektors befindet und so eine Sammelfläche von 48 m² bildet.²¹⁵ Die Kollektoren befinden sich, wie bei dem LFC angedeutet, grundsätzlich in einer Höhe von 2 m über dem Boden und werden senkrecht

zur Windrichtung ausgerichtet, um einen maximalen Wirkungsgrad zu erzielen.²¹⁶ Diese Normierung der Höhe über dem Grund ist bedeutsam, da die Effektivität der Nebelsammlung durch die Windgeschwindigkeit, die pro Höhenmeter steigt, zunimmt.²¹⁷ Der Rahmen, der die Konstruktion trägt, hat einen Durchmesser von 1 cm und besteht für die notwendige Stabilität aus Metall, welches verzinkt oder lackiert ist.²¹⁸ In manchen Fällen besteht der Rahmen ganz aus Aluminium, da dieses Material weniger anfällig für Rostbefall ist.²¹⁹ Das Metallgestell wird straff mit einem Geflecht aus Polypropylen, welches schon unter »Netzarten und deren Vergleich« genauer beschrieben wurde, überzogen, dessen Stützlinien horizontal ausgerichtet sind und die Fasern im Vergleich dazu in einem Winkel zur Vertikalen stehen, um so ein dreieckiges Muster ausbilden zu können.²²⁰ Dabei ist darauf zu achten, dass es zwar so straff wie möglich aufgebracht wird, sich das Maschenwerk dabei aber nicht großartig verformt.²²¹ Dies stellt unter anderem auch eine große Herausforderung dar, da das Netz zweilagig, und zwar

²¹² vgl. Schemenauer und Cereceda, 1994

²¹³ vgl. Jarimi et al., 2020

²¹⁴ ebd.

²¹⁵ ebd.

²¹⁶ vgl. Klemm et al., 2012

²¹⁷ vgl. Schemenauer und Cereceda, 1994

²¹⁸ ebd.

²¹⁹ ebd.

²²⁰ ebd.

²²¹ ebd.

so, dass die beiden Schichten in direktem Kontakt stehen, angebracht wird.²²² Durch diese Art der Anbringung nimmt die doppelte Maschenlage etwa 60 % der Oberfläche des Kollektors ein, womit rund 40 % der Fläche windoffen bleiben.²²³

Direkt unter dem Rahmen befindet sich eine Auffangrinne, die in verschiedenen Querschnitten ausgebildet sein kann, in der Tiefe jedoch 10 cm nicht überschreiten sollte.²²⁴ Sie ist dabei so angebracht, dass sie eher in Richtung Hinterseite des Kollektors orientiert ist, um dadurch möglichst die Gesamtheit der Tropfen einfangen kann, besonders die, die durch starken Wind schräg von der Struktur wieder abgetragen werden.²²⁵

Bei hohen Windlasten übt der Wind zu großen Druck auf die Maschen des Geflechtes aus, sodass es zu einer Schwächung oder gar zum Riß des Textiles und anschließend zum Zusammenbruch des Kollektors kommen kann.²²⁶ Umweltfaktoren wie beispielsweise UV-Strahlung tragen auch ihren Teil zu der Beschädigung der Vorrichtungen bei.²²⁷ Aus diesem Grund wurden robus-



Abb. 27: FogQuest Nebelkollector

te Materialien für Nebelfänger entwickelt, die unterschiedlichen und teils extremen Umweltbedingungen gerecht werden.²²⁸ Ein Beispiel dafür wird im nächsten Unterpunkt genauer beschrieben.

²²² vgl. Schemenauer und Cereceda, 1994

²²³ ebd.

²²⁴ ebd.

²²⁵ ebd.

²²⁶ vgl. Jarimi et al., 2020

²²⁷ ebd.

²²⁸ ebd.

CloudFisher

Basierend auf der Aufmachung der vorherigen Referenz von FogQuest wurde eine weitere Vorrichtung zum Sammeln von atmosphärischem Wasser erarbeitet, weshalb diese einige Ähnlichkeiten zueinander aufweisen.

Bei der Entwicklung des Nebelfängers namens CloudFisher waren einige Unternehmen beteiligt, wie unter anderem die für den Vertrieb zuständige aqualonis GmbH, die Deutsche WasserStiftung und die Technische Universität München, die maßgeblich an der Modifizierung und Testung beteiligt waren.²²⁹

Nach umfangreichen Testungen und Analysen gab es einige Änderungen im Bereich der Größe des Kollektors. Diese wurde nämlich an die Umweltgegebenheiten angepasst und auf die Fläche von 7,4 m² verkleinert, um die Druckbelastung durch den Wind, die Hauptursache für das Kollabieren der Vorrichtungen ist, zu minimieren.²³⁰

Eine weitere Anpassung an die Windgegebenheiten ist die Verwendung von Verlängerungen aus Gummi sowie von flexiblen Profilen aus Kunststoff für eine elastische-



Abb. 28: FogHa-TiN-Netz mit Wassertröpfchen

re Aufhängung der Geflechte.²³¹ Trotz dieser Adaptionen hat sich am Konzept der schnellen, energiefreien und unkomplizierten Montage auch durch ungeschulte Personen nichts geändert.²³² Die Vorrichtungen wurde außerdem UV-beständig, strahlungsresistent und witterungsbeständig gefertigt, um dem vorzeitigen Altern durch Sonne und Wind entgegenzuwirken.²³³

Der entscheidende Unterschied zu den Modellen von FogQuest ist die Verwen-

²²⁹ vgl. Mittal und Banners, 2017

²³⁰ ebd.

²³¹ ebd.

²³² ebd.

²³³ ebd.

dung einer anderen Netzart. Beim CloudFisher wird auf die Verwendung eines 3D-Gewebes gesetzt, das unter dem Namen FogHa-TiN bekannt ist und schon unter »Netzarten und deren Vergleich« genauer erläutert wurde, da es Windgeschwindigkeiten von bis zu 120 km/h standhalten und eine größere Oberfläche erzeugen kann, wodurch es bis zu viermal effektiver sein kann.²³⁴ Der Kollektor wird ebenfalls so aufgestellt, dass der Wind senkrecht auf das Netz auftrifft, wobei die Waben-

struktur vertikal und die Abstandsfilamente horizontal ausgerichtet sind.²³⁵



Abb. 29: Errichtung von mehreren CloudFisher-Kollektoren

Warka Tower

Arturo Vittori, ein italienischer Architekt, gründete die Non-Profit-Organisation Warka Water nach einer Reise nach Ostafrika, um einen Beitrag für insbesondere abgelegene Dörfer und die Vereinfachung von deren Wasserbeschaffung zu leisten.²³⁶

Der Name stammt von einem riesigen Feigenbaum namens Warka Baum, genauer *Ficus vasta*, welcher ein traditionelles Symbol in Äthiopien ist und als Vorbild für die Form der ersten Struktur war.²³⁷

Zwölf Prototypen aus verschiedenen Materialien entstanden in den letzten Jahren, um atmosphärisches Wasser zu gewinnen basierend auf der Inspiration von Insekten und Pflanzen.²³⁸ Die einzelnen Warka-Türme sind dabei so konzipiert, dass sie Wasser in Form Regen, Nebel und Tau auffangen und so als alternative Wasserquelle für Menschen bieten, die mit Wasserknappheit zu kämpfen haben.²³⁹

Die passive Struktur, welche nur mit einfachen Werkzeugen, ohne elektrische Energie oder Verwendung von einem Gerüst errichtet und dadurch problemlos von den Dorfbewohnern gewartet werden kann, beruht auf natürlichen Phänome-

nen wie Schwerkraft, Kondensation und Verdunstung.²⁴⁰ Ziel war es traditionelle Werkzeuge und Bautechniken der örtlichen Gemeinden in das Projekt miteinzubeziehen.²⁴¹ Deshalb wurden die einzelnen Bestandteile der Konstruktion so gewählt, dass sie lokal verfügbar und natürlich, zudem biologisch abbaubar oder recycelbar sind.²⁴²

Das Tragwerk des Turms bildet ein Rahmen aus Bambusstäben, die über Kreuz mit Schnüren aus Hanf verbunden sind,



Abb. 30: Warka Tower

²³⁶ vgl. Baunetz Wissen, *Warka Water: Bambusturm zur Trinkwassergewinnung in Äthiopien*, o. D.

²³⁷ ebd.

²³⁸ ebd.

²³⁹ vgl. Warka Water, o. D.

²⁴⁰ ebd.

²⁴¹ ebd.

²⁴² ebd.

und besitzt eine innenliegende Schicht bestehend aus einem Polyesternetz.²⁴³

Für die Montage eines Turmes, der sich aus sechs Modulen zusammensetzt, die von unten nach oben aufeinander folgend errichtet wird, werden nur wenige Personen und ein kurzes Zeitintervall benötigt.²⁴⁴

Die Wassertröpfchen, die sich im Netz verfangen, fließen anschließend in einen Sammel-tank am Boden des Turms, wo sie durch die Anbringung eines Stoffdaches im unteren Strukturbereich vor erneuter Verdunstung geschützt werden.²⁴⁵

Neben der Fähigkeit das gewonnene Wasser vor Verdampfung zu schützen, besitzt der Überdachung auch noch die Qualitäten der Verschattung und die Ausbildung eines sozialen Ortes für die Gemeinschaft, den die Dorfbewohner für Bildungszwecke oder öffentliche Versammlungen nutzen können.²⁴⁶



Abb. 31: Warka Tower-Netz mit Wassertröpfchen



Abb. 32: Blick unter das Dach

243 vgl. The Biomimicry Insitute, *Lightweight Water Collection System Inspired by Darkling Beetles*, 2017

244 vgl. Baunetz Wissen, *Warka Water: Bambusturm zur Trinkwassergewinnung in Äthiopien*, o. D.

245 vgl. The Biomimicry Insitute, *Lightweight Water Collection System Inspired by Darkling Beetles*, 2017

246 vgl. Warka Water, o. D.

Lokalisierung, Klima und Effizienz im Vergleich

Wie bereits erwähnt, sind nicht alle Nebelkollektoren in gleichem Maß dokumentiert. Wohingegen es sehr ausführliche Berichte in Bezug auf verschiedene Kenngrößen zu den beiden Kollektorarten von FogQuest gibt, fällt der Informationsumfang bei den beiden anderen Referenzen deutlich geringer aus.

Der Standard Fog Collector bzw. Large Fog Collector von FogQuest ist in verschiedenen Städten und Ländern auf fünf Kontinenten errichtet worden.²⁴⁷ Die Kollektoren wurden in unterschiedlichen Höhenlagen platziert, in denen verschiedene klimatische Bedingungen vorherrschend sind.²⁴⁸ Die beiden Standorte in Sidi Ifni, Marokko und Velebit, Kroatien werden im weiteren Verlauf genauer beleuchtet.

Eine ebenso weitläufige Verteilung wie SFC und LFC ist bei den Kollektoren von aqualonis zu finden. Diese befinden sich ebenfalls auf fünf Kontinenten und in unterschiedlichen Höhenmetern.²⁴⁹ Da ausschließlich Informationen zu der Verortung am Mount Boutmezguida in Sidi Ifni, Marokko veröffentlicht wurden, wird dieser

Standort stellvertretend für den CloudFisher verwendet.²⁵⁰ Zudem lässt sich bei gleichem Standort ein eindeutiger Vergleich zu den Kollektoren von FogQuest ziehen.

Es gibt zwar deutlich weniger Exemplare der Türme von Warka Water, aber diese sind ebenfalls auf fünf Kontinenten verteilt.²⁵¹ Auch hier gibt es nur zu einem Standort, nämlich dem in Dorze, Äthiopien, vereinzelt grobe Informationen, weshalb dieser Ort für den Vergleich herangezogen wird.

Die Verortung in Marokko befindet sich mit dem Luftdruck von 875 hPa in einer Höhenlage von 1225 m über dem Meeresspiegel, kurz ü.M., wo es in den Monaten Juli bis September bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 71 % bis 77 % zu den höchsten Durchschnittstemperaturen von 21,4°C bis 22,8°C kommen kann.²⁵²

Velebit in 1600 m ü.M. mit einem Luftdruck von 835 hPa besitzt die heißeste Periode im Zeitraum von Juni bis August eine relative Luftfeuchtigkeit im Mittel von 63 % und durchschnittlich Temperaturen zwi-

²⁴⁷ vgl. Klemm et al., 2012

²⁴⁸ ebd.

²⁴⁹ vgl. aqualonis, o. D.

²⁵⁰ ebd.

²⁵¹ vgl. Warka Water, o. D.

²⁵² vgl. Climate-Data.org, *Klima Sidi Ifni (Marokko)*, o. D.

schen 17,8°C und 20,2°C.²⁵³

Dorze in Äthiopien hingegen liegt mit einer Höhe von 2800 m ü.M. deutlich weiter oberhalb der beiden anderen Orte, weshalb der geringste Luftdruck von 719 hPa zuvermerken ist, und verrechnet zu Beginn des Jahres zwischen Januar und März die heißeste Temperaturwelle.²⁵⁴ Temperaturen zwischen 20,7°C und 21,5°C mit einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 47 % und 56 % sind in diesem Zeitraum gängig.²⁵⁵ Die vollständigen Klimaangaben der einzelnen Lokalisierungen für den gesamten Jahresverlauf befinden sich im Anhang unter »Wetter- und Klimadaten Referenzen«. Nach der Umrechnung der relativen Luftfeuchtigkeit in Bezug auf die Höhenlage mit Gleichung [1] und Gleichung [2], lässt sich die durchschnittliche Taupunkttemperatur mit Hilfe einer Online-Software bestimmen.²⁵⁶

Unter Verwendung der drei Größen Durchschnittstemperatur, korrigierter relativer Luftfeuchtigkeit und der durchschnittlichen Taupunkttemperatur konnte die absolute Luftfeuchtigkeit grafisch mittels dem Carrier-Diagramm, siehe im Anhang

unter »Wetter- und Klimadaten Referenzen«, ermittelt werden.

In Marokko, wo zwei der Nebelkollektortypen verortet sind, besitzt die absolute Feuchtigkeit der Luft zwischen etwa 16 g und 17 g/m³. In Kroatien beträgt die Konzentration im Mittel 12,5 g/m³ und in Äthiopien etwa 13,2 g/m³. Unter diesen klimatischen Gegebenheiten erzielten die Kollektoren von FogQuest in Velebilit 4 L/m²/Tag und in Sidi Infi mit 7 L/m²/Tag fast das Doppelte.²⁵⁷ Der CloudFisher kann etwa 22 L/m²/Tag an atmosphärischem Wasser ernten, was nicht einer fünffachen Ertragssteigerung entspricht, aber dennoch eine beachtliche Leistung darstellt.²⁵⁸ Der Warka Tower zeigt die geringste Effizienz bei einer gesamten Oberfläche von über 120 m² und einem maximalen Ertrag von 100 L, was etwa 0,81 L/m²/Tag entspricht.²⁵⁹ Hier zeigt sich der Einfluss des Designs der Nebelkollektoren auf dessen Effizienz, denn während die beiden flachen Strukturen einen vergleichsweise hohen Wasserertrag erbringen können, sind die gewonnenen Wassermengen der vasenartigen Form kaum nennenswert.

²⁵³ vgl. Climate-Data.org, *Klima Trnovac (Kroatien)*, o. D.

²⁵⁴ vgl. Climate-Data.org, *Klima Dorze (Äthiopien)*, o. D.

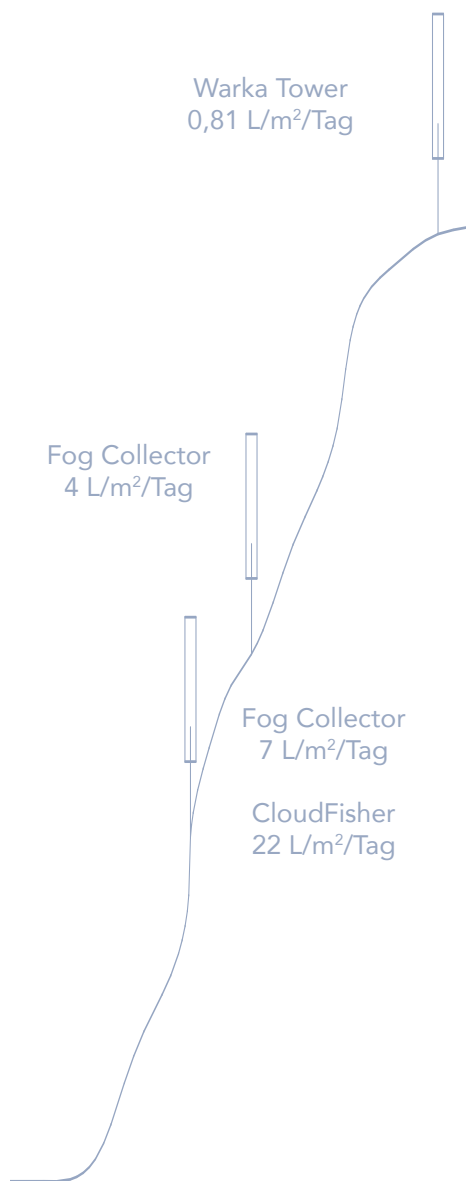
²⁵⁵ ebd.

²⁵⁶ <https://www.wetterochs.de/wetter/feuchte.html>

²⁵⁷ vgl. Klemm et al., 2012

²⁵⁸ vgl. aqualionis, o. D.

²⁵⁹ vgl. engineeringforchange.org, o. D.



Äthiopien, Dorze

2800 m ü.M.
719 hPa

Monat	Ø-Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	relative Luftfeuchte ü.M. [%]	Ø-Taupunkt [°C]	absolute Luftfeuchte [g/m³]
Januar	20,7	50	70	15,0	12,6
Februar	21,5	47	66	14,9	12,4
März	21,3	56	79	17,5	14,7

Kroatien, Velebit, Trnovac

1600 m ü.M.
719 hPa

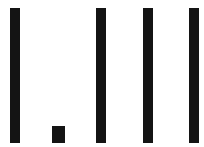
Monat	Ø-Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	relative Luftfeuchte ü.M. [%]	Ø-Taupunkt [°C]	absolute Luftfeuchte [g/m³]
Juni	17,6	67	81	14,5	12,3
Juli	20,2	61	74	15,4	12,9
August	20,2	61	74	15,4	12,9

Marroko, Mount Boutmezguida, Sidi Ifni

1225 m ü.M.
875 hPa

Monat	Ø-Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	relative Luftfeuchte ü.M. [%]	Ø-Taupunkt [°C]	absolute Luftfeuchte [g/m³]
Juli	22,0	71	82	18,8	15,9
August	22,8	72	83	19,8	16,9
September	21,4	77	89	19,5	16,7

Abb. 33: Zusammenfassung Wetter- und Klimadaten von Referenzen



Biomimikry-Strategien der Kühlung in der Natur

Die Hitzewellen in weiten Teilen der Erde bringen Energieversorger heutzutage deutlich mehr ins Schwitzen als deren Kunden, da Klimaanlage eine enorme Energiemenge benötigen.²⁶⁰ Anstatt große Energiemassen und giftige Chemikalien zu verbrauchen, stellt die Natur nur das, was sie braucht, dort her, wo sie es braucht, um gute klimatische Bedingungen zu erzeugen.²⁶¹ Denn ähnlich wie bei der Fähigkeit zur Wassergewinnung gibt es ebenfalls eine Vielzahl an Tieren und Pflanzen, die Vorgehensweisen entwickelt haben, die bei großer Hitze Abhilfe leisten können.

Zwei solcher Strategien werden im weiteren Verlauf beschrieben, die für die Deutung nachfolgender Inhalte bedeutsam sind.

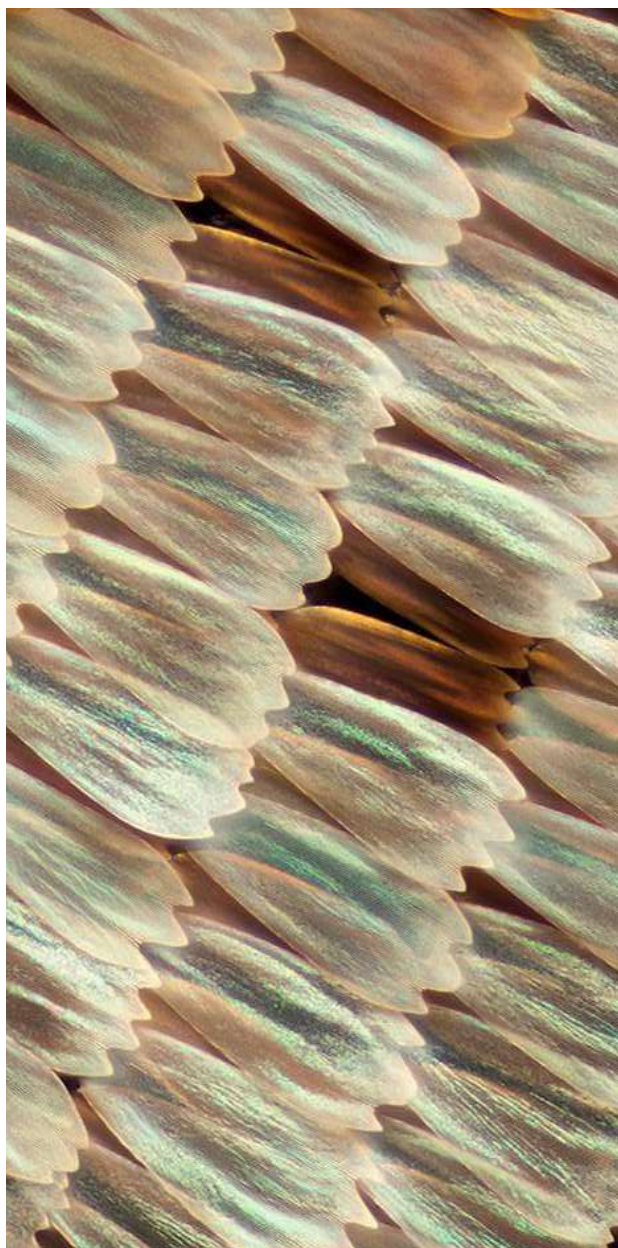


Abb. 34: Makroaufnahme von Schmetterlingsflügel III

²⁶⁰ vgl. Clark Howard, 2013
²⁶¹ ebd.

Strategie der Termiten

Das Habitat von Termiten zeichnet sich durch extreme klimatische Bedingungen aus, die großen Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht unterliegen.²⁶² Um die Areale der Termitenkönigin zu schützen und ihre Nahrungsquellen zu erhalten, haben sie eine Technik entwickelt, die es ihnen trotz der zwischen 40°C und 1,7°C variierenden Außentemperatur ermöglicht, innerhalb ihres Nestes eine konstante Temperatur von 30,5°C zu halten.²⁶³ Dafür öffnen und schließen die Termiten gewisse Öffnungen in ihrem Erdhügel und bewirken so Konvektionsströme zur Wärmeregulierung.²⁶⁴ Bei der auftriebsbedingte Lüftung geht es um einen Luftstrom, der sich aus den Temperaturabweichungen zwischen inneren und äußeren Bereichen ergibt und als Schornstein- bzw. Kamin-effekt bekannt ist.²⁶⁵ Die Termiten nutzen diese Strategie der auftreibenden Luft und dem damit verbundenen Luftstrom nicht nur für den Austausch von frischer und verbrauchter Luft, sondern auch zur Sammlung von Sonnenenergie.²⁶⁶

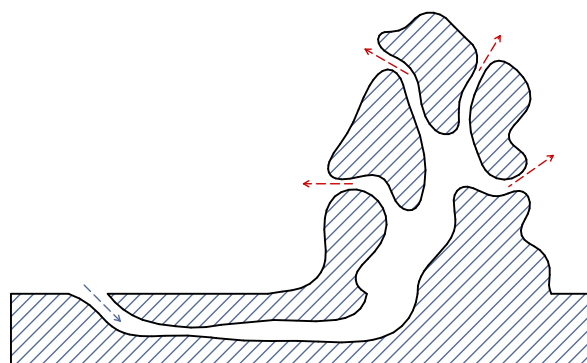


Abb. 36: Schema Termitenhügel

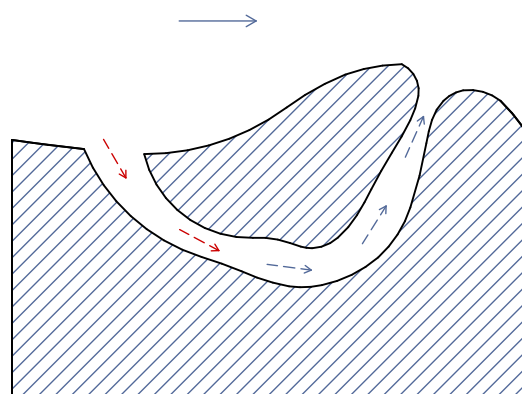


Abb. 35: Schema Präriehundbau

²⁶² vgl. Lin, 2020

²⁶³ ebd.

²⁶⁴ ebd.

²⁶⁵ ebd.

²⁶⁶ ebd.

Strategie der Schwarzschwanz-Präriehunde

Schwarzschwanz-Präriehunde, genauer *Cynomys ludovicianus*, sind soziale Nagetiere, die hauptsächlich in Nordamerika vorkommen und ausgedehnte unterirdische Höhlen bauen, in denen sie ihre Familien beherbergen.²⁶⁷

Bei einer Länge von bis zu 10 m reicht die Diffusion allein nicht aus, um die verbrauchte Luft im Inneren der Höhle durch frische Luft von außen zu auszutauschen, und deshalb haben Präriehunde eine spezielle Strategie entwickelt.²⁶⁸

Die Art und Weise, wie sie die Öffnungen zu ihren Höhlen anlegen und erbauen, trägt nämlich dazu bei, die Windenergie der windigen Landschaft ohne Erhebungen zu nutzen, und so eine passive Belüftung der Höhlengänge zu erhalten.²⁶⁹

Wenn Luft über eine Oberfläche strömt, verursacht dies einen Gradienten in der Strömungsgeschwindigkeit, bei dem sich die Bewegung mit stetig wachsender Annäherung an die Fläche verlangsamt.²⁷⁰ Der Präriehund macht sich diese Änderung im Gefälle zunutze und errichtet einen Erdhügel mit einer höher gelegenen Öffnung im Luv, der windzugewandten Seite, und

eine weitere Erhebung mit einem niedrigen Zugang im Lee, der windabgewandten Flanke.²⁷¹ Über der erhöhten Öffnung ist die Windgeschwindigkeit größer als an der weiter unten gelegenen, wodurch es gemäß dem Bernoulli-Prinzip zur Entstehung eines Bereiches kommt, der einen niedrigeren Druck besitzt.²⁷² Der entstandene Druckunterschied zwischen den Höhlenzugängen führt dazu, dass die Luft in eine Richtung durch den Bau strömt, wobei sie in die untere Öffnung gesaugt wird und aus dem höher gelegenen Durchbruch hinausströmt, was dem Mechanismus eines Venturi-Rohrs entspricht.²⁷³

²⁶⁷ vgl. The Biomimicry Institute, *Asymmetric Burrow Openings Create Passive Ventilation*, 2020

²⁶⁸ ebd.

²⁶⁹ ebd.

²⁷⁰ ebd.

²⁷¹ ebd.

²⁷² ebd.

²⁷³ ebd.

Technologische Kühlung der Luft

Durch die sich stetig fortsetzende Verstädterung wird das thermische Umfeld in städtischen Gebieten während der Sommermonate nachhaltig negativ beeinträchtigt.²⁷⁴ Berücksichtigt man die Umweltprobleme, die sich auf Grund des urbanen Wärmeinseleffekts in Groß-, bis hin zu Kleinstädten entwickeln, wird dies besser begreiflich.²⁷⁵ Herleiten lässt sich die Verschlechterung der thermischen Gegebenheiten vorrangig durch die große Menge an künstlich erzeugter Wärme sowie die Veränderung und Entfernung der natürlichen Bodenbedeckung für die Errichtung von Gebäuden durch menschliches Handeln.²⁷⁶ Letzteres wird jedoch als Hauptursache für die Entstehung der Wärmeinseln gesehen, was an den Materialeigenschaften der Straßenbeläge und Gebäudehüllen liegt, wie beispielsweise der geringen Albedo, dem Maß für das Rückstahlvermögen von Oberflächen, oder der hohen Wärmespeicherkapazität.²⁷⁷ Sie speichern tagsüber so viel Sonnenenergie, dass die Flächen auch noch nachts wärmer als deren Umgebungsluft sind.²⁷⁸ Dies hat außerdem auch gravierende Auswirkun-

gen auf die Luft im Inneren der Gebäude. Um den Anstieg der Temperaturen in den Städten einzudämmen und angenehme thermische Bedingungen in Außen-, aber vor allem Innenräumen zu schaffen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Ebenso wie bei der technologischen Gewinnung von Wasser gibt es bei der technologischen Kühlung verschiedene Systeme, die zum einen externe Energie benötigen, zum anderen mit Sonnenenergie betrieben werden oder auch vollkommen passiv funktionieren.

Im weiteren Verlauf werden zwei passive Möglichkeiten zur Kühlung der Luft, wie die Verwendung von traditionellen Bauweisen oder der Nutzung von Wasserverdunstung, genauer beschrieben.

²⁷⁴ vgl. He und Hoyano, 2010

²⁷⁵ ebd.

²⁷⁶ ebd.

²⁷⁷ ebd.

²⁷⁸ ebd.

Vernakuläre Kühlung

Vernakuläre Architektur ist eine Bezeichnung für das Bauen der Menschen ohne das Hinzuziehen von professionellen Planern, rein aus den Gegebenheiten eines Ortes und den jeweils zur Verfügung stehenden Rohstoffen heraus.²⁷⁹ Diese Art des Bauens kann ebenso viele Ziele verfolgen wie sie Formen annehmen kann. Für die Kühlung von Gebäuden gibt es verschiedene Ansätze, wovon im weiteren Verlauf nur einer genauer beschrieben wird.

Vor vielen Jahrhunderten wurde in Regionen von Asien wie etwa Persien oder Arabien an effektiven Lösungen gearbeitet, deren Ziel es war, ohne den Einsatz von elektrischer Energie die Temperatur im Innenraum zu senken.²⁸⁰ Durch die Errichtung von Windtürmen, den sogenannten Badgiren, stellt eine solche Lösung dar, mit der man Temperaturunterschiede von bis zu 20°C zwischen Innen- und Außenluft erzielen kann.²⁸¹ Dieses Phänomen beruht auf einem Prinzip, das sich den sogenannten Kamineffekt, welcher durch die Ausformulierung der Gebäude als Türme begünstigt wird, zunutze macht. Ist die

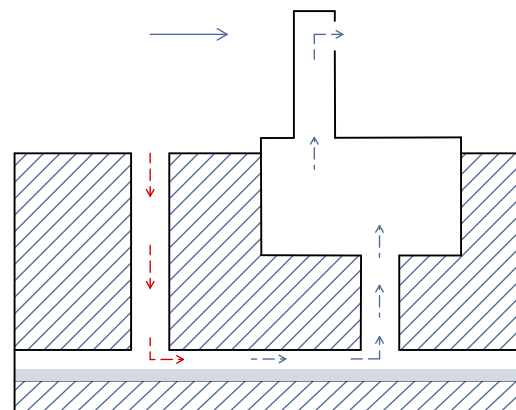


Abb. 37: Schema Windturm

Temperatur im Gebäudeinneren höher als außerhalb, kommt es zu diesem Effekt Kamineffekt.²⁸² Er entsteht, wenn warme Luft im Inneren emporsteigt und gleichzeitig die vorherrschende Hitze aufnimmt und im oberen Bereich des Gebäudes entweicht.²⁸³ Der Luftdruck im Gebäude nimmt dadurch mit zunehmender Höhe immer weiter an, wodurch kältere Luft in den unteren Teilen nachströmen kann.²⁸⁴ Windtürme gibt es in verschiedenen Bauformen. Generell sind sie alle im Bereich

²⁷⁹ vgl. Kasperek, 2020

²⁸⁰ vgl. Küffner, 2010

²⁸¹ ebd.

²⁸² vgl. Baunetz Wissen, Kamineffekt, o. D.

²⁸³ ebd.

²⁸⁴ ebd.

des Schaftes komplett geschlossen und arbeiten mit den recht zuverlässig wehenden Nachtwinden der Golfstaatenregion.²⁸⁵ Zum einen gibt Türme, die so aufgebaut sind, dass sie im oberen Bereich rundherum Öffnungen besitzen und so den Wind einfangen und in das Gebäude leiten.²⁸⁶ Wenn es tagsüber windstill ist, sorgt die Sonneneinstrahlung für den Auftrieb innerhalb des Turms und leitet die warme Luft nach außen.²⁸⁷ Andere Türme besitzen zusätzlich noch eine Wasserquelle, die in Form von einem Wasserbecken oder einem wasserführenden Kanal, der traditionell auch Qanat genannt wird, ausgebildet sein kann.²⁸⁸ Meist befindet sich diese Quelle unterhalb des Gebildes, wodurch es auch von unten mit kühlerer Luft versorgt wird, siehe Abb. 37.²⁸⁹

Neben der Kühlwirkung haben die Türme auch noch den Vorteil, dass sie in engen Siedlungen unabhängig von der Hauptwindrichtung, lediglich an der Sonneneinstrahlung ausgerichtet, erbaut werden können, um so den Einbau von Fenstern und der damit verbundenen Einstrahlung vermeiden zu können.²⁹⁰

²⁸⁵ vgl. Küffner, 2010

²⁸⁶ ebd.

²⁸⁷ ebd.

²⁸⁸ ebd.

²⁸⁹ ebd.

²⁹⁰ vgl. Bundesverband Geothermie, o. D.

Adiabate Kühlung

Die adiabate Kühlung, welche auch als Verdunstungskühlung bezeichnet wird, ist ein sehr leistungsfähiges Kühlverfahren, bei dem mit Hilfe von Verdunstungskälte Räume klimatisiert werden.²⁹¹ Der Begriff »adiabat« ist ein Ausdruck, der die Zustandsänderung von Wasser während der Kondensation beschreibt, die ohne direkte Zu- oder Abfuhr von Wärme verläuft.²⁹² Zur Erzeugung von Kälte wird ausschließlich die Verdunstungskälte von Luft und Wasser als unbegrenzte, natürliche Quelle verwendet.²⁹³ Zudem wird noch eine Oberfläche benötigt, die mit dem genannten Wasser benässt wird. Je nach Materialeigenschaften erhält man einen stärkeren oder eher schwächeren Kühleffekt. Typischerweise ist die Außenluft vor der adiabaten Kühlung heiß und ziemlich trocken.²⁹⁴ Weht nun ein Windstrom über eine feuchte Fläche, kondensieren Teile des vorhandenen Wassers, während der Umgebungsluft die erforderliche Wärme entzogen wird.²⁹⁵ Als Folge dessen ist ein Abfall der Lufttemperatur deutlich bemerkbar.²⁹⁶

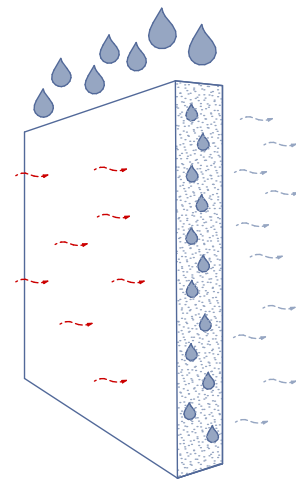


Abb. 38: Schema adiabate Kühlung

²⁹¹ vgl. Baunetz Wissen, *Adiabate Kühlung*, o. D.
²⁹² vgl. Colt, o. D.
²⁹³ vgl. Baunetz Wissen, *Adiabate Kühlung*, o. D.
²⁹⁴ vgl. Colt, o. D.
²⁹⁵ ebd.
²⁹⁶ ebd.

Referenzen zur passiven Kühlung

Wie schon zuvor beschrieben gibt es einen beachtlichen Umfang an Projekten, die sich mit passiven Kühlmechanismen befassen.

Die im Folgenden beschriebenen Entwürfe verschaffen einen Blick in ein umfangreiches Feld aus zum einen herkömmlichen und traditionellen Möglichkeiten und zum anderen das Potenzial zu hochentwickelten Abwandlungen davon.

Diese Referenzen wurden in großem Umfang erfasst, sodass sie einen guten Einblick in das Ausmaß ihrer Wirksamkeit sowie der Leistungsfähigkeit, die sich daraus erschließen lässt, liefern.



Abb. 39: EXPO Dubai 2020 , Österreich Pavillon



Abb. 40: CoolAnt

EXPO Dubai 2020 – Österreich Pavillon

Basierend auf bedeutenden Fragen bezüglich einer gemeinsamen und verbesserten Zukunft, bietet der Österreich Pavillon durch seinen achtsamen und respektvollen Umgang mit den Ressourcen auf der Erde eine mögliche Antwort darauf.²⁹⁷ Durch die behutsame Verwendung von lokalen Baumaterialien, Vorfertigung und Nachnutzungen wird eine deutliche Stellung in Bezug auf die aktuelle Wegwerfgesellschaft bezogen.²⁹⁸ Aber auch mit dem physikalischen Konzept positioniert sich

der Pavillon deutlich in Hinblick auf die Energiedebatte.²⁹⁹

Die knapp 40 formgebenden Kegel in verschiedenen Höhen erzeugen Lichtöffnungen in unterschiedlichen Größen und vielfältige Raumfolgen.³⁰⁰ Der Einsatz von klimasensitiver, traditioneller arabischer Bauweise in Kombination mit österreichischem Know-how in Gebäudeplanung stellt eine wichtige Grundlage für eine unkonventionelle Kühlung der Kegel bei einer Außentemperatur zwischen 25°C und

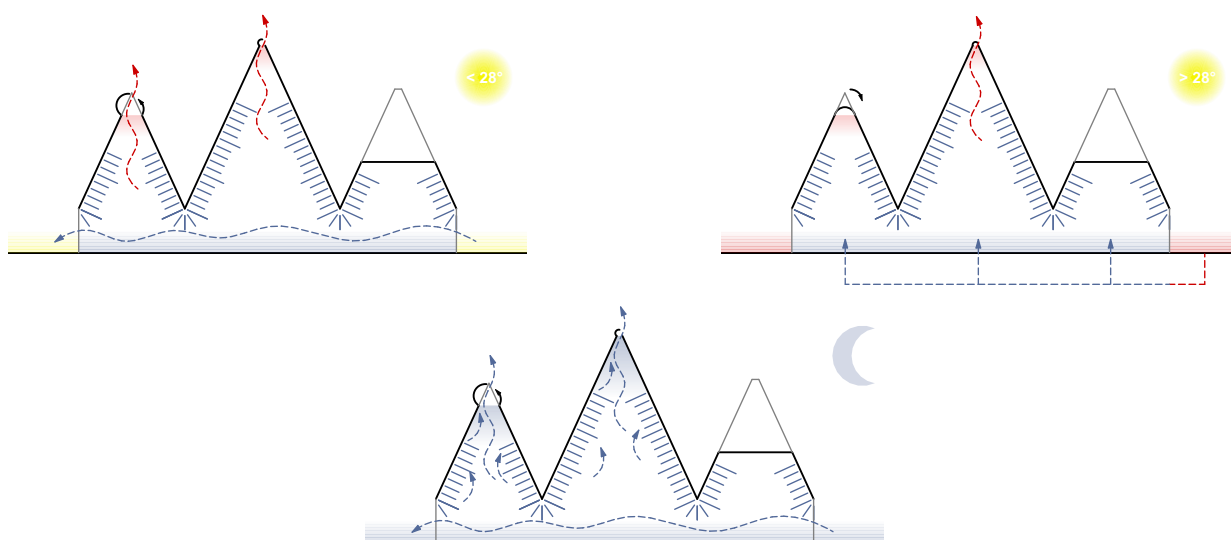


Abb. 41: Schema Funktionsweise Österreich Pavillon

297 vgl. querkraft architekten, o. D.
 298 ebd.

299 ebd.
 300 vgl. Leeb, 2018

35°C dar.³⁰¹

Die einzelnen Elemente besitzen transparente Abdeckungen an ihren Öffnungen, die untertags geschlossen sind und nachts geöffnet werden, um so den thermischen Auftrieb der Luft in den spitz zulaufenden Türmen zur Kühlung zu nutzen.³⁰² Die massive Bauweise des Pavillons unterstützt diesen Effekt zudem, in dem sich die Masse in der Nacht abkühlt und kühle Luft speichert, die tagsüber abgegeben werden kann.³⁰³ Durch die gezielte Orientierung der Deckel werden die Faktoren der arabischen Windtürme und -fänger effizient eingebunden.³⁰⁴ Aber auch die Innenhöfe tragen einen Teil zur thermischen Behaglichkeit der Innenräume bei, da aus ihnen untertags Zuluft angesaugt wird.³⁰⁵ Verstärkt wird der Kühleffekt aber auch durch die Verwendung eines weißen Außenanstriches mit hohem Reflexionsgrad.³⁰⁶



Abb. 42: Österreich Pavillon, Vogelperspektive



Abb. 43: CoolAnt in Betrieb

³⁰¹ vgl. Leeb, 2018

³⁰² ebd.

³⁰³ vgl. Energieleben, 2020

³⁰⁴ vgl. Leeb, 2018

³⁰⁵ ebd.

³⁰⁶ vgl. Energieleben, 2020

CoolAnt

Der CoolAnt von ant studio ist eine Low-Tech-Kühlanlage, die zur Kühlung eines Fabrikgebäudes in Indien entworfen wurde.³⁰⁷ Diese setzt sich aus aufeinander gestapelten Tonzylindern zusammen, die vor einem Generator der Fabrik aufgestellt sind und von diesem kontinuierlich mit Wasser besprüht werden.³⁰⁸ Die dafür verwendete Wassermenge stammt aus recyceltem Brauchwasser der Fabrik und fällt sehr gering aus, da das Wasser unbegrenzt oft umgewälzt und erneut eingesetzt werden kann.³⁰⁹

Auf Grund der großen, porösen Oberfläche der Tongefäße, die hygroskopisch, sprich wasseranziehend, sind und eine hervorragende Kapillarwirkung besitzen, kommt es zur Kühlung durch Verdunstung.³¹⁰ Bei der Wasserkondensation wird Energie benötigt, die der Umgebungsluft als Wärmeenergie entwendet wird, wodurch es zur Senkung der Lufttemperatur kommt.³¹¹

Mit einer Geschwindigkeit von 10 m/2 und einer Temperatur von 50° Celsius strömt die warme Luft in die weitere Öffnung der Zylinder, wo sie auf etwa 36°C gekühlt

wird.³¹²

Auf Grund seiner Beschaffenheit hat das Kühlsystem CoolAnt mehrere Vorteile, wie die Belebung traditioneller Handwerkskunst, die Senkung der Energiekosten gegenüber herkömmlichen Klimaanlage und der wartungsarmen Nutzung.³¹³

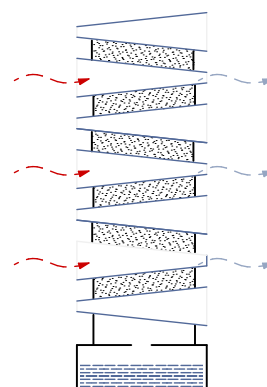


Abb. 44: Schema Funktionsweise CoolAnt

307 vgl. Baunetz Wissen, *Innovative Low-Tech-Kühlung für Fabrik in Indien*, o. D.

308 ebd.

309 ebd.

310 ebd.

311 vgl. Wikipedia, *Tonkrugkühler*, 2019

312 vgl. Baunetz Wissen, *Innovative Low-Tech-Kühlung für Fabrik in Indien*, o. D.

313 ebd.



Standort

Wien wurde jahrelang mehrfach direkt hintereinander von der internationalen Beratungsagentur Mercer als lebenswerteste Stadt weltweit auf Grund der hohen Lebensqualität eingestuft.³¹⁴ Dafür werden jährlich in mehr als 450 Städten der Welt unter Einbezug bestimmter Kriterien die Lebensqualität analysiert.³¹⁵ Als besonders herausragend gelten in Wien unter anderem die Gesundheitsversorgung, das öffentliche Verkehrsnetz sowie die Wasserversorgung.³¹⁶ Weniger gut sind dabei allerdings Punkte wie beispielsweise das Klima bewertet.³¹⁷

Die allgemeinen Gegebenheiten in Wien und an der spezifischen Verortung am Christian-Broda-Platz im Speziellen, werden im zweiten Teil der Arbeit behandelt. Dabei stehen Wetter und Klima sowie die infrastrukturelle Situation im Fokus.

Wien ist eine Möglichkeit zur Lokalisierung des anschließend erläuterten Projekts dar. Wie schon in den Grundlagen erläutert, kann atmosphärisches Wasser nahezu überall auf der Erde gewonnen werden.

³¹⁴ vgl. Stadt Wien, *Lebensqualität - Wien ist und bleibt Nummer eins*, o. D.

³¹⁵ ebd.

³¹⁶ vgl. Trautinger, 2019

³¹⁷ ebd.

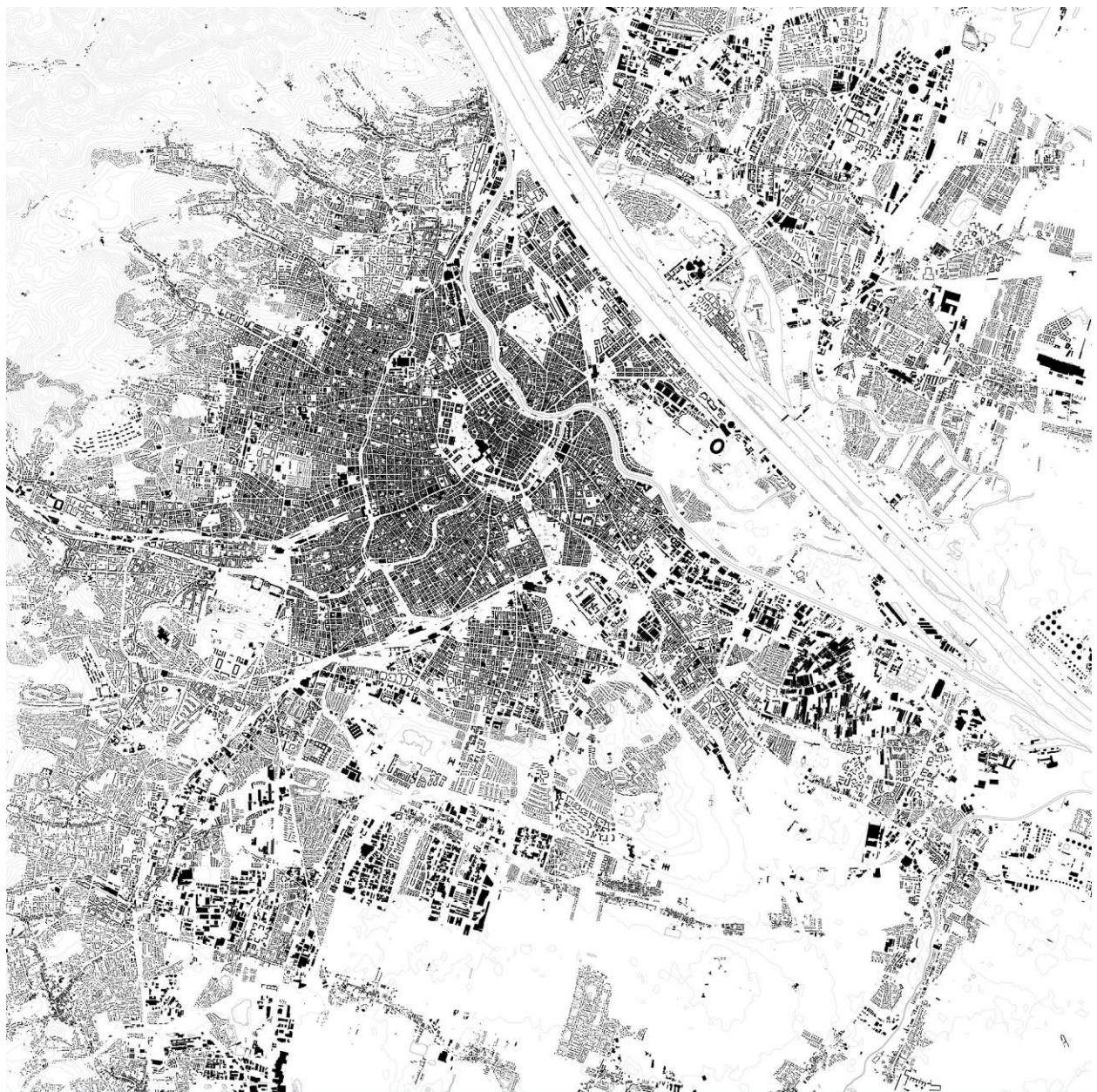


Abb. 45: Schwarzplan, M = 1 : 115.000

Wasserressourcen Wien

Das Wiener Wasser, das ein magistratischer Betrieb und somit Teil der Stadtverwaltung ist, kommt aus den Kalkhochalpen aus Niederösterreich und der Steiermark, von wo aus es durch unterirdische Leitungen, teilweise auch durch Berge, im natürlichen und freien Gefälle ohne die Verwendung von Pumpen bis in die 100.000 Haushalte der Stadt gelangt.³¹⁸ Die vollständige Versorgung mit kristallklarem Hochquellwasser aus unangetasteten und biologisch reinen Teilen der Alpen ist maßgeblich an der hohen Lebensqualität der Stadtbewohner beteiligt, für welche die Stadt Wien schon mehrmals ausgezeichnet wurde.³¹⁹

Um die Anforderungen und Problemen des Klimawandels und des Bevölkerungswachstums aufzugreifen und entsprechend reagieren zu können, wird die Stadt fortlaufend nachhaltig weiterentwickelt.³²⁰

Ein wichtiger Bestandteil dieser Entwicklung ist die Strategie mit dem Namen »Wiener Wasser 2050«, deren Ziel es ist, durch Sanierungen und Erweiterungen der Quellzugänge, Wasserleitungen und -behälter Wasser als wichtigstes Lebensmittel dauerhaft zu sichern.³²¹

318 vgl. WASSERWERK.at, o. D.

319 vgl. Stadt Wien, *Der Weg des Wiener Wassers von den Alpen in die Stadt*, o. D.

320 vgl. Stadt Wien, *Strategie »Wiener Wasser 2050«*, o. D.

321 ebd.

Allgemeine klimatische Bedingungen Wien

Wien ist eine der wenigen Städte in Europa, die am stärksten von der Klimaerwärmung getroffen werden.³²² Die dadurch resultierende Veränderung der klimatischen Bedingungen hat in Wien während der vergangenen vier Jahrzehnte zu einer Steigerung der Jahresdurchschnittstemperatur von bereits zwei Grad Celsius geführt.³²³ Auswirkungen wie hochsommerliche extreme Temperaturen, Starkregenereignisse sowie Trockenperioden und Stürme bringen Lebensraum und Lebewesen vor große Herausforderungen.³²⁴ Eine weitere Zunahme der Temperaturen von bis zu vier Grad bis Ende des Jahrhunderts wurde prognostiziert, sodass es zu einer erheblichen Zunahme an Tagen mit Temperaturen über 30° Celsius kommen wird.³²⁵

Im Folgenden werden die Zustandsgrößen Temperatur und Luftfeuchtigkeit für Wien analysiert, um Rückschlüsse auf die dortige Sammlung von Wasser durch den Vergleich mit den vorangegangenen Klimadaten, unter »Lokalisierung, Klima und Effizienz im Vergleich«, ziehen zu können.

322 vgl. Smid et al., 2019

323 vgl. Stadt Wien, *Anpassung an den Klimawandel in Wien*, o. D.

324 ebd.

325 ebd.

Temperatur Wien, allgemein

Wien lässt sich wegen seinem kontinentalen Klima in die Klimazone, die Mittelbreiten bezeichnet wird, einteilen.³²⁶ Ein gemäßigtes Klima mit den vier Jahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst und Winter prägt diese Zone besonders, in der sich der größte Teil von Europa befindet.³²⁷ Typisch für die Mittelbreiten ist der vorherrschende Wind, der in der Regel vom Meer zum Kontinent weht, also von Westen nach Osten, und Einfluss auf das Klima hat.³²⁸

Die wärmsten Monate in Wien sind in den Monaten Juni bis August zu vermerken.³²⁹ Die mittleren Temperaturen bewegen sich dann zwischen 19,5°C und 21,4°C.³³⁰ Die

vollständigen Klimaangaben für den gesamten Jahresverlauf befinden sich im Anhang unter »Wetter- und Klimadaten Wien, allgemein«.

Wie schon angedeutet hatte der Klimawandel bisher schon großen Einfluss auf die Stadt Wien. Verschiedene Studien zeigen, dass die Anzahl der Hitzetage über 30°C in den vergangenen knapp 65 Jahren extrem angestiegen ist, sodass die Anzahl der Tage mit solch hohen Temperaturen in den Sommermonaten durchschnittlich bei 15 liegt.³³¹ Der heißeste Tag im Jahr 2020 konnte mit einer Temperatur von 37,2°C gemessen werden.³³²

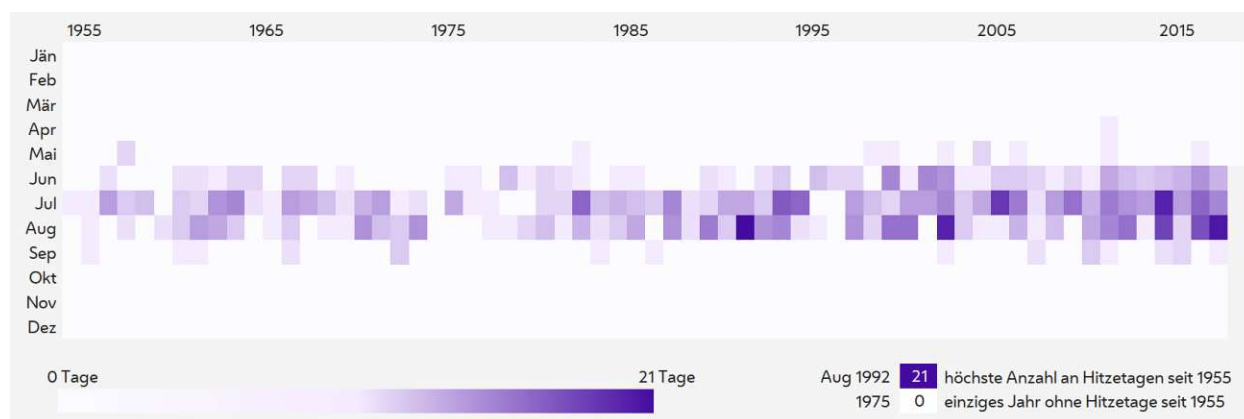


Abb. 46: Hitzetage über 30°C von 1955 - 2019

³²⁶ vgl. klima.org, o. D.

³²⁷ vgl. Heimat und Welt, o. D.

³²⁸ ebd.

³²⁹ vgl. Climate-Data.org, *Klima Wien (Österreich)*, o. D.

³³⁰ ebd.

³³¹ vgl. wien1x1.at, 2019

³³² vgl. Land Wien, 2021

Luftfeuchtigkeit Wien, allgemein

Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt über das Jahr hinweg etwa 65 % bis 80 %, wobei die geringsten Werte in den wärmeren Monaten erbracht werden.³³³

Basierend auf dem gleichen Vorgehen wie bei den Referenzen zur atmosphärischen Wassergewinnung unter »Lokalisierung, Klima und Effizienz im Vergleich« konnten unter Verwendung des Carrier-Diagramms die Werte für die absolute Luftfeuchtigkeit ermittelt werden. Die entsprechenden Diagramme befinden sich in der Beischrift unter »Wetter- und Klimadaten Wien, allgemein«. Im Juni liegt diese bei 11,2 g/m³, im Juli und August schon bei etwa 12,4 g/m³.

Vergleich und Rückschlüsse

Allgemein werden bei Forschungsthemen rund um das Thema Wetter und Klima Methoden angewandt, wie die Durchführung von Experimenten in der x oder der Untersuchung der klimatischen Effekte mit Hilfe von computerbasierten Programmen zur Bestimmung der Numerischen Strömungsmechanik, abgeleitet aus dem Englischen *Computational fluid dynamics*. Da aber beide Herangehensweisen dem Umfang dieser Arbeit nicht entsprechen würden, wird im Folgenden mit Hilfe von den bisher gewonnenen Erkenntnissen unter »Lokalisierung, Klima und Effizienz im Vergleich« zu vergleichen. Weiter sollen daraus Rückschlüsse für das mögliche Potential von Wien atmosphärisches Wasser zu gewinnen gezogen werden.

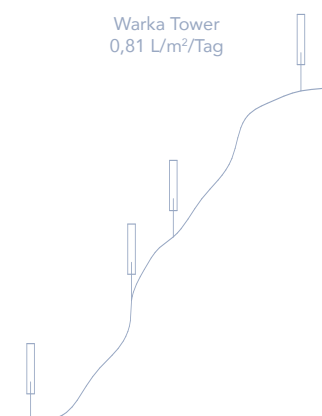
Vergleicht man zunächst die ermittelten Daten mit den Werten für Wien lassen sich Ähnlichkeiten und Unterschiede feststellen.

Die Klimadaten von Sidi Infi in Marokko weichen in jeder Hinsicht sehr stark von den Zahlen für Wien ab. Bei den beiden Lokalisierungen in Kroatien und Äthiopien

lassen sich jedoch stellenweise Ähnlichkeiten erkennen. Die Durchschnittstemperatur in Wien ist zwar etwas höher als in Velebit, Kroatien, jedoch sind die Daten für relative Luftfeuchtigkeit und der sich daraus ableitbaren absoluten Luftfeuchtigkeit recht ähnlich. In Dorze, Äthiopien sind die Temperaturen ebenfalls niedriger als in Wien, gleiches trifft auch auf die relative Luftfeuchtigkeit zu. Dennoch sind aber ähnliche Werte für die absolute Luftfeuchtigkeit zu bemerken.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass in Wien das Potential durchaus gegeben ist Wasser aus der Atmosphäre zu ernten. Was die mögliche Effizienz eines Nebel-

fängers in Wien angeht, lassen sich jedoch keine weiteren Angaben machen. Dies ist nicht möglich, weil die Erträge trotz ähnlicher klimatischer Bedingungen in Kroatien und Äthiopien grundlegend verschieden ausfallen. Die mögliche Annahme, dass die minimale Effizienz eines Kollektors in Wien der, der Struktur in Äthiopien, entspricht, ist ungewiss.



Äthiopien, Dorze

2800 m ü.M.
719 hPa

Monat	Ø-Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	relative Luftfeuchte ü.M. [%]	Ø-Taupunkt [°C]	absolute Luftfeuchte [g/m³]
Januar	20,7	50	70	15,0	12,6
Februar	21,5	47	66	14,9	12,4
März	21,3	56	79	17,5	14,7

Österreich, Wien

230 m ü.M.
986 hPa

Monat	Ø-Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	relative Luftfeuchte ü.M. [%]	Ø-Taupunkt [°C]	absolute Luftfeuchte [g/m³]
Juni	19,5	65	67	13,2	11,2
Juli	21,4	64	66	14,8	12,4
August	21,0	65	67	14,6	12,3

Abb. 47: Übersicht Klimadaten Dorze und Wien

Spezifische Gegebenheiten der Lokalisierung

Für die Bestimmung der genauen Lokalisierung innerhalb der Stadt Wien wurden zunächst drei Standorte mit unterschiedlichen Gegebenheiten untersucht. Diese Areale waren die Donauinsel mit Bezug zum Wasser, der Wiener Prater mit einer direkten Anbindung zu Grünflächen und der Westbahnhof, dessen Umfeld weitestgehend versiegelt ist.

Die Wahl traf auf den Christian-Broda-Platz nahe dem Westbahnhof. Die Gründe für diese Entscheidung in Bezug auf die speziellen infrastrukturellen Gegebenheiten auf der einen Seite, und den damit verbundenen klimatischen Bedingungen auf der anderen Seite, werden im Folgenden genauer beleuchtet.

Infrastrukturelle Bedingungen Christian-Broda-Platz

Der Christian-Broda-Platz befindet sich wie schon erwähnt in unmittelbarer Nähe vom Westbahnhof in Wien. Der Westbahnhof stellt einen wichtigen Knotenpunkt für das Verkehrsnetz dar, da er den Endpunkt von allen regionalen Expresszügen darstellt.³³⁴ Zudem ist eine U-Bahn-Station direkt angebunden, was für das öffentliche Verkehrsnetz bedeutend ist. Aber auch für den Straßenverkehr stellt dieses Areal der Stadt eine wichtige Verbindung dar, da sich dort der Mariahilfer und der Neubaugürtel treffen. Diese Gegebenheiten stellen für die Bewohner_innen, aber auch Besucher_innen, von Wien die direkte Anbindung für Freizeitmöglichkeiten dar. Denn am Christian-Broda-Platz beginnt die kilometerlange Fußgängerzone Wiens, die ein abwechslungsreiches Angebot an verschiedenen Einkaufs- und Gastronomiemöglichkeiten beherbergt. Diese Punkte machen diese Lokalisierung zu einem Ort, an dem sich viele Menschen aufhalten. Für die Positionierung des Entwurfes ist dies von besonderem Vorteil, weil so die breite Masse erreicht werden kann.

³³⁴ vgl. WienTourismus, o. D.



Abb. 48: Lageplan, M = 1 : 2.500



Klimatische Bedingungen Christian-Broda-Platz

Die erhobenen Daten unter »Allgemeine klimatische Bedingungen Wien« stellen einen Mittelwert für die gesamte Stadt dar. Dabei befinden sich die einzelnen Bezirke aber teilweise in ziemlich unterschiedlichen Umgebungen und sind folglich auch bedingt unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Deshalb ist es nötig die klimatischen Bedingungen für den Ort des Vorhabens durch weitere Erhebungen zu präzisieren. Dafür wurden die erneut die Temperatur untersucht, aber auch Wind und Schatten, um anhand dieser Informationen wichtige Entwurfsentscheidungen treffen zu können.

Die Ergebnisse dieser Analysen werden im weiteren Verlauf genauer beschrieben.

Temperatur

Wie schon einleitend beschrieben wurden zu Beginn der Recherche drei Standorte während des Zeitraums von Juni 2021 bis September 2021 untersucht. Dafür wurden zusammenfassende Monatsübersichten verwendet, die den Verlauf von Temperatur und Taupunkttemperatur darstellen, da diese Rückschlüsse auf die Nebel- und Tauereignisse bieten. Im Fokus standen also die Zeitpunkte, in denen sich die Temperatur der Luft unterhalb der Taupunkttemperatur befindet.

Die Häufigkeit dieses Ereignisses war zwar am Wiener Prater deutlich höher, teilweise sogar fast viermal so hoch, aber dennoch fiel die Wahl des Standortes auf den Westbahnhof.

Dort trafen im Juni 2021 keine Zeiträume ein, die für das Sammeln für atmosphärisches Wasser geeignet gewesen wären.³³⁵ Im Juli 2021 konnten dafür sechs Tage, im August 2021 vier Tage und im September acht Tage festgehalten werden.³³⁶ Die vollständigen Wetterdaten befinden sich im Anhang unter »Wetter- und Klimadaten Wien, Christian-Broda-Platz«

Trotz oder eher auf Grund dieser Daten

³³⁵ vgl. Weather Underground, 2021
³³⁶ ebd.

wurde der Christian-Broda-Platz gewählt, da dort die klimatischen Bedingungen eine besonders große Herausforderung für alle Organismen darstellen und folglich Abhilfe geleistet werden muss.

Wind

In Wien ist es sehr windig, sodass es kaum einen Tag gibt, an dem man nicht mit Gegenwind rechnen kann.³³⁷ Es gibt Statistiken, die zeigen, dass es in den südlich und östlich gelegenen Stadtbezirken etwa 10 Tage windstill ist, im Norden und Westen der Stadt sogar nur drei bis vier windstille Tage im Jahr.³³⁸ Auf Grund der Lage von Wien am Ostrand der Alpen, am östlichen Übergang zum Alpenvorland, welches zur Pannonischen Tiefebene führt, entstehen die Hauptwindrichtungen West bis Nordwest und Südost.³³⁹ Der Wind kommt an über 160 Tagen im Jahr aus west-nordwestlicher Richtung und an etwa 40 Tagen jährlich aus Südosten.³⁴⁰

Die Erhöhungen des Wienerwaldes, die die Stadt im Westen umgeben, stellen eine Barriere für den dort ankommenden Wind dar, sodass dieser entlang der Donau oder im Wiental gelenkt wird, weshalb der Wind verstärkt in die Stadt strömt.³⁴¹ In der südöstlichen Region ist das Umland so flach, dass es kein Hindernis für den Wind darstellt, weshalb es nur selten zu Windereignissen aus dieser Richtung kommt.³⁴² Kommt es allerdings im Sommer zu Wind

337 vgl. Kiss, 2018

338 ebd.

339 vgl. Stadt Wien, *Windpotentialkataster*, o. D.

340 vgl. Kiss, 2018

341 ebd.

342 ebd.

aus Südost, bringt er heiße Luft aus der ungarischen Tiefebene mit sich.³⁴³

Die einzelnen Windpotentiale innerhalb der Stadt Wien können mit Hilfe eines Windpotentialkatasters für bestimmte Orte bestimmt werden.³⁴⁴ Untersucht man nun die Gegebenheiten am Christian-Broda-Platz stellt man fest, dass es entlang der Mariahilfer Straße, die von Westen her kommt, eine Art Windschneise gibt, die den Platz umhüllt. Laut dem Windpotentialkataster liegt dort ein mittelmäßiges Windenergiepotential vor, dass sich in einem Bereich zwischen 2,5 m/s und 4 m/s bewegt, aber auch größer ausfallen kann.³⁴⁵ Da es in Wien aber auch immer zu Stürmen mit hohen Windgeschwindigkeiten kommt, wurden diese Ereignisse auch untersucht.

In den Monaten von Juni 2020 bis September 2020 lag die mittlere Windgeschwindigkeit zwischen 10 km/h und 15 km/h.³⁴⁶ Es gab aber auch etwa 14 stürmische Tage mit Windgeschwindigkeiten von maximal 85 km/h.³⁴⁷ Im gleichen Zeitraum im Jahr 2021 lag die mittlere Windgeschwindigkeit zwischen 10 km/h und 13 km/h und die

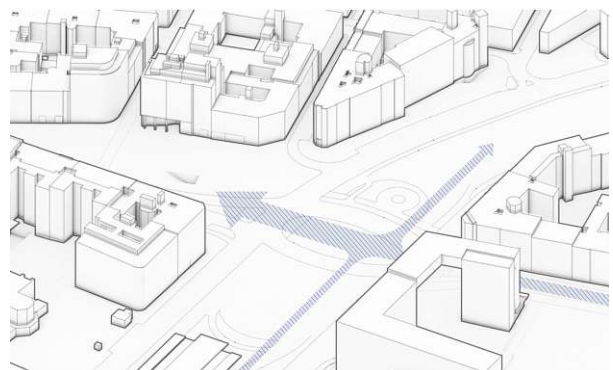


Abb. 49: Windeinwirkung Christian-Broda-Platz

Anzahl der stürmischen Tage verzeichnete ebenfalls 14 Tage, jedoch mit Geschwindigkeiten von 60 km/h bis 82 km/h.³⁴⁸

³⁴³ ebd.

³⁴⁴ vgl. Stadt Wien, *Windpotentialkataster*, o. D.

³⁴⁵ ebd.

³⁴⁶ vgl. Stadt Wien, *Wind Februar 2020 bis Februar 2022*, 2022

³⁴⁷ ebd.

³⁴⁸ ebd.

Schatten

Da die Hitzetage in Wien wie erwähnt immer weiter zunehmen, ist das Vorkommen von verschatteten Flächen besonders von Bedeutung. Denn der Aufenthalt im Freien wird für alle Lebewesen an solchen Tagen zunehmend anstrengender, besonders für Kinder und ältere Personen.³⁴⁹ Ideal zum Schattenspenden wären Bäume, doch auf Grund der unter dem Gehweg verlegten Leitungen, ist der benötigte Wurzelraum oft nicht gegeben.³⁵⁰

Die Gegebenheiten am Christian-Broda-Platz zur Entstehung von Schatten sind während der heißen Sommermonate durch die Platzierung der Gebäude äußerst ungünstig. Hat man zwar vormittags noch Schatten, den die Gebäude südöstlich des Platzes erzeugen, sieht dies mit tags ganz anders aus. Die Sonne wandert Richtung Westen und strahlt auf das nahezu ungeschützte Areal. Grund hierfür ist die Verkehrszone des Mariahilfer Gürtels. Das Ausbleiben der Verschattung reicht bis in die Abendstunden.

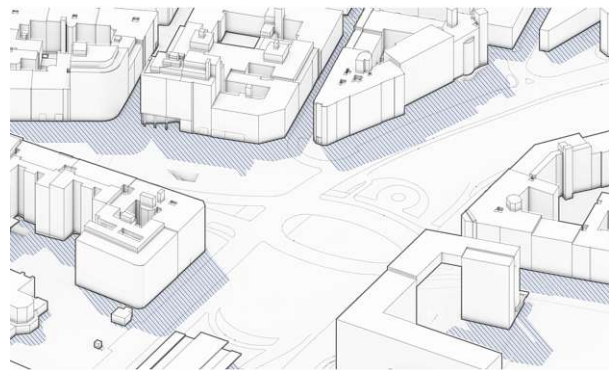


Abb. 50: Sonnenstand 9:00 Uhr

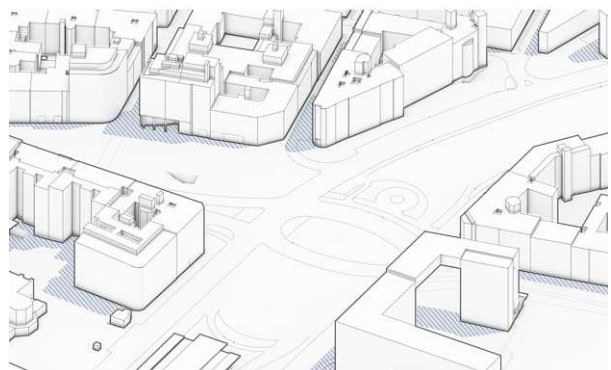


Abb. 51: Sonnenstand 13:00 Uhr

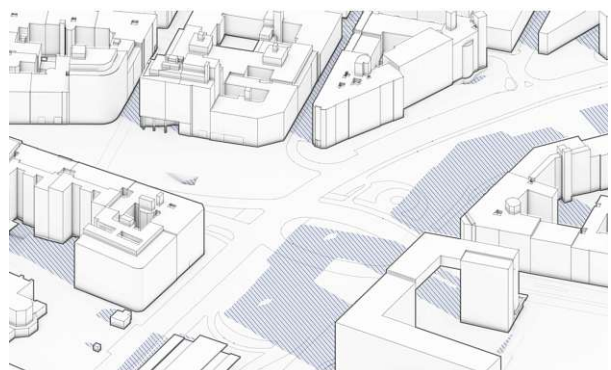


Abb. 52: Sonnenstand 17:00 Uhr

³⁴⁹ vgl. Stadt Wien, *Wiener Schatten - Abkühlen von Straßen, Gassen und Plätzen*, o. D.

³⁵⁰ ebd.



Entwurf

In den vorherigen beiden Teilen der Arbeit, »Grundlagen« und »Standort«, wurden Informationen erhoben, die nun im Folgenden dritten Teil der Arbeit in Form eines Entwurfes zusammengefasst werden. Dieser stellt eine mögliche Interpretation der Herausforderung in Bezug auf Wassergewinnung sowie Kühlung dar.

Der weitere Teil behandelt vier Unterpunkte. Zu Beginn wird das entwickelte Konzept beschrieben, dann die Wahl der Materialisierung vorgestellt, die daraus resultierende strukturelle Beschaffenheit sowie deren Funktionen werden zudem erklärt. Den Abschluss dieses Entwurfsteils und auch der gesamten Arbeit bildet ein Fazit und der sich daraus ergebende Ausblick.

Konzept

Das Konzept setzt sich aus einigen Leitgedanken zusammen. Im Vordergrund steht die Entwicklung eines passiven Systems, das sowohl die Gewinnung von Wasser als auch die Kühlung des städtischen Raumes leisten kann.

Die Materialien, die für die Umsetzung eingesetzt werden, sollen natürlichen Ursprungs sein und entweder aus recycelten Elementen bestehen oder nach der Nutzung recycelt werden können.

Der Entwurf sollte so konzipiert sein, dass die Struktur dazu fähig ist sich den vorhandenen Gegebenheiten durch Veränderung eigenständig anzupassen. Zudem sollte das Gefüge in sich stabil sein, sodass keine zusätzliche Befestigung in irgendeiner Form notwendig ist. Dadurch soll ein dauerhafter Fußabdruck vermieden werden. Ein Vorteil dieser Konstruktionsweise ist, dass die Struktur »wandern« kann und somit an verschiedenen Orten, nicht nur innerhalb Wiens, auf die Problematik der Wasserressourcen und der damit zusammenhängenden Temperatursteigerung aufmerksam kann und als Diskussionsgrundlage dienen kann.

passives System

Gewinnung von
Wasser

Kühlung der
Stadt

Verwendung
natürlicher Materialien
up- / recyceln

Anpassung an vorhan-
dene Gegebenheiten

kein Fußabdruck

Wander-Struktur

Diskussionspunkt

Materialisierung

Bei der Wahl der Materialien wurde, wie zuvor schon erwähnt, großen Wert auf den Lebenszyklus der Rohstoffe gelegt. Hauptwerkstoff der Konstruktion ist Aluminium, da dessen Eigenschaften die beste Lösung für die Entwurfsaufgabe darstellen. Auf Grund der physikalischen Zusammensetzung besitzt es eine hohe Wärmeleitfähigkeit, ein sehr geringes Gewicht und ist außerdem noch stabil.³⁵¹ Diese Merkmale haben zum einen positiven Einfluss auf die Temperatur der Komponenten, da sie wegen ihrer Wärmeleitfähigkeit in der Lage sind Wärme sehr lange zu speichern und andersherum Kälte abzugeben. Somit ist es möglich nicht nur während der Nacht Wasser zu gewinnen, sondern auch während der frühen Morgenstunden, wenn die Umgebungstemperatur langsam steigt. Stabilität ist ebenfalls eine Stärke von Aluminium, was in Zusammenhang mit den windigen Gegebenheiten in Wien auch von Vorteil ist.

Eine weitere Eigenschaft ist die Verwertung, da es auf diese Weise gut recycelt beziehungsweise »upgecycelt«, also in nur bedingt abgewandelter Form, wiederver-

wendet werden kann. Die Verarbeitungsmöglichkeiten von Aluminium sind auf Grund der weichen Beschaffenheit zudem sehr umfangreich, weil es dadurch sehr gut verarbeitet werden kann. Es kann sowohl das Verfahren des Strangpressens als auch des Auswalzens problemlos eingesetzt werden.³⁵² Aus diesem Grund kann nahezu die gesamte Konstruktion aus Aluminium hergestellt werden. Für das Tragwerk kommen Stangen in rechteckigem oder L-förmigem Querschnitt zum Einsatz, zur Sammlung von atmosphärischem Wasser wird ein Aluminiumnetz verwendet. Dieses Netz muss neben den unter »Netzarten und deren Vergleich« genannten Eigenschaften, wie UV-Beständigkeit, für die Umsetzung der Entwurfsaufgabe auch hoch knitterfähig sein.

Das Wasser, das mit Hilfe der Struktur gewonnen wurde, soll dafür genutzt werden, den städtischen Raum zu kühlen. Dafür werden Baumwolltextilien verwendet, die ebenfalls »upgecycelt« und anschließend recycelt werden können.

Um die Struktur vor möglichen Kippbewegungen durch starke Umwelteinflüsse

zu schützen, wird noch ein dritter Werkstoff verwendet. Beton soll das nötige Gewicht am Boden der Konstruktion sorgen. Außerdem besitzt Beton, ähnlich wie Aluminium auch, die Qualität Wärme zu speichern und Kälte abzugeben.³⁵³ Diese Eigenschaft kann auch erhebliche Auswirkungen auf das Temperaturgeschehen haben. Beton ist außerdem sehr belastbar, zudem unempfindlich gegenüber Einflüssen wie Witterung und Feuchtigkeit, was zu enormer Langlebigkeit der Elemente führt.³⁵⁴

353 vgl. Baunetz Wissen, *Der Baustoff Beton und seine Eigenschaften*, o. D.

354 vgl. Beton Dialog Österreich, o. D.

Zonierungsprinzip

Um den Entwurfsgedanken und den einzelnen Konzeptpunkten möglichst gerecht zu werden, wurde die Struktur in zwei Abschnitte geteilt. Eine der Zonen dient dabei zur Wassergewinnung nachts und während der frühen Morgenstunden und der direkt daran anschließende Bereich nutzt dann wiederum tagsüber das gewonnene Wasser zur Kühlung der Stadt. Ein Vorteil der Unterteilung ist die individuelle Anpassung der Komponenten an die vorhandenen Gegebenheiten. Der Prozessablauf sieht also vor, dass die Wassergewinnungs-Zone im oberen Bereich liegt und das Wasser dann, bedingt durch die Schwerkraft, in die unten gelegene Kühl-Zone übergeht.

Die obere Zonierung ist nochmals geteilt und setzt sich aus zwei Segmenten zusammen. Zum einen sind da Gitterschalen, die eine blütenartige Struktur ausbilden, und durch ihre hohe Anbringung wohl das meiste Wasser gewinnen kann. Darunter befindet sich eine hyperbolische Struktur, die eine innere und eine äußere Konstruktionsebene besitzt.

Die untere Zone lässt einen Raum entste-



Abb. 53: Axometrische Darstellung Zonen

hen, der durch Stangen besteht, an denen Textilien angebracht sind. Diese Textilien dienen im nassen Zustand Möglichkeit zur Verdunstungskühlung.

Platziert ist das Ganze auf einem Fundament, das aus vier Betonfertigteilen besteht und mit Vertiefungen versehen ist, die wie eine Art Auffangschale funktionieren. In den Rinnen kann das gesammelte Wasser oder auch Regenwasser aufgefangen werden.

Gestaltung der Zonen

Die höchstgelegenste Zone besteht aus sieben gitterschalenartigen Blättern, die atmosphärisches Wasser in einer Höhe von über 10 m sammeln. Da in diesen Höhen wie beschrieben teilweise sehr hohe Windgeschwindigkeiten gemessen werden können, muss die Struktur die Fähigkeit besitzen sich ab einer gewissen Windgeschwindigkeit zu verändern. Um eine geringere Windeinwirkung verzeichnen zu können, muss die Oberfläche des Gefüges minimiert werden. Windgeschwindigkeiten bis zu 30 km/h wurden dabei als Normalzustand definiert. Geschwindigkeiten darüber bis zu einem Maximalwert von 120 km/h sollten die Gitterschalen standhalten.

Diese bestehen aus rechteckigen Stangen aus Aluminium, die entlang von geodätischen Linien verlaufen. Geodätische Linien sind die Linien, die automatisch einen Querschnitt um seine schwache Achse verkrümmt, niemals jedoch um seine starke Achse.³⁵⁵ Der Querschnitt der Elemente ist so gewählt, dass sie sich bis zu einem gewissen Radius verbiegen können, ohne zu brechen.

Die einzelnen Blätter funktionieren so, dass sich die einzelnen Stangen mit Hilfe des Scherenprinzips in Abhängigkeit voneinander bewegen können.

Um die Anpassung bei hohen Windstärken vollziehen zu können, kommt es zu einer Proportionsänderung der Blätter. Diese »strecken sich«, nehmen an Höhe zu und verringern ihre Breite. Damit dieser Mechanismus funktioniert, sind jeweils die obere und untere Ecke der Schalen über eine Teleskopstange mit Gasdruckfeder miteinander verbunden. Gleiches gilt auch für die beiden seitlichen Eckpunkte, allerdings mit dem Zusatz, dass diese auch noch mit den benachbarten Blättern verbunden sind, zu sehen in Abb. 54. Es gibt hier also zwei Teleskopstangen, die auf einen Punkt wirken. Die, die sich innerhalb der Fläche befindet, ist im Normalzustand gedehnt, die außerhalb ist zusammengezogen.

Wirkt nun der Wind auf die Außenfläche der Aluminiumstäbe, gibt die Struktur nach, die Feder in der vertikalen Teleskopstange dehnt sich aus und die horizontale Feder wird zusammengedrückt. Als Re-

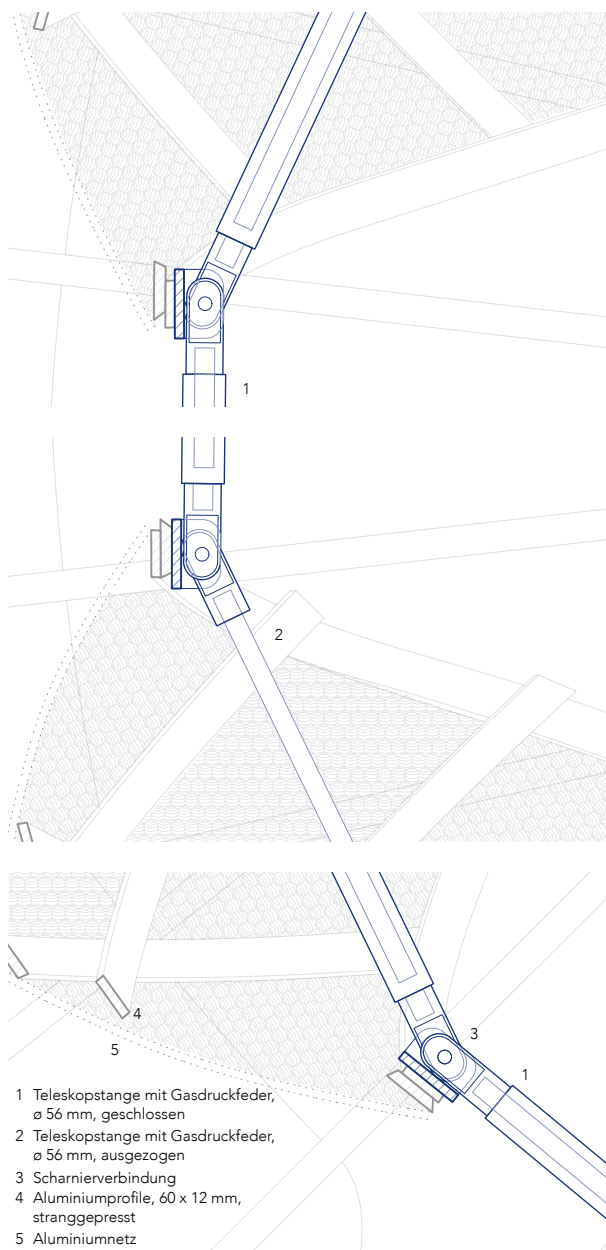


Abb. 54: Horizontalschnitt Gitterschalen, M = 1 : 10

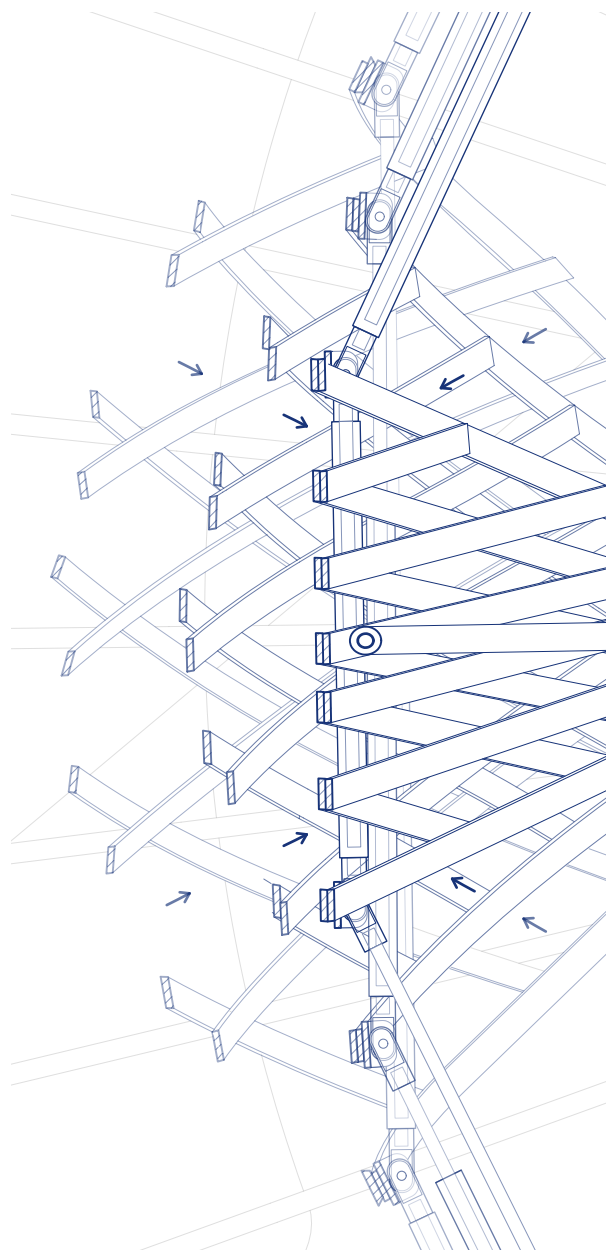


Abb. 55: Bewegungsmechanismus Gitterschalen, Horizontalschnitt, M = 1 : 10

aktion darauf, dehnt sich die Feder der horizontalen Stange, die als Verbindung zwischen den Blättern dient, aus und es kommt zu der gewünschten Anpassung und Minimierung der Windanströmfläche, siehe Abb. 55. Die resultierende Form ist ein flaches Element, ohne jegliche Krümmung. Lässt nun der Wind wieder nach, gelangen die Gasdruckfedern der Teleskopstangen wieder in ihre Ausgangsposition und die Aluminiumelemente nehmen wieder ihre gekrümmte Erscheinung an. Jene gleichmäßige Bewegung und Kontraktion beziehungsweise Relaxation des Gefüges hat Ähnlichkeit mit einem Atemzug und verleiht der Struktur Lebendigkeit. Von außen ist ein Netz, das wie beschrieben ebenfalls aus Aluminium besteht, über die Gitterschalen gespannt. Für die Einhängung davon wurden über das Verfahren des Strangpressens kleine Erhebungen ausgebildet, an denen das Netz, ähnlich wie der Druckknopf-Mechanismus, mit einem passenden Gegenstück festgedrückt werden kann. Damit das Netz der Bewegung der Struktur mittels Scherenprinzip standhalten kann, muss es eine

ausgeprägte Knitterfähigkeit besitzen. Befindet sich die Komposition in geschlossenem Zustand, muss sich das Netz entlang der Zwischenräume zusammenfallen können, ohne dabei beschädigt zu werden. Damit sich die Stangen entlang der Teleskopstange bewegen können, befindet sich dort eine bewegliche Scharnier-Verbindung, siehe Abb. 56. Gleiches gilt auch für den unteren Punkt, zu sehen in Abb. 58. Dieser hat aber zusätzlich noch die Aufgabe, die Teleskopstange in einer starren Position zu halten und zudem mit dem restlichen Teil der Struktur zu verbinden. Dies geschieht mit Hilfe eines adaptierten T-Profils, welches über eine Öffnung zur Verschraubung der Teleskopstange verfügt. Dieses Profil liegt auf drei Ringen, die den oberen Abschluss des zweiten Teiles darstellen, auf und ist auch damit durch Verwendung eines Bolzens verbunden. Die sieben Blätter sind entlang der Ringe mit etwa 8,10 m Durchmesser gleichmäßig verteilt. Der äußere sowie der mittlere dieser Ringe bestehen aus einem Aluminiumelement, das wegen seiner Steifigkeit in L-Form

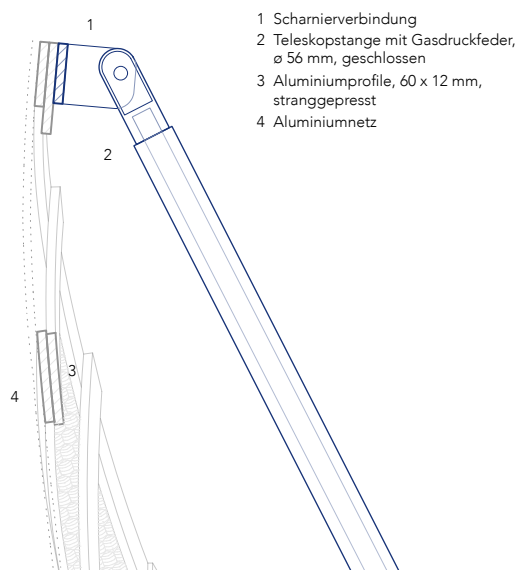


Abb. 56: Oberer Anschlusspunkt Gitterschale, $M = 1 : 10$

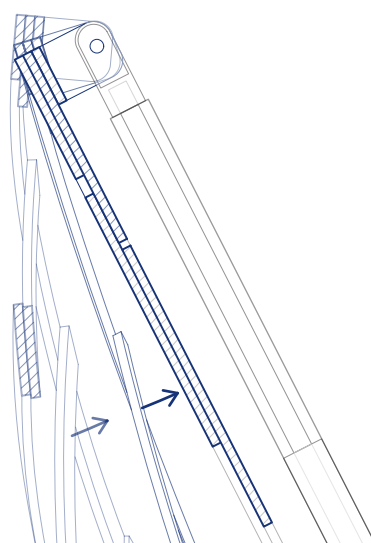


Abb. 57: Bewegungsmechanismus oberer Anschlusspunkt Gitterschale, $M = 1 : 10$

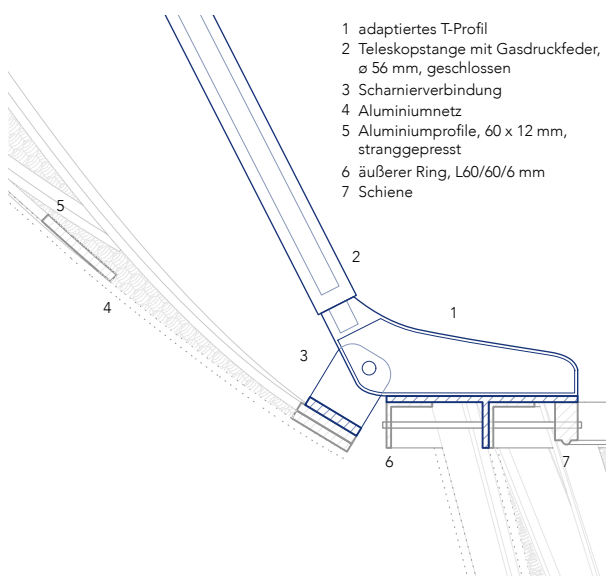


Abb. 58: Unterer Anschlusspunkt Gitterschale, Verbindung mit Hyperboloidstruktur, $M = 1 : 10$

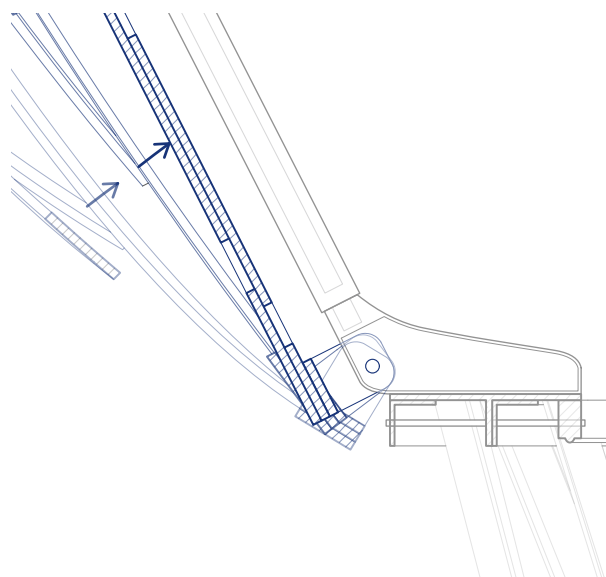


Abb. 59: Bewegungsmechanismus unterer Anschlusspunkt Gitterschale, $M = 1 :$

ausgebildet ist. Zwischen diesen Bauteilen befinden sich 28 Stäbe, die ebenfalls ein L-Profil besitzen, und ebenfalls mittels Bolzen mit den Reifen verbunden sind. Diese Stangen sind so positioniert, dass sie eine hyperbolische Struktur in der Höhe von 6 m ergeben. Die Hyperboloidkonstruktion besitzt einen Rotationswinkel von 90° . Der innenliegende und somit dritte Ring ist eine Schiene mit Teflonbeschichtung, siehe Abb. 60. Im Zwischenraum des mittleren und inneren Reifens sind ebenfalls 28 L-förmige Elemente platziert, jedoch um etwa 13° rotiert. Grund für die Rotation ist die Verdichtung der äußeren Lage. Die L-Profile besitzen im Vergleich zu der äußeren Stangenschicht nicht die gesamte notwendige Länge, sondern sind in drei Abschnitte unterteilt. Auf diese Art und Weise kann die innere Elementschicht in drei voneinander unabhängige Teile gegliedert werden, die im Einzelnen weniger Gesicht besitzen. Das ist ein wichtiger Faktor, denn ähnlich wie der obere Bereich der Wassergewinnungs-Zone soll sich auch die hyperbolische Struktur den Windgegebenheiten anpassen können. Die nor-

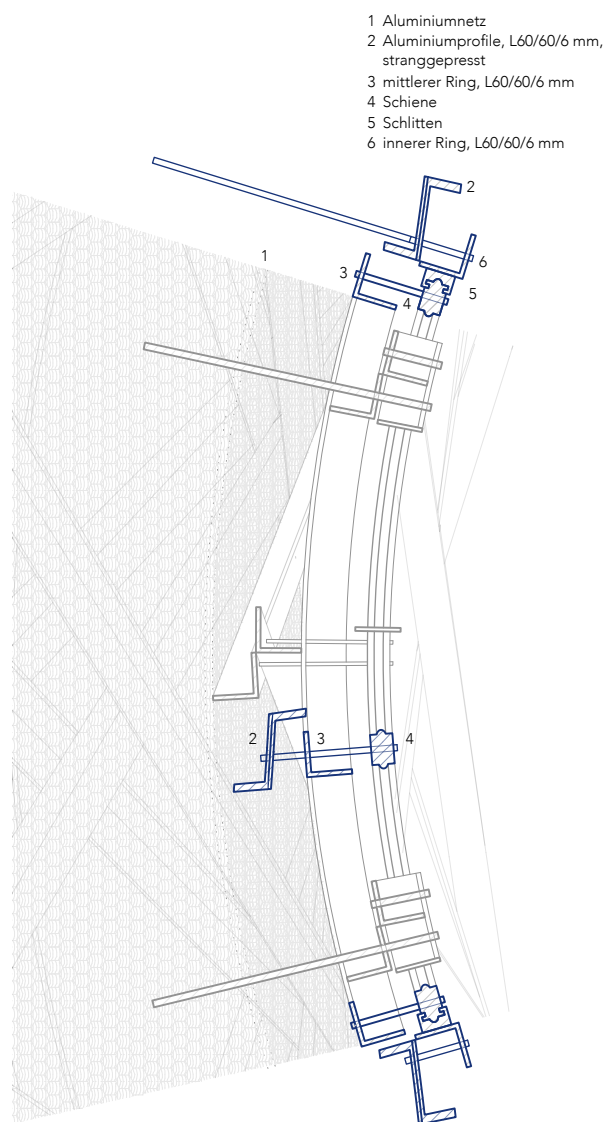


Abb. 60: Horizontalschnitt Hyperboloidstruktur,
 M = 1 : 10

male Windgeschwindigkeit wurde auch hierfür mit bis zu 30 km/h definiert. Die Veränderung der Struktur beginnt, wenn diese Geschwindigkeit höher ausfällt und ist ebenfalls dazu in der Lage 120 km/h standzuhalten.

Kommt es nun zu starken Windereignissen beginnen sich die drei inneren hyperbolischen Stabwerke entlang der Schienen zu bewegen. Den oberen und unteren Abschluss der Abschnitte bilden Ringe mit L-Profil, die wiederum auf einer Art Schlit-

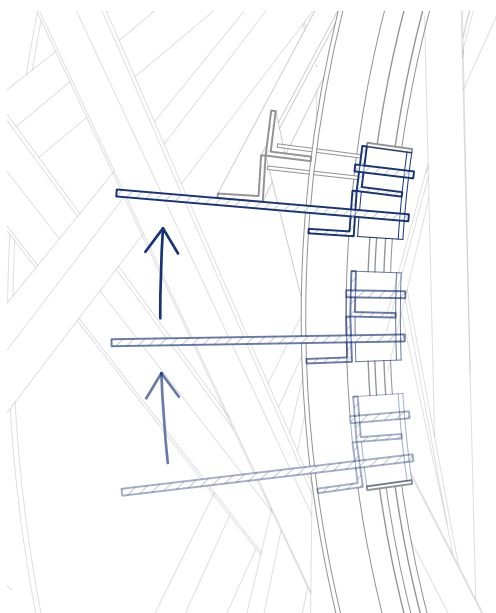


Abb. 61: Bewegungsmechanismus Hyperboloidstruktur, $M = 1 : 10$

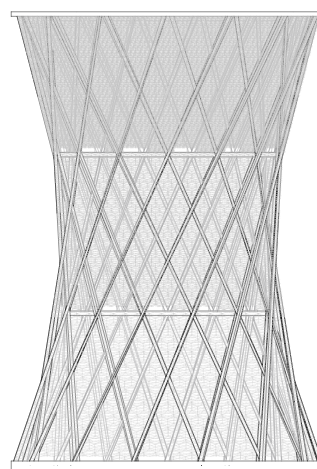


Abb. 62: Geschlossene Hyperboloidstruktur, $M = 1 : 100$

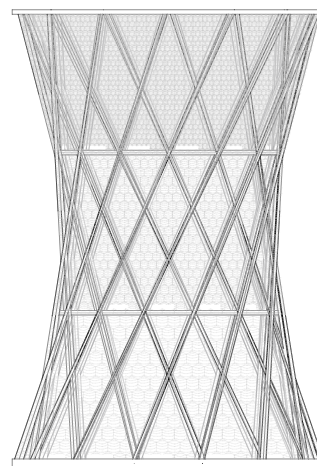


Abb. 63: Offene Hyperboloidstruktur, $M = 1 : 100$

ten befestigt sind. Am Schlitten, der den unteren Abschluss darstellt, ist zusätzlich noch ein lineares, horizontal verlaufendes Element befestigt, das als Windanströmfläche dient und die Bewegung antreibt. Start- und Endpunkt der zu bewältigenden Strecke sind jeweils mit einer Begrenzung versehen. Der Großteil, der sich dazwischen befindenden Schiene, ist im Inneren mit einer Aussparung versehen, die Raum für eine Feder bietet. Durch die Entfernung des Schlittens vom Startpunkt wird diese zunehmend ausgedehnt. Somit können sich die Schlitten entlang der Schienen bis zu dieser Begrenzung bewegen und verschwinden nahezu vollständig hinter der äußeren Struktur, siehe Abb. 61. Mit dieser Anpassung kann die Windanströmfläche um knapp 50 % minimiert werden, zu sehen in Abb. 63. Lässt der Wind nach, zieht sich die Feder wieder zusammen und die Schiene fährt wieder auf die Ausgangsposition.

An den Stellen, wo die drei Abschnitte aufeinandertreffen, ist die Schiene so ausgebildet, dass sie auf beiden Seiten über eine Führungsbahn verfügt.

Im Vergleich zu dem oberen Anschlusspunkt gibt es an dieser Schnittstelle nicht zwei, sondern lediglich einen weiteren Ring, mit dem die Schiene verbunden ist. Ebenso wie bei den blätterartigen Gitterschalen, befindet sich auf der Außenseite der einzelnen hyperbolischen Stabwerke auch ein Aluminiumnetz, das zur Gewinnung von atmosphärischem Wasser genutzt wird. Das Netz ist dabei jeweils an den außenliegenden Profilen befestigt, die ebenfalls mittels Strangpressverfahren

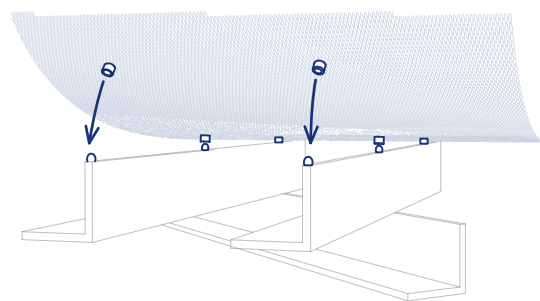


Abb. 64: Prinzip Netzaufhängung, M = 1 : 8

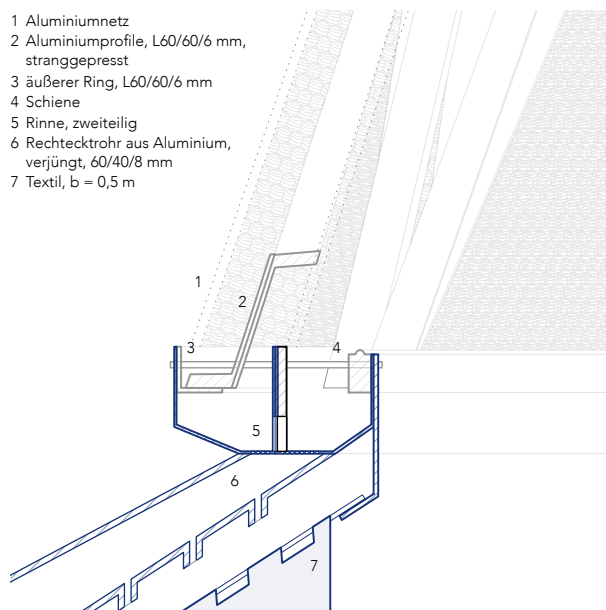


Abb. 65: Anschlusspunkt Hyperboloidstruktur mit Kühlungs-Zone, $M = 1 : 10$

mit kleinen Erhebungen versehen sind. Der Mechanismus beruht auch im unteren Teil der Wassergewinnungs-Zone auf dem Druckknopfprinzip.

Um durch die architektonische Formensprache der länglichen, runden Struktur die Möglichkeit der adiaten Kühlung nutzen zu können, besitzt das eingesetzte Netz, anders als bei den Gitterschalen, unterschiedliche Schattenkoeffizienten. Das in zwei Lagen verwendete Netz ist im unteren Bereich des hyperbolischen

Stabwerkes relativ windoffen. Mit zunehmender Höhe wird die Durchlässigkeit aber immer weiter minimiert, sodass der Kamineffekt als Resultat daraus entsteht, kalte Luft unten eingesaugt und heiße Luft durch die obere Öffnung abtransportiert werden kann.

Den unteren Abschluss der außen und innen liegenden Hyperboloidstruktur bilden wieder drei Ringe, ähnlich wie am oberen Ende. Anstelle des T-Profils, das für die Halterung der Teleskopstangen verwendet wurde, sind in diesem Bereich zwei Rinnen, in denen das gewonnene Wasser gesammelt werden kann, befestigt. An die Rinnen schließen direkt hohle Rechteckrohre an, in die das Wasser hineinlaufen kann, siehe Abb. 65. Diese hohlen Elemente sind so ausgebildet, dass sie über einzelne Öffnungen verfügen, über die das Wasser auf die verwendeten Textilien tropfen kann. Die Textilien sind am oberen Ende zu einer Art Schlaufe ausgebildet, in der eine dünne Stange gefädelt ist. Diese Stange ist in einer Aufhängevorrichtung, die ebenfalls in die Bolzenverbindung eingespannt ist, befestigt. Über die restliche

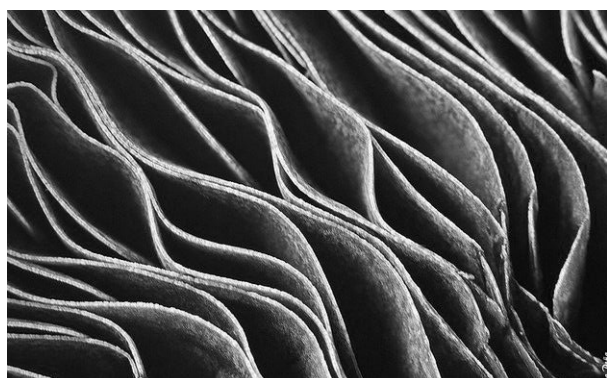


Abb. 66: Abstrakte Darstellung Textilbewegung

Länge des Stoffes von etwa 3,50 m befinden sich in einem regelmäßigen Abstand Ösen, die eine Verbindung zu den Rechteckrohren erlauben. Das Gewebe besitzt nur an der oberen Seite eine Verstärkung durch den Einsatz der dünnen Stange, weil es sich seitlich durch Windeinwirkung bewegen können soll, um so der Struktur noch mehr Lebendigkeit zu verleihen, siehe Abb. 66.

Das untere Ende des rechteckigen Rohres wird in eine Aussparung im Fundament, die mit einem Dorn versehen ist, eingefädelt. Auf Höhe der Oberkante des Sockels besitzt das Rechteckrohr eine letzte Öffnung, durch die das Wasser aus dem Element auf die Oberfläche der Plattform

gelangen kann.

Das Fundament besteht aus vier Betonfertigteilen, die wie unter »Zonierungsprinzip« beschrieben, über Vertiefungen verfügen, die sich über die gesamte Größe hinweg verteilen und als Auffangschale von Wasser dienen. Die Länge des Textils ist dabei so gewählt, dass es sich innerhalb dieser Einbuchtungen befindet, um so auch von unten Wasser aufzusagen. Beton ist zwar äußert robust und nicht sonderlich anfällig für Witterungsschäden, dennoch besitzen

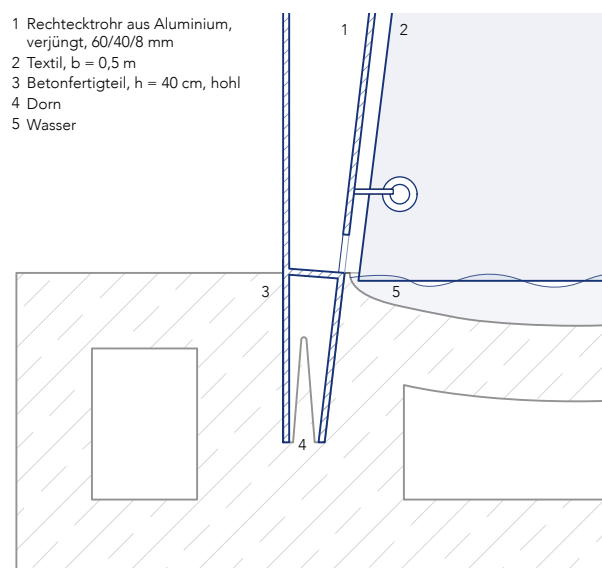
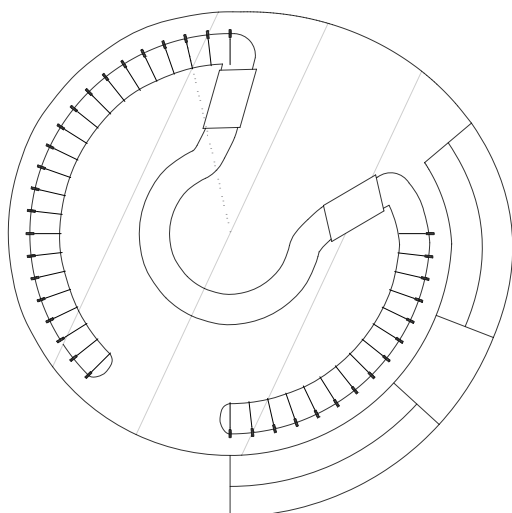


Abb. 67: Anschlusspunkt Kühlungs-Zone mit Fundament, M = 1 : 10

die Einzelteile eine Schicht aus Wachs zur Imprägnierung. An den Stellen, wo es zu Fugenbildung kommt, wird der Rohstoff Lehm eingesetzt, der anschließend ebenfalls mit Wachs beschichtet wird. Verknüpft sind die länglichen Elemente an ihren Längsseiten mit Verbindern, an den Querprofilen werden sie mit Stahlseilen miteinander verbunden.

Die Verteilung der einzelnen Gefüge aus Rechteckrohr und Textil auf dem Fundament ist dabei so gewählt, dass sie an der

Ausrichtung der Hauptwindrichtungen Nord-West, West und Süd-Ost orientiert sind. Auf diese Weise entstehen auf zwei Seiten Öffnungen, die als Zugänge zur Struktur genutzt werden können. Zu der größeren Öffnung schließt eine Rampe an, die eine rohlstullgerechte Steigung besitzt. Auch auf dem Fundament ist die Wegführung durch Pfade in entsprechender Breite und Überfahrmöglichkeiten der Vertiefungen gegeben.



ø Fundament: 8,10 m

Abb. 68: Horizontalschnitt Kühlungs-Zone,
M = 1 : 150



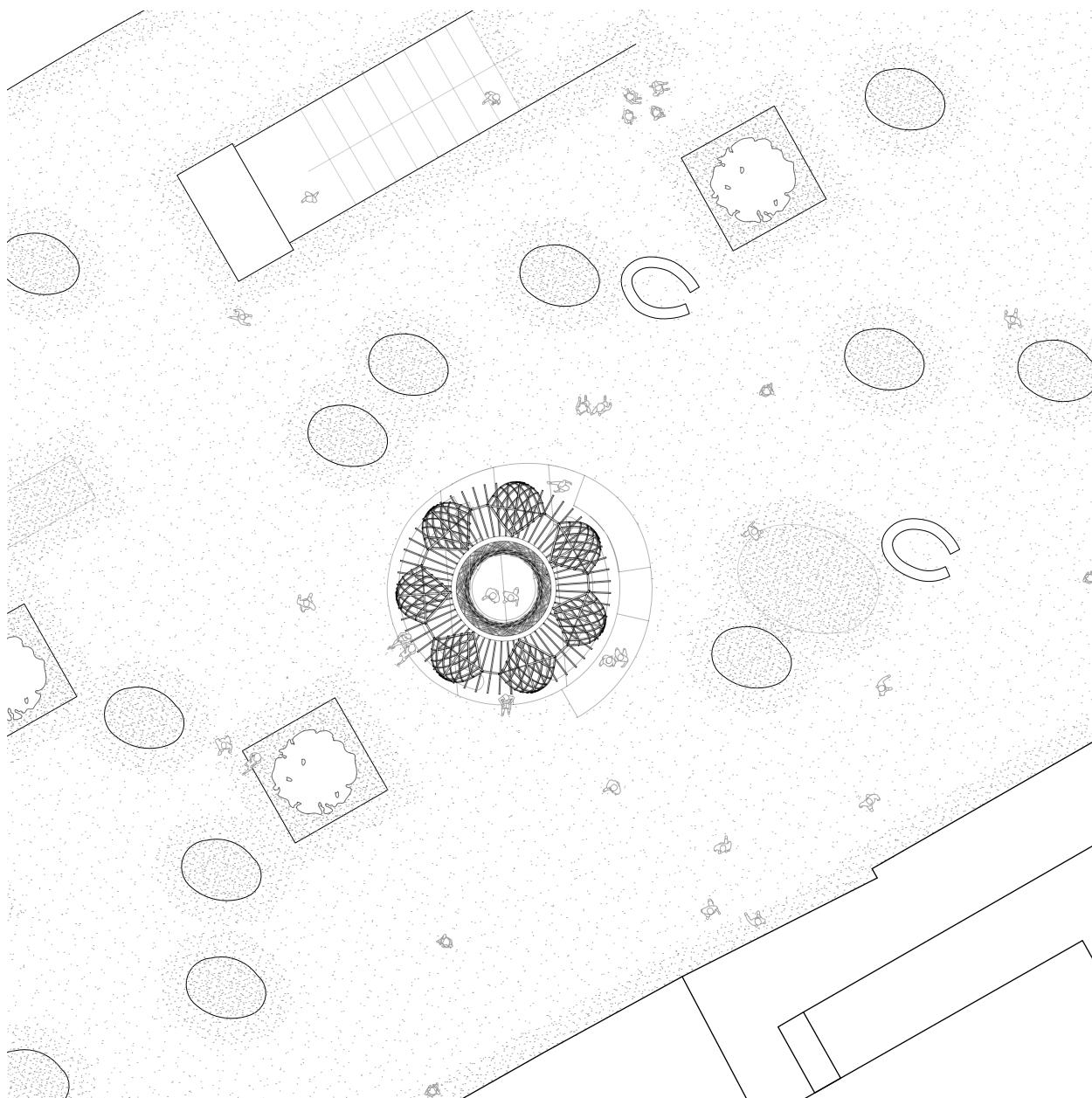


Abb. 69: Lageplan, M = 1 : 250



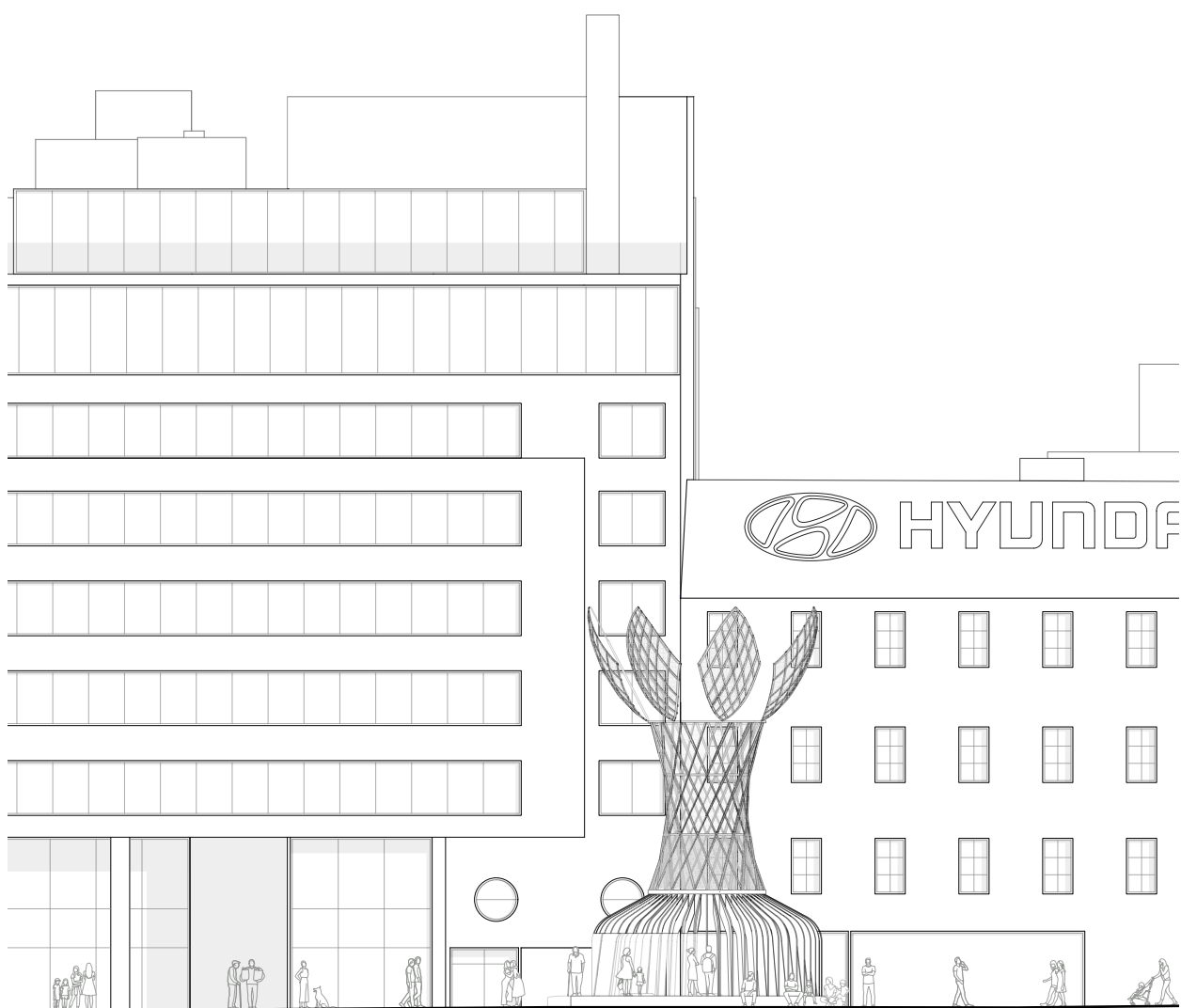


Abb. 70: Ansicht Nord-West, M = 1 : 250

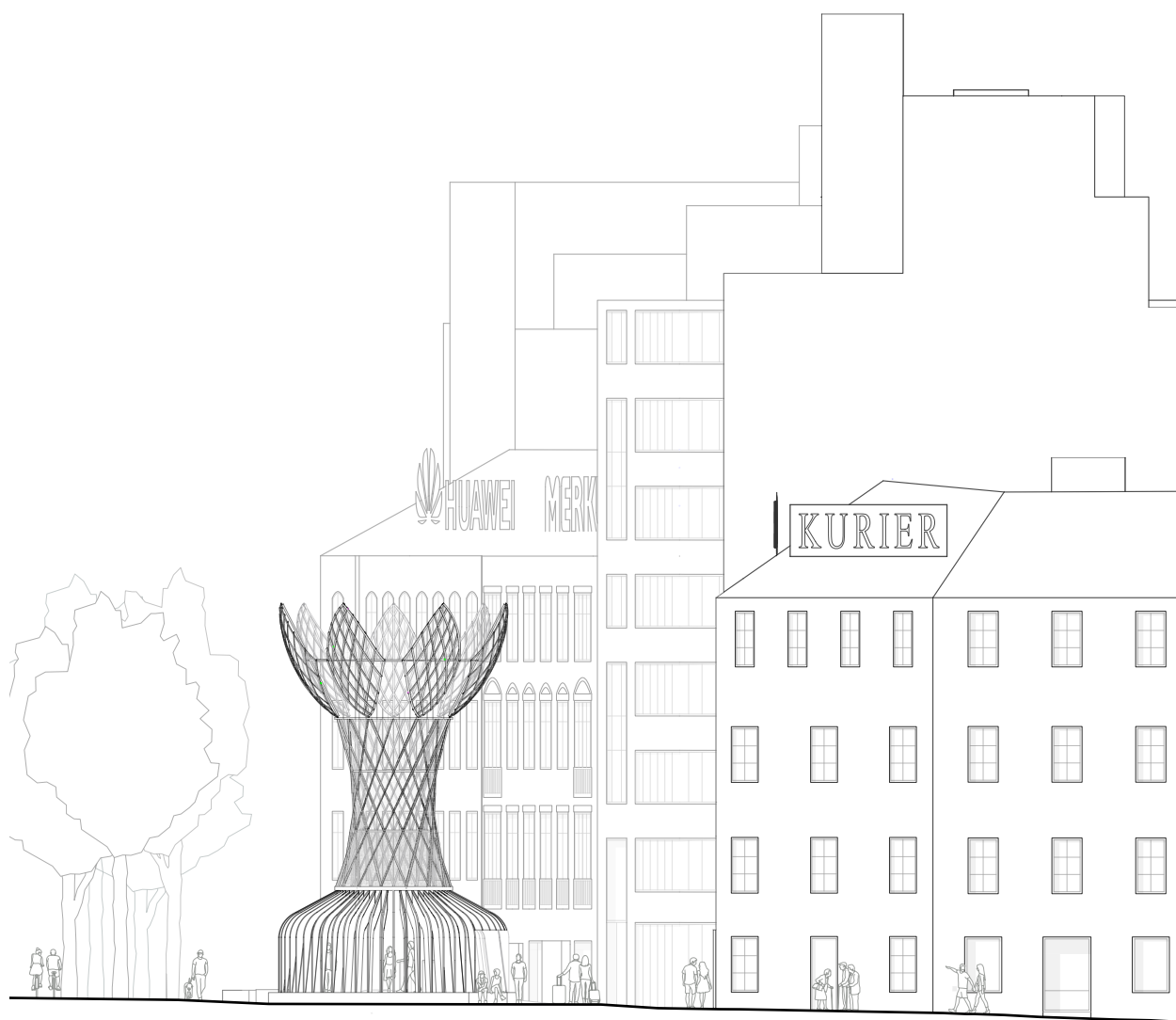


Abb. 71: Ansicht Süd-West, M = 1 : 250

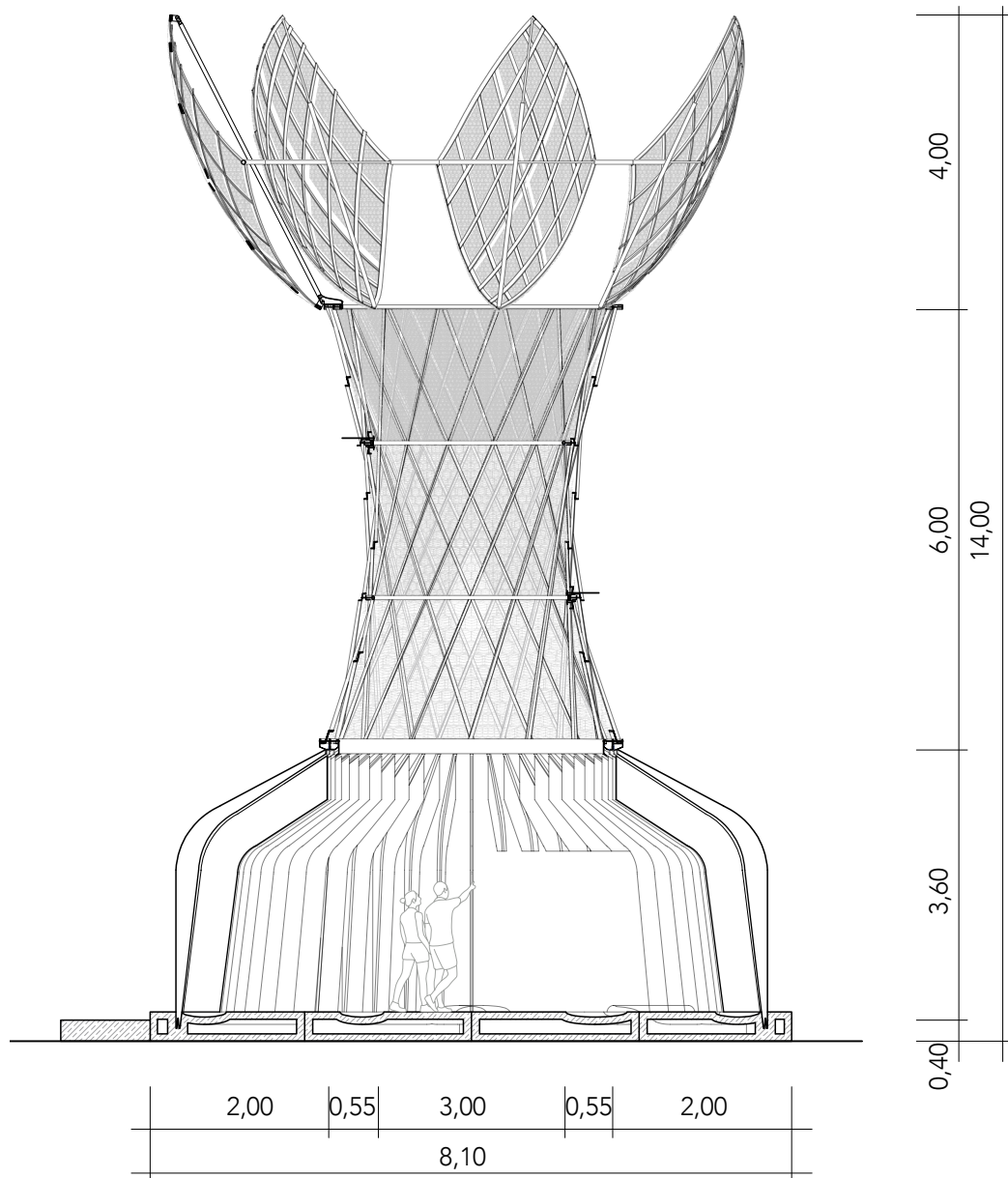


Abb. 72: Horizontalschnitt, M = 1 : 100

Fazit und Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass die Natur eine große Bandbreite an Möglichkeiten bereit hält, die der Menschheit bei der Bewältigung existierender Probleme und Herausforderungen behilflich sein können. Das Ausmaß der Konsequenzen menschlichen Handelns wird immer schwerwiegender und das, nicht nur für die Menschen selbst, sondern auch für alle anderen Organismen auf der Erde. Allerdings können Personen ohne weiteres ihren Standort ändern, für andere Geschöpfe gilt das jedoch nicht. Umso wichtiger erscheint es an Lösungen zu arbeiten, die große Leistung vollbringen können.

Das schon erwähnte Schlagwort Natur spielt dabei eine große Rolle. Denn in der Natur laufen die Prozesse ohne künstlich erzeugte Energie ab. Und dennoch kann sie mit ihren Strategien und Prinzipien große Effekte erzielen. Mit der Motivation die Natur etwas genauer zu analysieren, Prozesse und Verhaltensweisen zu verstehen, ergeben sich viele neue Möglichkeiten, die der Menschheit helfen können. Meist ist deren Ausgangspunkt ein einfacher Mechanismus, den es jedoch erst einmal

zu wissen gilt.

Überall auf der Erde gibt es atmosphärisches Wasser, dessen Nutzung herkömmliche Wasserquellen entlasten kann. Gerade in wohlhabenderen Ländern sollte auf diese Möglichkeit zurück gegriffen werden, da sie auch Auswirkung auf den Rest der Welt hat, vor allem Menschen, deren Lebensumstände sehr schwierig sind. Genutzt werden kann das gewonnene Wasser unter anderem als Trinkwasser, aber auch um Mechanismen zu betreiben, die durch Verdunstung den immer heißer werdenden städtischen Raum kühlen können.

In der heutigen Zeit, in der es so viele verschiedene Möglichkeiten durch den Einsatz von elektrischer Energie gibt, ist es umso wichtiger sich auf das Wesentliche zu berufen. Gerade weil die vorhandenen Ressourcen immer knapper werden und dies immer spürbarer wird, ist ein sofortiges Handeln erforderlich. Ein Umdenken der Gesellschaft hinsichtlich der Kreislaufprozesse der Natur muss geschehen. Besonders in der Architektur und dem Bauwesen ist ein neues Denken unumgänglich.



Literaturverzeichnis

- aqualionis. (o. D.). Abgerufen am 11. 10. 2021 von aqualionis: <https://www.aqualionis.com>
- as. (23. 12. 2019). Bionik und Biomimikry - wenn die Natur als Vorbild dient. Abgerufen am 29. 7. 2021 von Open Science - Lebenswissenschaften im Dialog: <https://www.openscience.or.at/de/wissen/umwelt-technik-landwirtschaft/2019-12-23-bionik-und-biomimikry-wenn-die-natur-als-vorbild-dient/>
- Azad, M. A. K. (2016). *Fog Collection on Plant Surfaces and Biomimetic Applications*. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Azeem, M., Guérin, A., Dumais, T., Caminos, L., Goldstein, R. E., Pesci, A. I., De Dios Rivera, J., et al. (2020). *Optimal Design of Multilayer Fog Collectors*. ACS Applied Materials and Interfaces, 12(6).
- Baunetz Wissen. (o. D.). Adiabate Kühlung. Abgerufen am 02. 12. 2021 von Baunetz Wissen: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/a/adiabate-kuehlung-680764>
- Baunetz Wissen. (o. D.). Der Baustoff Beton und seine Eigenschaften. Abgerufen am 12. 11. 2021 von Baunetz Wissen: <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/eigenschaften/der-baustoff-beton-und-seine-eigenschaften-150942>
- Baunetz Wissen. (o. D.). Innovative Low-Tech-Kühlung für Fabrik in Indien. Abgerufen am 23. 11. 2021 von Baunetz Wissen: <https://www.baunetzwissen.de/gebauedetechnik/tipps/news-produkte/innovative-low-tech-kuehlung-fuer-fabrik-in-indien-6944328>
- Baunetz Wissen. (o. D.). Kamineffekt. Abgerufen am 12. 11. 2021 von Baunetz Wissen: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/k/kamineffekt-48345>
- Baunetz Wissen. (o. D.). Warka Water: Bambusturm zur Trinkwassergewinnung in Äthiopien. Abgerufen am 16. 07. 2021 von Baunetz Wissen: <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/tipps/news-produkte/warka-water-bambusturm-zur-trinkwassergewinnung-in-aethiopien-5357045>
- Bernett, A. (17. 01. 2015). Biomimicry, Bioutilization, Biomorphism: The Opportunities

- of Bioinspired Innovation. Abgerufen am 29. 07. 2021 von Terrapin Bright Green: <https://www.terrapinbrightgreen.com/blog/2015/01/biomimicry-bioutilization-biomorphism/>
- Beton Dialog Österreich. (o. D.). Natürlich Beton. Abgerufen am 13. 02. 2022 von Beton Dialog Österreich: <https://baustoffbeton.at/natuerlichbeton/>
- Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. (o. D.). Was ist virtuelles Wasser? Abgerufen am 28. 11. 2021 von Durstige Güter: <https://www.durstige-gueter.de/was-ist-virtuelles-wasser/>
- Bundesverband Geothermie. (o. D.). Badgir. Abgerufen am 23. 11. 2021 von Bundesverband Geothermie: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/b/badgir.html>
- chemie.de. (2022). Elastizitätsmodul. Abgerufen am 28.. 02. 2022 von chemie.de: <https://www.chemie.de/lexikon/Elastizitätsmodul.html>
- chemie.de. (o. D.). Aluminium. Abgerufen am 12. 11. 2021 von chemie.de: <https://www.chemie.de/lexikon/Aluminium.html#Eigenschaften>
- chemie.de. (o. D.). Eigenschaften des Wassers. Abgerufen am 23. 11. 2021 von chemie.de: https://www.chemie.de/lexikon/Eigenschaften_des_Wassers.html
- chemie.de. (o. D.). Wasser. Abgerufen am 23. 11. 2021 von chemie.de: <https://www.chemie.de/lexikon/Wasser.html#Vorkommen>
- Chen, L., Zhang, X., Zhang, C., Raza, M., & Li, X. (2018). *Experimental Investigation of a Condensation Particle Counter Challenged by Particles with Varying Wettability to Working Liquid*. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(1).
- Clark Howard, B. (03. 07. 2013). 5 Natural Air-Conditioning Designs Inspired by Nature. Von National Geographic: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/130703-air-conditioning-biomimicry-natural-cooling> abgerufen
- Climate-Data.org. (o. D.). Klima Dorze (Äthiopien). Abgerufen am 22. 11. 2021 von Climate-Data.org: <https://de.climate-data.org/afrika/aethiopien/suedliche-nationen/>

dorze-55021/

Climate-Data.org. (o. D.). Klima Sidi Ifni (Marokko). Abgerufen am 22. 11. 2021 von Climate-Data.org: <https://de.climate-data.org/afrika/marokko/sidi-ifni/sidi-ifni-26355/>

Climate-Data.org. (o. D.). Klima Trnovac (Kroatien). Abgerufen am 22. 11. 2021 von Climate-Data.org: <https://de.climate-data.org/europa/kroatien/trnovac/trnovac-834398/>

Climate-Data.org. (o. D.). Klima Wien (Österreich). Abgerufen am 22. 11. 2021 von Climate-Data.org: <https://de.climate-data.org/europa/oesterreich/wien/wien-41/>

Colt. (o. D.). Wie funktioniert adiabatische Kühlung? Abgerufen am 02. 12. 2021 von Colt: <https://www.colt-info.de/wie-funktioniert-adiabatische-kuehlung.html>

Deutscher Wetterdienst. (o. D.). Absolute Feuchte. Abgerufen am 23. 11. 2021 von Deutscher Wetterdienst: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100072&lv3=100198>

Deutscher Wetterdienst. (o. D.). Klima. Abgerufen am 10. 10. 2021 von Deutscher Wetterdienst: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?jsessionid=F6CE636C89C93858A09D06006228119C.love31084?lv2=101334&lv3=101462>

Deutscher Wetterdienst. (o. D.). Klimaelemente. Abgerufen am 10. 10. 2021 von Deutscher Wetterdienst: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=101420>

Deutscher Wetterdienst. (o. D.). Luftdruck. Abgerufen am 23. 11. 2021 von Deutscher Wetterdienst: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101518&lv3=101614>

Deutscher Wetterdienst. (o. D.). Tauscheinungen. Abgerufen am 23. 11. 2021 von Deutscher Wetterdienst: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102672&lv3=102732>

- Deutscher Wetterdienst. (o. D.). Taupunkt. Abgerufen am 23. 11. 2021 von Deutscher Wetterdienst: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=102672&lv3=102734>
- Deutscher Wetterdienst. (o. D.). Wetter. Abgerufen am 23. 11. 2021 von Deutscher Wetterdienst: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=102936&lv3=103164>
- Ecodesign Kit. (o. D.). Grundlagen. Abgerufen am 23. 02. 2022 von Ecodesign Kit: <https://www.ecodesignkit.de/grundlagen/a1-ausgewaehlte-umweltwirkungsbe-reiche/a11-klimawandel/hintergrund-und-wirkmechanismen/>
- Energieleben. (08. 05. 2020). Profis am Wort: „Auf maßvolleren Umgang mit Ressourcen besinnen“. Abgerufen am 23. 11. 2021 von Energieleben.at: <https://www.energieleben.at/profis-am-wort-auf-massvolleren-umgang-mit-ressourcen-besin-nen/>
- engineeringforchange.org. (o. D.). Warka Water Tower. Abgerufen am 22. 11. 2021 von engineeringforchange.org: <https://www.engineeringforchange.org/solutions/product/warka-water-tower/>
- Eugster, W. (2008). *Fog Research*. Die Erde, 139.
- Fernandez, D. M., Torregrosa, A., Weiss-Penzias, P. S., Zhang, B. J., Sorensen, D., Cohen, R. E., McKinley, G. H., Kleingartner, J., Oliphant, A., & Bowman, M. (2018). *Fog water collection effectiveness: Mesh intercomparisons*. Aerosol and Air Quality Research, 18(1).
- Ghosh, R., Patra, C., Singh, P., Ganguly, R., Sahu, R. P., Zhitomirsky, I., & Puri, I. K. (2020). *Influence of metal mesh wettability on fog harvesting in industrial cooling towers*. Applied Thermal Engineering, 181.
- Grecco, F. T., Widerski, R., Soares, J. R., & Biali Coá, M. (2017). *PROJETO WARKA WATER: UM ESTUDO SOBRE VIABILIDADE DE COLETA DE ÁGUA ATRAVÉS DO ORVALHO NA CIDADE DE CAMPO MOURÃO - PR*. Engevista, 19(5).

- Harrouk , C. (28. 08. 2020). Warka Water and Arturo Vittori Create Integrated Village for the Rainforest Community in Cameroon. Abgerufen am 16. 07. 2021 von ArchDaily: <https://www.archdaily.com/946669/warka-water-and-arturo-vittori-create-integrated-village-for-the-rainforest-community-in-cameroon>
- He, J. & Hoyano, A. (2010). *Experimental study of cooling effects of a passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramics with high water soaking-up ability*. Building and Environment, 45(2).
- Heimat und Welt. (o. D.). Europa - Klimazonen nach A. Siegmund und D. Volz. Abgerufen am 01. 02. 2022 von Heimat und Welt: <https://www.heimatundwelt.de/kartenansicht.xtp?artId=978-3-14-100271-3&stichwort=Seeklima&fs=1>
- Jarimi, H., Powell, R., & Riffat, S. (2020). *Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting*. International Journal of Low-Carbon Technologies, Oxford University Press.
- Kasperek, D. (14. 02. 2020). Gegen architektonische Armut. Abgerufen am 12. 11. 2021 von Die Architekt: <http://derarchitektbda.de/gegen-architektonische-armut/>
- Kiss, M. (23. 11. 2018). Wind: Wieso in Wien immer Wind bläst. Abgerufen am 23. 01. 2022 von wetter-wien.wien: <https://wetter-wien.wien/wetter-lexikon/wind/>
- Klemm, O., Schemenauer, R. S., Lummerich, A., Cereceda, P., Marzol, V., Corell, D., Van Heerden, J., et al. (2012). *Fog as a fresh-water resource: Overview and perspectives*. Ambio, 41(3).
- klima.org. (o. D.). Klima in Wien. Abgerufen am 01. 02. 2022 von klima.org: <https://klima.org/österreich/klima-wien/>
- Küffner, G. (01. 08. 2010). Kühlen geht auch ohne Kompressoren. Abgerufen am 23. 11. 2021 von Frankfurter Allgemeine Zeitung: <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/technik/kaeltetechnik-kuehlen-geht-auch-ohne-kompressoren-11009535.html>
- Land Wien. (2021). Wien in Zahlen 2021. Wien.

- Leeb, F. (18. 10. 2018). 3D-Puzzle aus Lehm, Österreich-Pavillon auf der Expo 2020 Dubai. Abgerufen am 23. 11. 2021 von *architektur.aktuell*: <https://www.architektur-aktuell.at/projekte/oesterreich-pavillon-auf-der-expo-2020-dubai>
- Lin, S. (2020). *Biomimicry as a Design Tool for Sustainability in Burning Man*. Dalhousie University, Halifax.
- Mittal, K.L., & Bahnert, T. (2017). *Textile Finishing*. Scrivener Publishing LLC, John Wiley & Sons.
- Morichi, G., Bandeira Calixto, L., & Zanelli, A. (2018). *Novel Applications for Fog Water Harvesting*. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6(3).
- Park, K. C., Chhatre, S. S., Srinivasan, S., Cohen, R. E., & McKinley, G. H. (2013). *Optimal design of permeable fiber network structures for fog harvesting*. *Langmuir*, 29(43).
- querkraft architekten. (o. D.). EXPO österreichischer pavillon dubai. Abgerufen am 23. 11. 2021 von querkraft architekten: <https://www.querkraft.at/projekte/expo-pavillon>
- Regalado, C. M., & Ritter, A. (2016). *The design of an optimal fog water collector: A theoretical analysis*. *Atmospheric Research*, 178–179.
- Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994). *A Proposed Standard Fog Collector for Use in High-Elevation Regions*. *Journal of Applied Meteorology*, 33(11).
- Schiermeier, Q. (01. 09. 2014). Wasser marsch! Abgerufen am 07. 10. 2021 von *Spektrum.de*: <https://www.spektrum.de/news/neue-methoden-zur-trinkwassergewinnung/1306738>
- Siemens. (o. D.). h, x-Diagramm – Aufbau und Anwendung. Abgerufen am 22. 11. 2021 von Siemens: <https://sid.siemens.com/v/u/A6V10327345>
- Smid, M., Russo, S., Costa, A. C., Granell, C., & Pebesma, E. (2019). *Ranking European capitals by exposure to heat waves and cold waves*. *Urban Climate*, 27.
- Stadt Wien. (2022). Wind Februar 2020 bis Februar 2022. Abgerufen am 04. 02. 2022

- von Stadt Wien: <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/wind-monat.html>
- Stadt Wien. (o. D.). Anpassung an den Klimawandel in Wien. Abgerufen am 23. 02. 2022 von Stadt Wien: <https://www.wien.gv.at/umwelt/klimaschutz/anpassung.html>
- Stadt Wien. (o. D.). Der Weg des Wiener Wassers von den Alpen in die Stadt. Abgerufen am 01. 03. 2022 von Stadt Wien: <https://www.wien.gv.at/wienwasser/versorgung/weg/index.html>
- Stadt Wien. (o. D.). Lebensqualität - Wien ist und bleibt Nummer eins. Abgerufen am 02. 02. 2022 von Stadt Wien: <https://www.wien.gv.at/politik/international/vergleich/mercerstudie.html>
- Stadt Wien. (o. D.). Strategie „Wiener Wasser 2050“. Abgerufen am 01. 03. 2022 von Stadt Wien: <https://www.wien.gv.at/kontakte/ma31/wasser-strategie-2050.html>
- Stadt Wien. (o. D.). Wasserversorgung in Wien. Abgerufen am 30. 07. 2021 von Stadt Wien: <https://www.wien.gv.at/wienwasser/versorgung/index.html>
- Stadt Wien. (o. D.). Wiener Schatten - Abkühlen von Straßen, Gassen und Plätzen. Abgerufen am 23. 02. 2022 von Stadt Wien: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/architektur/oeffentlicher-raum/wiener-schatten.html>
- Stadt Wien. (o. D.). Windpotentialkataster. Abgerufen am 06. 02. 2022 von Stadt Wien: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/themenstadtplan/windkraft/index.html>
- The Biomimicry Insitute. (2017). Glossary of Terms. Abgerufen am 21. 07. 2021 von Biomimicry Toolbox: https://toolbox.biomimicry.org/wp-content/uploads/2018/03/Toolbox_Glossary_3.18.pdf
- The Biomimicry Insitute. (2017). Lightweight Water Collection System Inspired by Darkling Beetles. Abgerufen am 13. 07. 2021 von ask nature: <https://asknature.org/innovation/lightweight-water-collection-system-inspired-by-darkling-beetles/>

- The Biomimicry Institute. (o. D.). Biomimicry. Abgerufen am 20. 07. 2021 von Biomimicry Institute: <https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/>
- The Biomimicry Institute. (30. 07. 2017). Biomimicry, Climate Change & Architecture: an interview with Michael Pawlyn. Abgerufen am 15. 12. 2021 von Biomimicry Institute: <https://biomimicry.org/michael-pawlyn-biomimicry-climate-change/>
- The Biomimicry Institute. (2017). The Beetles That Drink Water From Air - Darkling beetles. Abgerufen am 13. 07. 2021 von ask nature: <https://asknature.org/strategy/water-vapor-harvesting/>
- The Biomimicry Institute. (02. 07. 2020). Asymmetric Burrow Openings Create Passive Ventilation. Abgerufen am 10. 11. 2021 von The Biomimicry Institute: <https://asknature.org/strategy/asymmetric-burrow-openings-create-passive-ventilation/>
- Trautinger, F. (13. 03. 2019). „Warum redet ihr immer von Mercer?“ – Fragen und Antworten zur angeblichen „Managerumfrage“. Abgerufen am 22. 02. 2022 von wien1x1.at: <https://wien1x1.at/warum-redet-ihr-immer-von-mercero/>
- Tureček, T. (31. 12. 2021). Industrieschnee: Ein anthropogen verursachter Schneefall. Abgerufen am 22. 2. 2022 von ZAMG: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/aktuell/schon-gewusst/wetterlexikon/wetterlexikon-industrieschnee-anthropogen-verursachter-schneefall>
- Umwelt Bundesamt. (o. D.). Wasser. Abgerufen am 18. 02. 2022 von Umwelt Bundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser>
- Wang, B., Zhou, X., Guo, Z., & Liu, W. (2021). *Recent advances in atmosphere water harvesting: Design principle, materials, devices, and applications*. Nano Today, 40.
- Warka Water. (o. D.). Warka Tower. Abgerufen am 15. 07. 2021 von Warka Water: <https://www.warkawater.org/warkatower/>
- WASSERWERK.at. (o. D.). Wiener Wasser. Abgerufen am 01. 03. 2022 von WASSERWERK.at: <http://www.wasserwerk.at/home/wasserwerke/wien>

- Weather Underground. (2021). Wetterstation - I9FUNFHA40. Abgerufen am 01. 10. 2021 von Weather Underground: <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/I9FUNFHA40>
- Wedl, M. (2020). *Ein Beitrag zur Erstellung einer Gitterschale unter der Verwendung asymptotischer Kurven auf Minimalflächen*. Technische Universität Wien, Wien.
- wetter.de. (6. 10. 2014). Wetter Lexikon: So entsteht Tau. Abgerufen am 23. 11. 2021 von wetter.de: <https://www.wetter.de/cms/wetter-lexikon-so-entsteht-tau-2072520.html>
- WetterOnline. (o. D.). Nebel. Abgerufen am 21. Juli 2021 von WetterOnline: <https://www.wetteronline.de/wetterlexikon/nebel>
- wien1x1.at. (27. 07. 2019). Oben Data: Das Wetter in Wien seit 1955 - Monat für Monat, Jahr für Jahr. Abgerufen am 24. 11. 2021 von wien1x1.at: <https://wien1x1.at/ogd-wetter/>
- WienTourismus. (o. D.). Wiens Bahnhöfe. Abgerufen am 12. 10. 2021 von WienTourismus: <https://www.wien.info/de/reiseinfos/anreise/bahnhoeefe-340176>
- Wikipedia. (27. 08. 2019). Tonkrugkühler. Abgerufen am 23. 11. 2021 von Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Tonkrugkühler>
- Wikipedia. (22. 03. 2022). Luftdruck. Abgerufen am 24. 03. 2022 von Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Luftdruck>
- Wikipedia. (7. 02. 2022). Weltbevölkerung. Abgerufen am 22. 02. 2022 von Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Weltbevölkerung>
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. (o. D.). Wetter und Klima. Abgerufen am 10. 10. 2021 von ZAMG: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/wetter-und-klima>

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Leitsatz von Viva con Agua. Quelle: <https://www.vivaconagua.ch/waterisahumanright/>.
- Abb. 2: Lebenselixier Wasser. Quelle: <https://www.falstaff.at/nd/die-unterschiedlichen-wasser-arten-1/.jpeg>.
- Abb. 3: Verteilung der Wasserressourcen auf der Erde. Quelle: <https://www.vivaconagua.ch/waterisahumanright/>.
- Abb. 4: Wetterphänomen Nebel. Quelle: <https://www.wetteronline.de/wetterlexikon/nebel>.
- Abb. 5: Wetterphänomen Regen. Quelle: <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/media.media.d7a962fb-964d-4f6c-af76-af979a48ac7c.original1920>.
- Abb. 6: Makroaufnahme von Schmetterlingsflügel I. Quelle: <https://kwerfeldein.de/2014/08/23/die-fluegel-der-schmetterlinge/>.
- Abb. 7: Makroaufnahme von Schmetterlingsflügel II. Quelle: <https://kwerfeldein.de/2014/08/23/die-fluegel-der-schmetterlinge/>.
- Abb. 8: Schwarzkäfer in der typischen Haltung zum Auffangen von Nebeltröpfchen. Quelle: <https://asknature.org/strategy/water-vapor-harvesting/>.
- Abb. 9: REM-Aufnahme von charakteristischer mikrostruktureller Oberfläche. Quelle: Mittal, K.L., & Bahnert, T. (2017). *Textile Finishing*. Scrivener Publishing LLC, John Wiley & Sons.
- Abb. 10: REM-Aufnahme von Spindelfaser. Quelle: Jarimi, H., Powell, R., & Riffat, S. (2020). *Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting*. International Journal of Low-Carbon Technologies, Oxford University Press.
- Abb. 11: Buschgras mit Wassertröpfchen. Quelle: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsif.2011.0847>.
- Abb. 12: Techniken zur atmosphärischen Wassergewinnung. Eigene Darstellung, basierend auf: Jarimi, H., Powell, R., & Riffat, S. (2020). *Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting*. International Journal of Low-Car-

bon Technologies, Oxford University Press.

- Abb. 13: Schema zur Gewinnung von atmosphärischem Nebel. Eigene Darstellung, basierend auf: https://docdownload.net/page.php?title=Warka%20Water%20presentation&doc=ww_pr_a3_pd_00-0_book_170926_wp_35&user=warkawaterinc&id=171116110126-5f77d83aac8f03c12201cc4a-1bea1806&count=66.
- Abb. 14: Raschelnetz. Quelle: http://www.fogquest.org/wp-content/uploads/2011/07/mesh_sm.jpg.
- Abb. 15: MIT-14-Netz. Quelle: <https://www.ubuy.co.th/en/product/MPUDZS-maporch-304-stainless-steel-mesh-screen-type-mesh-10-wire-11-4-x-23-6-29cm-x-60cm-woven-vent-mesh-me>.
- Abb. 16: FogHa-TiN-Netz. Quelle: Mittal, K.L., & Bahners, T. (2017). *Textile Finishing*. Scrivener Publishing LLC, John Wiley & Sons.
- Abb. 17: Aufbau FogHa-TiN-Netz. Quelle: <https://patents.google.com/patent/US6630414B1/en?q=US+6%2c630%2c414+B1>
- Abb. 18: Schema für zylinderförmige und planare Nebelkollektoren. Eigene Darstellung, basierend auf: <https://www.semanticscholar.org/paper/Exploring-fog-harvesting-nature-based-solution-in-Cantini-Angelotti/68b63254285436f45d538e91b93e6fddf236af40>.
- Abb. 19: Netz mit Neigung von 15°. Quelle: Ghosh, R., Patra, C., Singh, P., Ganguly, R., Sahu, R. P., Zhitomirsky, I., & Puri, I. K. (2020). *Influence of metal mesh wettability on fog harvesting in industrial cooling towers*. Applied Thermal Engineering, 181.
- Abb. 20: Netz mit Neigung von 35°. Quelle: Ghosh, R., Patra, C., Singh, P., Ganguly, R., Sahu, R. P., Zhitomirsky, I., & Puri, I. K. (2020). *Influence of metal mesh wettability on fog harvesting in industrial cooling towers*. Applied Thermal Engineering, 181.

- Abb. 21: Netz mit Neigung von 45°. Quelle: Ghosh, R., Patra, C., Singh, P., Ganguly, R., Sahu, R. P., Zhitomirsky, I., & Puri, I. K. (2020). *Influence of metal mesh wettability on fog harvesting in industrial cooling towers*. Applied Thermal Engineering, 181.
- Abb. 22: Netz mit Neigung von 65°. Quelle: Ghosh, R., Patra, C., Singh, P., Ganguly, R., Sahu, R. P., Zhitomirsky, I., & Puri, I. K. (2020). *Influence of metal mesh wettability on fog harvesting in industrial cooling towers*. Applied Thermal Engineering, 181.
- Abb. 23: REM-Aufnahme von Gunnera-Pflanze. Quelle: Azad, M. A. K. (2016). *Fog Collection on Plant Surfaces and Biomimetic Applications*. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Abb. 24: REM-Aufnahme von gerillter Mikrostruktur. Quelle: Azad, M. A. K. (2016). *Fog Collection on Plant Surfaces and Biomimetic Applications*. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Abb. 25: Stahlungskühlkondensator ETH Zürich. Quelle: <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2021/06/trinkwasser-aus-luftfeuchtigkeit-ge-winnen.html>.
- Abb. 26: Teilausschnitt Warka Water. Quelle: <https://lightroom.adobe.com/shares/cc063578abb34bbda2950e343241eafd/albums/ca438bec0aaa4e02b-2129f4c16ee1597/assets/50655b80e5134457b095af2d33d1b091>.
- Abb. 27: FogQuest Nebelkollektor. Quelle: <http://www.fogquest.org/latest-news/page/2/>.
- Abb. 28: FogHa-TiN-Netz mit Wassertröpfchen. Quelle: <https://www.aqualonis.com>.
- Abb. 29: Errichtung von mehreren CloudFisher-Kollektoren. Quelle: <https://www.aqualonis.com>.
- Abb. 30: Warka Tower. Quelle: <https://www.warkawater.org/warkatower/>.
- Abb. 31: Warka Tower-Netz mit Wassertröpfchen. Quelle: <https://lightroom.adobe>.

com/shares/cc063578abb34bbda2950e343241eafd/albums/ca438bec0aa-a4e02b2129f4c16ee1597/assets/9ad1f31ad756eb992fb68ce2484b96d0.

Abb. 32: Blick unter das Netz. Quelle: <https://lightroom.adobe.com/shares/cc063578abb34bbda2950e343241eafd/albums/ca438bec0aaa4e02b2129f4c16ee1597/assets/19f15a5e6ceaa2f2245a051b4e6dc7de>.

Abb. 33: Zusammenfassung Wetter- und Klimadaten von Referenzen. Eigene Darstellung.

Abb. 34: Makroaufnahme von Schmetterlingsflügel III. Quelle: <https://kwerfeldein.de/2014/08/23/die-fluegel-der-schmetterlinge/>.

Abb. 35: Schema Termitenhügel. Eigene Darstellung, basierend auf: Lin, S. (2020). *Biomimicry as a Design Tool for Sustainability in Burning Man*. Dalhousie University, Halifax.

Abb. 36: Schema Präriehundbau. Eigene Darstellung, basierend auf: Lin, S. (2020). *Biomimicry as a Design Tool for Sustainability in Burning Man*. Dalhousie University, Halifax.

Abb. 37: Schema Windturm. Eigene Darstellung, basierend auf: Lin, S. (2020). *Biomimicry as a Design Tool for Sustainability in Burning Man*. Dalhousie University, Halifax.

Abb. 38: Schema adiabate Kühlung. Eigene Darstellung, basierend auf: <http://www.exploration-architecture.com/projects/sahara-forest-project>.

Abb. 39: EXPO Dubai 2020 , Österreich Pavillon. Quelle: <https://www.querkraft.at/projekte/expo-pavillon>.

Abb. 40: CoolAnt. Quelle: <https://www.coolant.co/gallery/serendipity-arts-festival-2019>.

Abb. 41: Eigene Darstellung, basierend auf: <https://www.querkraft.at/projekte/expo-pavillon>.

Abb. 42: Österreich Pavillon, Vogelperspektive. Quelle: <https://www.querkraft.at/pro>

jekte/expo-pavillon.

Abb. 43: CoolAnt in Betrieb. Quelle: <https://www.archdaily.com/878851/this-innovative-cooling-installation-fight-the-soaring-temperatures-at-the-borders-of-delhi>.

Abb. 44: Schema Funktionsweise CoolAnt. Eigene Darstellung, basierend auf: <https://www.archdaily.com/878851/this-innovative-cooling-installation-fight-the-soaring-temperatures-at-the-borders-of-delhi>.

Abb. 45: Schwarzplan, M = 1: 115.000. Eigene Darstellung.

Abb. 46: Hitzetage über 30°C von 1955 – 2019. Quelle: <https://wien1x1.at/ogd-wetter/>

Abb. 47: Übersicht Klimadaten Dorze und Wien. Eigene Darstellung.

Abb. 48: Lageplan, M = 1 : 2.500. Eigene Darstellung.

Abb. 49: Windeinwirkung Christian-Broda-Platz. Eigene Darstellung.

Abb. 50: Sonnenstand 9:00 Uhr. Eigene Darstellung.

Abb. 51: Sonnenstand 13:00 Uhr. Eigene Darstellung.

Abb. 52: Sonnenstand 17:00 Uhr. Eigene Darstellung.

Abb. 53: Axometrische Darstellung Zonen. Eigene Darstellung.

Abb. 54: Horizontalschnitt Gitterschalen, M = 1 : 10. Eigene Darstellung.

Abb. 55: Bewegungsmechanismus Gitterschalen, Horizontalschnitt, M = 1 : 10. Eigene Darstellung.

Abb. 56: Oberer Anschlusspunkt Gitterschale, M = 1 : 10. Eigene Darstellung.

Abb. 57: Bewegungsmechanismus oberer Anschlusspunkt Gitterschale, M = 1 : 10. Eigene Darstellung.

Abb. 58: Unterer Anschlusspunkt Gitterschale, Verbindung mit Hyperboloidstruktur, M = 1 : 10. Eigene Darstellung.

Abb. 59: Bewegungsmechanismus oberer Anschlusspunkt Gitterschale, M = 1 : 10. Eigene Darstellung.

Abb. 60: Horizontalschnitt Hyperboloidstruktur, M = 1 : 10. Eigene Darstellung.

Abb. 61: Bewegungsmechanismus Hyperboloidstruktur, $M = 1 : 10$. Eigene Darstellung.

Abb. 62: Geschlossene Hyperboloidstruktur, $M = 1 : 100$. Eigene Darstellung.

Abb. 63: Geschlossene Hyperboloidstruktur, $M = 1 : 100$. Eigene Darstellung.

Abb. 64: Prinzip Netzaufhängung, $M = 1 : 8$. Eigene Darstellung.

Abb. 65: Anschlusspunkt Hyperboloidstruktur mit Kühlungs-Zone, $M = 1 : 10$. Eigene Darstellung.

Abb. 66: Abstrakte Darstellung Textilbewegung. Quelle: <https://sevenofakind.tumblr.com/post/41605271041>

Abb. 67: Anschlusspunkt Kühlungs-Zone mit Fundament, $M = 1 : 10$. Eigene Darstellung.

Abb. 68: Horizontalschnitt Kühlungs-Zone, $M = 1 : 150$. Eigene Darstellung.

Abb. 69: Lageplan, $M = 1 : 250$. Eigene Darstellung.

Abb. 70: Ansicht Nord-West, $M = 1 : 250$. Eigene Darstellung.

Abb. 71: Ansicht Süd-West, $M = 1 : 250$. Eigene Darstellung.

Abb. 72: Horizontalschnitt, $M = 1 : 100$. Eigene Darstellung.

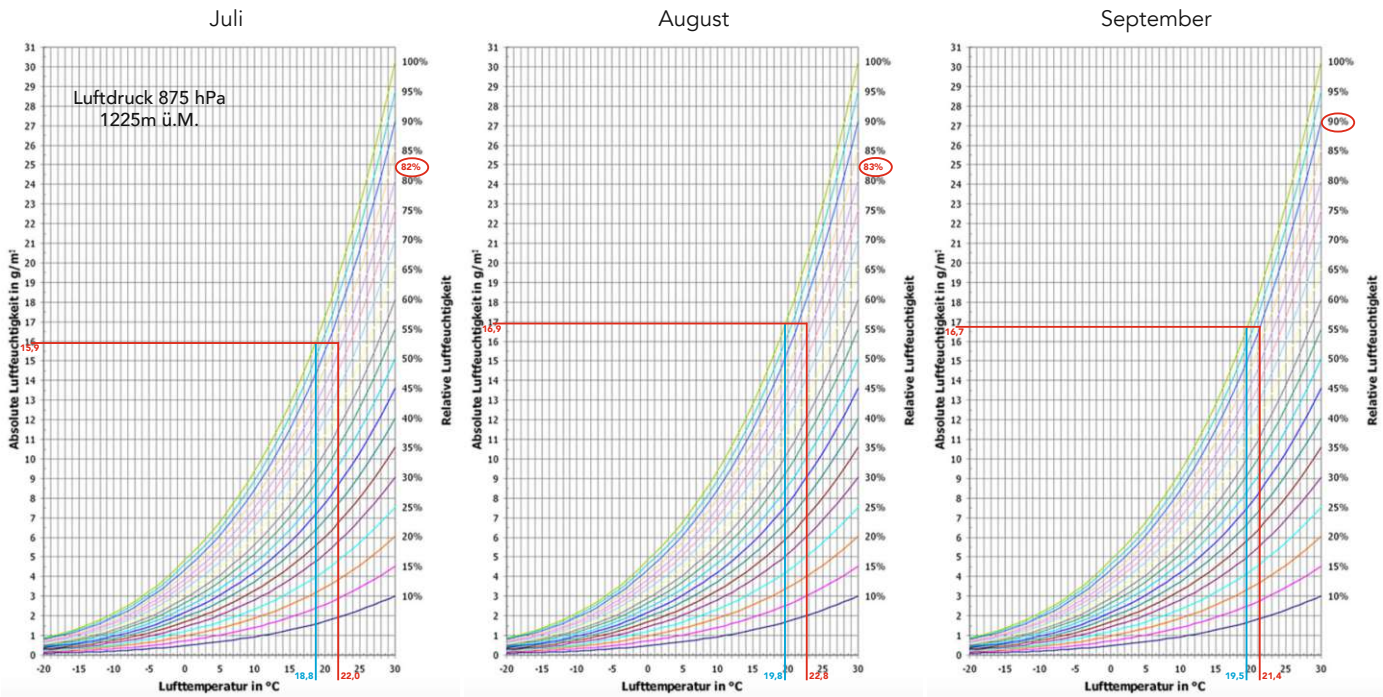
Wetter- und Klimadaten Referenzen

Marokko, Mount Boutmezguida, Sidi Ifni

Klimadaten Jahresübersicht:

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Ø. Temperatur (°C)	14.4	15	16.8	17.3	18.5	20.1	22	22.8	21.4	20.7	17.7	15.6
Min. Temperatur (°C)	10.7	11.5	13.2	14.3	15.7	17.3	18.9	19.8	18.7	17.6	14.4	12
Max. Temperatur (°C)	18.4	18.9	20.8	20.7	21.8	23.4	25.7	26.5	24.8	24.3	21.4	19.6
Niederschlag (mm)	22	24	25	15	11	8	6	6	9	17	29	31
Luftfeuchtigkeit(%)	65%	65%	63%	70%	73%	76%	71%	72%	77%	72%	68%	65%
Regentage (Tg.)	3	3	3	3	2	1	1	0	1	2	3	3
Sonnenstd. (Std.)	8.4	8.7	9.0	8.7	8.8	8.1	7.8	7.0	7.5	8.0	8.4	8.3

Ermittlung von absoluter Luftfeuchtigkeit mittels Carrier-Diagramm:

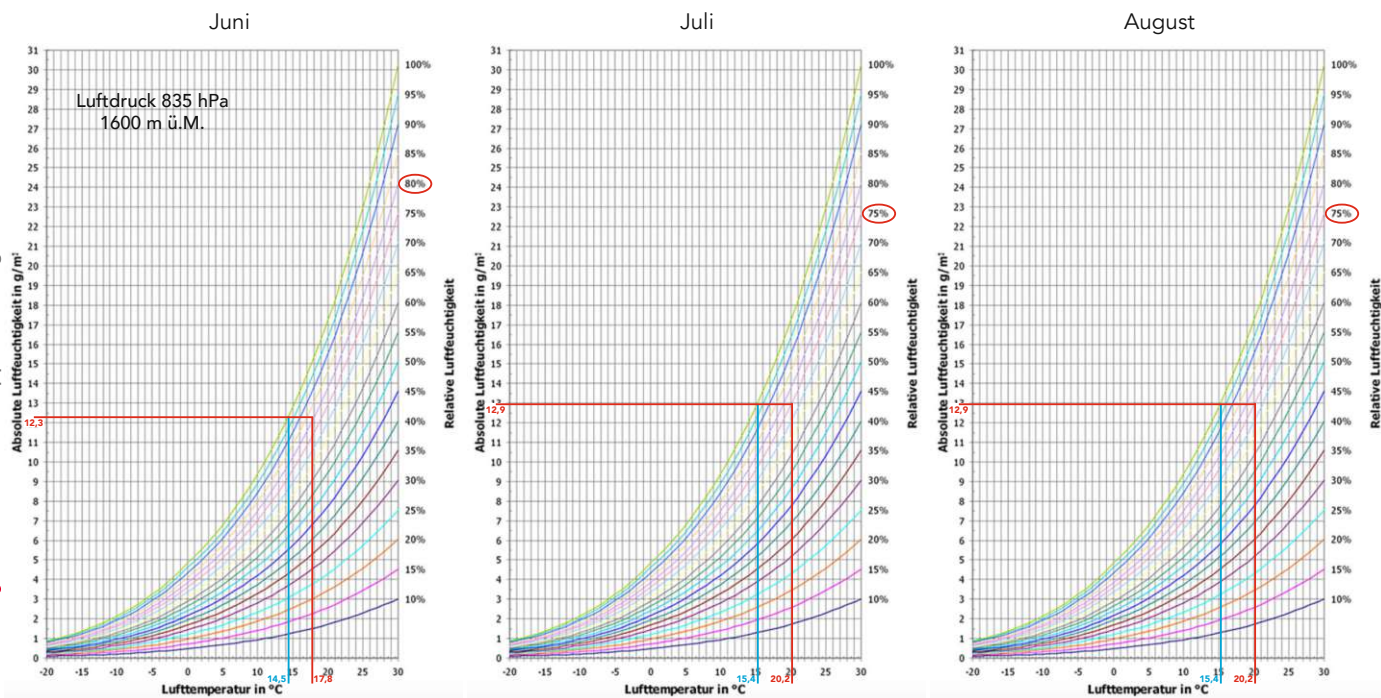


Kroatien, Velebit, Trnovac

Klimadaten Jahresübersicht:

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Ø. Temperatur (°C)	0.1	0.8	4.5	9	13.4	17.8	20.2	20.2	14.9	10.8	6.3	1.7
Min. Temperatur (°C)	-3	-2.9	0.4	4.5	8.6	12.8	14.9	15	10.8	7.2	3.2	-1.2
Max. Temperatur (°C)	3.7	4.7	8.9	13.6	17.8	22.3	25	25.3	19.4	14.9	9.7	5
Niederschlag (mm)	110	113	109	119	116	77	52	60	117	151	185	149
Luftfeuchtigkeit(%)	82%	79%	76%	72%	72%	67%	61%	61%	72%	80%	83%	83%
Regentage (Tg.)	9	8	9	10	9	7	6	5	7	8	10	9
Sonnenstd. (Std.)	4.4	5.2	6.8	8.9	10.6	12.1	12.5	11.4	9.0	6.5	4.8	4.3

Ermittlung von absoluter Luftfeuchtigkeit mittels Carrier-Diagramm:

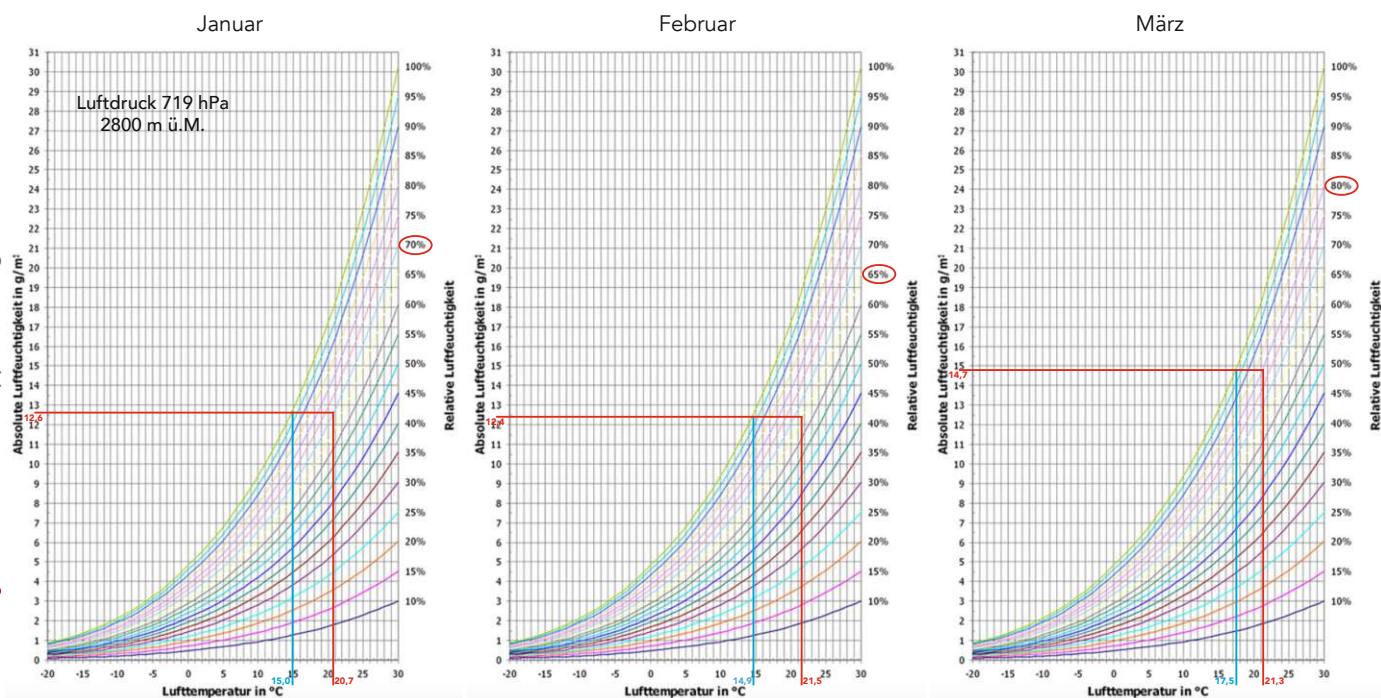


Äthiopien, Dorze

Klimadaten Jahresübersicht:

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Ø. Temperatur (°C)	20.7	21.5	21.3	19.9	18.9	18.3	17.9	18.1	18.8	18.6	19.1	19.7
Min. Temperatur (°C)	16.2	16.9	16.9	16.2	15.5	15.2	14.9	15	15.2	15	15	15.3
Max. Temperatur (°C)	25.3	26.4	26	24.4	23	21.9	21.3	21.7	22.8	22.9	23.6	24.2
Niederschlag (mm)	149	160	357	635	676	278	243	276	500	697	314	163
Luftfeuchtigkeit(%)	50%	47%	56%	72%	79%	75%	73%	72%	72%	76%	66%	55%
Regentage (Tg.)	9	9	15	19	21	20	20	20	20	21	14	9
Sonnenstd. (Std.)	9.3	9.7	8.7	7.1	5.6	5.5	4.8	5.1	6.3	6.4	7.9	8.8

Ermittlung von absoluter Luftfeuchtigkeit mittels Carrier-Diagramm:



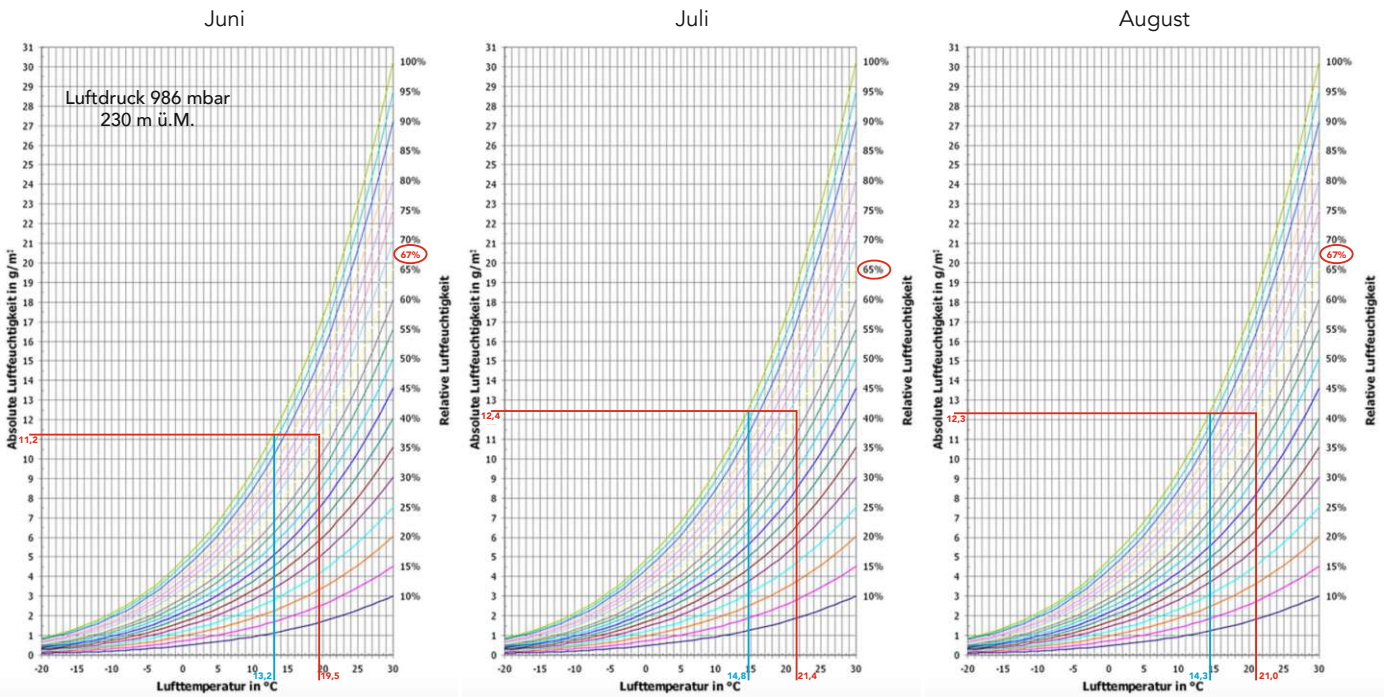
Wetter- und Klimadaten Wien, allgemein

Österreich, Wien

Klimadaten Jahresübersicht:

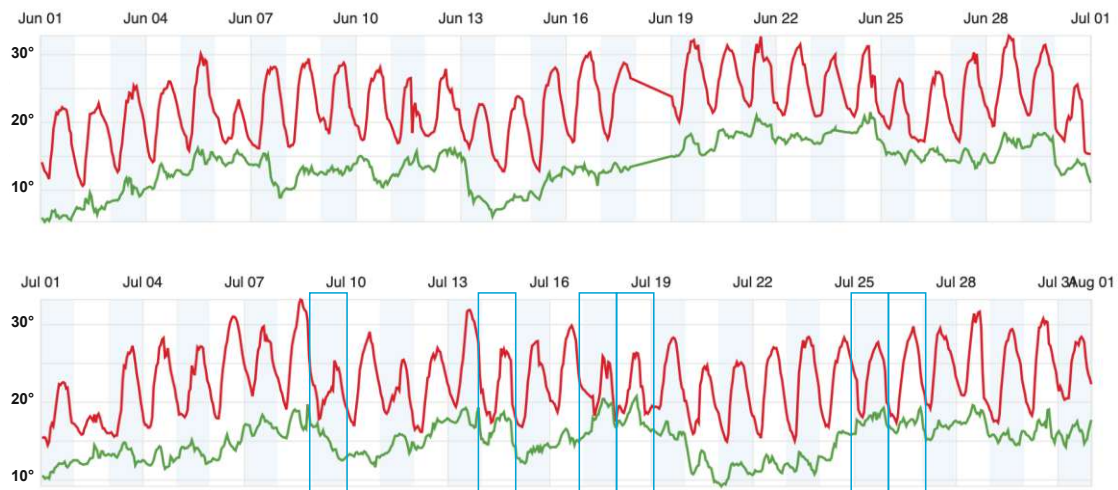
	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
ø. Temperatur (°C)	0	1.6	5.6	11.1	15.5	19.5	21.4	21	16.1	11	6.1	1.2
Min. Temperatur (°C)	-2.9	-2	0.8	5.7	10.4	14.3	16.4	16	11.9	7.2	3.1	-1.5
Max. Temperatur (°C)	3	5.4	10.3	16.1	20.1	24.1	26	25.7	20.5	15	9.2	4.1
Niederschlag (mm)	39	37	52	51	75	79	82	72	74	50	49	43
Luftfeuchtigkeit(%)	79%	75%	71%	65%	67%	65%	64%	65%	71%	78%	81%	81%
Regentage (Tg.)	7	6	8	7	9	9	9	7	7	7	7	7
Sonnenstd. (Std.)	4.0	5.2	6.8	9.4	10.4	11.8	11.9	11.0	8.0	5.5	4.1	4.0

Ermittlung von absoluter Luftfeuchtigkeit mittels Carrier-Diagramm:

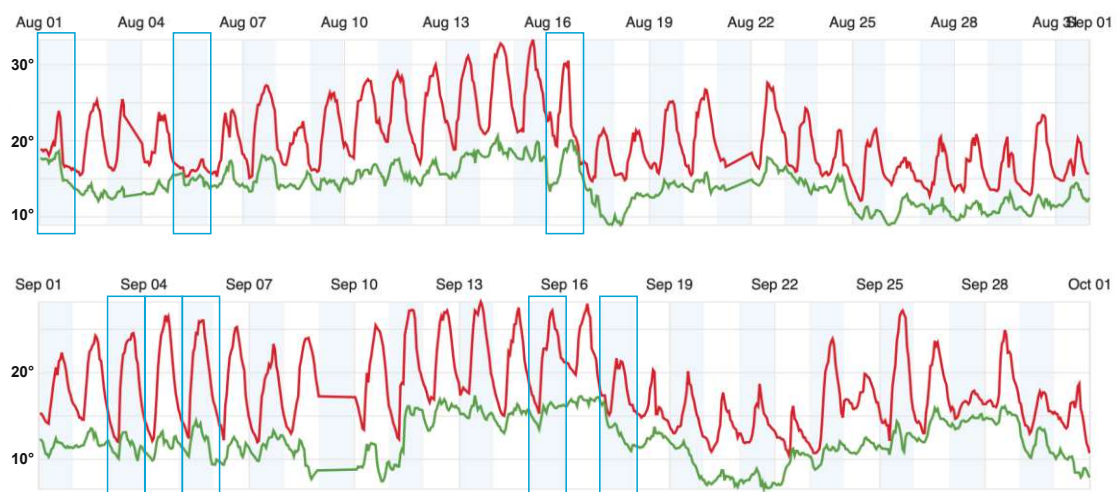


Wetter- und Klimadaten Wien, Christian-Broda-Platz

Juni | Juli



August | September



<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/I9FUNFHA40/graph/2021-06-5/2021-06-5/monthly>
<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/I9FUNFHA40/graph/2021-07-5/2021-07-5/monthly>
<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/I9FUNFHA40/graph/2021-08-5/2021-08-5/monthly>
<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/I9FUNFHA40/graph/2021-09-5/2021-09-5/monthly>

