

Fresh Barrio Breeze

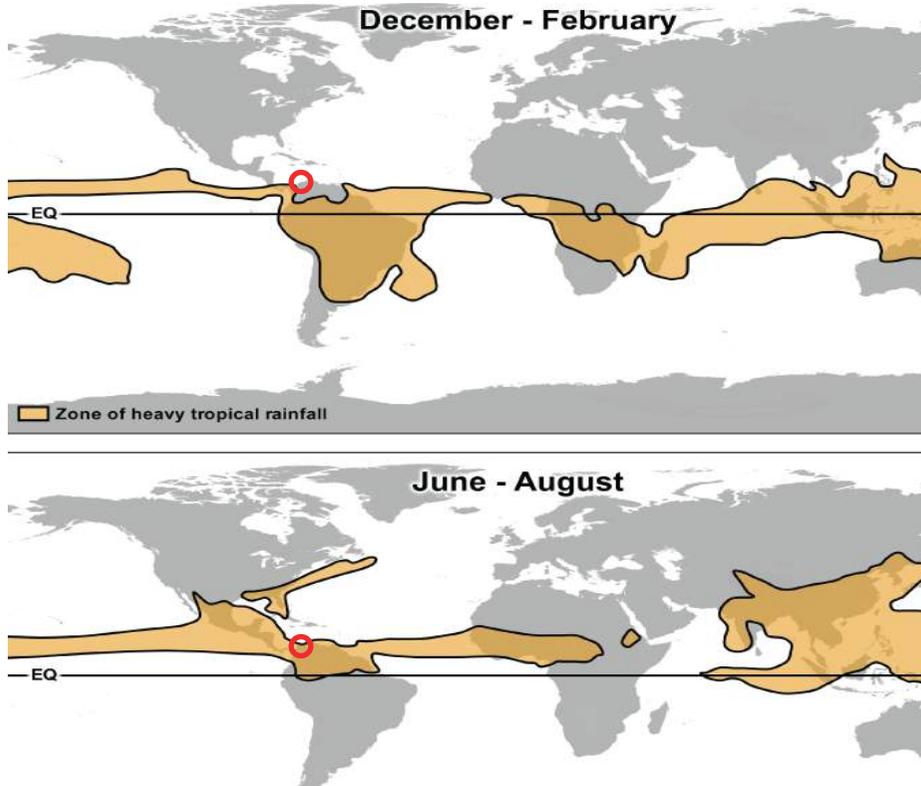
Vertiefungsarbeit

Booklet Prozessdokumentation

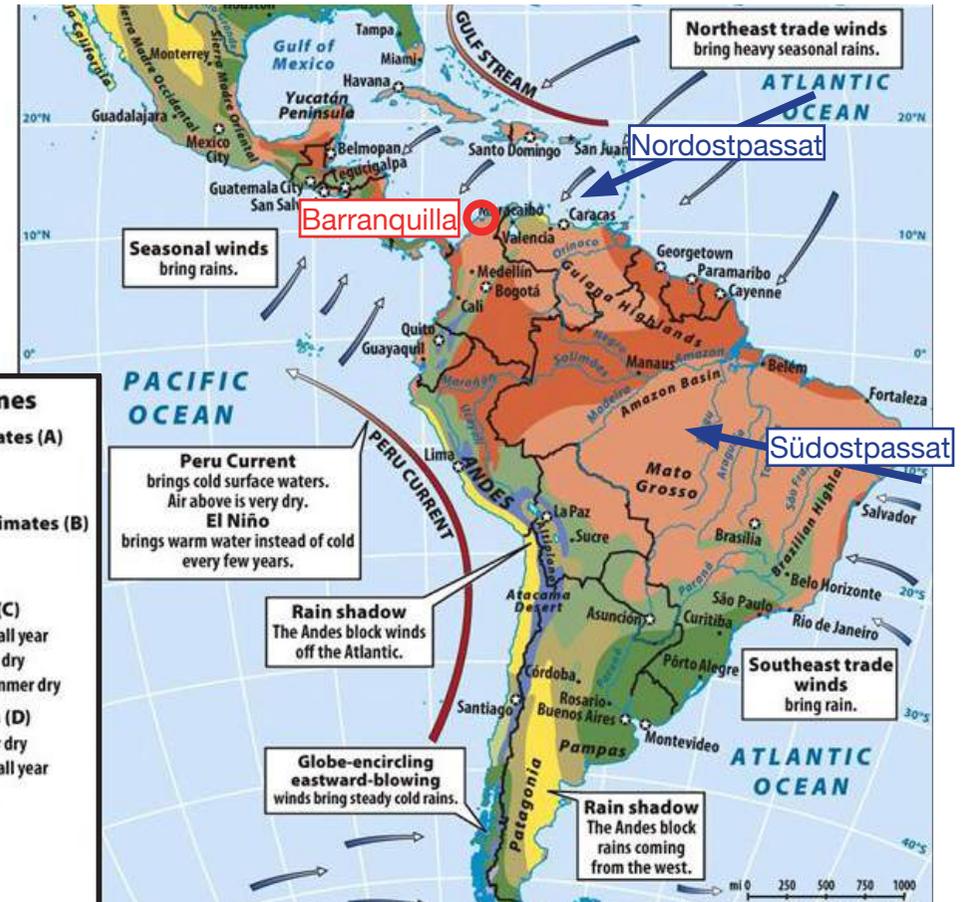
Abgabe 22.01.2021

1. Klimaanalyse

1. Klimaanalyse: Makroklima - Tropen und Monsun



Monsun und damit einhergehende Regenzeit¹



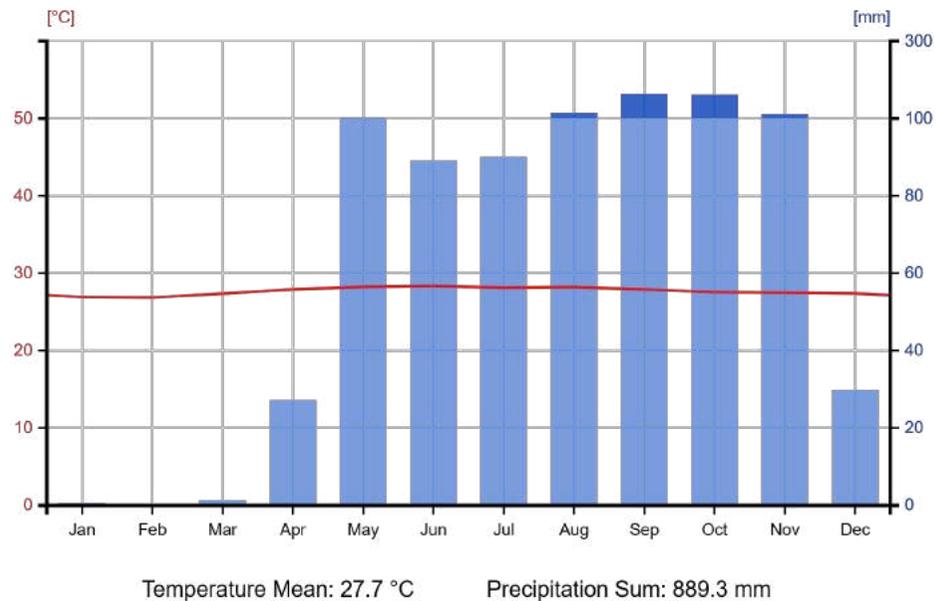
Abhängigkeit der Klimaklassifikation von Winden und geographischer Lage²

- Die kolumbianische Stadt Barranquilla liegt innerhalb der Wendekreise der Sonne und somit in den Tropen.
- Wo die Sonne im Zenit steht erwärmt sich die Luft am stärksten, steigt auf, und sorgt so am Erdboden für eine Tiefdruckrinne.
- Ungefähr 30° nördlicher/südlicher sinkt die Luft wieder ab und gelangt als Passatwinde (durch die Erdrotation zusätzlich abgelenkt) zur Tiefdruckrinne.
- Kommen die Winde vom Meer her, so bringen sie feuchte Luftmasse mit sich, welche zu Regen führen.
- Dieser sogenannte Monsun, ist aufgrund der Wanderung der Sonne saisonal.
- Barranquilla gehört zur Klimazone des Tropischen Savannenklimas (Aw), w steht dafür für wintertrocken, von Januar bis März fällt kaum Niederschlag.

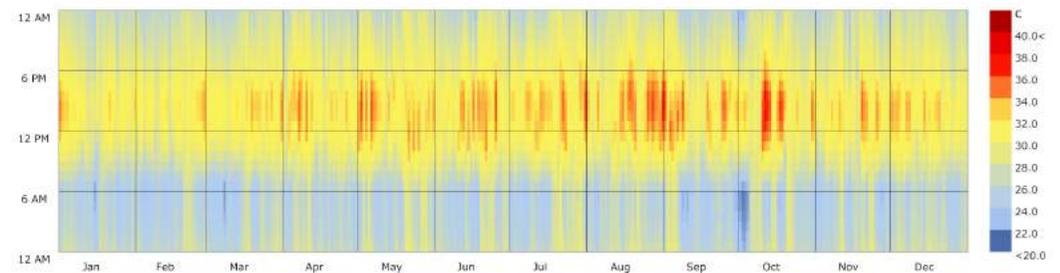
¹ University Corporation for Atmospheric Research: <https://scied.ucar.edu/docs/where-monsoons-are-found>, 2020

² W. H. Freeman and Company: World Regional Geography, Fifth Edition, 2011

1. Klimaanalyse: Regenzeit und Temperatur



Montatliche Durchschnittstemperatur und Regenmenge (Jahre 1989-2018) ¹



Trockenkugeltemperatur ganzjährig, jede Stunde des Tages

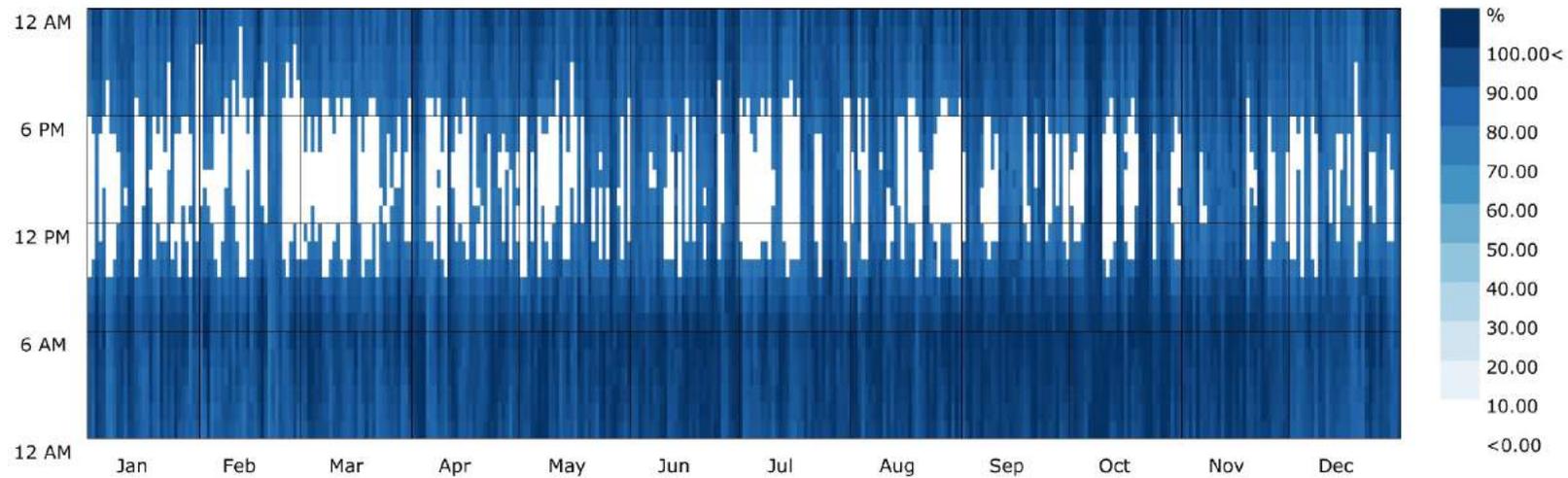
- Regenzeit: Mai - November; Trockenzeit: Dezember - April
- **Temperaturverlauf** übers ganze Jahr **konstant hoch** -> keine saisonalen Kältespeicher

Kennzahlen Temperaturanalyse:

- Anzahl Stunden > 26 °C : 6081 h (69% der Stunden im Jahr)
- Anzahl Stunden < 22 °C : 38 h (1% der Stunden im Jahr)
- Schlüsselwerte Temperatur Max.: 36.1 °C, Min.: 20.4 °C, Durchschnitt sowie **Median: 27.6 °C**

¹ www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/

1. Klimaanalyse: Relative Luftfeuchtigkeit



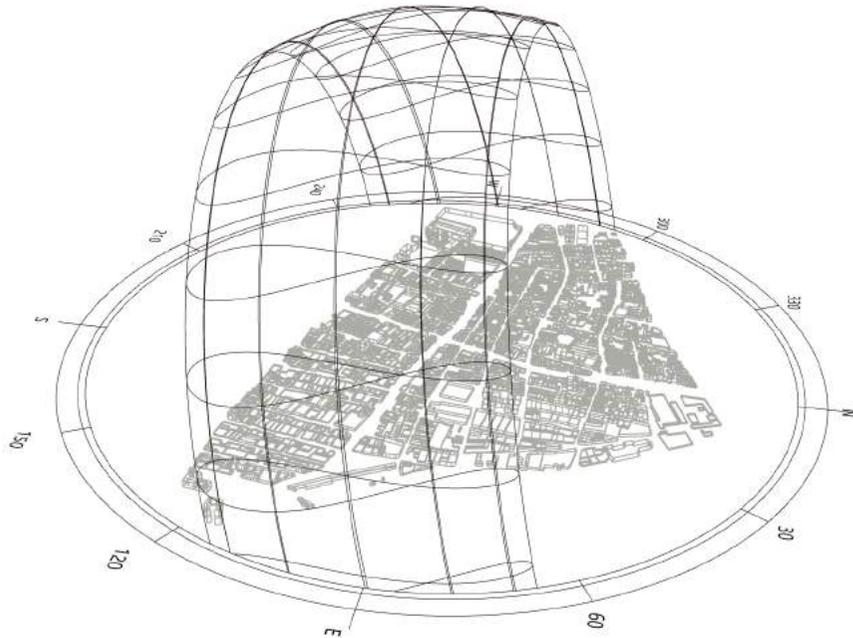
Relative Luftfeuchtigkeit ganzjährig, Werte über 70% RH, jede Stunde des Tages

- **Relative Feuchtigkeit überschreitet** ganzjährig **Komfortbereich** -> Nachteilig für Verdunstungskühlung, und führt zu höherem Temperaturempfinden

Kennzahlen Feuchtigkeitsanalyse:

- Anzahl Stunden > 70%: 7387 h (84% der Stunden im Jahr)
- Anzahl Stunden < 35%: 0 h (0% der Stunden im Jahr)
- Schlüsselwerte Relative Feuchtigkeit Max.: 100%, Min.: 53%, **Median: 84%**

1. Klimaanalyse: Sonnenverlauf und Solarenergie

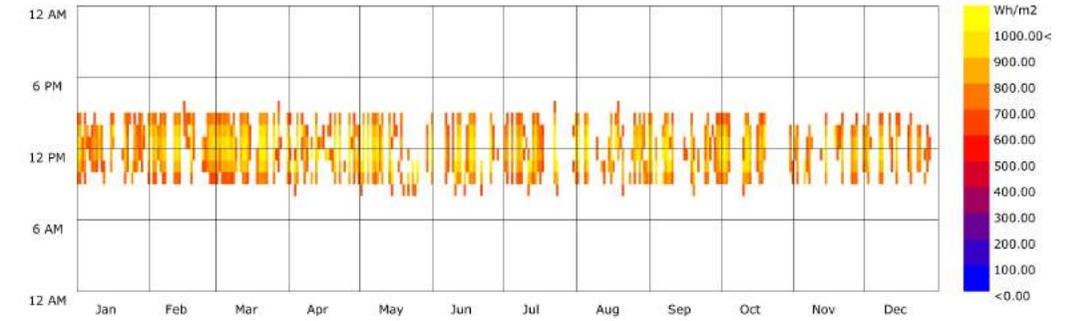


Wintersonnenwende (21.12. links) und Sommersonnenwende (21.6. rechts)

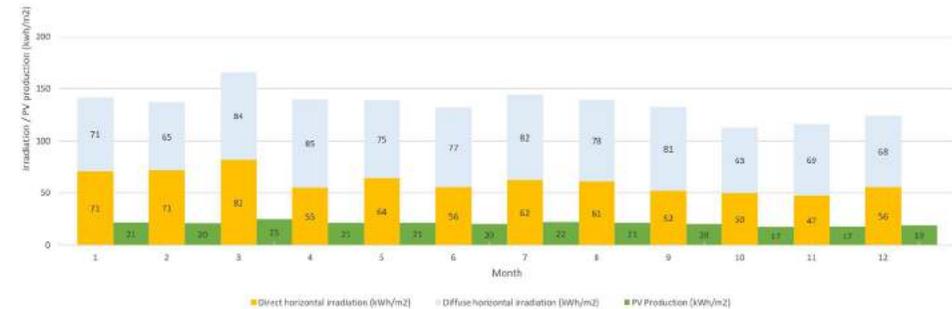
- ganzjähriger etwa gleich **hoher Ertrag** aus **PV-Modulen**
- einzelne Tage nicht genügend Einstrahlung (bewölkt)
-> Speicher oder andere Energiequellen notwendig

Total jährl. horiz. Globalstrahlung: 1625 kWh/m² (898 diffus, 727 direkt)

- Total Sonnenstunden pro Jahr: 4544 h (52 % der Stunden im Jahr)
- Max./min. Sonnenstunden pro Tag: 14h/12h
- Jährlicher Ertrag PV-Anlage (Wirkungsgrad n=0.2): 244 kWh/m²



Globalstrahlung auf horizontale Oberfläche, Stunden > 600 Wh/m²



Monatliche horizontale Globalstrahlung direkt, diffus und Ertrag PV-Anlage (n=0.2)

Schnelle Rechnung Eigenversorgung Privathaushalt Kolumbien:

Wohnfläche Kolumbien: 24.5 m² / p -> Annahme 4 stockiges Gebäude

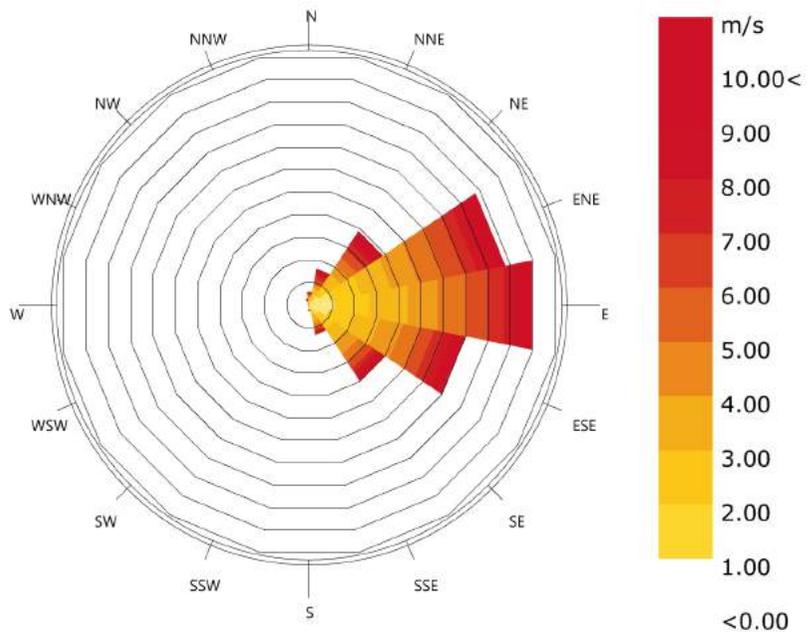
-> 6 m² PV auf Dach

Ertrag PV: 244 kWh/m² a * 6 m² = 1 464 kWh/p a

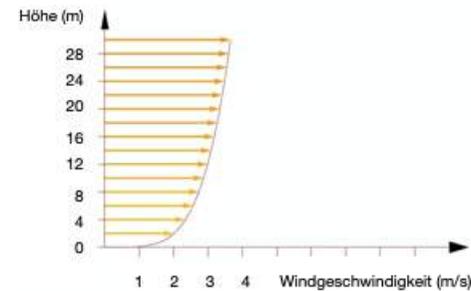
Vgl. Elektrizitätsverbrauch privat: 939 kWh/p a

Vgl. Elektrizitätsverbrauch gesamt: 1 400 kWh/p a

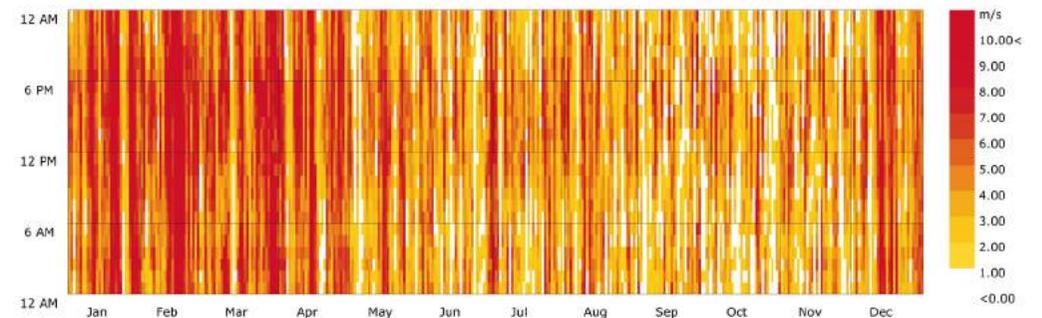
1. Klimaanalyse: Wind



Windrichtung und -geschwindigkeit ganzjährig



Durchschnittliche Windgeschwindigkeiten je Höhe, ganzjährig



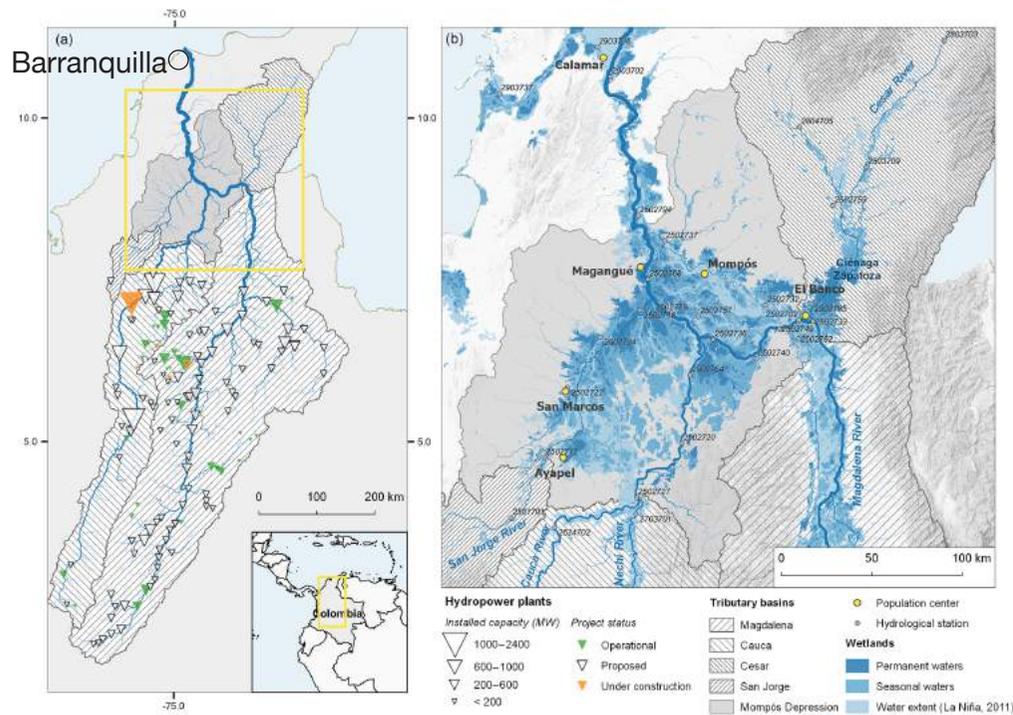
Windstärke von mehr als 1 m/s, ganzjährig, jede Stunde des Tages

- ganzjährig **Wind** mit guter Intensität, aus der gleichen Richtung -> nutzbar für niedrigeres Temperaturempfinden und Kühlung (Windtürme, Querlüftung)

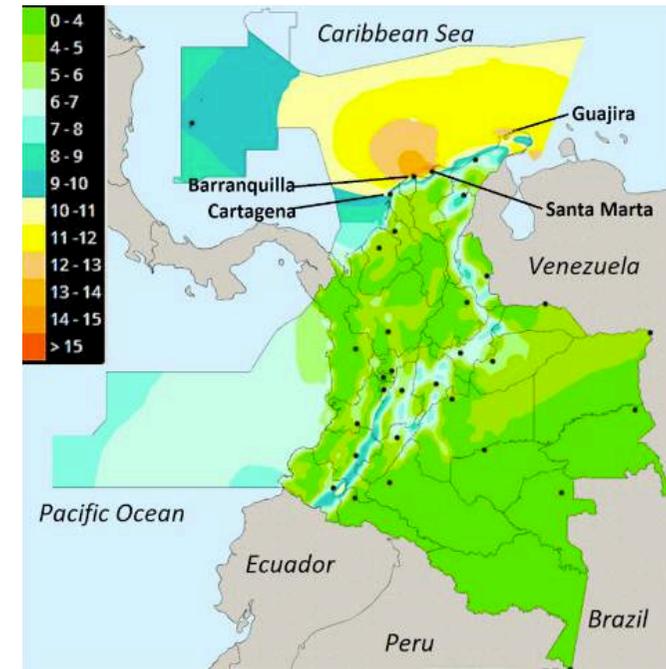
Kennzahlen Wind:

- Anzahl Stunden > 1 m/s: 7712 h (88% der Stunden im Jahr)
- Anzahl Stunden > 3.5 m/s: 4261 h (49% der Stunden im Jahr)
- Anzahl Stunden > 6 m/s: 1628 h (21% der Stunden im Jahr) (wäre gutes Potential für Nutzung von Windenergie)
- Schlüsselwerte Windgeschwindigkeit Max.: 19 m/s, Durchschnitt: **4 m/s**

1. Klimaanalyse: Energieversorgung, Rio Magdalena, Windpotential



Rio Magdalena und Wasserkraftnutzung ¹



Potential Windenergie (Geschwindigkeit in m/s) ²

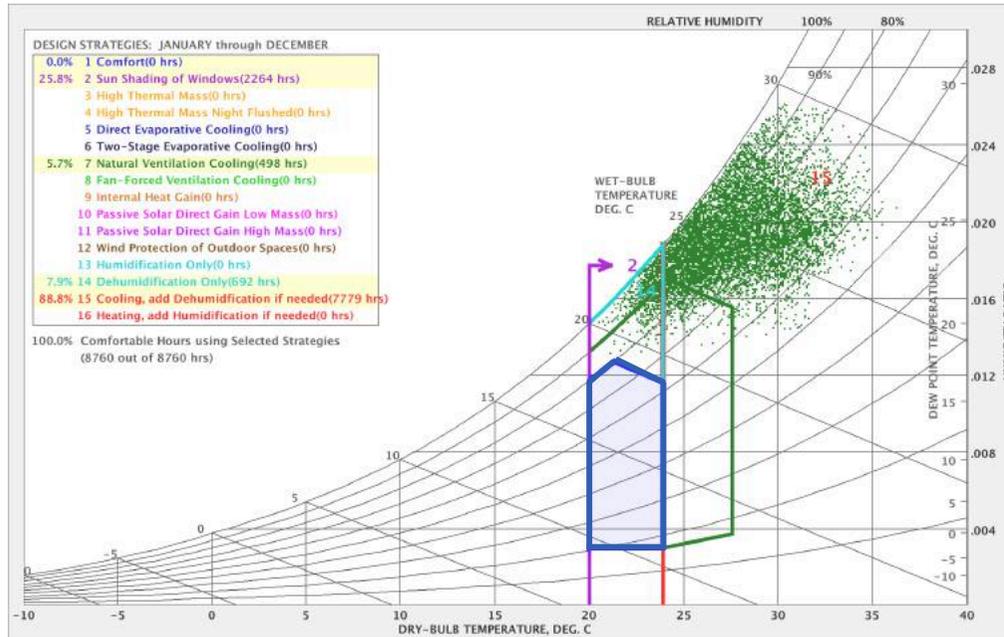
- Im Jahre 2018 wurde rund 75 Prozent der Elektrizität Kolumbiens durch Wasserkraft erzeugt, der Rest kam aus fossilen Energiequellen (Erdöl, Gas, Kohle). ³
- Im Herbst 2020 wurde der Auftrag vergeben, zehn Windturbinen in Guajira, nördöstlich von Barranquilla, zu erstellen. Dies zeigt das Potential von Wind in der Region.

¹ Angarita et al.: Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, <https://doi.org/10.5194/hess-22-2839-2018>, 2018

² Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology (online pdf): Juan Gabriel Rueda-Bayona et al., Journal of Cleaner Production, Elsevier, 2019

³ Repsol (online pdf): Anuario Estadístico-Energético 2019, 2019

1. Klimaanalyse: Psychrometrische Darstellung



Unbearbeitet: 0% der Stunden **komfortabel** ausser mit aktiver Kühlung Entfeuchtung ¹
(mit diesem Tool werden nicht mal 6% der Stunden durch Ventillation komfotabel)

Bearbeitet: 63% der Stunden **komfortabel**, erreicht durch wenig Kleidung und Ventilation ²

Psychrometrische Darstellung zur Komfortanalyse, kritische Betrachtung:

- für die Modellrechnung verwendete **Berechnungsmethoden** entscheidend (Was gilt als komfortabel? Wie stark wirken Effekte wie Ventilation?)
- **Spannweite Komforttemperatur** entscheidend:
während (je nach Autor) in Mitteleuropa ab 29 °C PET ³ das thermische Empfinden als warm mit starkem Hitzestress definiert wird
beginnt in Taiwan und Singapur erst ab 34 °C PET der starke Hitzestress ⁴

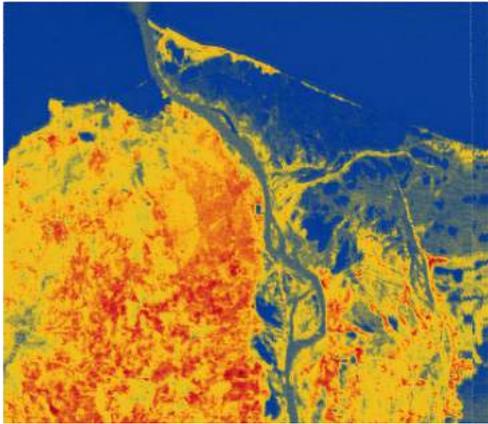
¹ Climate Consultant

² Grasshopper (Rhino) Plugin Energie- und Klimasysteme III

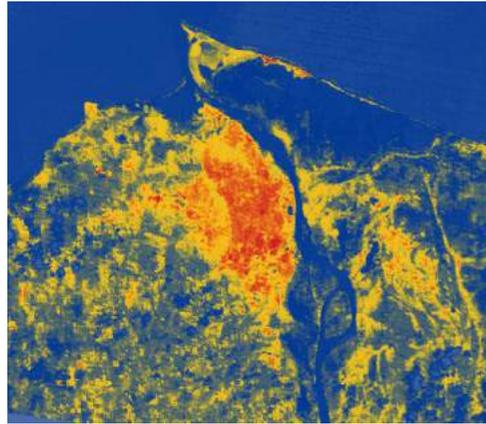
³ PET = Physiologische Äquivalenttemperatur (Grundlagen Luftgeschw. 0.1 m/s, Wasserdampfdruck 12 hPa, sitzende Tätigkeit, Kleidung 0.9 clo)

⁴ Lin und Matzarakis 2008; Matzarakis und Mayer 1996

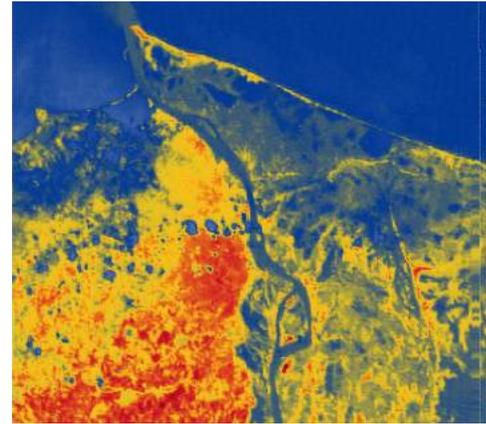
1. Klimaanalyse: Hitzekarte



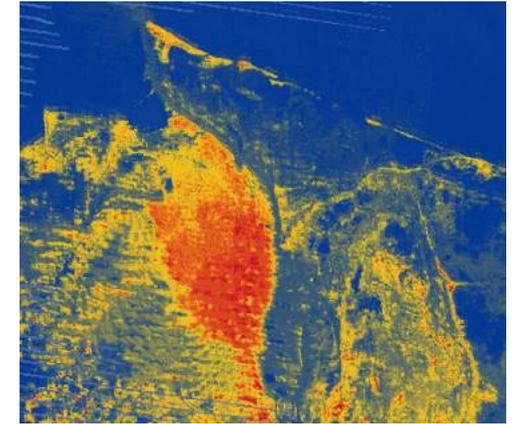
Hitzekarte 2001



Hitzekarte 2008



Hitzekarte 2011



Hitzekarte 2020

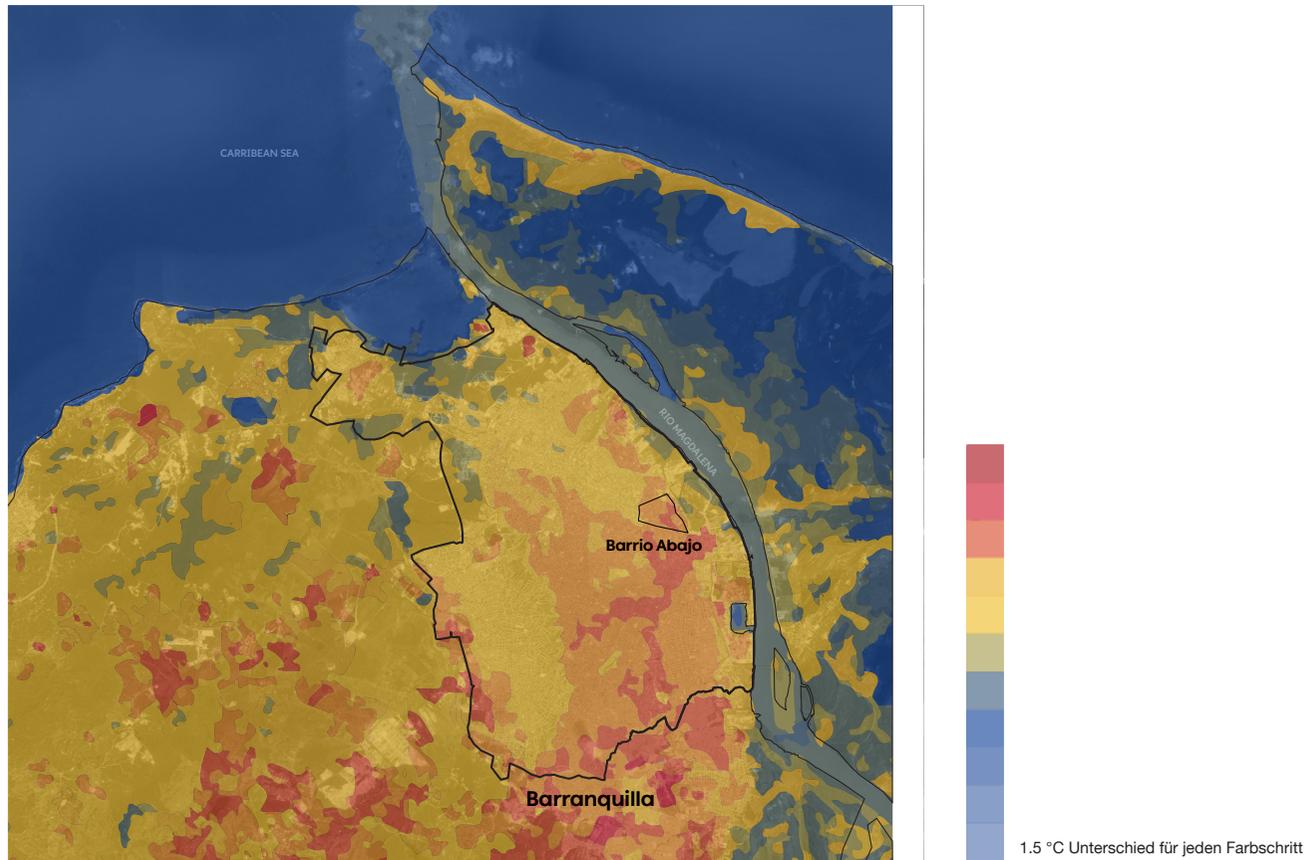
Hitzekarte Erklärung Methode

- Quelle: Landsat - Satellitenaufnahmen durch die NASA und U.S. Geological Survey werden mittels einem Tool in Rhino Grasshopper Dragonfly verarbeitet
- Ergebnis ist eine Karte, welche die mittlere Strahlungstemperatur zeigt. Die Temperaturangaben in Grad sollten nicht verwendet werden, da eine atmosphärische Korrektur aufgrund der Luftfeuchtigkeit vorzunehmen wäre. Aber **Temperaturunterschiede** in °C zwischen warmen und kalten Gebieten können verlässlich dargestellt werden. Sieht man sich die Satellitenaufnahmen verschiedener Tage und Jahre an, so sind auch die wärmeren Gebiete gleichenorts.

Hitzekarte Fazit

- Eine Abgrenzung zwischen bebautem Gebiet und unbebauten Flächen ist unerklärlicherweise nur in den Karten von 2008 und 2020 zu sehen, es kann kein Urban Heat Island Effekt anhand dieser Satellitenaufnahmen erklärt werden.
- Klar erkennbar sind jedoch die kühlende Wirkung der Gewässer und Feuchtgebiete.

1. Klimaanalyse: Hitzekarte



Hitzekarte mittlere Strahlungstemperatur

- Die hier gezeigte Satellitenaufnahme von Barranquilla ist vom 5.2.2001 dann war der Himmel nahezu wolkenfrei.
- Die **kühlende** Wirkung von Gewässern und den **östlichen Feuchtgebieten** ist klar ersichtlich.
- Es ist ein **Temperaturunterschied** von bis zu **10 °C** zu sehen.

1. Klimaanalyse: Fazit

Herausforderungen

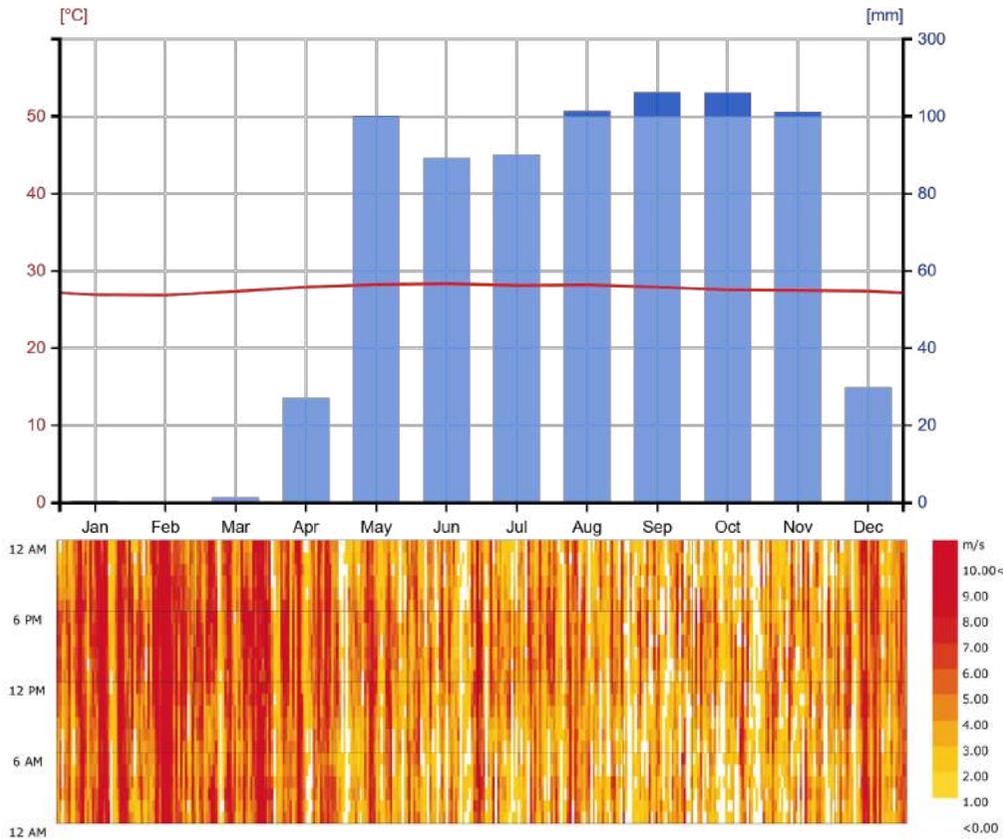
- Temperatur und Luftfeuchtigkeit ganzjährig konstant sehr hoch, auch noch hohe Temperaturen in den Nächten (nie unter 20 °C).

Chancen

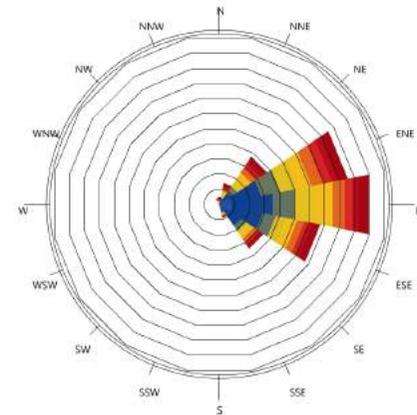
- Viel Sonneneinstrahlung macht PV-Anlagen ganzjährig ertragreich.
- Ganzjährig ähnlicher Sonnenverlauf ermöglicht bspw. Beschattung von Mittagssonne (senkrecht) und Nachmittagssonne (Westen) ganzjährig durch gleiche Strategie, wie bspw. richtige Orientierung des Gebäudes, seiner Fenster, Dächer und Brise Soleil.
- Immer genug hohe und gleiche Temperaturen machen Heizungen obsolet und ermöglichen Strategien zum Erreichen von Komfort, welche an jedem Tag gleich gut wirken und keine grosse Flexibilität aufweisen müssen.
- Wind der ganzjährig etwa gleich stark weht und immer aus Richtung der kühleren Feuchtgebiete im Osten kommt, ermöglicht eine Kühlungsstrategie durch natürliche Belüftung ganz auf den Wind auszurichten. Zusätzlich besteht das Barrio Abajo aus hauptsächlich ein- bis zweistöckigen Gebäuden, welche den Wind nicht blockieren, wie es grosse Wohnblöcke oder Hochhäuser tun würden.

2. Spezifizierung (Saisons / Tage)

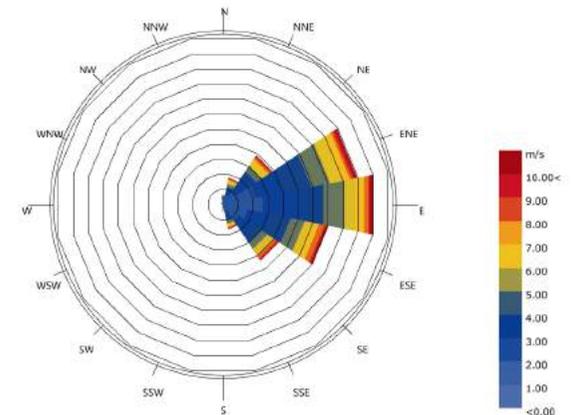
2. Spezifizierung: Trockenzeit - Regenzeit



Monatliche Regenmenge¹ und Windstärke



Trockenzeit: Dezember bis April



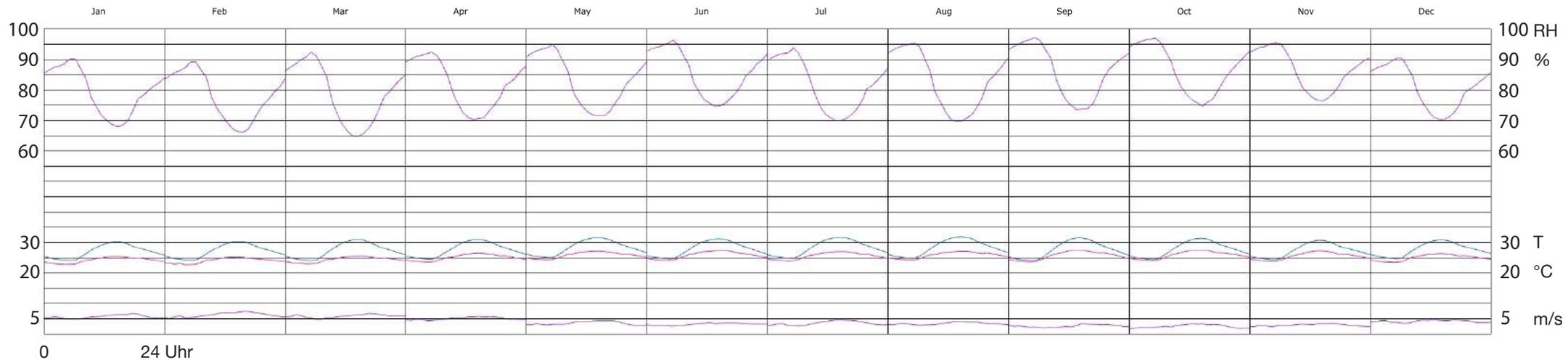
Regenzeit: Mai bis November

Windrichtung und -geschwindigkeit

- **stärkere Winde** während **Trockenzeit**, generieren aber keinen spezifischen Vorteil für passive Kühlung, da Temperaturen ganzjährig ähnlich hoch sind
- Es gibt kein Potential Saisonunterschiede auszunutzen (für bspw. Speicher), jedoch muss die Regenzeit beachtet werden und Sturmfluten sind auch in Bar-ranquilla üblich, entsiegelte Böden helfen gegen Überschwemmungen aber auch gegen den Urban Heat Island Effekt.

¹ www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/

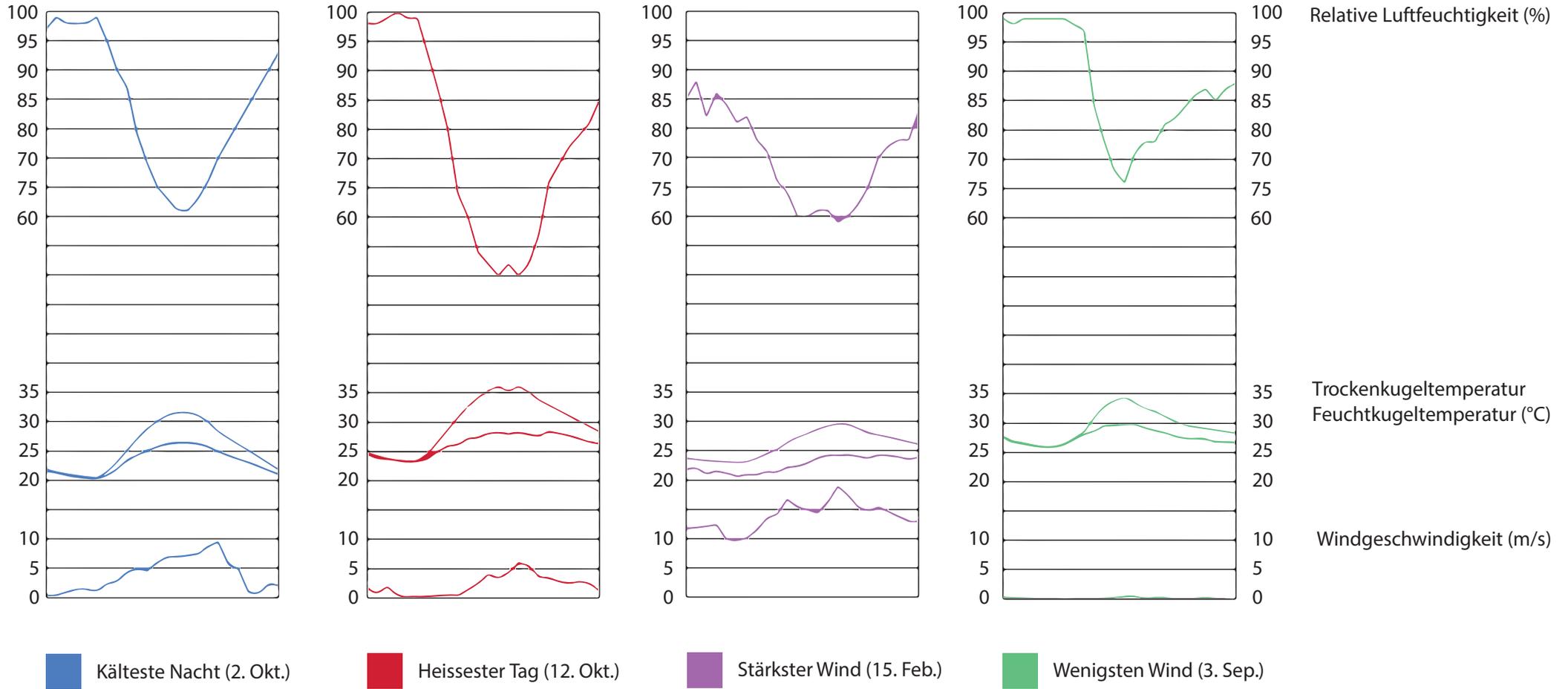
2. Spezifizierung: keine Monatsunterschiede



Je Monat ein Durchschnittstag (Durchschnittswert des Monats für jede Stunde am Tag)

- ganzjährig gleiche klimatische Bedingungen (abgesehen vom Niederschlag)

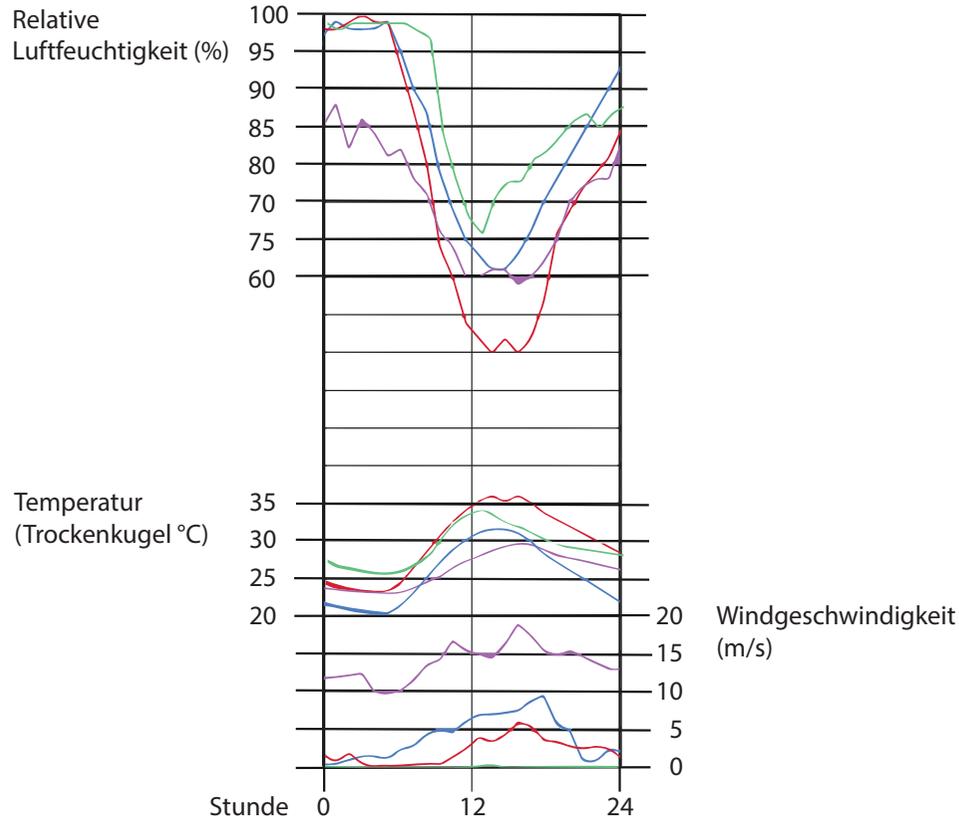
2. Spezifizierung: einzelne Tage mit Maximalwerten



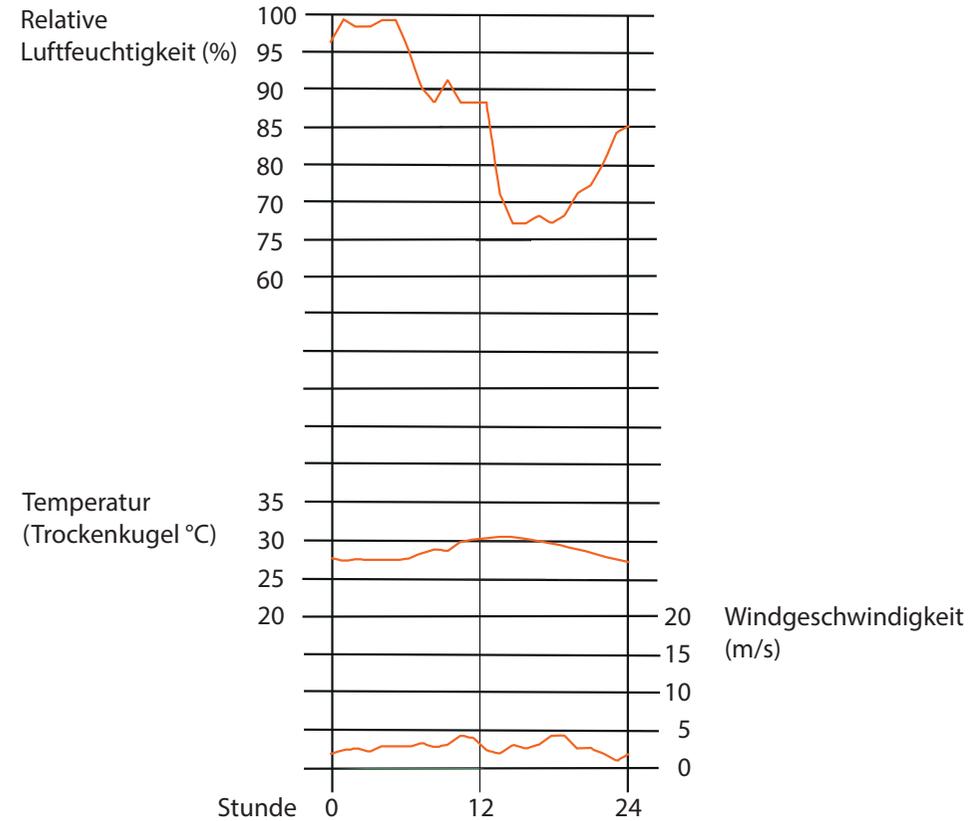
Fazit: zusammengefasst kann man sagen:

- **jeder Tag** des Jahres ist fast **gleich**
- Ausnahmen sind der Niederschlag ausschliesslich in der Regenzeit und
- Zeiten mit Unwetter, welche zu Überschwemmungen in Barranquilla führen

2. Spezifizierung: Gewählter Referenztag



- Heissester Tag (12. Okt.)
- Kälteste Nacht (2. Okt.)
- Stärkster Wind (15. Feb.)
- Wenigsten Wind (3. Sep.)



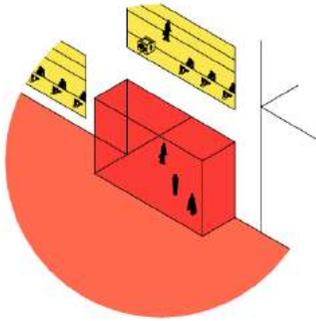
- Gewählter Tag (15. Okt.)

Kriterien für die Wahl:

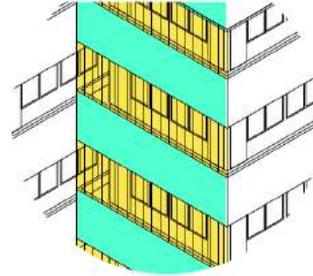
- Temp. 28.55 °C (Ø/Tag) Wind 2.49 m/s (Ø/Tag)
- **89 % der Tage** haben **bessere Bedingungen**: windiger und kühler
- an nur 33 Tagen im Jahr ist es heisser und weniger windig (diese sind quer verteilt im Jahr)

3. Strategien für passive Kühlung

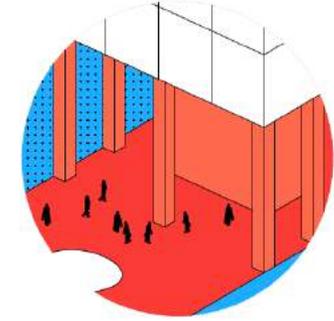
3. Strategien für passive Kühlung: Singapur als Referenz (hohe Temperaturen und Feuchtigkeit)



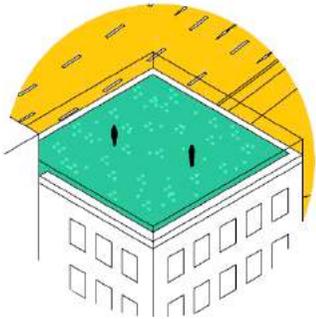
Pufferzonen innen und aussen



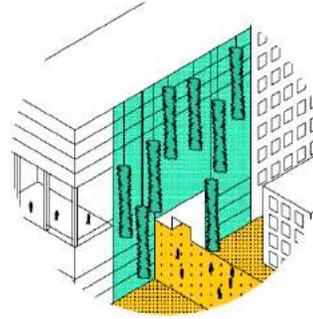
(fixe) **Sonnenschutzelemente**



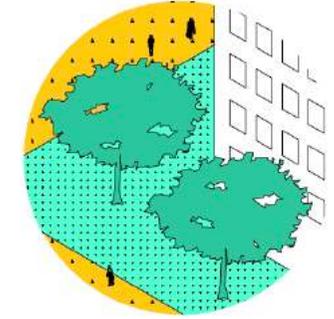
Winddurchlässigkeit



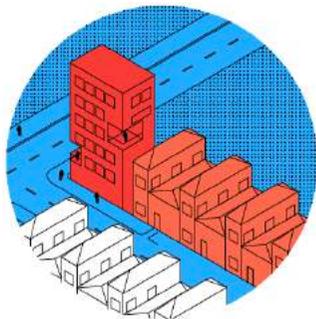
begrünte Dächer



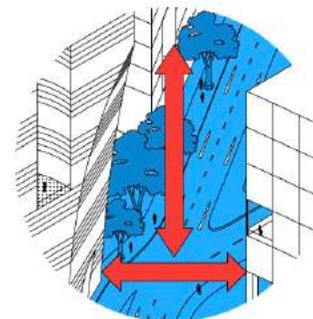
begrünte Fassaden



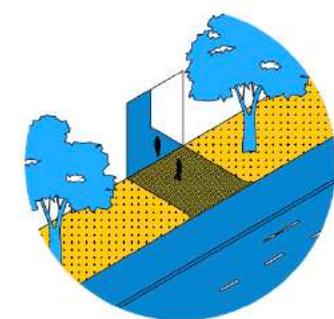
Vegetation um Gebäude



variable **Gebäudehöhen**



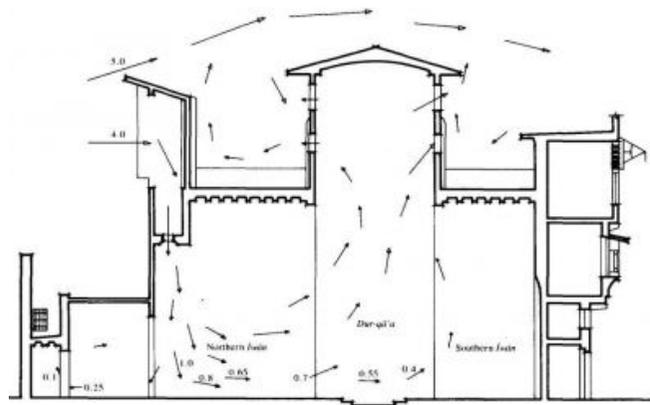
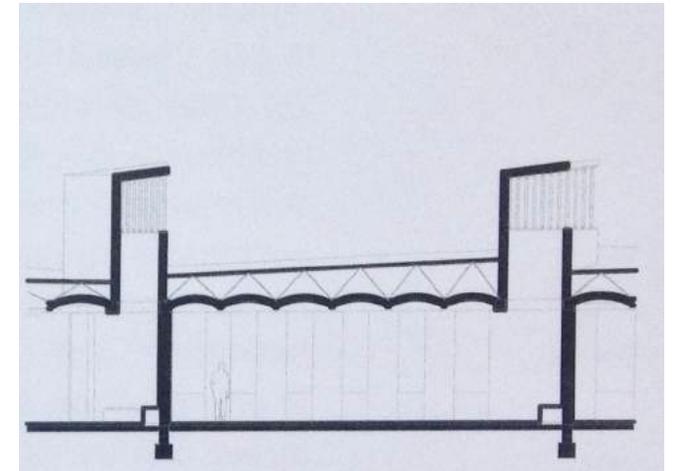
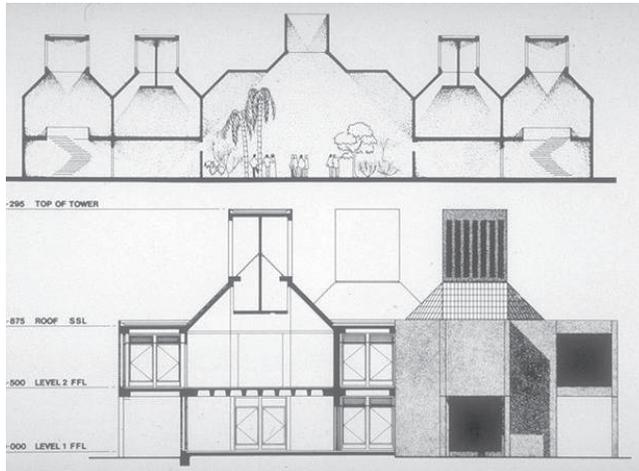
Verhältnis Strasse - Gebäudehöhen



entsiegelte Böden

Strategies for cooling Singapore, Hrsg. Lea A. Rufenacht und Juan Angel Acero, 2017

3. Strategien für passive Kühlung: Windtürme



Malqaf, Dur Qa'a, Kairo 1350 ¹

Qatar University Campus ²

Lycée Schorge, Burkina Faso, Francis Kéré ³

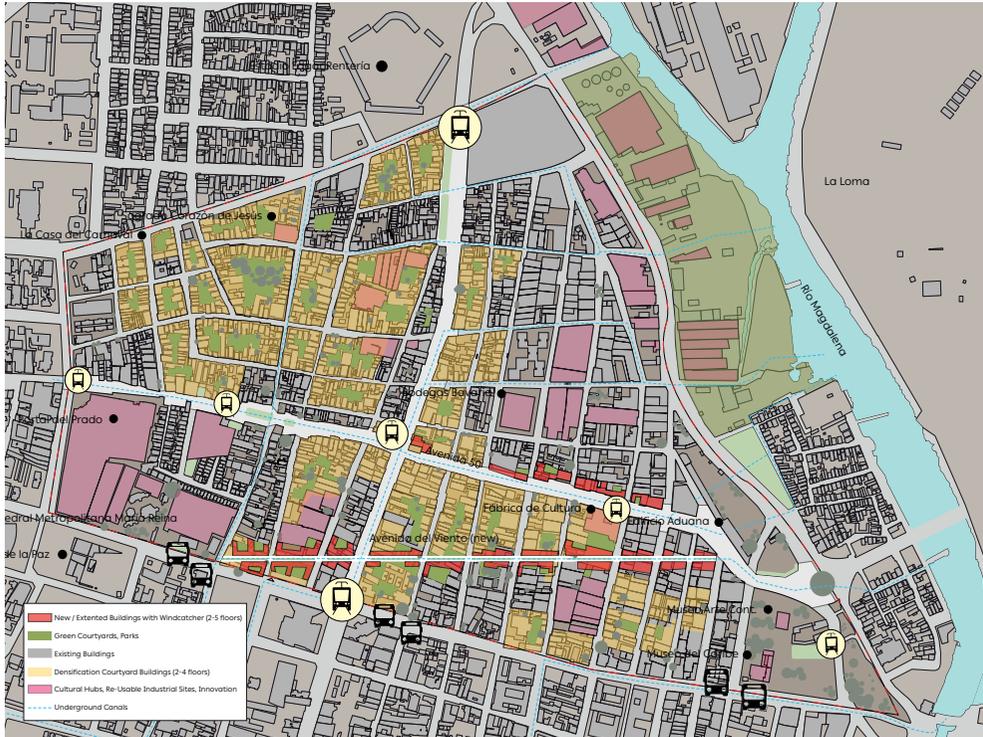
¹ Bild: online: New Zealand Digital Library: Fhaty, 1986

² Bild: meconstructionnews.com, 2013; Schnitt: Aga Khan Award for Architecture, 1982

³ Bild und Schnitt: Buch: Francis Kéré: Radically Simple, 2016

4. Stand Zwischenkritik

4. Stand Zwischenkritik: Städtischer Massstab



Verdichtung an bestehender Strasse und neue Achse in Windrichtung (Ost-West)



Neue Gebäude in Rot, aus östlicher Sicht

Intention:

- Eine neu erstellte Strassenachse in Windrichtung soll einen Windkorridor schaffen, welcher den südlichen Teil des Barrios belüftet, welcher sonst nur aus Strassen senkrecht zur vorherrschenden Windrichtung besteht.

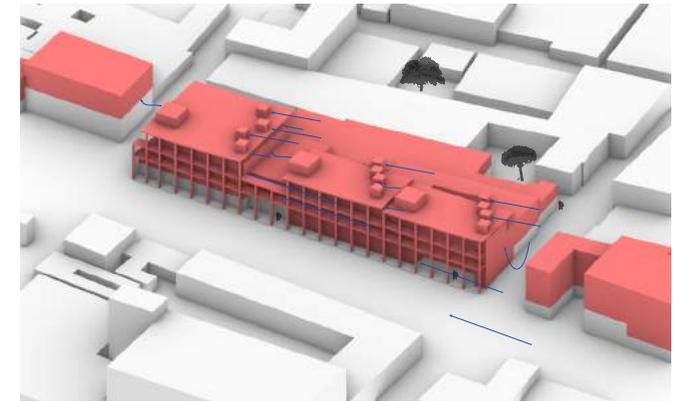
Kritik:

- Eine Strasse in Ost-West Richtung hat den Nachteil, dass der Strassenraum massiv erhitzt wird. Vor allem am Morgen und Nachmittag, wenn die Sonne nicht senkrecht steht, ist so eine Beschattung des Aussenraums und von Nachbargebäuden massiv erschwert.

4. Stand Zwischenkritik: Gebäude Prototyp

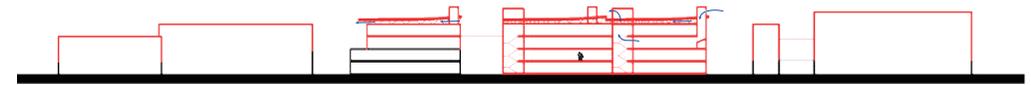


Verdichtung an bestehender Strasse und neue Achse in Windrichtung (Ost-West)



Axonometric 1:500

Axonometrie und Schnitt



Section A 1:500

Intention:

- Die Carrera 50 wurde verbreitert und dadurch die nördlichen Gebäude abgerissen und es fehlten Fassaden zur Strasse hin. Neue Architektur mit der Nutzung von natürlicher Belüftung soll dort entstehen. Beschattete Aussenräume durch Loggien lassen den Wind passieren.

Kritik:

- Die Visualisierung macht den Anschein einer massiven Bauweise. Eine hohe Speichermasse erhitzt den Innenraum jedoch nur zusätzlich, weil es in der Nacht nicht genug kalt wird, hat sie auch nicht den Vorteil als Puffer zu wirken.
- Die Windtürme sind zu knapp bemessen und es fehlt ein klarer, ästhetischer, architektonischer Ausdruck.

5. Vernakuläre Architektur und Baumaterialien

5. Vernakuläre Architektur und Baumaterialien: Maloca und Mythos



Maloca: riesiges Langhaus, Indigene Ufaina,
Foto um 1900 in Kolumbien ¹



Maloca: zeitgenössisch ²

Kritische Betrachtung des Zusammenhangs von Nachhaltigkeit und Vernakulärer Architektur:

In ihrem Text entzaubern AlSayyad und Arboleda die vernakuläre Architektur. Seit Vitruv, über Alberti bis hin zu Rudolfsky wird diese als zeitloses Ideal angesehen. Mit Beispielen wird veranschaulicht, welche Komponenten dazu führten, dass vernakuläre Architektur, vielfach gerechtfertigt, verschwindet.

Ein Beispiel ist das indigene Volk der Ufaina in Kolumbien. Traditionell lebten bis zu 200 Personen in einem Maloca. Wenn nach 10 - 15 Jahren die lokalen Ressourcen zugrunde gingen, zügelte die Gruppe einen Tagesmarsch weiter, wo es genug Wild und Fisch gab und bauten ein neues Maloca. Diese Praxis würde jedoch in der heutigen Zeit verunmöglicht durch den andauernden Bürgerkrieg zwischen der Regierung und FARC - Rebellen. Indigenen Stämme wurden vertrieben, Kinder als Soldaten missbraucht und Ressourcen ausgebeutet. Eine nachhaltige Nutzung der Ressourcen und die Möglichkeit traditionelle Malocas zu bauen ist nicht mehr gegeben. ³

¹ Bild: Thomas Whiffen, The North-West Amazons: Notes Of Some Months Spent Among Cannibal Tribes (London: Constable and Company, 1915)

² Bild: Comisión Fílmica Colombiana, Silvia Acheverri

³ Buch: Text: The Sustainable Indigenous Vernacular: Interrogating a Myth, Nezar AlSayyad, Gabriel Arboleda. Ausschnitt aus: Aesthetics of Sustainable Architecture, Sang Lee, 2011

5. Vernakuläre Architektur und Baumaterialien: Baupraxis in den Selbstbaugebieten



Bahareque: traditionell, Handwerk
Bambus/Holz, Lehm (Adobe), Putz ¹



Ranchito: temporär, unkompliziert
günstige Gebrauchtmaterialien ²



Casa: dauerhaft
Backstein ³

Katherine V. Gough untersuchte in ihrer Arbeit die Baupraxis in fünf Selbstbaugebieten in der kolumbianischen Stadt Pereira. Sie erkannte dabei zwei vorherrschende Haustypen. Zwei Drittel der Haushalte bauten zuerst ein ranchito (Hütte) aus Bambus und einfach zu erhaltenden, günstigen Materialien. Dies war dem Startkapital und erst temporären Charakter geschuldet. Im kollektiven Bewusstsein der Bewohner gilt jedoch das Haus aus Backsteinen als Ideal. Bambushäuser werden nicht als Casa bezeichnet und das Wort für Backstein (Ladrillo) gilt als Synonym für Baumaterial (Materiales). Sobald genügend Geld vorhanden ist, wird ein Haus aus Backstein gebaut. Die einzige Ausnahme von dauerhaften Bambushäusern bilden das traditionelle Bahareque, welches aber nur von älteren Menschen gebaut wurde. ⁴

¹ Bild: online: pinterest, Giselle Antunes

² Bild: Adam James Moore, Un Pedacito de Tierra: A Spatial Analysis of the Political Agency of Internally Displaced Persons in El Oasis, Medellín, 2016

³ Bild: online: stocksy, Alejandro Moreno de Carlos, Medellín, 2014

⁴ Buch: Text: Self-help Housing in Urban Colombia; Alternatives for the Production and Distribution of Building Materials; Katherine V. Gough, Kopenhagen, 1996

5. Vernakuläre Architektur und Baumaterialien: Bahareque



Bahareque: traditionell verwurzelt in Barranquilla ¹



Sichtbarkeit der Holz-Lehm-Konstruktion ¹



Entwurf für Guapi, Kolumbien ²

Dass neue Wohngebäude vor allem aus Backsteinen entstehen, heisst nicht, dass dieses Baumaterial klimatisch betrachtet das geeignetste ist. Zudem ist die Bauweise aus Holz oder Bambus, kombiniert mit Lehm, auch in Barranquilla traditionell verbreitet.

Victor Olgay, Experte für klimatisch passendes Bauen, entwarf für Kolumbien Gebäude aus Holz unter Nutzung von natürlicher Belüftung.

¹ Bild: Evolución de la Arquitectura popular en Barranquilla, Porfirio Ospino Contreras

² Bild: Clima y arquitectura en Colombia, Victor Olgay

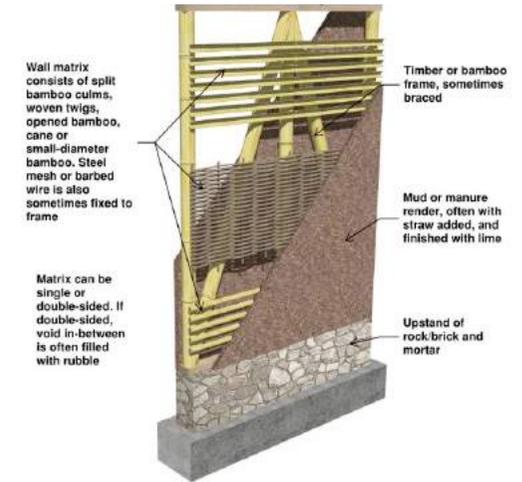
5. Vernakuläre Architektur und Baumaterialien: Bahareque



Bahareque: in Costa Rica, 20-jährig¹



Bahareque: mögliche Ausführung, dünne Wände¹



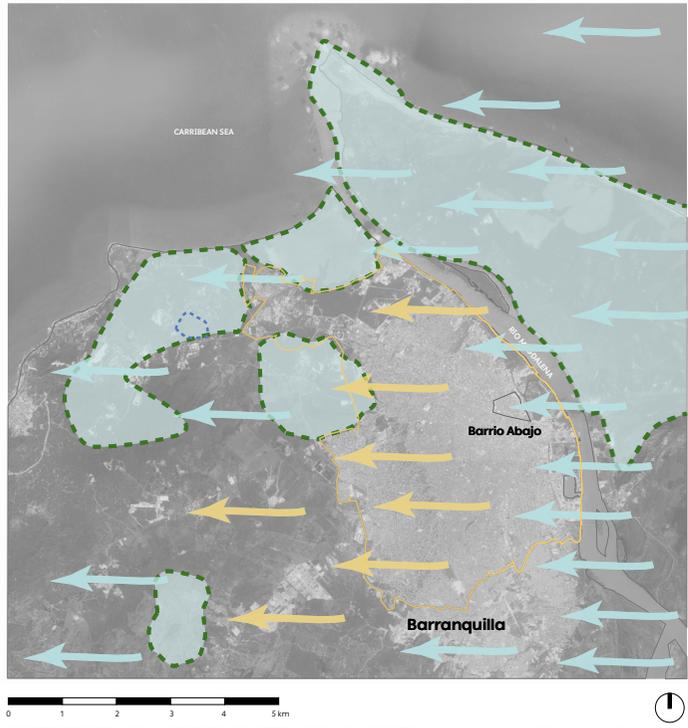
Bahareque: Wandkonstruktion in Südamerika¹

Das System Bahareque ist anpassbar auf die heutige Zeit. Mit der richtigen Anpassung an Anforderungen nach Dauerhaftigkeit, Erdbeben- und Brandsicherheit wurden schon zahlreiche Bahareques an verschiedensten Orten in der Welt gebaut. Erfolgreich verwendet beispielsweise als Ersatzgebäude derjenigen, welche durch Katastrophen zerstört wurden.¹

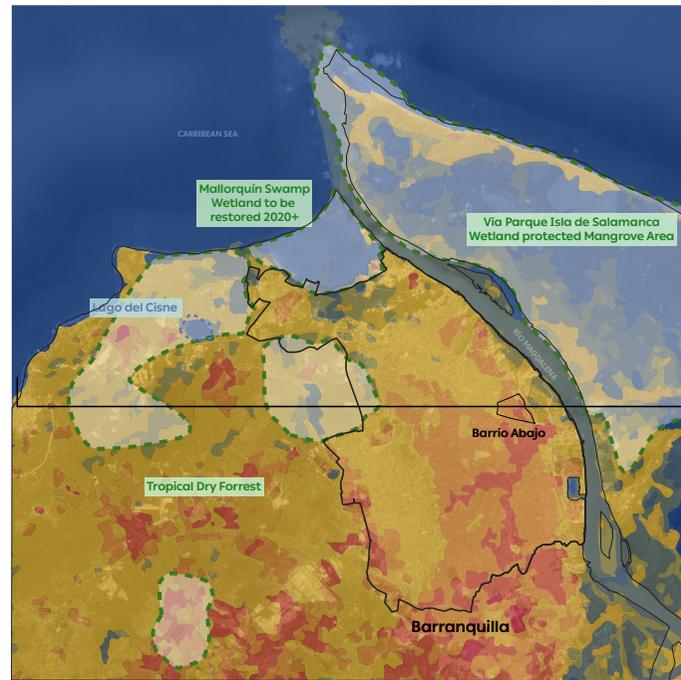
¹ Design Guide for Engineered Bahareque Housing; Kaminski, Lawrence, Trujillo, 2016

6. Endabgabe

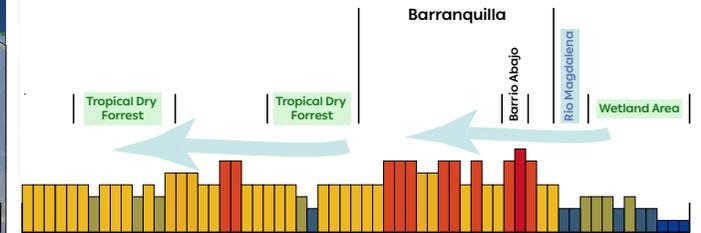
6. Endabgabe: Klimatische Bedingungen



Hauptwindrichtung, Stadtgebiet und Barrio

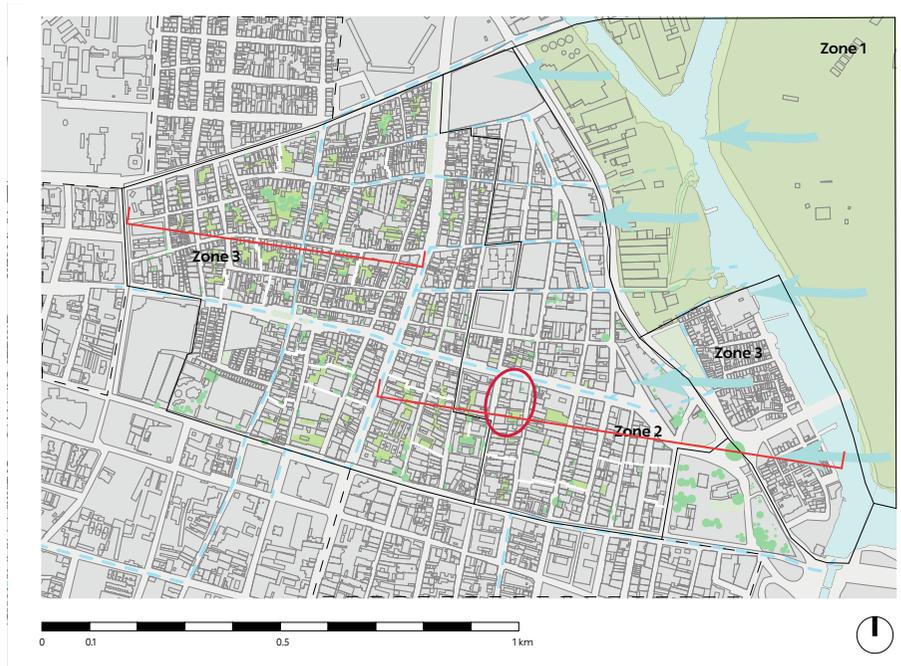
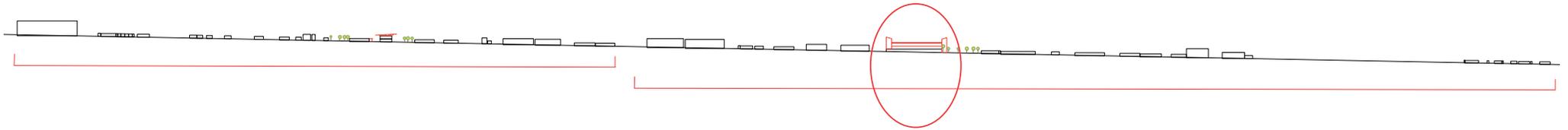


Hitzekarte, Feuchtgebiete und Regenwald



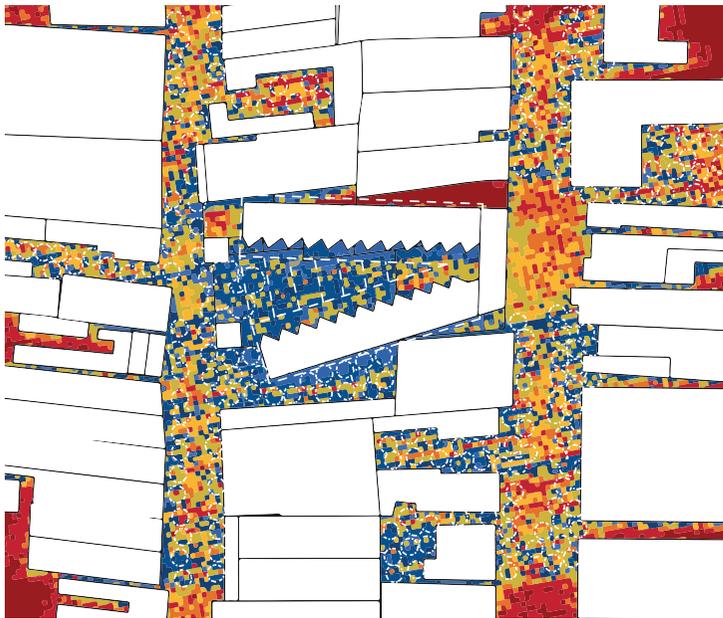
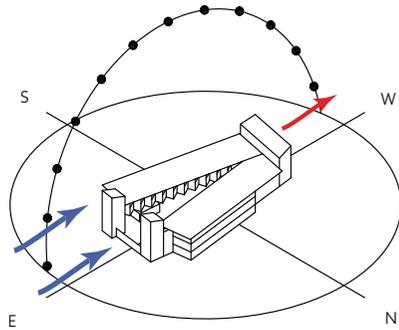
Schnitt mit Unterschieden mittlerer Strahlungstemperatur

6. Endabgabe: Standort



Entwurf, Standort innerhalb Barrio

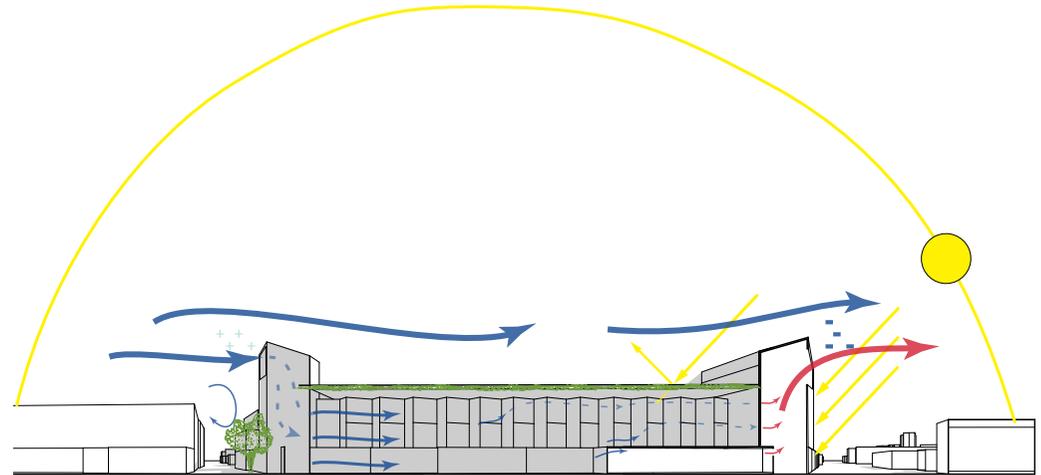
6. Endabgabe: Prototyp Architektur



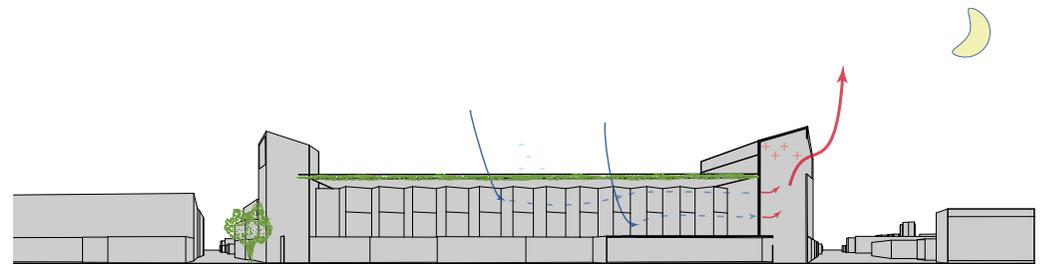
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 <

Anzahl Sonnenstunden auf Strassenebene

Der V-förmige Grundriss öffnet sich zur Windrichtung und der Morgensonne, während er am Nachmittag vor Hitze abschirmt

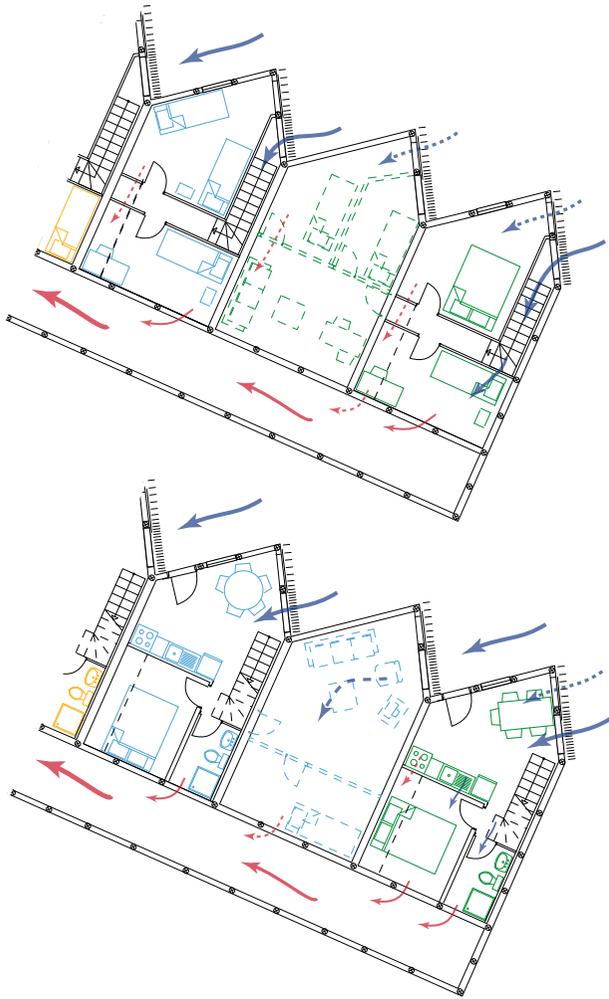


Sonnenposition am Referenztag 15. Okt. um 3 Uhr Nachmittags
der Solarkamin im Westen kann am Nachmittag aufgeheizt werden
und beschattet während der heissesten Zeit des Tages

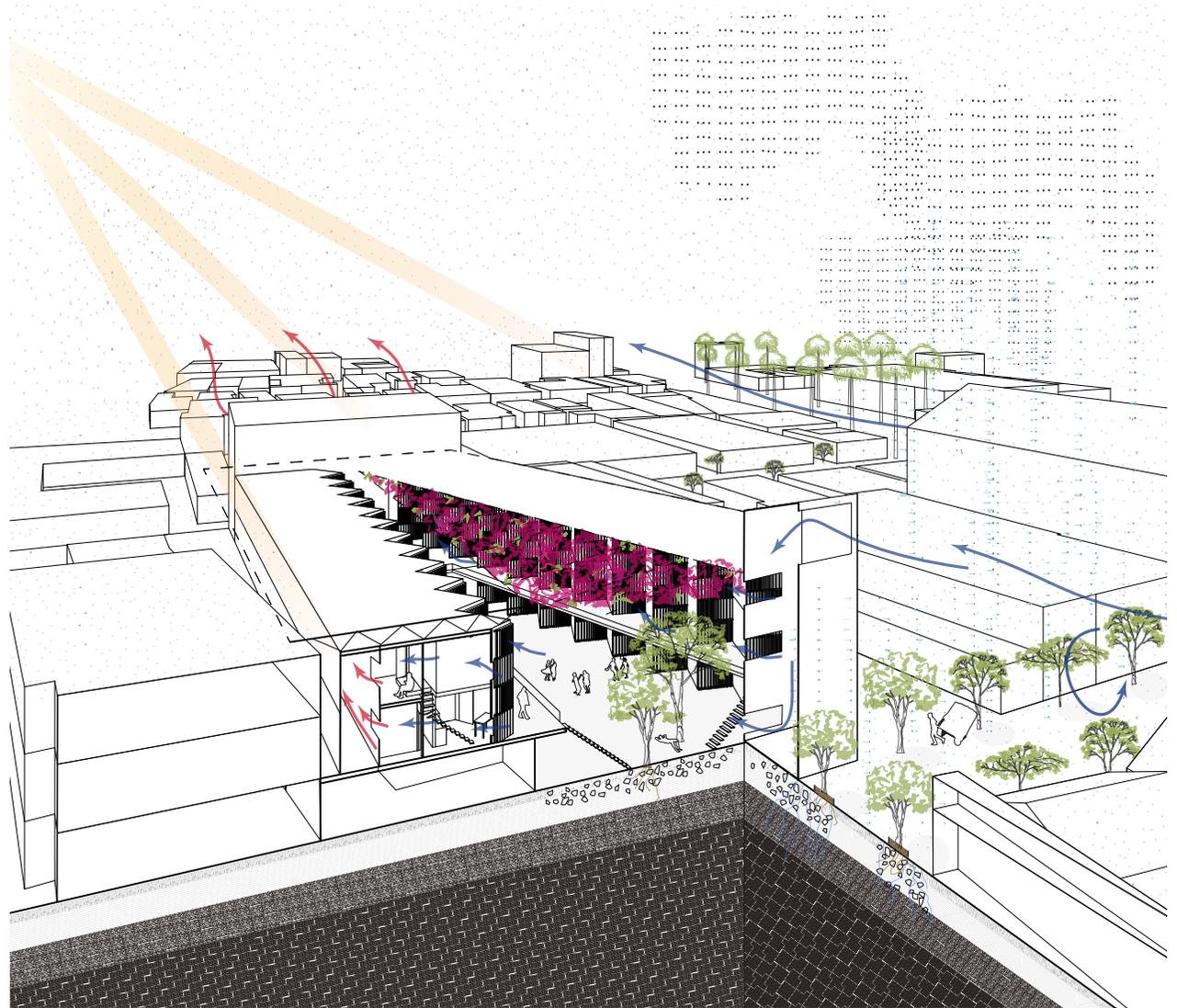


Erwärmte Rückwand des Solarkamins lässt diesen langsamer Abkühlen als die Umgebung
und ermöglicht damit eine natürliche Belüftung der Wohneinheiten auch bei Windstille

6. Endabgabe: Grundrisse und Axonometrie



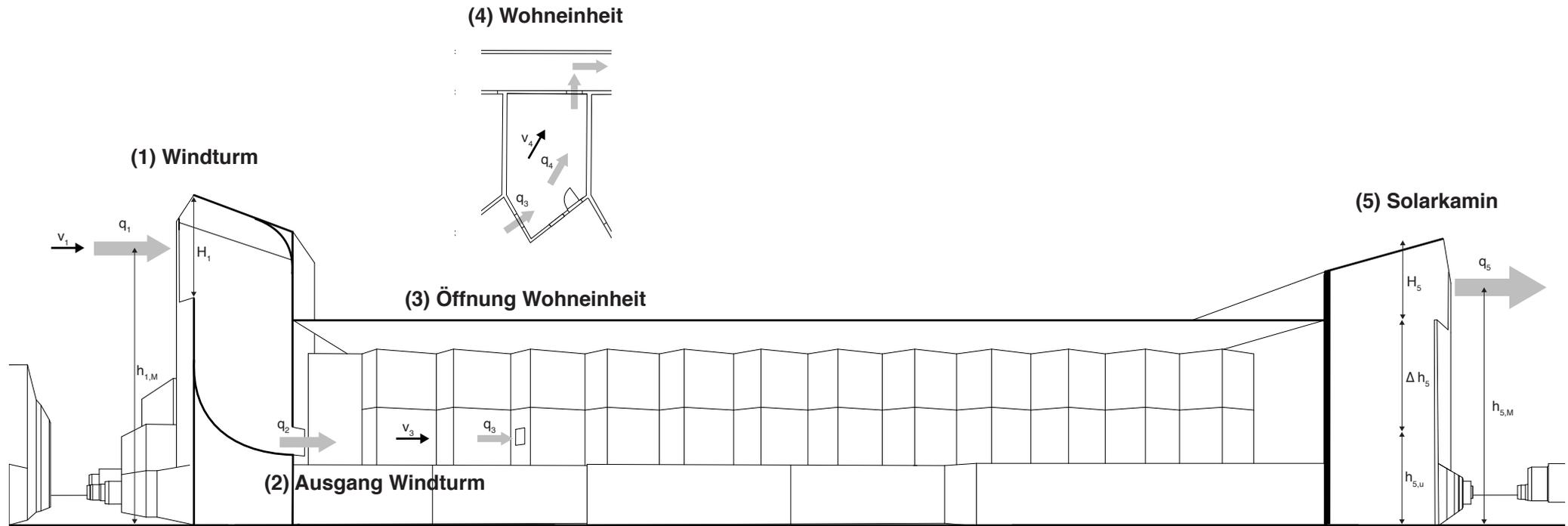
Eine Wohnung besteht aus zwei Wohneinheiten (je 20 m²) übereinander und einer Einheit zur eigenhändigen Erweiterung.



Der Ostwind gelangt durch die beiden Windtürme in den Innenhof, durch die Wohneinheiten und schliesslich durch den Solarkamin wieder nach draussen.

7. Berechnungen

7. Berechnungen: Vorgehen

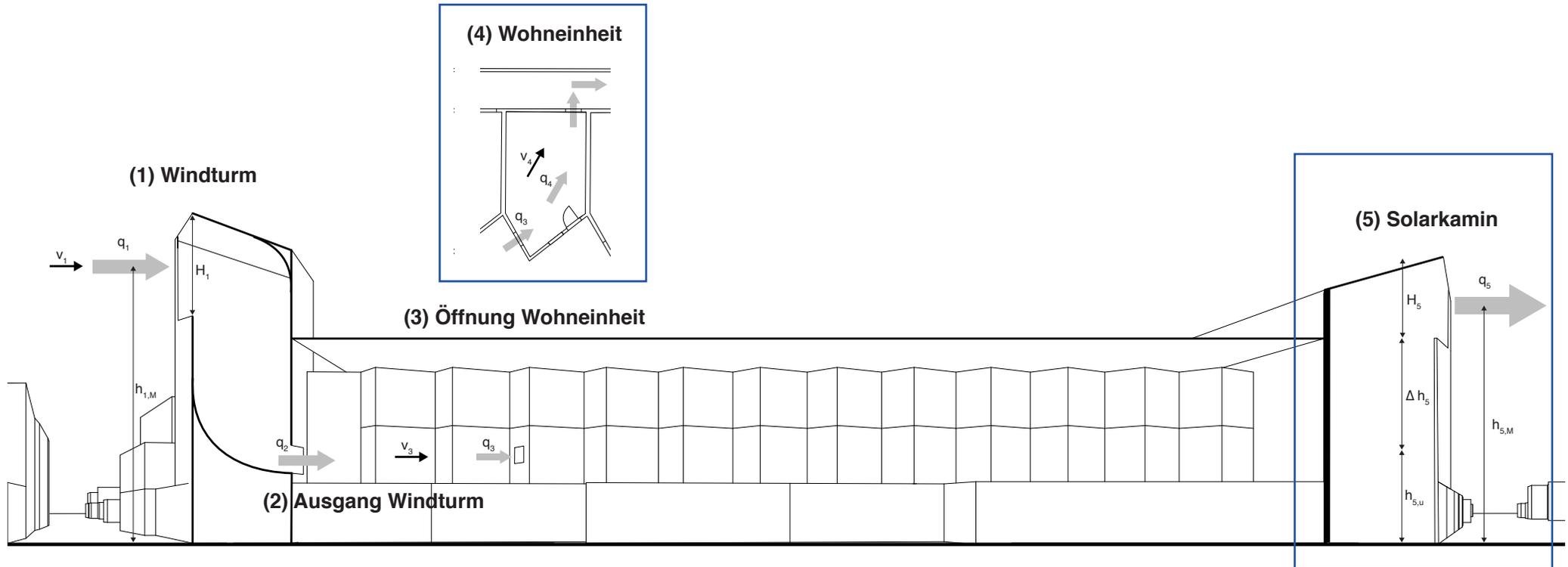


- Zuerst wurde versucht mittels der Publikation der Ingenieursvereinigung CIBSE: *Natural ventilation in non-domestic buildings*¹ die Berechnungen durchzuführen. Die Beispielrechnungen liessen jedoch keine Belüftungsberechnung mittels gleichzeitigem Effekt eines wärmeren Solarkamins und Winddruck zu.
- Eine Dissertation von Lukas Karl Schwan² zeigte auf, dass eine Solarkamin, unterstützt durch Winddruck, annähernd berechnet werden kann. Er hat verschiedene Berechnungsarten mittels dem Simulationsprogramm TRNSYS (welches auch in Energie und Klimasysteme III erwähnt wurde) und einem tatsächlichen Versuchsaufbau im Labor verglichen.
- Das Vorgehen, welches ich für diese Arbeit gewählt habe, ist:
- Schritt 1: Berechnung des Volumenstroms q_{Solar} durch alleinige Beachtung des Effekts Auftriebsdruck im stärker als die Umgebung erhitzten Solarkamin (5)
- Schritt 2: Berechnung des Volumenstroms q_{Wind} durch alleinige Beachtung des Effekts Winddruck eingeführt durch die beiden Windtürme (1)
- Schritt 3: Berechnung des Volumenstroms $q_{\text{gesamt}} = \sqrt{q_{\text{Solar}}^2 + q_{\text{Wind}}^2}$ als Ergebnis der Kombination beider Effekte (LBL Modell²)

¹ CIBSE applications manual AM10, Natural ventilation in non-domestic buildings, reprinted with corrections - 2007

² Dissertation: Steigerung der Lüftungseffektivität von Solarkaminen durch thermische Aktivierung und Nutzung von Windeffekten; Lukas Karl Schwan, TU München, 2019

7. Berechnungen: Schritt 1: Solarkamin



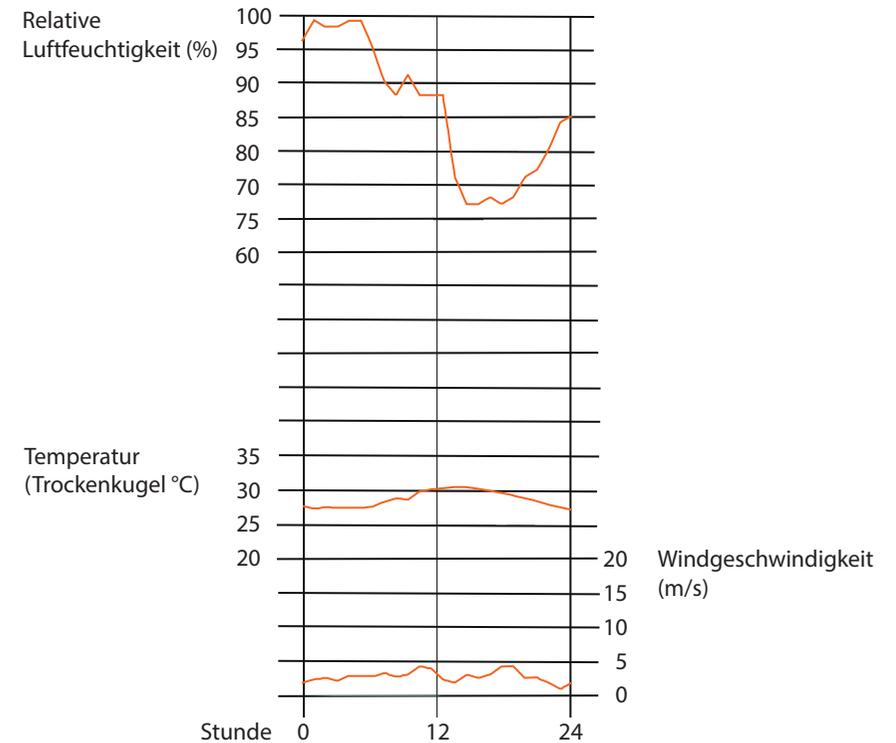
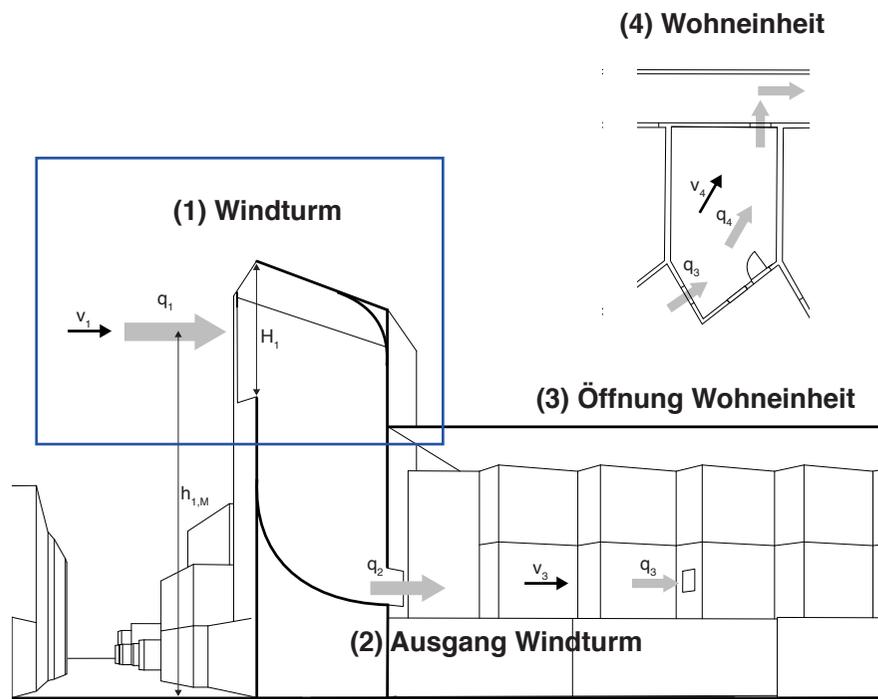
- Alle Berechnungen mit eingesetzten Werten sind in der separaten Excel Datei ersichtlich. Dort befinden sich auch Quellausschnitte für Koeffizienten (c_d , c_p).
- Folgende Annahmen wurden getroffen: Aussentemp. 30 °C = Höchstwert am Referenztag (15. Okt.); Temp. im Kamin: als 10 °C höher festgelegt
 $h_{5,u} = 4.5 \text{ m}$ (Höhe der Öffnung Wohneinheit zu Solarkamin); $\Delta h_5 = 5.5 \text{ m}$; $p_L = 101\,325 \text{ Pa}$; $R = 287 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$; $g = 9.81 \text{ m} / \text{s}^2$; $\rho = 1.2 \text{ kg} / \text{m}^3$
 $q_{5,\text{Solar}} = 90 \text{ m}^3/\text{s}$ (vorherige Rechnungsversuche gaben diese Größenordnung); $c_d = 0.6$ (wie offenes Fenster¹); $c_{p,3} = 0.5$ (Annahme Tabelle²)
 Geschwindigkeit in Wohneinheit berechnet als Winddruck durch Öffnung mit Öffnungsgröße $A_4 = 10 \text{ m}^2$ (Raumbreite * Raumhöhe)
- (5) Ausgang Solarkamin, Auftriebsdruck³: $\Delta p_{5,\text{Solar}} = g \cdot (\rho_{\text{aussein}} - \rho_{\text{aussein}}) \cdot \Delta h_5 \cdot (-1) = -2.01 \text{ Pa}$ mit $\rho_L = p_L / (R \cdot T_L)$ (Luftdichte³)
- (5) Öffnungsgröße Solarkamin³: $A_5 = \sqrt{\rho / (2 \cdot \Delta p_{5,\text{Solar}})} \cdot (q_{5,\text{Solar}} / c_d) = 82 \text{ m}^2$ ergibt für die Öffnung die Masse $H_5 = 4 \text{ m}$ und $B_5 = 20.5 \text{ m}$
- (4) Windgeschwindigkeit in der Wohneinheit³: $v_{4,\text{Solar}} = \sqrt{(2 \cdot \Delta p_{4,\text{Solar}}) / (c_{p,3} \cdot \rho)} = 0.39 \text{ m/s}$ mit $\Delta p_4 = (0.5 \cdot \rho \cdot q_4^2) / (A_4^2 \cdot c_d^2) = 0.05 \text{ Pa}$ (Volumenstr. Öffn.³)

¹ S. 56 Fig. 4.20 Estimation of C_{df} ...: CIBSE applications manual AM10, Natural ventilation in non-domestic buildings, reprinted with corrections - 2007

² S. 32 Tab. 2.8: Steigerung der Lüftungseffektivität von Solarkaminen durch thermische Aktivierung und Nutzung von Windeffekten; Lukas Karl Schwan, TU München, 2019

³ Formelsammlung Energie- und Klimasysteme, 25. September 2020

7. Berechnungen: Schritt 2: (1) Winddruck Eingang Windturm

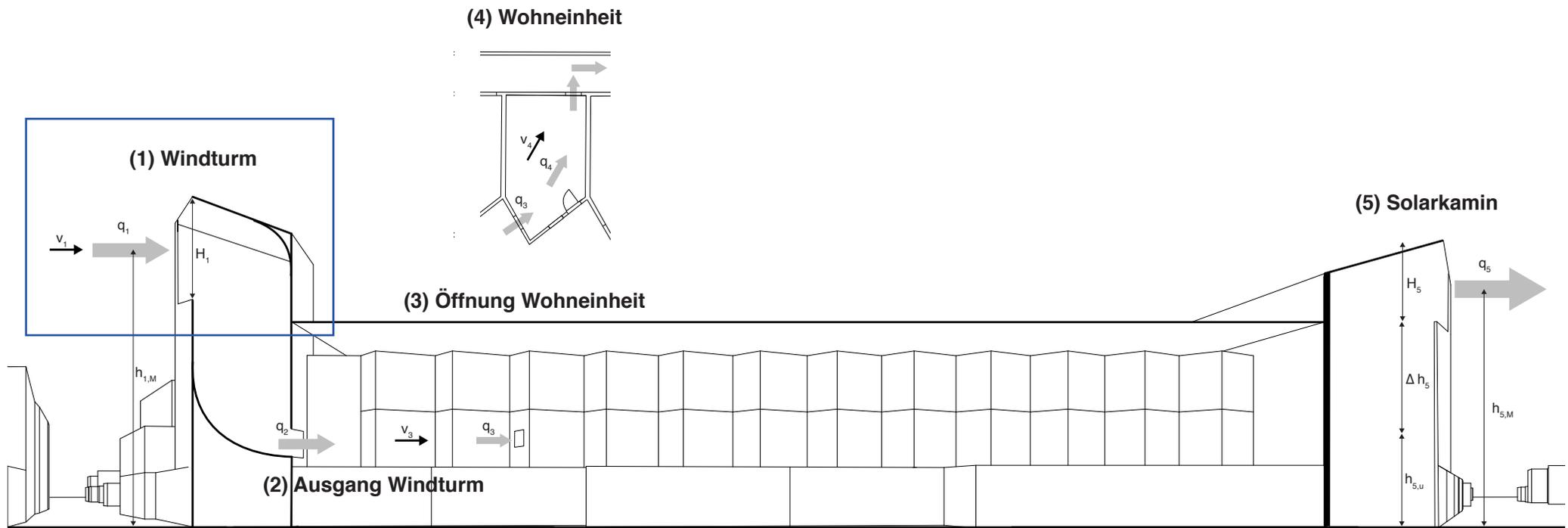


• Annahmen: Windgeschw. (10m) $v = 2.5 \text{ m/s}$ = Durchschnittswert am Referenztag (15. Okt.)

■ Gewählter Tag (15. Okt.)

• Da 89 % der Tage bessere Bedingungen als der 15. Oktober haben, sie namentlich windiger und kühler sind, hat die Berechnung von Öffnungsgrößen für diesen Tag den Vorteil, dass an den meisten Tagen noch etwas bessere Bedingungen herrschen und somit eine natürliche Belüftung gewährleistet ist, welche die meisten Stunden des Jahres komfortabel gestaltet.

7. Berechnungen: Schritt 2: (1) Winddruck Eingang Windturm



- Annahmen: Windgeschw. (10m) $v = 2.5 \text{ m/s} =$ Durchschnittswert am Referenztag (15. Okt.); $g_1 = 0.28$ (Proflexponent Vorstadt¹, Nachbargeb. 1-2 stöckig) $c_d = 0.6$ (wie offenes Fenster²); $c_{p,1} = 0.86$ (Annahme Tabelle³); $\rho = 1.2 \text{ kg / m}^3$
Folgende drei Werte, welche den Volumenstrom beeinflussen, wurden erst durch Ausprobieren im Excel definitiv festgelegt. Dafür musste eine Balance gefunden werden zwischen der Geschwindigkeit im Innenhof zwischen Ausgang Windturm und Öffnung, v_3 und der Windgeschwindigkeit in der Wohneinheit v_4 , sie sollten genug hoch sein um zu kühlen, aber nicht unkomfortabel. $A_1 = 26.5 \text{ m}^2$ (Öffnungsgröße Windturm); $H_1 = 5.15 \text{ m}$; $h_{1,M} = 14 \text{ m}$

- (1) Windgeschwindigkeit Eingang Windturm¹: $v_1 = v * (h_{1,M} / 10)^{g_1} = 2.75 \text{ m/s}$

- (1) Volumenstrom Öffnung Windturm⁴: $q_{1,\text{Wind}} = c_d * A_1 * \sqrt{(2 * \Delta p_{1,\text{Wind}}) / \rho} = 40.5 \text{ m}^3 / \text{s}$ mit $\Delta p_{1,\text{Wind}} = c_{p,1} * (\rho / 2) * v_1^2 = 3.89 \text{ Pa}$ (Winddruck⁴)

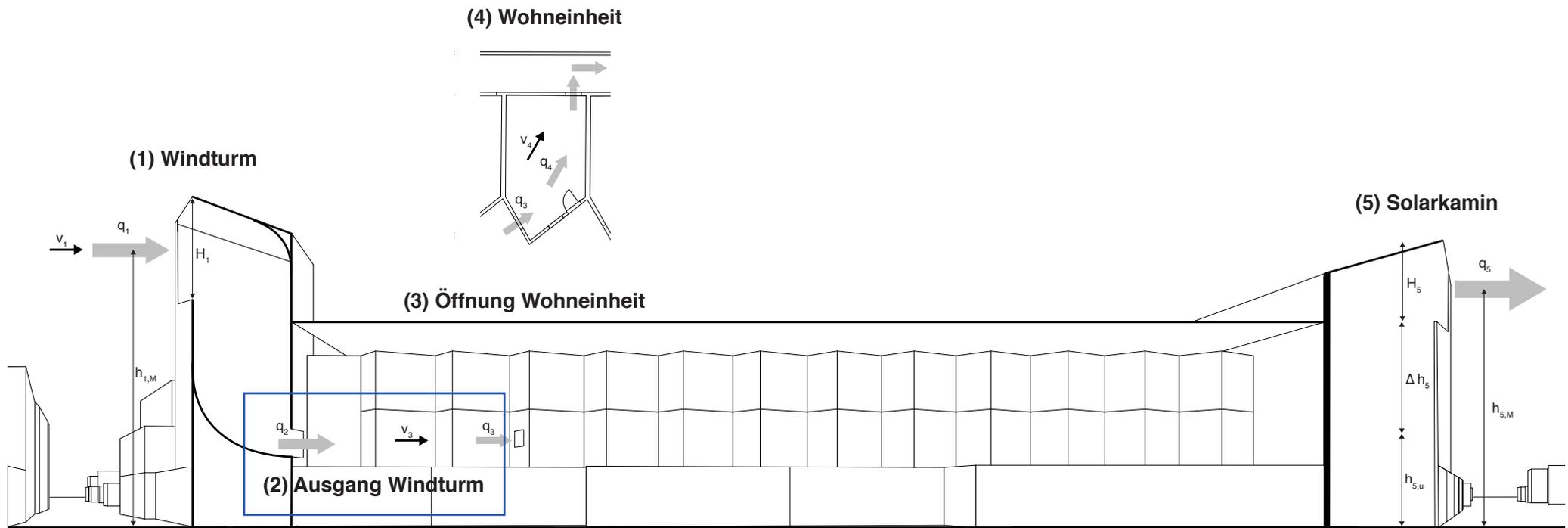
¹ S. 33 Gleichung 2.27 und Abb. 2.15: Steigerung der Lüftungseffektivität von Solarkaminen durch thermische Aktivierung und Nutzung von Windeffekten; Lukas Karl Schwan, TU München, 2019

² S. 56 Fig. 4.20 Estimation of C_{df} ...: CIBSE applications manual AM10, Natural ventilation in non-domestic buildings, reprinted with corrections - 2007

³ S. 102, 103 Fig. 4.1, Tab. 4.1: Wind Towers : Architecture, Climate and Sustainability; Bahadori, Mehdi N., et al., Springer International Publishing AG, 2014 (ebook via ETH, 17.1.2021)

⁴ Formelsammlung Energie- und Klimasysteme, 25. September 2020

7. Berechnungen: Schritt 2: (2) Ausgang Windturm



- Annahmen: $c_d = 0.6$ (wie offenes Fenster¹) ; $c_{p,2} = 0.05$ (Annahme Tabelle²) ;
In der Publikation zu Windtürmen³ wird die Berechnung von Druckverlusten durch Richtungsänderungen als massgebender angesehen als die durch Reibung, hier wurde nur diese berücksichtigt. Folgende Werte wurden verwendet: v_1 als Annäherung (da kein Durchschnittsgeschwindigkeit im Windturm ermittelt wurde) und $K = 1$ als Summe von zwei Biegungen (0.5). Gerundete Ecken wurden gewählt, da die Werte von 1.3 - 1.5 für 90° Knicke zu hoch wären. $A_2 = 24.1 \text{ m}^2$ wurde im Excel ermittelt, möglichst hoch für hohen Wind in der Wohneinheit, aber genug tief um am Ausgang Druck zu erhalten $\Delta p_{2, \text{Wind}}$.
- (2) Druck Ausgang Windturm ohne Verluste⁴: $\Delta p_{2, \text{vorher}} = (0.5 * \rho * q_2^2) / (A_2^2 * c_d^2) = 4.69 \text{ Pa}$ mit $q_2 = q_1$
- (2) Druck Ausgang Windturm mit Verlusten: $\Delta p_{2, \text{Wind}} = \Delta p_{2, \text{vorher}} - \Delta p_{d, \text{Wind}} = 0.16 \text{ Pa}$ mit $\Delta p_{d, \text{Wind}} = 0.5 * K * \rho * v_1^2$ (Druckverluste³)
- (2) Windgeschwindigkeit Ausgang Windturm⁴: $v_{2, \text{Wind}} = \sqrt{(2 * \Delta p_{2, \text{Wind}}) / (c_{p,2} * \rho)} = 2.34 \text{ m/s}$

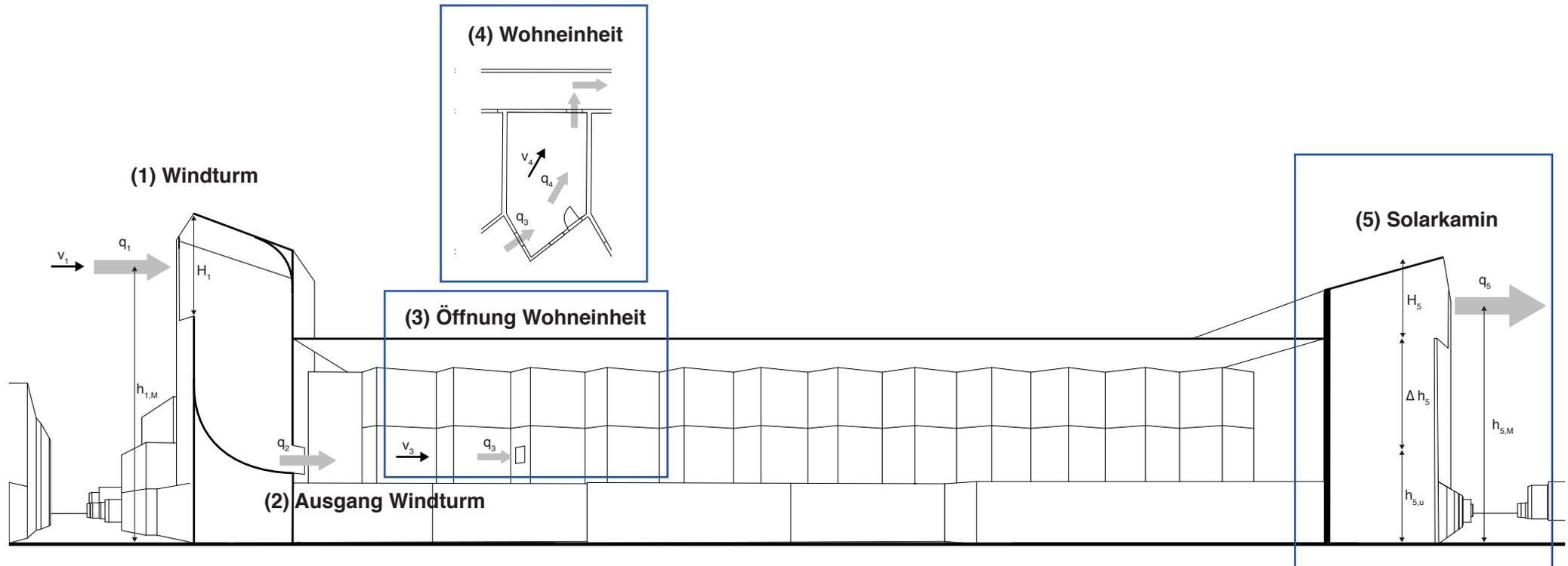
¹ S. 56 Fig. 4.20 Estimation of C_d ...: CIBSE applications manual AM10, Natural ventilation in non-domestic buildings, reprinted with corrections - 2007

² S. 102, 103 Fig. 4.1, Tab. 4.1: Wind Towers : Architecture, Climate and Sustainability; Bahadori, Mehdi N., et al., Springer International Publishing AG, 2014 (ebook via ETH, 17.1.2021)

³ S. 111, Gleichung 4.29: Wind Towers : Architecture, Climate and Sustainability; Bahadori, Mehdi N., et al., Springer International Publishing AG, 2014 (ebook via ETH, 17.1.2021)

⁴ Formelsammlung Energie- und Klimasysteme, 25. September 2020

7. Berechnungen: Schritt 2: (3) + (4) Wohneinheit + (5) Winddruck durch Solarkamin



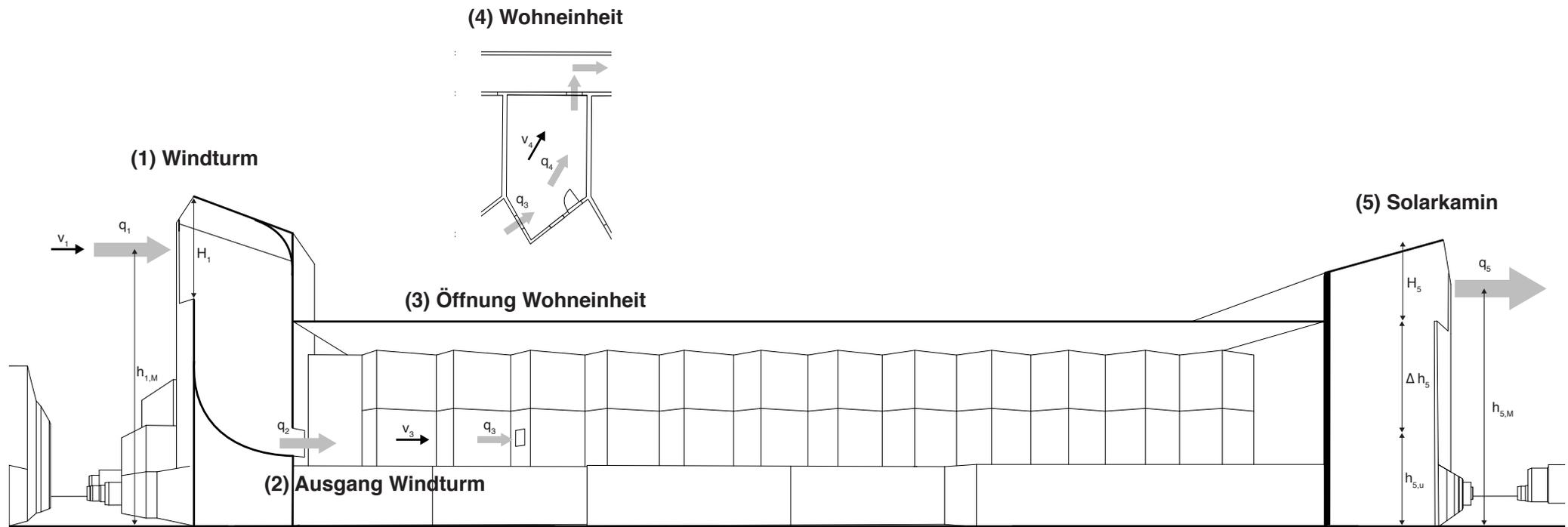
- Annahmen: als Vereinfachung Windgeschwindigkeit bleibt gleich $v_2 = v_3$; $c_d = 0.6$ (wie offenes Fenster¹); $c_{p,3} = 0.5$ (Annahme Tabelle²)
Durch den nach oben geschlossenen Innenhof (Dächer und Gitter mit Kletterpflanzen) gelangt sämtliche Luft durch die Wohneinheiten und Solarkamin nach draussen: $q_4 = q_3 = q_2 / 27 = - (q_5 / 54)$ (54 Wohneinheiten, 2 Windtürme, 1 Solarkamin)
- (3) Öffnungsgröße Wohneinheit³: $A_3 = \sqrt{\rho / (2 \cdot \Delta p_{3,Wind})} \cdot (q_{3,Wind} / c_d) = 1.5 \text{ m}^2$ mit $\Delta p_{3,Wind} = c_{p,3} \cdot (\rho / 2) \cdot v_3^2 = 1.65 \text{ Pa}$ (Winddruck³)
- (4) Windgeschwindigkeit in der Wohneinheit³: $v_{4,Solar} = \sqrt{(2 \cdot \Delta p_{4,Solar}) / (c_{p,3} \cdot \rho)} = 0.35 \text{ m/s}$ mit $\Delta p_4 = (0.5 \cdot \rho \cdot q_4^2) / (A_4^2 \cdot c_d^2) = 0.05 \text{ Pa}$ (Volumenstr. Öffn.³)
- (5) Druck Ausgang Solarkamin³: $\Delta p_{5,Wind} = (0.5 \cdot \rho \cdot q_5^2) / (A_2^2 \cdot c_d^2) = - 1.63 \text{ Pa}$

¹ S. 56 Fig. 4.20 Estimation of C_{df} ...: CIBSE applications manual AM10, Natural ventilation in non-domestic buildings, reprinted with corrections - 2007

² S. 32 Tab. 2.8: Steigerung der Lüftungseffektivität von Solarkaminen durch thermische Aktivierung und Nutzung von Windeffekten; Lukas Karl Schwan, TU München, 2019

³ Formelsammlung Energie- und Klimasysteme, 25. September 2020

7. Berechnungen: Schritt 3: Effekt Solarkamin und Winddruck kombiniert



- Annahmen: $q_{\text{gesamt}} = \sqrt{q_{\text{Solar}}^2 + q_{\text{Wind}}^2} = 121 \text{ m}^3 / \text{s}$ als Ergebnis der Kombination beider Effekte (LBL Modell¹).
- Mit dem neuen Volumenstrom wurden nun die endgültigen Windgeschwindigkeiten errechnet (Formeln wie vorherige Seiten, Berechnung im Excel ersichtlich). Hier ist die Übersicht der Ergebnisse; ΔT bezeichnet dabei um wieviel es im Solarkamin wärmer ist als im Innenraum und Außenraum. n ist die Luftwechselrate je Wohneinheit.

Effekt		q (m ³ /s)	v_3 (m/s)	v_4 (m/s)	n (1/min)
Auftriebsdruck	$v = 0 \text{ m/s}$ $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	100	2.60	0.39	2.0
Winddruck	$v = 2.5 \text{ m/s}$ $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$	90	2.34	0.35	1.8
Kombination	$v = 2.5 \text{ m/s}$ $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	135	3.50	0.53	2.7

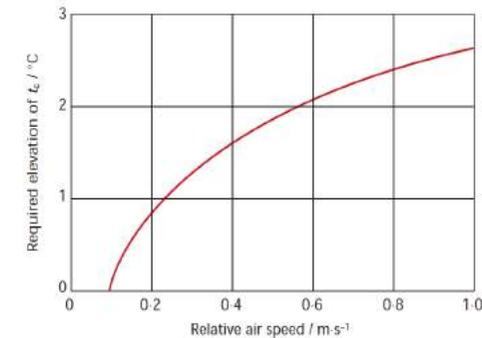
¹ Dissertation: Steigerung der Lüftungseffektivität von Solarkaminen durch thermische Aktivierung und Nutzung von Windeffekten; Lukas Karl Schwan, TU München, 2019

8. Komfort und Fazit

8. Komfort

Effekt		q (m ³ /s)	v_3 (m/s)	v_4 (m/s)	n (1/min)
Auftriebsdruck	$v = 0$ m/s $\Delta T = 10$ °C	100	2.60	0.39	2.0
Winddruck	$v = 2.5$ m/s $\Delta T = 0$ °C	90	2.34	0.35	1.8
Kombination	$v = 2.5$ m/s $\Delta T = 10$ °C	135	3.50	0.53	2.7

Ergebnisse Berechnungen Entwurfsprojekt



Effekt Windgeschwindigkeit auf Empfindungstemperatur ¹

Im Vergleich zu uns Westeuropäern haben Bewohner der Tropen ein anderes Temperaturempfinden. Werte über 30 °C werden unter bestimmten Bedingungen nicht als unkomfortabel angesehen. Ein wichtiger Beitrag kann natürliche Belüftung liefern, hohe Temperaturen werden als weniger heiss empfunden. Dabei sind bei höheren Temperaturen auch höhere Windgeschwindigkeiten möglich, da sie nicht als unkomfortabel empfunden werden. Eine Befragung in einer natürlich belüfteten Kantine in Singapur (welches klimatisch zu Kolumbien sehr ähnlich ist) hat ergeben, dass eine Durchschnittstemperatur von 30.1 °C, mit einer durchschnittlichen relativen Feuchtigkeit von 75% und der hohen Windgeschwindigkeit von 0.47 m/s als sehr angenehm empfunden wurde.²

Auch ein Beispiel mit Komfortanalysen einer Schule in Paraguay zeigt, dass hohe Windgeschwindigkeiten möglich sind, dort 0.4 m/s, und diese damit das arbeiten in nur durch natürliche Belüftung gekühlten Räumen angenehm machen. Hohe Feuchtigkeit und Temperaturen über 30°C werden empirisch noch immer als komfortabel empfunden, auch wenn diese mittels Berechnungsmethoden (PMV oder TSV-Andreas) schlecht abschneiden.³

In den Berechnungen zum Entwurfsprojekt wurde angestrebt hohe Windgeschwindigkeiten v_4 um die 0.5 m/s in der Wohneinheit zu erreichen welche damit die empfundene Temperatur bis fast 2 °C senken. Dies wurde erreicht, während gleichzeitig die Windgeschwindigkeit v_3 im Innenhof genug tief gehalten wurde, um nach dem *Lawson comfort criteria* noch angenehm zu bleiben für Aktivitäten wie kurzes Hinsetzen. Dabei ist auch zu beachten, dass diese hohen Geschwindigkeiten nur zwischen den Windtürmen und Eingängen der Wohneinheiten bestehen, ein Grossteil des Hofes wird niedrigere haben.

¹ S. 6 Fig. 2.4 Effect of air speed on dry resultant temperature: CIBSE applications manual AM10, Natural ventilation in non-domestic buildings, reprinted with corrections - 2007

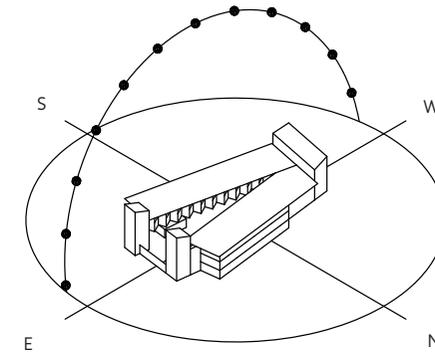
² S. 225: Applying Natural Ventilation for Thermal Comfort in Residential Buildings in Singapore; Wang Liping, Wong Nyuk Hien, National University of Singapore, 2007

³ Thermal Comfort Assessment in the Hot and Humid Region of Paraguay: a Comparison Between Three Methodologies; López, Lucchese, Andreasi, 2015

8. Fazit

Effekt		q (m ³ /s)	v_3 (m/s)	v_4 (m/s)	n (1/min)
Auftriebsdruck	$v = 0$ m/s $\Delta T = 10$ °C	100	2.60	0.39	2.0
Winddruck	$v = 2.5$ m/s $\Delta T = 0$ °C	90	2.34	0.35	1.8
Kombination	$v = 2.5$ m/s $\Delta T = 10$ °C	135	3.50	0.53	2.7

Ergebnisse Berechnungen Entwurfsprojekt



Axonometrie Entwurfsprojekt

Die Ergebnisse der Berechnungen sind mit Vorsicht zu geniessen. Sehr unsicher ist beispielsweise ob die Winddruckkoeffizienten c_p richtig gewählt wurden, Druckverluste im Windturm, sowie zwischen Wohneinheit und Solarkamin (welche gar nicht berechnet wurden). Wie weit sich der Solarkamin erhitzt und welche Masse er haben müsste wäre auch noch zu verbessern. So wird in Veröffentlichungen eine Tiefe von nur 0.1 - 0.3 m als optimal bewertet, um keine abwärtsgerichteten Gegenströmungen zu erhalten.¹

Trotzdem meine ich folgende Erkenntnisse aus den Berechnungen gewonnen zu haben:

- Der Effekt des Solarkamins fiel um einiges grösser aus, als ich erwartet hatte, gedacht war er ursprünglich nur als Notlösung bei Windstille oder dem Übergang von Tag zu Nacht, während dem er als träge Masse mit erhöhter Temperatur weiter kühle Luft durch die Wohneinheiten ziehen sollte.
- Die Dimension der beiden Windtürme musste angepasst werden (GR ursprünglich 4 * 4m), es wurde nun je eine Öffnung von 5.15 * 5.15 m berechnet um genügend Luft nach unten zu befördern.
- Das System, von Windtürmen welche Luft durch den Innenhof hinein in Wohneinheiten bläst gab wegen der Komplexität Probleme bei den Berechnungen welche wahrscheinlich auch bei einer tatsächlichen Ausführung bestehen würden. Separate Windtürme oder zumindest getrennte Luftröhren je Einheit, würden sicherlich bessere Steuerungsmöglichkeiten bewerkstelligen um komfortable Wohnbedingungen zu ermöglichen.

¹ Dissertation: Steigerung der Lüftungseffektivität von Solarkaminen durch thermische Aktivierung und Nutzung von Windeffekten; Lukas Karl Schwan, TU München, 2019