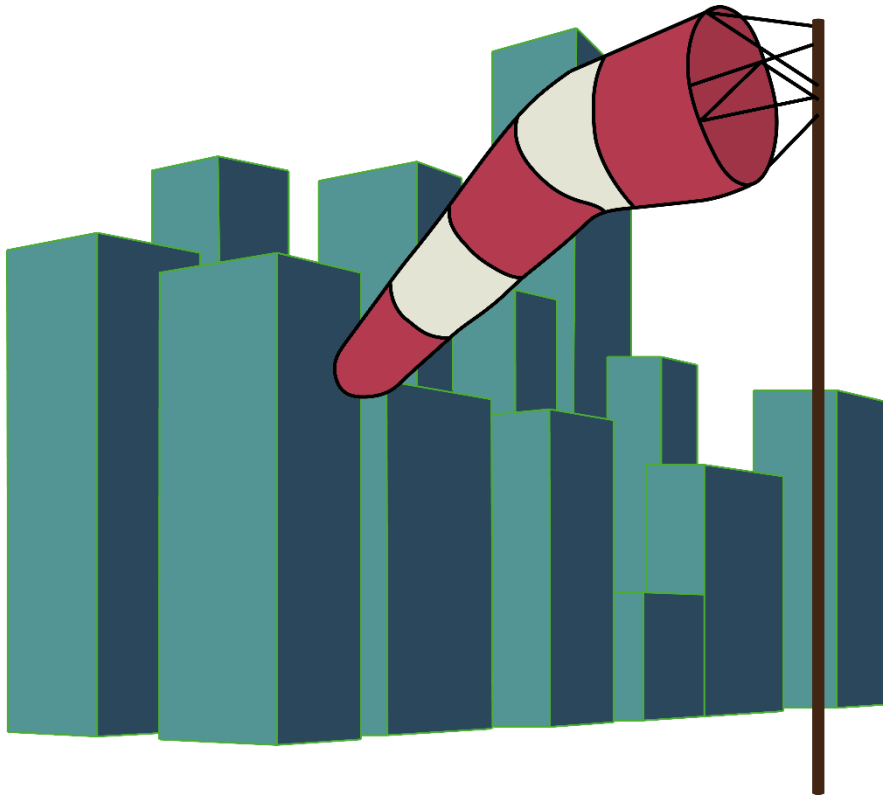


Einfluss der Bebauung auf die urbane Ventilation

Visualisierung mit Strömungsversuchen an Modellen



Gustav Schönfeld

Klasse 6e

Schuljahr 2025/2026

Kantonsschule Hohe Promenade, Gymnasium, Zürich

Betreuung: Ursula Zehnder

Korreferat: Michelle Gubler

Grafik Titelseite: eigene

Ich, Gustav Schönfeld, erkläre hiermit, dass ich meine Maturitätsarbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel verfasst habe.

Zürich, den 18. Dezember 2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Einleitung	4
1.1 Hintergrund	4
1.2 Problemstellung und Motivation	4
1.2.1 Problemstellung	4
1.2.2 Motivation	5
1.3 Ziel der Arbeit	5
1.4 Hypothesen	5
1.5 Aufbau der Arbeit	6
2. Theoretischer Hintergrund	6
2.1 Grundlagen Städtische Überhitzung	6
2.1.1 Stadt als Lebensraum	6
2.1.2 Vergleich Temperaturen Stadt und Land	6
2.1.3 Städtischer Wärmeinseleffekt und dessen Ursachen	8
2.1.3.1 Städtischer Wärmeinseleffekt	8
2.1.3.2 Oberflächeneigenschaften von Baustoffen	9
2.1.3.3 Aerodynamische Rauigkeit und Oberflächenvergrößerung	9
2.1.3.4 Lokaler Treibhauseffekt und anthropogene Wärmeproduktion	10
2.1.3.5 Kleinerer Verdunstungseffekt (<i>Evapotranspirationseffekt</i>)	10
2.1.4. Wohlbefinden und Gesundheitsrisiken	10
2.2 Massnahmen	11
2.3 Urbane Ventilation	12
2.3.1 Definition	12
2.3.2 Verschiedene Windphänomene	13
2.3.2.1 Kaltluftströme	13
2.3.2.2 Synoptische Winde	15
2.3.3 Situation Stadt Zürich	15
2.4 Städtebau und urbane Ventilation	16
2.4.1 Einführung Städtebau und Begriffserklärungen	16
2.4.2 Typische Stadtstrukturen	17
2.4.3 Einfluss der Bebauung auf die Durchlüftung	19
2.4.4 Interessenskonflikte in der Stadtplanung	22
3. Forschung	22
4. Praktischer Teil	23
4.1 Zielsetzung	23
4.2 Aufbau	24

4.3 Modelle und deren Eigenschaften	26
4.4 Datenerfassung	28
4.5 Auswertung	28
4.6 Ergebnisse	29
4.6.1 Keine Bebauung	29
4.6.2 Blockrandsiedlung	29
4.6.3 Zeilensiedlung längs	32
4.6.4 Zeilensiedlung quer	34
4.6.5 Blockrandsiedlung Stelzen	36
4.6.6 Zusätzliche Informationen	38
4.7 Diskussion des Versuchs	39
4.7.1 Vergleich der Strömungsphänomene zwischen den Bebauungstypen	39
4.7.1.1 Bodennahe Durchlässigkeit	39
4.7.1.2 Stärke des Aufstaus an der Luv-Seite	39
4.7.1.3 Aufsteigen des Nebels	39
4.7.1.4 Wind von oben	40
4.7.2 Diskussion der theoretischen Durchlüftungsparameter im Versuch	40
4.7.3 Validität	41
4.8 Fazit und Anwendung der Ergebnisse	42
5. Bilanz	44
5.1 Zusammenfassung	44
5.2 Schlussfolgerungen	44
6. Danksagung	45
7. Verzeichnisse	46
7.1 Quellenverzeichnis	46
7.2 Abbildungsverzeichnis	50
8. Anhang	52
8.1 Bau des Windkanals	52

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Forschung ist sich weitgehend einig, dass die mittlere globale Erwärmung der Erdatmosphäre von 1.1 °C seit der Industrialisierung überwiegend auf den anthropogen verstärkten Treibhauseffekt (von Menschen verursacht) zurückzuführen ist. Das Jahr 2024 war global das wärmste seit dem verlässlichen Aufzeichnungsbeginn um 1850.¹ Es ist davon auszugehen, dass die globale Durchschnittstemperatur weiter steigen wird. Prognosen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zeigen einen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur bis Ende des Jahrhunderts (2100) von 2.1 - 3.5 °C bei mittlerem Treibhausgas-Emissionsszenario (SSP2-4.5) und bis zu 3.3 – 5.7 °C bei starkem Treibhausgas-Emissionsszenario (SSP5-8.5).^{2,3,4}

In der Schweiz ist im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter, den Jahren 1850 bis 1900, die Mitteltemperatur bereits um 2.9 °C gestiegen. Die Klimaerwärmung stellt für die Schweiz -wie auch für viele andere Länder- eine grosse Herausforderung dar.⁵

Mit dem Fortschreiten des Klimawandels werden unter anderem Extremwetterereignisse wie Trockenheit und Hitzewellen häufiger auftreten. Letztere sind insbesondere für die Stadtbevölkerung ein Problem. Aufgrund verschiedener Faktoren erwärmen sich Städte nämlich stärker als ländliche Gebiete. Dieses Phänomen wird als *Städtischer Wärmeinsel Effekt* bezeichnet.⁶

Die Auswirkungen von Hitzebelastung auf die Menschen sind schwerwiegend. Hohe Temperaturen können sich negativ auf das Wohlbefinden, die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit auswirken, insbesondere bei Kindern und älteren Menschen sowie bei Personen, die in den Sommermonaten im Freien arbeiten müssen.⁷ Angesichts dieser Herausforderungen rückt die *urbane Ventilation*, also die Förderung natürlicher, nächtlicher kühler Luftströme zur Hitzeminderung aus dem Stadtumland in die Stadt, zunehmend in den Fokus der Stadtplanung.

1.2 Problemstellung und Motivation

1.2.1 Problemstellung

Die Überhitzung von Städten ist ein Phänomen, das in Zukunft aufgrund des Klimawandels zunehmen wird. Der vermehrte Einsatz von Klimaanlage zur Kühlung von Innenräumen kann jedoch nicht die Lösung sein, da Klimaanlage durch Abwärme die städtische Überhitzung im Aussenbereich sogar verstärken. Daher ist unter anderem die urbane Ventilation eine entscheidende Strategie zur Kühlung von Städten.

Die konkrete Problemstellung liegt darin, dass in der städtebaulichen Praxis und im öffentlichen Bewusstsein unzureichend bekannt ist, wie spezifische architektonische Parameter die Effizienz der natürlichen urbanen Ventilation beeinflussen. Es fehlt Veranschaulichung, die den Zusammenhang zwischen Bebauungsart und effektiver Kühlung durch natürliche nächtliche Luftströme anschaulich vermittelt.

¹ Wilke, «Trends der Lufttemperatur».

² Tietz, «Sechster Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC».

³ Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, «Klima der Schweiz».

⁴ NCCS, «Kernaussagen CH2018».

⁵ MeteoSchweiz, «Klimawandel - MeteoSchweiz».

⁶ MeteoSchweiz, «Hitze in Städten - MeteoSchweiz».

⁷ Wilke, «Gesundheitsrisiken durch Hitze».

1.2.2 Motivation

Ich wohne in der Stadt Zürich und litt selber unter den Hitzewellen der vergangenen Sommer. Die Temperaturen über Mittag waren oft so hoch, dass ich es vermied, das Haus zu verlassen. Doch auch Innenräume, sofern sie nicht klimatisiert wurden, heizten sich stark auf. So wurde die Hitze beispielsweise in den Schulzimmern an Sommertagen unerträglich. Bei mir führte dies zu sinkender Konzentrationsfähigkeit und beeinträchtigtem Wohlbefinden. Zudem konnte ich aufgrund warmer Nächte nur schlecht schlafen, was mich tagsüber zusätzlich zur Hitze stark belastete. Auch unsere Haustiere und unser Garten litten stark unter den hohen Temperaturen.

Im Juni 2025 hatte ich die Gelegenheit, an einer Studienwoche der ETH Zürich teilnehmen zu können. Dabei bot sich mir ein spannender Einblick in die Umweltingenieurwissenschaften. Während dieser Studienwoche habe ich viel bezüglich Städte und Klimawandel gelernt. Besonders beeindruckt war ich von einer Führung durch die Versuchshallen der ETH, in denen physikalische Modellversuche durchgeführt wurden. Dies brachte mich auf die Idee, für meine Maturarbeit selbst Versuche an einem Modell durchzuführen, da mich Problemstellungen, bei denen Theorie und Anwendung kombiniert werden können, faszinieren. Allerdings verfüge ich weder über das Budget noch über geeignete Messinstrumente und -techniken für detaillierte Untersuchungen. Deshalb werde ich mich auf die Visualisierung von urbaner Durchlüftung (Kaltluftströme) konzentrieren.

1.3 Ziel der Arbeit

Urbane Ventilation ist essenziell für eine lebenswerte, nicht überhitzte Stadt der Zukunft. Sie ist jedoch in der Bevölkerung ein noch eher unbekanntes Phänomen. Ziel meiner Arbeit ist daher, Kaltluftströme zu visualisieren und ihre Bedeutung für die Kühlung von Hitzeinseln aufzuzeigen. In welchem Ausmass Städte und Quartiere durchlüftet werden, hängt unter anderem stark von deren Bauweise ab.⁸ Um den Einfluss von Architektur und Gebäudemorphologie auf die Durchlüftung zu demonstrieren, werde ich einen physikalischen Strömungstest in einem selbstgebauten Windkanal an einem Städtmodell durchführen. Mein Ziel ist es, anhand von Modellen den Einfluss unterschiedlicher Bebauungen und Siedlungstypen auf die Kaltluftströme zu simulieren und zu dokumentieren.

1.4 Hypothesen

In dieser Arbeit werden die Einflüsse spezifischer städtebaulicher Parameter auf die urbane Ventilation untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass Gebäudetyp, Bebauungsdichte sowie die Anordnung und Ausrichtung der Gebäude die Ausbreitung der Kaltluftströme massgeblich beeinflussen. Folgende Hypothesen dienen als Ausgangslage für die Versuche:

1. Durchlässigkeit je nach Ausrichtung: Die Zeilenbebauung, die parallel zur Windrichtung ausgerichtet ist, ermöglicht eine beinahe ungehinderte Kaltluftdurchströmung der Siedlung. Solch eine Siedlung kann Kaltluftströme effizient in Richtung des Stadtinneren leiten. Eine Zeilenbebauung mit der Ausrichtung quer zum Wind, reduziert die Durchlüftung signifikant im Vergleich zur Ausrichtung längs/parallel. Die Ausrichtung quer verhindert, dass Kaltluft in das Stadtinnere vordringen kann.
2. Barrierewirkung: Die Blockrandsiedlung wirkt aufgrund ihrer grossen, geschlossenen Fassade wie eine Barriere und behindert so das Vordringen der Kaltluftströme in Richtung des Stadtinneren. Es bildet sich ein Aufstau vor den Gebäuden.
3. Stelzenbauweise: Da Kaltluftströme auf Bodenhöhe fliessen, kann durch eine Anhebung der Gebäude mit Stelzen die Durchlüftung der Siedlung erhöht werden. Dies auch bei kompakten Siedlungsformen, wie der Blockrandsiedlung.

⁸ Guo u. a., «Exploring the effect of the architecture morphology on urban ventilation at block scale using CFD-GIS and random forest combined method».

Die getesteten Bauformen (Blockrandsiedlung im Stadtinneren, Zeilensiedlung am Stadtrand) sind typische Stadtstrukturen für die Stadt Zürich. Dadurch lassen die Ergebnisse direkte Rückschlüsse auf die Durchlüftungssituation in realen Siedlungen in Zürich zu.

1.5 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist folgendermassen gegliedert: In einem theoretischen Teil wird zuerst das Hintergrundwissen über städtische Erwärmung vermittelt und am Beispiel der Stadt Zürich aufgezeigt. In einem zweiten Teil folgen meine physikalischen Versuche mit Häusermodellen im Windkanal.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1 Grundlagen Städtische Überhitzung

2.1.1 Stadt als Lebensraum

Rund 4.2 Milliarden Menschen leben weltweit in urbanen Gebieten. Tendenz steigend.⁹ Seit 2008 leben mehr Menschen in Städten als in ländlichen Gebieten. Bis 2050 werden voraussichtlich gar zwei Drittel der Weltbevölkerung in Städten leben.¹⁰ Städte sind unter anderem zentral für Wirtschaft, Bildung, Forschung und Politik. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass Städte attraktiv sind und viele Menschen anziehen. Doch aufgrund versiegelter Böden, Strassenschluchten, spärlicher Bepflanzung und lokaler Abwärme bilden Städte ein Lokalklima, das die Lebensqualität besonders im Sommer beeinträchtigt. Durch den Klimawandel werden die Temperaturen dort höher als im Umland, was zu zunehmender Hitzebelastung führt.

Innerhalb einer Stadt gibt es verschiedene *Mikroklimata*, was bedeutet, dass an verschiedenen Orten unterschiedliche Wind- und Temperaturverhältnisse herrschen und zusätzlich die Luftqualität sehr verschieden ist (Mikro = maximal einige hundert Meter).^{11 12}

Angesichts der Wichtigkeit von Städten und deren Belastung durch den Klimawandel wurden 2015 von den Vereinten Nationen Widerstandsfähigkeit und Nachhaltigkeit von Städten in den Sustainable Development Goals (SDG) verankert. So sollen bis 2030 Städte resilienter gegen Umweltkatastrophen und Extremwetterereignissen wie Hitzewellen und Hochwasser werden. Auch die Emissionsreduktion ist ein wesentlicher Bestandteil der Agenda 2030 SDG 11.¹³

2.1.2 Vergleich Temperaturen Stadt und Land

Das Klima in Städten unterscheidet sich deutlich vom Klima in ländlichen Gebieten. Vergleicht man die Temperaturen in Städten mit den Temperaturen im nahegelegenen Umland, fällt auf, dass die in der Stadt gemessenen Temperaturen fast immer höher sind als jene auf dem Land. Zwar sind höhere Temperaturen in der Stadt im Vergleich zum Land das ganze Jahr über messbar, der Unterschied ist jedoch in Sommernächten am ausgeprägtesten. So kann die nächtliche Stadttemperatur im Sommer bis zu 7 °C höher sein als diejenigen in den ländlichen Regionen. Gut sichtbar ist der Unterschied im Raum Zürich anhand der Messstationen Zürich Kaserne und Zürich Affoltern (siehe Abbildung 1). Vor allem nachts weist das mitten in der Stadt Zürich gelegene Kasernenareal bis zu 6 °C höhere Temperaturen auf als das Aussenquartier Zürich Affoltern. Abbildung 1 zeigt die gemessenen Temperaturunterschiede während einer Woche im August 2023.¹⁴

⁹ Palusci und Cecere, «Urban Ventilation in the Compact City: A Critical Review and a Multidisciplinary Methodology for Improving Sustainability and Resilience in Urban Areas». (2)

¹⁰ United Nations Department of Economic and Social Affairs, «Sustainable cities and human settlements».

¹¹ e-genius, «Städtisches Mikroklima».

¹² MeteoSchweiz, «Hitze in Städten - MeteoSchweiz».

¹³ United Nations Department of Economic and Social Affairs, «Sustainable cities and human settlements».

¹⁴ MeteoSchweiz, «Hitze in Städten - MeteoSchweiz».

Temperaturvergleich Stadt – Land

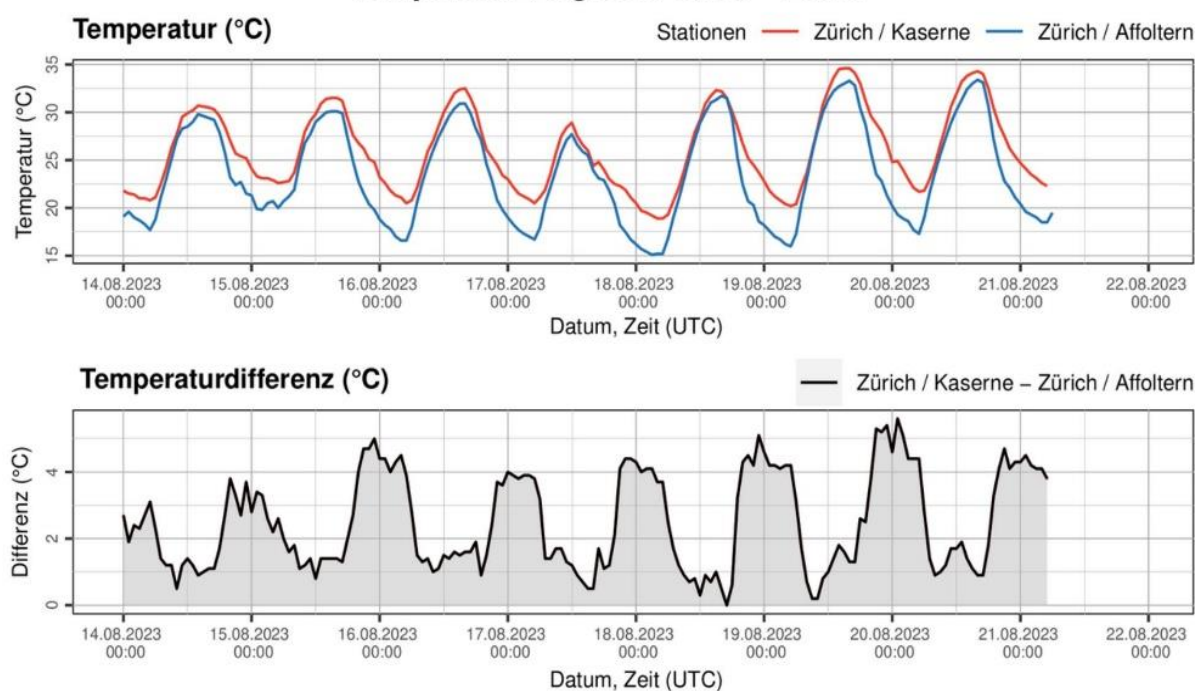


Abbildung 1 Temperaturunterschiede Zürich Affoltern und Zürich Kaserne 14.-22.8.2023¹⁵

Die Wärmedifferenz Stadt/Land zeigt sich auch in der Anzahl Hitzetage und Tropennächte. Besonders heisse Tage mit einer Höchsttemperatur über 30 ° C werden als *Hitzetage* bezeichnet. Nächte, in denen die Temperatur nicht unter 20 °C sinkt, sind sogenannte *Tropennächte*. Sowohl Hitzetage als auch Tropennächte kommen in den Städten deutlich häufiger vor. Anhand der Anzahl Hitzetage und Tropennächte kann der klimatische Unterschied zwischen Stadt und Land gut quantifiziert werden. Durch das Kategorisieren von besonders warmen Tagen und Nächten in Hitzetagen und Tropennächten lassen sich extreme Wettererscheinungen zählen und die Belastung für die Bevölkerung abschätzen. Ferner können auch Trends über längere Zeiträume festgestellt werden. Der Unterschied der Anzahl an Hitzetage und Tropennächte der Messstation Zürich Affoltern gegenüber Zürich Kaserne ist gut erkennbar. In Abbildung 2 sind die Anzahl Tropennächte und Hitzetage während 30 Jahren (1990-2020) jeweils für die Messstationen Zürich Kaserne und Zürich Affoltern dargestellt.^{16 17}

¹⁵ MeteoSchweiz, «Temperaturvergleich Stadt Land/Hitzeinsel Affoltern Kaserne».

¹⁶ Sven Titz und Nikolai Thelitz, «Es wird noch heisser».

¹⁷ Regula Gehrig u. a., *Fachbericht MeteoSchweiz*.

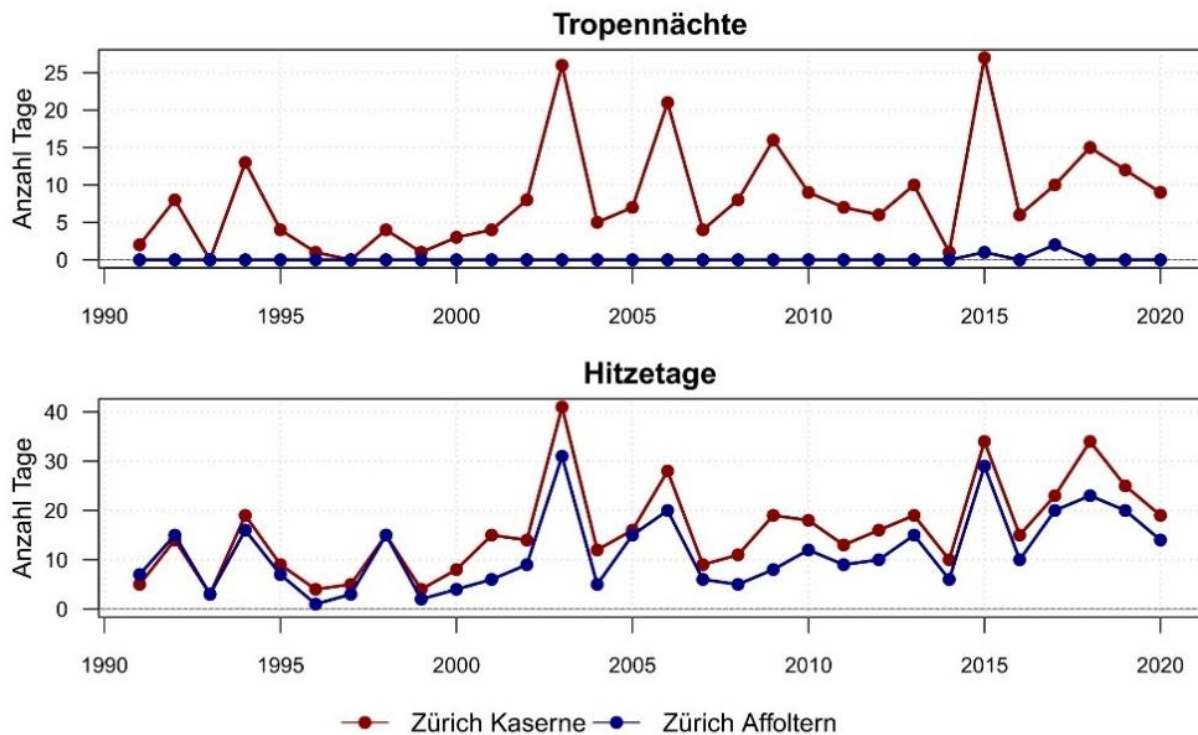


Abbildung 2 Vergleich Anzahl Tropennächte und Hitzetage in Zürich Affoltern und Zürich Kaserne von 1990-2020¹⁸

2.1.3 Städtischer Wärmeineleffekt und dessen Ursachen

2.1.3.1 Städtischer Wärmeineleffekt

Als *Städtischer Wärmeineleffekt* (auf Englisch: *Urban Heat Island (UHI)*) wird das Phänomen beschrieben, dass die Temperaturen in Städten oft höher sind als im unbebauten Umland. Der UHI ist eine Folge des veränderten Wärmehaushalts durch Bebauung und Treibhausgas-Emissionen in urbanem Gebiet. Je grösser eine Stadt flächenmässig ist und je dichter sie bebaut ist, desto stärker fällt der städtische Wärmeineleffekt in der Regel aus. Des Weiteren hat die geographische Breite (Latitude) einer Stadt einen Einfluss. Mit zunehmender Entfernung vom Äquator ist die Sonneneinstrahlung, die auf die Oberfläche trifft, aufgrund des Einfallswinkels weniger intensiv, was sich in geringerer Erwärmung bemerkbar macht. Die grössten Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland werden in der Nacht gemessen, besonders während der Sommermonate. Konkret, der UHI ist in Sommernächten am ausgeprägtesten. Im Durchschnitt sind Schweizer Städte nachts 5-7 °C wärmer als ihr Umland (Gemessen werden hierbei die Temperaturen zwei Meter über dem Boden).¹⁹ Dies führt zu bis zu drei Mal mehr Tropennächten in Städten im Vergleich zu ländlichen Regionen. Tagsüber ist der Temperaturunterschied Stadt/ Land geringer, weshalb die Anzahl Hitzetage in Städten weniger von der Anzahl Hitzetage auf dem Land abweicht (Abbildung 2).^{20 21 22 23 24}

¹⁸ MeteoSchweiz, «In den Städten ist es heisser als auf dem Land».

¹⁹ Regula Gehrig u. a., *Fachbericht MeteoSchweiz*.

²⁰ MeteoSchweiz, «Hitze in Städten - MeteoSchweiz».

²¹ Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, «Häufigkeit und Intensität von Wärmeinselsituationen am Beispiel „Frankfurt am Main“».

²² Byrd Polar and Climate Research, The Ohio State University, «What is an Urban Heat Island (UHI)?»

²³ Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie, «Der Wärmeineleffekt (1)».

²⁴ Katarina Fischer, «Hitzeineleffekt: Warum es in unseren Städte so heiß ist und was dagegen hilft».

Der UHI wurde 1982 erstmals von T.R. Oke beschrieben. Ursache des Wärmeinseleffekts ist die Kumulation verschiedener atmosphärischer und anthropogener Prozesse in städtischem Gebiet. Die Intensität wird besonders durch das Zusammenwirken von Sonneneinstrahlung, städtischen Oberflächenstrukturen, Luftschadstoffen, reduzierter atmosphärischer Durchlüftung sowie anthropogener Wärmefreisetzung verursacht. Spitzenwerte des UHI lassen sich während Hochdruckwetterlagen, also bei wind- und bewölkungsarmen Wetterlagen mit hoher Sonneneinstrahlung, registrieren. Es ist wichtig zu beachten, dass der UHI selbst keine Folge des Klimawandels ist, jedoch durch die steigenden Temperaturen deutlich verstärkt wird.^{25 26 27 28 29}

2.1.3.2 Oberflächeneigenschaften von Baustoffen

Die Eigenschaften der in Städten verwendeten Baustoffe tragen massgeblich zur starken Erwärmung städtischer Gebiete bei. Meistverbaute Materialien sind Stahl, Beton, Asphalt und Glas. Dunkle Baustoffe mit einem geringen Reflexionsvermögen (Albedo), wie zum Beispiel Asphalt, haben die Eigenschaft, besonders viel kurzwellige Sonnenenergie zu absorbieren. Die aufgenommene Energie wird aufgrund der Wärmespeicherkapazität der Materialien in Form von Wärme in den Materialien gespeichert. Wegen dieser Wärmespeicherfähigkeit wird die Wärme von den Oberflächenmaterialien erst verzögert wieder abgestrahlt. Dadurch strahlen Oberflächen in Städten auch nachts bis in die frühen Morgenstunden langwellige Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) ab, obwohl die Sonne als eigentliche Energiequelle längst untergegangen ist. Durch enge Strassenschluchten und Innenhöfe wird die Abstrahlung gen Himmel zugleich behindert. Ein Teil der Infrarotstrahlung kann also nicht in die Atmosphäre entweichen, sondern wird von Bebauung erneut absorbiert. Die wiederabsorbierte Energie wird dann nach und nach zusätzlich in die Umgebung abgestrahlt. Wärmestrahlung wird somit mehrfach reflektiert. Als Folge davon bleibt ein Grossteil der Wärmeenergie in der Stadt gefangen und kann nicht in die Atmosphäre entweichen. Als Konsequenz bleiben bodennahe Luftschichten in Städten nachts warm und kühlen nur sehr langsam ab (erklärt hohe Anzahl Tropennächte).^{30 31 32 33}

2.1.3.3 Aerodynamische Rauigkeit und Oberflächenvergrößerung

Je mehr Gebäude, Strassenschluchten, Bäume oder sonstige *unregelmässige Strukturen* in einer Stadt sind, desto rauer ist die sogenannte *Stadtoberfläche*. Diese Rauigkeit hemmt die Luftzirkulation, was zu Hitzeakkumulation führt. Zusätzliche Verwinklung und Komplexität der Bebauung führt zu einer Vergrößerung der Oberfläche. Dadurch wird tagsüber auch mehr Sonnenstrahlung absorbiert. Diese *Rauigkeit* reduziert also das Reflexionspotenzial. Die Rauigkeit der Stadt bewirkt eine 40-prozentige Mehrabsorbierung von Sonnenstrahlen im Vergleich zu flachen Oberflächen aus dem gleichen Material. Verstärkt wird die Absorbierung zusätzlich durch erwähnte Mehrfachreflexionen: Sonnenenergie, die nicht von der ersten Oberfläche absorbiert wird, wird reflektiert und von anderen Flächen erneut aufgenommen. Dadurch erwärmen sich letztere Oberflächen mehrfach. Auch bei der doppelten Reflexion bleibt wiederum Energie in den Strassenschluchten gefangen und nur ein Bruchteil kann in die Atmosphäre entweichen.^{34 35}

²⁵ MeteoSchweiz, «Hitze in Städten - MeteoSchweiz».

²⁶ Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, «Häufigkeit und Intensität von Wärmeinselsituationen am Beispiel „Frankfurt am Main“».

²⁷ Byrd Polar and Climate Research, The Ohio State University, «What is an Urban Heat Island (UHI)?»

²⁸ Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie, «Der Wärmeinseleffekt (1)».

²⁹ Katarina Fischer, «Hitzeinseleffekt: Warum es in unseren Städte so heiß ist und was dagegen hilft».

³⁰ Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie, «Der Wärmeinseleffekt (2)».

³¹ Katarina Fischer, «Hitzeinseleffekt: Warum es in unseren Städte so heiß ist und was dagegen hilft».

³² Byrd Polar and Climate Research, The Ohio State University, «What is an Urban Heat Island (UHI)?»

³³ Unger, «Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database».

³⁴ Salvati u. a., «Impact of reflective materials on urban canyon albedo, outdoor and indoor microclimates».

³⁵ Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie, «Der Wärmeinseleffekt (2)».

2.1.3.4 Lokaler Treibhauseffekt und anthropogene Wärmeproduktion

In städtischen Gebieten ist die Luftschadstoffkonzentration höher als in ländlichen Gebieten. Zurückzuführen ist das auf den hohen Ausstoss an Treibhausgas-Emissionen auf engem Raum. Die Emissionen entstehen in der Stadt vor allem durch das Verbrennen fossiler Treibstoffe im Verkehr, bei der Beheizung und der Industrie. Dadurch akkumulieren sich Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und bodennahes Ozon (O₃) in der städtischen Atmosphäre. Diese absorbieren und re-emittieren terrestrische Infrarotstrahlung, wodurch der Wärmeverlust der bodennahen Atmosphäre verringert wird. Auch durch den Reifenabrieb und Russ entsteht Luftverschmutzung, die zu einer Trübung der städtischen Luft führt. Durch die Trübung wird Sonnenlicht absorbiert und gestreut was, zusätzlich erwärmt.^{36 37}

Durch die Verbrennung selbst wird ebenfalls Wärmeenergie freigesetzt. Dadurch erwärmen sich Luft und Oberflächen zusätzlich.³⁸

2.1.3.5 Kleinerer Verdunstungseffekt (*Evapotranspirationseffekt*)

In Städten sind versiegelte Flächen wie Asphalt und Beton weit verbreitet. Regenwasser kann von diesen Materialien nicht gespeichert werden und wird über die Kanalisation abgeleitet. Das verhindert, dass sich Regenwasser in Städten an der Oberfläche ansammeln und in den Boden eindringen kann. Bei natürlichen, unversiegelten Oberflächen sickert das Regenwasser hingegen in den Boden und wird dort gespeichert. An warmen Tagen verdunstet das versickerte Wasser, was zu einer Kühlung der Umgebung führt. Die Verdunstung ist ein endothermer Prozess, der der Umgebungsluft Wärme entzieht. Auch die Verdunstung von Wasser aus Wasserkörpern wirkt kühlend. In Städten fehlen wasserspeichernde Böden und Gewässer. Daher ist der kühlende *Evaporationseffekt* geringer.

In vielen Städten fehlt ferner Begrünung. Durch biochemische Prozesse in Pflanzen transpirieren diese Wasser durch ihre Blätter. So lassen beispielsweise Bäume an heissen Sommertagen mehrere hundert Liter Wasser über ihre Blätter verdunsten. Durch die Verdunstung wird der Umgebung Energie entzogen, was die Umgebungstemperatur um bis zu 15 °C senken kann.³⁹

Regenwasser wurde in der Vergangenheit als störender Faktor, der schnell aus der Stadt entfernt werden muss, angesehen. Im modernen, klimaangepassten Städtebau ist Regenwasser hingegen eine willkommene Ressource, die gezielt zurückgehalten wird, um für Kühlung zu sorgen.

Die Summe von *Evaporation* (Wasserkörper/Boden) und *Transpiration* (Pflanzen) wird als *Evapotranspiration* bezeichnet. Dies beschreibt die Gesamtmenge an Wasser, die in einem Gebiet an die Atmosphäre verloren geht.⁴⁰

2.1.4. Wohlbefinden und Gesundheitsrisiken

Hohe Aussentemperaturen stellen für den Körper eine Belastung dar. Die Durchblutung der Haut nimmt mit höheren Temperaturen zu, um Wärme abzutransportieren. Dadurch muss das Herz schneller schlagen. Das ist besonders für Bluthochdruckpatienten eine Gefahr. Rund 20% der Schweizer Bevölkerung ist davon betroffen.⁴¹

Um für Kühlung zu sorgen, bildet der Körper Schweiß. Dies geht jedoch mit einem Verlust an Flüssigkeit und Mineralstoffen einher. Für die menschliche Gesundheit ist daher die starke Erhitzung von Städten im

³⁶ Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie, «Der Wärmeinseleffekt (2)».

³⁷ Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), «Sommermog in der Schweiz. Stellungnahme der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (EKL)».

³⁸ Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie, «Der Wärmeinseleffekt (2)».

³⁹ Schweizer Radio und Fernsehen (SRF), «Hitzewelle im Büro - Studie».

⁴⁰ Pflanzenforschung.de, «Evapotranspiration».

⁴¹ MonAm, «High blood pressure (age: 15+)».

Sommer ein Problem. Eine wesentliche Rolle spielt dabei auch die fehlende Abkühlung in der Nacht.⁴² Ist es nachts zu warm, sinkt die Schlafqualität. Verminderte Schlafqualität führt zu Übermüdung und sinkender Konzentrationsfähigkeit. Dadurch steigt das Unfallrisiko.⁴³

Ist der menschliche Körper rund um die Uhr von Hitzestress betroffen, insbesondere wenn auch nachts keine signifikante Abkühlung stattfindet, kann dies zu Schlafstörungen, Dehydrierung und zur Verschlimmerung schon bestehender Krankheiten wie Herz- oder Nierenprobleme führen. Auch Hitzeerschöpfung kann eine Folge sein. Hitzeerschöpfung ist eine Ansammlung von Symptomen wie Übelkeit, Schwäche und Ohnmacht als Folge von Hitzebelastung. Dabei verliert der Körper Flüssigkeit und Elektrolyten. Der Verlust letzterer erschwert es dem Körper, auf hohe Temperaturen zu reagieren. Werden verlorengangenes Wasser und verlorengangene Elektrolyte nicht ersetzt, kann dies zu Krämpfen führen.^{44 45}

Hitze und Hitzestress wirken sich nicht nur negativ auf das Wohlbefinden der Menschen aus, es wird sogar vermutet, dass ein Zusammenhang zwischen Hitze und dem Sterberisiko existiert.⁴⁶ In der Schweiz sollen im Jahr 2024 326 Menschen an den Folgen der Hitze gestorben sein.⁴⁷

2.2 Massnahmen

Um Überhitzung im städtischen Raum entgegenzuwirken, gibt es einige bewährte Methoden: Begrünung und Beschattung durch Bepflanzung, Nutzung von Wasserkörpern, wie Brunnen und Teiche, und Entsiegelung der Böden. Dabei spricht man von *grüner und blauer Infrastruktur*. Grüne Infrastruktur bezieht sich auf die Vegetation in der Stadt. Dies beinhaltet Grünflächen wie Parks und Gärten aber auch die Begrünung von Häuserfassaden und Dächern. Blaue Infrastruktur bezieht sich auf den Wasserkreislauf und das Management von Regenwasser zur Stadtkühlung und Bewässerung. Diese grüne und blaue Infrastruktur-Massnahmen sind effektiv und lokal gut einsetzbar. So können durch Pflanzung von Bäumen städtische Tagestemperaturen an Sommertagen um bis zu 15 °C (gefühlte Temperatur) gesenkt werden.^{48 49}

Ein weiterer Ansatz, die Überhitzung von urbanen Räumen zu mildern, ist, natürlich entstehende Luftströme zu fördern, welche kühlere Luft aus dem Umland in die Städte hineinbringen. Dabei spricht man vor allem von *Kaltluftströmen*. Der Erhalt existierender bzw. die Wiedereinführung verlorener städtischer Ventilation ist ein langfristiges und planungsintensives Unterfangen der Stadtplanung.⁵⁰

Viele der erläuterten Probleme hinsichtlich der Erhitzung von Städten sind erkannt und zahlreiche Massnahmen in der Planung bereits realisiert. Die einzelnen Massnahmen müssen lokal genau analysiert werden, da es zu Ziel-Wirkungskonflikten kommen kann. So kann ein Baum beispielsweise zur Kühlung durch Transpiration beitragen, jedoch gleichzeitig die Frischluftzufuhr behindern.

Die Handlungsfelder und Handlungsansätze der Stadt Zürich zur Hitzeminderung sind in folgender Illustration zusammengefasst (Abbildung 3). Meine Arbeit befasst sich mit dem Handlungsfeld HF 01 «Kaltluftentstehungsflächen und -leitbahnen» und dort mit den Handlungsansätzen HA 01 «Baukörper für günstiges Mikroklima optimieren» und HA 02 «Gebäudestellung auf Luftaustausch ausrichten».

⁴² Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, «Häufigkeit und Intensität von Wärmeinselsituationen am Beispiel „Frankfurt am Main“».

⁴³ Deutscher Wetterdienst, «Stadtklima - die städtische Wärmeinsel».

⁴⁴ YIP KATHLEEN und TANEN DAVID, *Hitzeerschöpfung*.

⁴⁵ Byrd Polar and Climate Research, The Ohio State University, «What is an Urban Heat Island (UHI)?»

⁴⁶ Bundesamt für Umwelt (BAFU), «Hitze in Städten».

⁴⁷ NCCS, «Hitzebedingte Sterblichkeit».

⁴⁸ Bundesamt für Umwelt (BAFU), «Hitze in Städten».

⁴⁹ Schweizer Radio und Fernsehen (SRF), «Hitzewelle im Büro - Studie».

⁵⁰ Jan Carmeliet, «Führt Verdichtung zu mehr Hitzestress in Städten?»

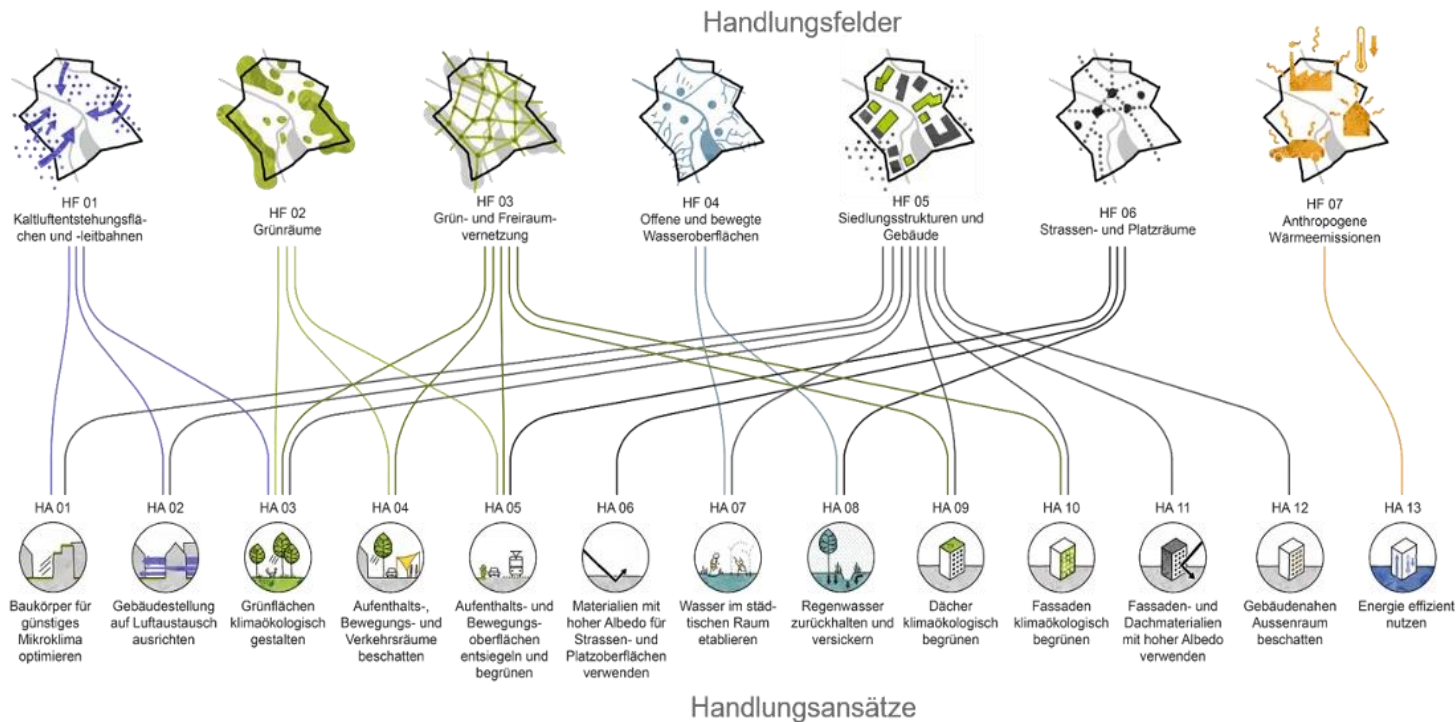


Abbildung 3 Handlungsfelder und Handlungsansätze der Stadt Zürich zur Hitzeminderung⁵¹

2.3 Urbane Ventilation

2.3.1 Definition

Unter *urbaner Ventilation* versteht man einerseits die tatsächliche Zirkulation der Luft in einer Stadt. Zugleich wird mit urbaner Ventilation das bewusste Einplanen und das Management von Luftströmen in bebautem Gebiet bezeichnet. So ist zum Beispiel das Errichten von Windkorridoren eine der wichtigsten stadtplanerischen Massnahmen, um die urbane Ventilation zu verbessern. Dies kann nachweisbar dazu beitragen, den UHI zu mildern. Das Prinzip der Windkorridore besteht darin, nachts kühle, saubere Luftmassen aus dem Umland gezielt in die Stadt zu führen, sodass Hitze und Luftverschmutzung der Stadt mit abfliessender Luft abtransportiert werden können. Windkorridore sind Schneisen (z.B. lange, breite Strassen), durch die der Wind aus dem Umland in die Stadt einströmen kann. Dabei wird erwärmte, verschmutzte Stadtluft mit kühler, sauberer Luft ersetzt. Der Luftaustausch basiert auf physikalischen Prozessen. Thermische Antriebskräfte und Druckdifferenzen (verursacht durch Temperatur- bzw. Dichteunterschiede) zwischen Umland und Stadt bewegen Luftmassen. Abbildung 4 zeigt beispielhaft wie urbane Ventilation funktioniert.⁵²

⁵¹ Grün Stadt Zürich, «Fachplanung Hitzeminderung».

⁵² Directory, «Urban Ventilation → Term».

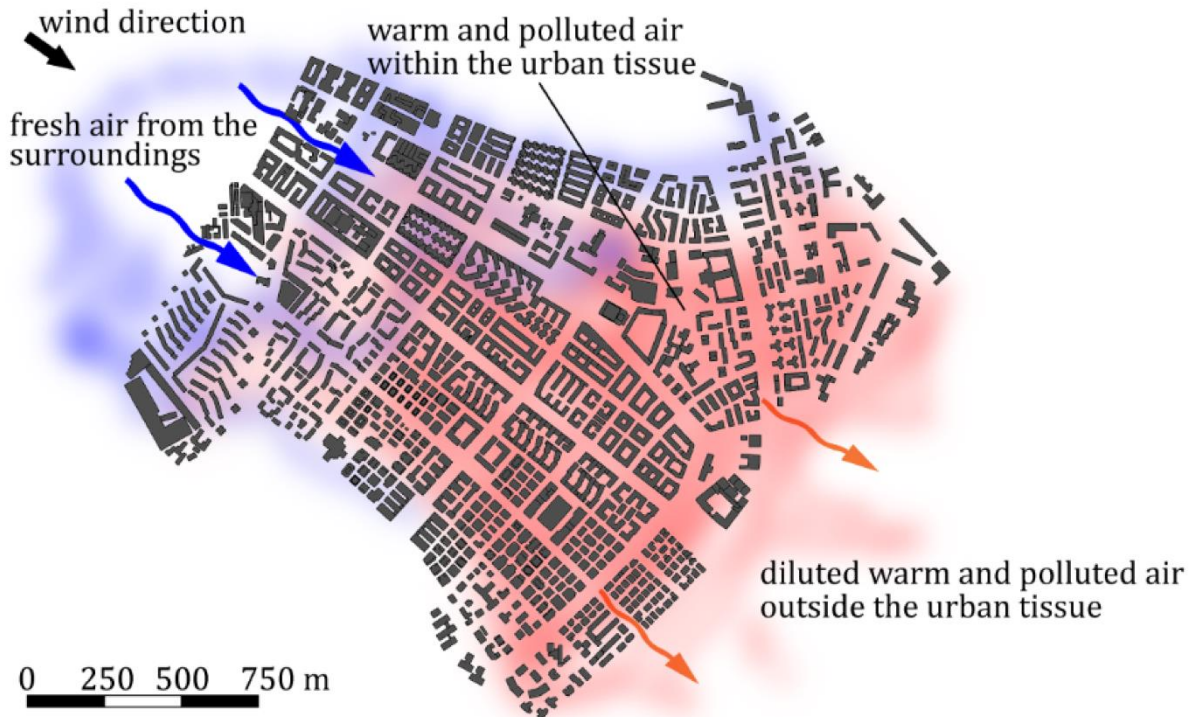


Abbildung 4 Graphische Visualisierung der urbanen Ventilation⁵³

2.3.2 Verschiedene Windphänomene

2.3.2.1 Kaltluftströme

Wichtig für die Städte Kühlung in der Nacht sind Luftmassen im mikro- und mesoskaligen Bereich (mikroskalig < 2 km, mesoskalig 2-200 km). Als *Kaltluft* gelten Luftmassen, die kühler sind im Vergleich zu ihrer Umgebung.⁵⁴

Aufgrund von Reliefs- und Dichteunterschieden setzen sich Kaltluftmassen in Bewegung und erzeugen so eine thermisch-induzierte Luftzirkulation. Aufgrund der Dichte sind Kaltluftströme immer bodennah. Entscheidend für das Ausbreitungs- und Bewegungsverhalten von Kaltluft ist die aerodynamische Rauigkeit des Untergrunds und das Relief. Als *Kaltluftbahnen* werden Flächen bezeichnet, die von Kaltluft überströmt werden und diese leiten. Verdrängt Kaltluft wärmere Luft, spricht man von *Kaltluftadvektion*. Sie ist in der urbanen Ventilation gewollt. Die Förderung von Kaltluftströmen ist -wie erwähnt- ein effektives Mittel, um nächtlicher Überhitzung entgegenzuwirken. Die Bezeichnung *Frischluchtströme* kommt daher, dass die Luft aus dem Stadtumland meist weniger schadstoffbelastet ist. Kaltluftströme treten vor allem nachts bei schwachen Windlagen auf, da dann der Temperaturunterschied zwischen Umland und Stadt am grössten ist und die Luftströmung nicht durch starke Winde beeinträchtigt wird. Kaltluftströme haben in der Regel eine

⁵³ Palusci und Cecere, «Urban Ventilation in the Compact City: A Critical Review and a Multidisciplinary Methodology for Improving Sustainability and Resilience in Urban Areas».

⁵⁴ Spektrum Akademischer Verlag, «Kaltluft».

Höhe von nur einigen Metern. Ihre Fliessgeschwindigkeit beträgt meist zwischen 0.2 – 2 m/s. Genaue Ausmasse, wie das Volumen, sind jedoch von vielen Faktoren abhängig.^{55 56 57 58}

Kaltluftströme sind lokal und nächtlich und können in folgende drei Typen kategorisiert werden:

1. Flurwinde

Flurwinde entstehen in der bodennahen Atmosphäre durch nächtliche Abkühlung. Je geringer die Wärmespeicherkapazität des Untergrunds ist, desto stärker kann sich Luft nachts darüber abkühlen, da vom Boden nur in geringem Mass Infrarotstrahlung emittiert wird. Über naturnahen Flächen, wie Wiesen und Äckern, findet nachts dieser Abkühlungsprozess statt. Man spricht daher von *Kaltluftentstehungsflächen* oder *Ausgleichsraum*.⁵⁹ Über versiegelten Flächen und erwärmten Wasserkörpern findet aufgrund der hohen Wärmespeicherkapazität kein Abkühlungsprozess statt. Zwischen Stadt und Land entsteht wegen des Temperaturunterschieds ein Druckunterschied. Im kühleren Umland herrscht ein höherer Luftdruck als in der überhitzten Stadt. So gelangt Kaltluft in die Stadt. Das städtische Tiefdruckgebiet formt sich, da die warme städtische Luft wegen ihrer geringeren Dichte, verglichen mit der Umgebungsluft, aufsteigt. Oberhalb der Stadt entsteht durch eine kuppelartige Warmluftschicht ein höherer Druck als über dem Umland (siehe Abbildung 5). In der Höhe fliesst nun Luft ins Umland, am Boden in die Stadt. Der Strömungseffekt in Richtung Stadt auf Bodenhöhe wird von Korridoren wie Flusstälern, Grün- und Strassenzügen begünstigt.^{60 61}

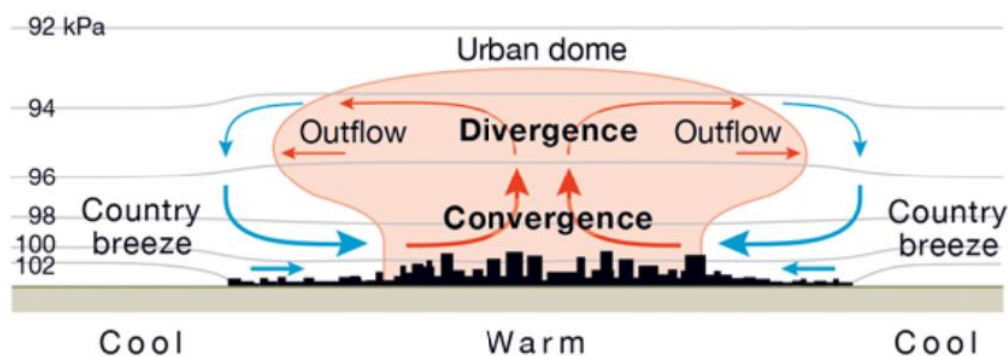


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Flurwinde (Country Breeze)⁶²

⁵⁵ «Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar - K - Kaltluftfluss».

⁵⁶ Spektrum Akademischer Verlag, «Kaltluft».

⁵⁷ Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft - Sektion Klima und Mobilität, «Sicherstellung der Kaltluftzirkulation».

⁵⁸ Marschall, «Advektion».

⁵⁹ «Glossar der Stadtklimaanalyse Mannheim 2020».

⁶⁰ Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft - Sektion Klima und Mobilität, «Sicherstellung der Kaltluftzirkulation».

⁶¹ Kuttler und Weber, «Characteristics and phenomena of the urban climate».

⁶² Kuttler und Weber, «Characteristics and phenomena of the urban climate».

2. Talwinde (*katabatische Winde*)

Die Antriebskraft der Talwinde ergibt sich aus zwei Faktoren. Einerseits spielt der Temperaturunterschied zwischen aufgeheizter Stadt und kühlerem Umland eine Rolle. Andererseits ist auch der Höhenunterschied zwischen der erwärmten Stadt in Tallage (*Wirkungsraum*) und der Umgebung (Ausgleichsraum) relevant:

Oft befinden sich Städte in einer Tallage und sind von spärlich oder unbebauten Hängen umgeben. An den Hängen (Ausgleichsraum) kühlt die Luft nachts wegen der Wärmeabstrahlung stärker ab als in der Stadt. Die abgekühlte Luft der Hänge ist dichter und somit schwerer als die erwärmte Luft der Stadt. Unter den Einfluss der Schwerkraft fliesst daher die kühle Luft hangabwärts Richtung Stadt ab.

Beim Erreichen der Stadt verdrängt die einströmende Kaltluft die warme, weniger dichte Stadtluft. Dadurch gelangt kalte Frischluft in die Stadt, was dort zu einer Reduktion der Temperatur und zu einem Abtransport von Luftschadstoffen führt.^{63 64}

3. Binnenwinde

Grössere Freiflächen innerhalb von Städten, wie Parks oder Wiesen, kühlen nachts stärker ab als die Luft der versiegelten Umgebung. Die dort entstehenden Kaltluftmassen fliessen dann aufgrund von Druckunterschieden in angrenzende Strassen und erzeugen Kühlung. Sind die Freiflächen höher gelegen als die umliegende Stadt, können Binnenwinde auch katabatisch entstehen. Binnenwinde sind kleinräumig und entfalten ihre Wirkung nur dann, wenn die Entstehungsflächen nicht unmittelbar von dichter Bebauung umgeben sind, die die Luftströme blockieren.⁶⁵

2.3.2.2 Synoptische Winde

Synoptische Winde wehen tagsüber und sind überregional. Sie sind makroskalig (mehrere tausend Kilometer) und entstehen durch Hoch- und Tiefdruckgebiete in der Troposphäre. Ein Beispiel ist der Westwind in Mitteleuropa. Synoptische Winde interagieren vor allem mit der städtischen Oberfläche. Ihr kühlender Effekt hängt stark von dieser Interaktion ab.⁶⁶

2.3.3 Situation Stadt Zürich

75% des Gebiets der Stadt Zürich werden von mindestens einer Art der oben genannten Kaltluftströme erreicht. Der häufigste Kaltluftstrom ist aufgrund Zürichs Tallage der Talwind.⁶⁷ So erreichen Kaltluftströme vom Uetliberg Zürich Enge. Hirslanden auf der anderen Stadtseite wird vom Adlisberg mit Kaltluft versorgt.⁶⁸ Die Zürcher Altstadt wird von Kaltluftströmen nicht erreicht. Die Kaltluftversorgung der Stadt Zürich ist in Abbildung 6 dargestellt.

⁶³ Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft - Sektion Klima und Mobilität, «Sicherstellung der Kaltluftzirkulation».

⁶⁴ Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, «Tal- und Bergwinde - MeteoSchweiz».

⁶⁵ Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft - Sektion Klima und Mobilität, «Sicherstellung der Kaltluftzirkulation».

⁶⁶ Spektrum Akademischer Verlag, «Synoptische Wettersysteme».

⁶⁷ Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft - Sektion Klima und Mobilität, «Sicherstellung der Kaltluftzirkulation».

⁶⁸ Svenson Cornehlis u. a., «04.27 Uhr».

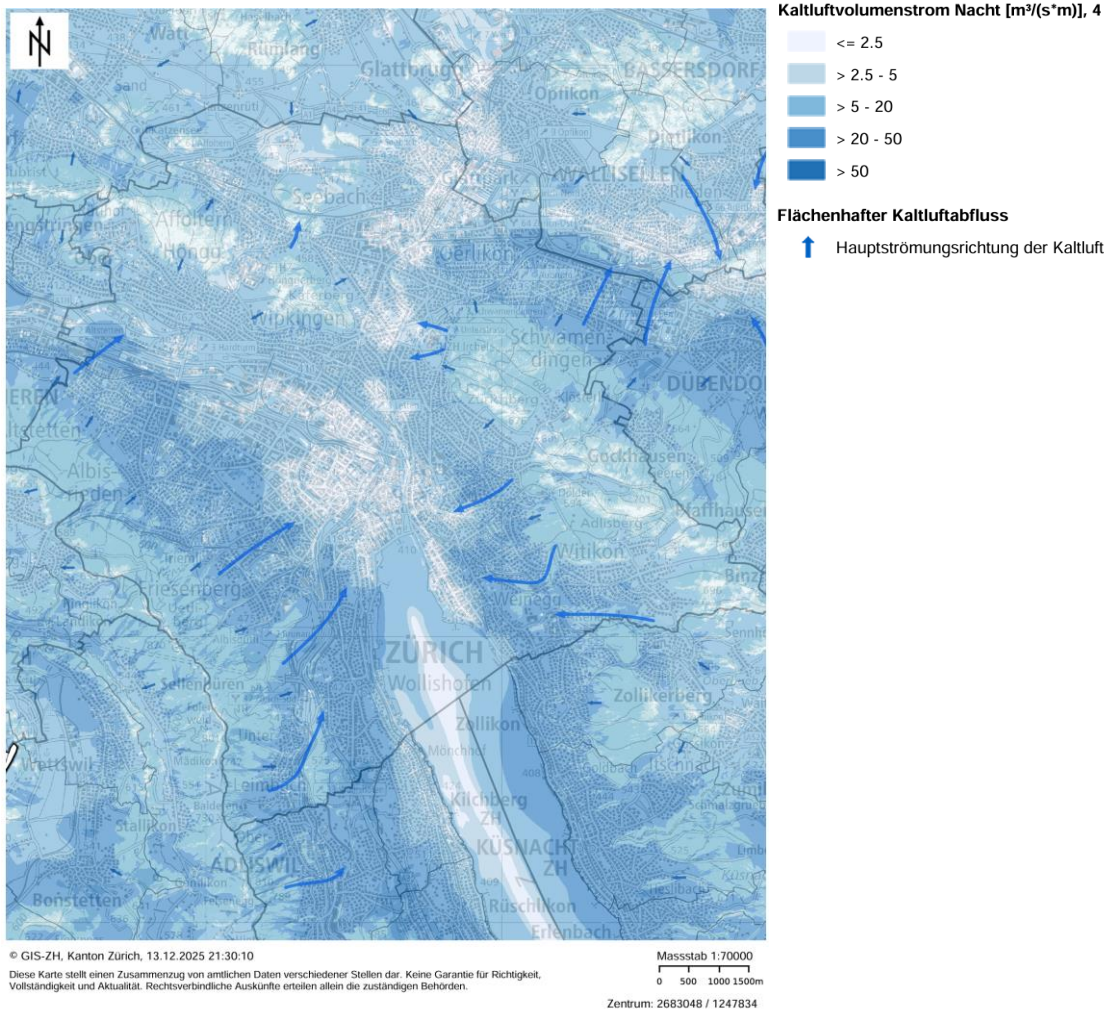


Abbildung 6 Screenshot GIS-Karte und Legende nächtlicher Kaltluftströme in der Stadt Zürich (Stand 2024)⁶⁹

2.4 Städtebau und urbane Ventilation

2.4.1 Einführung Städtebau und Begriffserklärungen

Der Städtebau befasst sich mit der Gestaltung und Planung von Gebäudegruppen bis hin zu ganzen Stadtteilen des öffentlichen Raums. Ziel ist, möglichst nachhaltige, funktionale und lebenswerte urbane Räume für alle Menschen zu schaffen.⁷⁰

Im Städtebau und im Kontext städtischer Durchlüftung fällt oft der Begriff *Morphologie* oder *Stadtformologie*. Die Morphologie einer Stadt bezeichnet das *Formprinzip*, also die Anordnung wiederkehrender Grundelemente, aus denen eine Stadt besteht. Dies sind beispielsweise Strassen, Parzellen und Gebäudeblöcken. Sie bezeichnet somit die Struktur des Stadtgrundrisses. In der Literatur wird teilweise auch die Veränderungen dieser Struktur über eine Zeitperiode als Stadtformologie beschrieben.⁷¹

Die *Körnung* beschreibt die Grösse, die Dichte und die Anordnung der baulichen Elemente. Sie unterscheidet, wie fein oder grob (oder wie komplex) ein Stadtteil bebaut ist. Bei einer feinen Körnung sind viele kleine

⁶⁹ Geoportal Kanton Zürich, *GIS-Browser Geoportal Kanton Zürich*.

⁷⁰ Architekt, «Städtebau».

⁷¹ TU Dresden Fakultät Architektur und Landschaft, «Grundlagen Städtebau».

Parzellen dicht aneinander. Das Zürcher Niederdorf ist feinkörnig, da es aus vielen kleinen, dicht aneinander gebauten Häusern besteht. Bei einer groben Körnung sind die einzelnen Elemente wie Strassen und Gebäude grösser und weiter voneinander entfernt. Grosskörnig sind beispielsweise Industriegebiete und Grossbausiedlungen.⁷²

Die *städtische Rauigkeit* (Roughness Length) beschreibt die Unebenheit der Oberfläche einer Stadt. Sprich, wie «glatt» die Oberfläche ist, die sich aus Strassen, Dächern und Vegetation bildet. Die Rauigkeit ist massgebend, wie stark ein Luftstrom abgebremst wird. Städte mit einer hohen Rauigkeit bremsen Winde stark.⁷³

Street Canyons oder Strassenschluchten sind häufig vorkommende Strukturen in Städten. Sind diese schmal und durch Bebauung von Wind abgeschirmt, entstehen in ihnen spezielle Mikroklimata.⁷⁴

In der Luftschicht über Städten entsteht durch den Einfluss des Stadtklimas eine atmosphärische *Grenzschicht*. Diese Grenzschicht spielt eine wichtige Rolle im Luftaustausch zwischen der Atmosphäre und den Städten. Die Grenzschicht wird unterteilt in die *Stadthindernisschicht* (Urban Canopy Layer (UCL)) und die *Stadtgrenzschicht* (Urban Boundry Layer (UBL)). Die Stadthindernisschicht ist der Bereich unterhalb der Dachfirste, also dort, wo sich Menschen aufhalten. Im UCL wird das Mikroklima vor allem durch die Bebauung und die Form der städtischen Umgebung beeinflusst. Die Stadtgrenzschicht hingegen liegt darüber und reicht bis in eine Höhe, in der die Stadt keinen Einfluss mehr auf die Atmosphäre hat. Bei Grosstädten kann diese mehr als 500 Meter über dem Boden sein. Das Dachniveau, also die Grenze zwischen UBL und UCL, wirkt auf Winde ähnlich wie eine zweite Bodenoberfläche (städtische Rauigkeit).^{75 76}

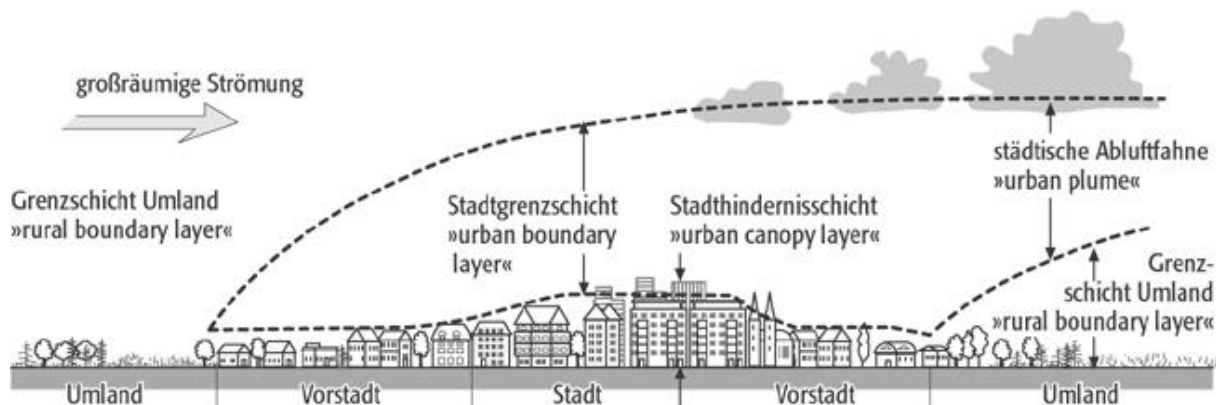


Abbildung 7 Schematische Darstellung von Stadtgrenzschicht (UBL) und Stadthindernisschicht (UCL)⁷⁷

2.4.2 Typische Stadtstrukturen

Laut dem Zürcher Amt für Städtebau gibt es in der Stadt Zürich zwei übergeordnete Kategorien für städtebauliche Strukturen: der urbane, dicht bebaute *kompakte Stadtkörper* und der weniger dicht bebaute *durchgrünte Stadtkörper*.⁷⁸

⁷² Designing Buildings the Construction Wiki, «Urban Grain».

⁷³ Directory, «Roughness Length → Term».

⁷⁴ «Street Canyon - an overview | ScienceDirect Topics».

⁷⁵ Spektrum Akademischer Verlag, «Stadtgrenzschicht».

⁷⁶ Miles, «What Is the Urban Heat Island Effect and Urban Surface Roughness?»

⁷⁷ Miles, «What Is the Urban Heat Island Effect and Urban Surface Roughness?»

⁷⁸ Stadt Zürich Amt für Städtebau, «Architektur im Amt für Städtebau».

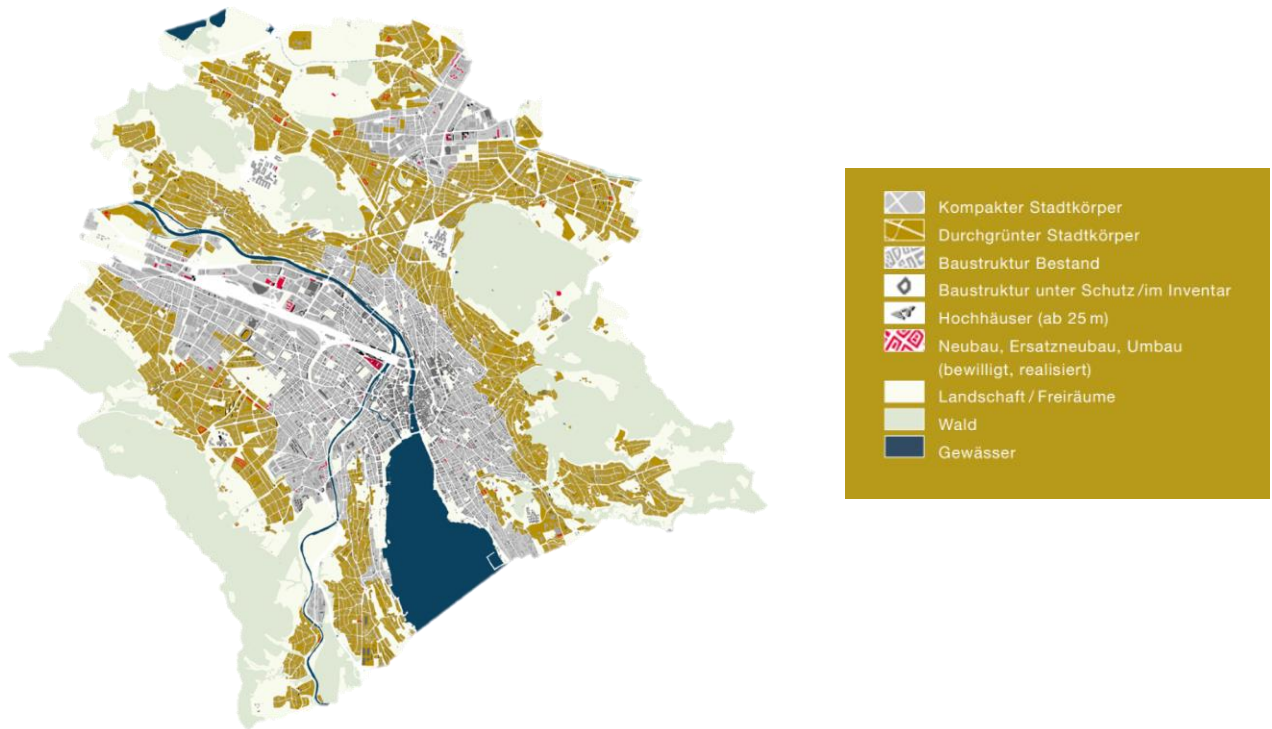


Abbildung 8 Räumliche Verteilung der durchgrünter und kompakten Stadtkörper in der Stadt Zürich ⁷⁹

Diese Kategorien lassen sich weiter in acht Unterkategorien unterteilen. Die jeweiligen Unterkategorien unterscheiden sich in Charakter, Dichte und Körnung. Je nach Eigenschaften der Bebauung variiert dann die Durchlässigkeit. ^{80 81}

Eine Unterkategorie der kompakten Stadtstrukturen ist zum Beispiel die *Blockrandbebauung*.

Unter *Blockrandbebauung* versteht man eine städtische Bauweise, bei der mehrere Häuser aneinander ohne Abstand entlang einer Grundstücksgrenze gebaut werden. Dabei entsteht in der Mitte ein oder mehrere Innenhöfe. Blockrandbebauungen formen klar definierte Strassenräume. Diese Bautypologie ist charakteristisch für viele historische Zentren europäischer Städte. In der Stadt Zürich ist sie vor allem im Seefeld und in Wiedikon zu finden (siehe Abbildung 9) ^{82 83}.

⁷⁹ Stadt Zürich Amt für Städtebau, «Architektur im Amt für Städtebau».

⁸⁰ Stadt Zürich Amt für Städtebau, «Architektur im Amt für Städtebau».

⁸¹ Guo u. a., «Exploring the effect of the architecture morphology on urban ventilation at block scale using CFD-GIS and random forest combined method».

⁸² Stadt Zürich, «Visualisierungen Solarstadt 2040».

⁸³ Das Lexikon für Architektur und Bauwesen, «Blockrandbebauung».



Wiedikon



Blockrand

Abbildung 9 Grundriss und Fotografie einer Blockrandsiedlung in der Stadt Zürich⁸⁴

Die *Zeilensiedlung* oder *Zeilenbebauung* ist Teil der durchgrünten Stadtkörper. Charakteristisch ist der längliche Grundriss der Häuser, wobei mehrere Häuser parallel zueinander oder in einer Reihe quer zu einer Strasse angeordnet sind. Abbildung 10 zeigt eine typische Zeilensiedlung in der Stadt Zürich (Milchbuck)⁸⁵



Milchbuck



Zeilen

Abbildung 10 Grundriss und Fotografie einer Zeilensiedlung in der Stadt Zürich⁸⁶

2.4.3 Einfluss der Bebauung auf die Durchlüftung

Urbane Durchlüftung kann nur durch gezielte Stadtplanung erzielt werden, wobei die Planung des Gebäudelayouts eine zentrale Rolle spielt. Es ist wichtig zu erwähnen, dass für städtische Belüftung grundstücksübergreifend geplant werden muss. Urbane Ventilation funktioniert nur grossräumig und muss daher auch grossräumig geplant werden. Winde entstehen nicht auf einem einzelnen Grundstück.

Das Durchlüftungspotential von Siedlungen wird primär von der Geometrie, Anordnung und Gestaltung der Gebäude beeinflusst. Wichtig dabei sind folgende Parameter, welche entscheiden, wieviel Frischluft vom

⁸⁴ Stadt Zürich Amt für Städtebau, «Architektur im Amt für Städtebau».

⁸⁵ TU Dresden Fakultät Architektur und Landschaft, «Grundlagen Städtebau».

⁸⁶ Stadt Zürich Amt für Städtebau, «Architektur im Amt für Städtebau».

Stadtrand in die Quartiere eindringen kann und wie gut grossräumige Winde oberhalb der Stadt die Fussgängerhöhe (2m über Boden) erreichen:⁸⁷

Bebauungsdichte:

Bebauungsdichte wird durch *Packing-* und *Frontal-Area-Density* beschrieben. Packing-Density ist das Verhältnis der Gebäudegrundrissfläche zur Grundstücksfläche. Frontal-Area-Density beschreibt die Fläche der windzugewandten Fassaden im Verhältnis zur Grundstücksfläche. Dichte Grundstücke, also solche mit einem grossen Anteil bebauter Fläche und einer grossen Fassadenfläche, die in Windrichtung zeigt, bremsen Winde. Befinden sich dichte Bebauungen an ungünstiger Stelle, werden unter Umständen ganze Stadtteile nicht mit Frischluft versorgt.⁸⁸

Gebäudehöhe und deren Variabilität:

Variierende Gebäudehöhen vergrössern die Rauigkeit der Stadt. Variiert die Gebäudehöhe über die ganze Stadt hinweg stark, so werden grossräumige Winde über der Stadt abgebremst. Geringere Windgeschwindigkeiten in der städtischen Atmosphäre führen zu geringerem Hitze- und Luftschadstoff-Abtransport.⁸⁹

Ragen jedoch nur ein paar einzelne Gebäude über die durchschnittliche Dachhöhe hinaus, wirkt sich dies positiv auf die Durchlüftung aus. Winde in der UBL können von einzelnen herausragenden Gebäuden umgelenkt werden und in die Strassenschluchten der UCL gelangen. Dies führt dort zu einer Belüftung. Durch die Umlenkung entstehen Turbulenzen und eine Vermischung der Luftschichten (UBL und UCL) findet statt. Im Idealfall entsteht dadurch eine Durchlüftung auf Fussgängerhöhe, was das Wohlbefinden der Menschen erheblich steigert, da Hitze und Schadstoffe entfernt werden. Allerdings können zu starke umgeleitete Winde aus der UBL auch unangenehme Effekte auf die Menschen im UCL haben. Hohe Gebäude können etwa Windböen in das UCL umlenken. Diese Windböen erreichen so die Fussgängerhöhe und werden dort von den Menschen als unangenehm empfunden. Das Verhindern der unangenehmen Effekte war früher primär das wissenschaftliche Forschungsgebiet, zum Beispiel bei Städten in Küstennähe. Erst seit einigen Jahren rückt auch der positive Einfluss von Bebauung auf Winde in den Fokus der Forschung.^{90 91 92}

Höhenvariabilität der Gebäude kann im grossen Rahmen, also über die ganze Stadt hinweg, den UHI verstärken. Einzelne höhere Gebäude können aber gezielt eingesetzt werden, um die Durchlüftung ihrer Umgebung zu erhöhen.⁹³

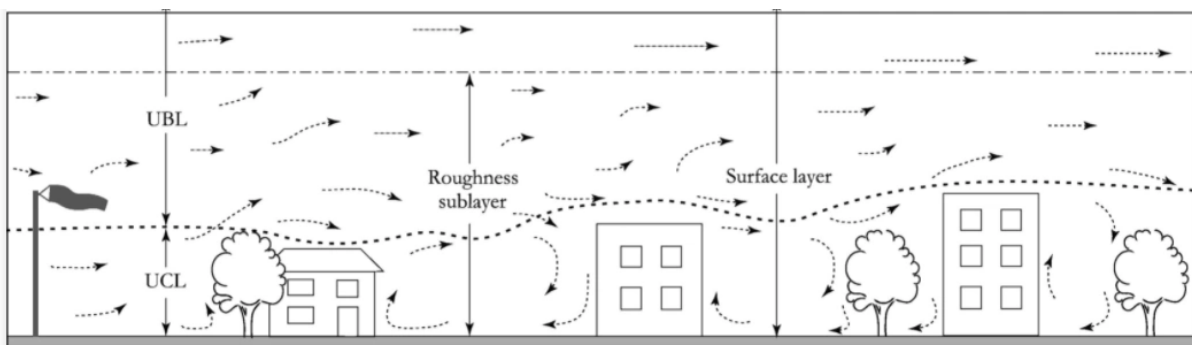


Abbildung 11 Einfluss von Gebäuden auf Wind im UCL und UBL⁹⁴

⁸⁷ Ng, *Designing High-Density Cities: For Social and Environmental Sustainability*.

⁸⁸ Elbadri u. a., «Airflow in Urban Environment: an Approach to Improve Egyptian Buildings Regulations».

⁸⁹ Kuttler und Weber, «Characteristics and phenomena of the urban climate».

⁹⁰ Ng, *Designing High-Density Cities: For Social and Environmental Sustainability*.

⁹⁴ Miles, «What Is the Urban Heat Island Effect and Urban Surface Roughness?»

Verhältnis der Gebäudehöhe zur Strassenbreite

Studien ergaben, dass in Strassenschluchten das Verhältnis der Gebäudehöhe (H) im Vergleich zur Strassenbreite (W) weniger als 0.7 ($H/W < 0.7$) betragen darf, damit Luftströme aus der UBL das Bodenniveau erreichen können. Wie Abbildung 12 zeigt, kann dieses Verhältnis in Grossstädten mit Hochhäusern und Strassenschluchten nicht erreicht werden. Deshalb muss zwingend versucht werden, Frischluft aus dem Stadtumland durch Windkorridore in dichte Stadtgebiete auf Bodenniveau zu befördern. Dafür sind Windkorridore nötig.

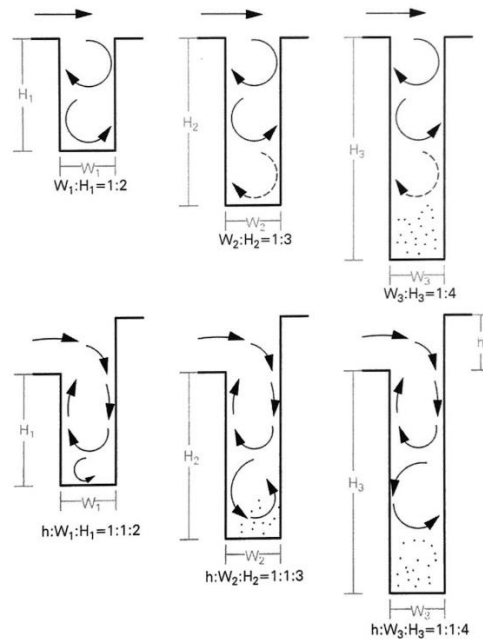


Abbildung 12 Grafik zeigt Einfluss des Verhältnisses von Gebäudehöhe und Strassenbreite auf Winde⁹⁵

Gebäude- und Strassenausrichtung:

Die Ausrichtung der Gebäude und Strassen ist hinsichtlich der Kaltluftströme als auch der synoptischen Winde wichtig. Kaltluftströme kommen aufgrund der Topografie meist aus derselben Himmelsrichtung. Für Gebiete am Stadtrand ist eine Orientierung längs zur Strömungsrichtung der Kaltluft erstrebenswert. Ziel ist es, die Kaltluftströme auf Bodenhöhe zu behalten und tiefer in die Stadt zu leiten. Durch die richtige Orientierung von Strassenzügen können *Kaltluftleitbahnen* erschaffen werden. Im Kerngebiet einer Stadt ist es wichtig, dass Winde von oberhalb der Stadt den Boden erreichen können. Deshalb ist auch dort eine Orientierung von Strassenschluchten hin zur dominanten, synoptischen Windrichtung wichtig. Synoptische Winde können in parallel zur Windrichtung verlaufende Strassenschluchten eindringen und Bodenhöhe

⁹² Ng, *Designing High-Density Cities: For Social and Environmental Sustainability*.

⁹³ Kuttler und Weber, «Characteristics and phenomena of the urban climate».

⁹⁴ Miles, «What Is the Urban Heat Island Effect and Urban Surface Roughness?»

⁹⁵ Ng, *Designing High-Density Cities: For Social and Environmental Sustainability*.

erreichen. Die Strassenschluchten dienen als *Windleitbahnen*. Ist der Wind auf Bodenhöhe, so kann er in umliegende Gebiete vordringen und für Kühlung sorgen. Als Faustregel gilt, dass Strassenschluchten und längliche Gebäude nicht mehr als 30° zur dominanten Windrichtung abweichen dürfen, um als effektive Windleitbahn zu fungieren.⁹⁶

In Realität muss aber bei der Gebäudeausrichtung der Einfluss der Sonne berücksichtigt werden, welche die Gebäude nämlich unmittelbar erwärmt. Es ist also ein Abwägen geboten, wie sich die Orientierung im grossen (Winde) wie im kleinen Rahmen (Erwärmung) auswirkt.⁹⁷

Gebäudevorsprünge:

Je breiter die Strassenschluchten sind, umso mehr Luftmassen haben darin Raum und können geleitet werden. Die Leitfähigkeit hängt aber nicht nur von der Breite der Strassenschlucht ab, sondern auch von den angrenzenden Gebäuden. Ist der Abstand der Gebäude nicht regelmässig und ragen Gebäude in die Strassenschluchten hinein, kann es vorkommen, dass Turbulenzen erzeugt werden, die den Luftstrom bremsen.⁹⁸

2.4.4 Interessenskonflikte in der Stadtplanung

Wie bereits anhand des Beispiels eines Baumes erwähnt, können Massnahmen verschiedener Handlungsansätze zu Wirkungskonflikten führen. Auch Konflikte bezüglich individueller Interessen wie Budget, Optik oder Raumnutzung, können auftreten. Darauf genauer einzugehen, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

3. Forschung

Windkanal vs. Computational Fluid Dynamics

Um den Einfluss der Gebäudeformen auf das Durchlüftungspotential zu untersuchen, werden häufig Simulationen mit sogenannten *Computational Fluid Dynamics* (CFD) Programmen gemacht. CFDs sind ein geeignetes und weit verbreitetes Werkzeug, da sie viele Faktoren wie verschiedene Oberflächen, Begrünung und anthropogene Wärme ohne viel Mehraufwand berücksichtigen können. Zudem sind sie verhältnismässig günstig.⁹⁹

Vor der Erfindung von CFDs waren Windkanaltests das gängige Mittel um Strömungsverhalten, sei es an Fahrzeugen oder auch an Gebäuden, zu testen. Im Vergleich zu Computersimulationen benötigen Windkanäle keine enorme Rechenleistung, um komplexe Strömungsmuster zu simulieren. Sie machen keine Fehler und sind deshalb präziser. Meist werden heutzutage zuerst Berechnungen in CFD-Programmen durchgeführt. Danach wird möglicherweise ein Test im Windkanal durchgeführt, um die Ergebnisse der Computersimulation zu überprüfen.^{100 101}

⁹⁶ Ng, *Designing High-Density Cities: For Social and Environmental Sustainability*.

⁹⁷ Ng, *Designing High-Density Cities: For Social and Environmental Sustainability*.

⁹⁸ Elbadri u. a., «Airflow in Urban Environment: an Approach to Improve Egyptian Buildings Regulations».

⁹⁹ Guo u. a., «Improving Natural Ventilation Performance in a High-Density Urban District: A Building Morphology Method».

¹⁰⁰ Azman u. a., «Flow structure in modern cities: wind tunnel investigation».

¹⁰¹ Zhao u. a., «Boundary layer wind tunnel tests of outdoor airflow field around urban buildings: A review of methods and status».

4. Praktischer Teil

4.1 Zielsetzung

Das Ziel des praktischen Teils meiner Arbeit ist, den Einfluss von unterschiedlichen Bebauungstypologien auf das Verhalten von Kaltluftströmen zu simulieren. Anhand eines physikalischen Strömungsmodells wird untersucht, wie sich die Bebauung auf den Luftstrom (simulierte Kaltluftströme) auswirkt.

Folgende Zielsetzung wird verfolgt:

Visualisierung: Der Fokus liegt auf der Visualisierung der Luftströme mit einem geeigneten Nebel an den Modellen.

Vergleich mit Theorie: Ziel ist es, herauszufinden, ob die beobachteten Muster im Modellversuch mit den in Kapitel «2.4.3 Einfluss der Bebauung auf die Durchlüftung» genannten Parametern erklärbar sind.

Optimierung: Durch die hypothetische Stelzenbauweise soll aufgezeigt werden, dass innovative Ansätze dazu beitragen können, die Kaltluftdurchlässigkeit zu verbessern.

Getestet werden Blockrandbebauung und Zeilenbebauung mit Ausrichtung der Gebäude quer und längs zur Windrichtung. Es wird auch eine hypothetische Bauweise auf Stelzen getestet. Dies, da dargelegt wurde, dass Kaltluftströme bodennah sind. Durch eine Stelzenbauweise sollten die Winde weniger gestört werden (Annahme). Für die Stelzenausführung wird die Blockrandsiedlung als Ausgangsmodell verwendet und die Gebäude mit Stelzen versehen. Die Versuche werden bei gleichbleibenden Bedingungen im Windkanal durchgeführt. Als Kontrollversuch wird der Kaltluftstrom im Windkanal ohne Bebauung durchgeführt. Die verschiedenen Versuchsanordnungen verfügen etwa über unterschiedlich grosse Bebauungsdichten, Frontflächen und Verhältnissen der Gebäudehöhe zur Strassenschluchtbreite, sowie über unterschiedliche Gebäudeausrichtungen und -höhen. Es wird angenommen, dass der sich Einfluss dieser Faktoren auf das Strömungsverhalten der simulierten Winde auswirkt.

Angenommen wird, dass dichte Bebauungen, wie die Blockrandsiedlung, die Luftströme massgeblich behindern und deren Frontfassaden wie eine Barriere auf die Winde wirken. Zudem wird eine Abweichung der Winddurchlässigkeit der Siedlungen je nach Ausrichtung der Gebäude erwartet.

Versuchsanordnungen:

Blockrandbebauung	Zeilensiedlung längs	Zeilensiedlung quer	Blockrandbebauung auf Stelzen	Kontrollversuch ohne Bebauung
-------------------	-------------------------	------------------------	----------------------------------	----------------------------------

Bei der Durchführung des Versuchs wird auf auffällige Windströmungsmuster und die Nebelverteilung im Modell geachtet. Diese geben Auskunft, an welchen Stellen im Modell der Wind stark beeinflusst wird und ob alle Orte (zum Beispiel Strassen) gleichmässig von Luft versorgt werden. Zudem liegt Augenmerk darauf, wieviel Nebel hinter dem Modell auf einer Freifläche ankommt. Dies gibt Auskunft, wie gut die Siedlungsmodelle bodennahe Luft durchlassen. In der Realität ist dies wichtig, um zu wissen, wie stark eine Gebäudeform den Kaltluftstrom in Richtung Stadtzentrum behindert.

4.2 Aufbau

Das Experiment wird anhand eines vereinfachten, verkleinerten Modells, Massstab 1:300, durchgeführt. Dieser Massstab ergab sich aus Tests mit Prototypen. Sind die Häusermodelle kleiner, sind weniger Details im Nebel erkennbar. Ist der Massstab zu gross, passen nicht genügend Häuser in den Versuch und es müsste mehr Nebel erzeugt werden.

Die Häusermodelle werden aus 4 mm dicken Polystyrolplatten gefertigt und auf einer Platte im selbstgebauten Windkanal angeordnet. Polystyrolplatten eignen sich gut als Baustoff für die Häusermodelle, da die Platten einfach zuzuschneiden sind und sich präzise verkleben lassen. Durch einen Ventilator wird ein gleichmässiger Luftstrom erzeugt. Er wird zunächst durch eine selbstgebaute Holzvorrichtung kanalisiert und erzeugt so einen bodennahen Luftstrom. Augenmerk liegt hierbei darauf, dass der Luftstrom gleichmässig, möglichst laminar und reproduzierbar ist, um vergleichbare Ergebnisse zu gewinnen.

Der Windkanal besteht aus einem Ventilator zur Windproduktion und einer Nebelmaschine. Beide sind in eine Holzstruktur integriert, die den erzeugten Luftstrom und den Nebel zusammenführt und gezielt in einen bodennahen Strom lenken. Der Ausgang der Wind-Nebel-Vorrichtung hat eine Breite von 40 cm und eine Höhe von 5 cm. Im Massstab sind das realistische Werte für Kaltluftströme. Das Häusermodell steht etwa 10-20 cm von der Wind-Nebel-Erzeugungsmaschine entfernt. Die Grundplatte hat eine Breite von 60 cm und eine Länge von 1.5 m.

Die Luftströme werden mithilfe von Nebel aus einer Party-Nebelmaschine visualisiert. Der Nebel wird bereits in der Wind-Nebel-Vorrichtung in den Luftstrom eingespeist. Der Luftstrom trifft das Modell nicht wie eine Welle, sondern gleichmässig und konstant. Die Winde in der Landschaft, welche simuliert werden, entstehen nicht plötzlich, sondern entwickeln sich langsam. Der Nebel wird deshalb erst in den Wind eingespeist, wenn dieser schon etwa eine Minute im Modell weht und konstant ist. Der Vorteil, den Nebel in den schon existierenden Luftstrom einzuspeisen ist, dass sich der Luftstrom um die Modelle nicht ändern sollte. Das heisst, der Zeitpunkt der Fotoaufnahme spielt später keine Rolle. Das Windmuster ist kurz nach dem Einspeisen gleich wie einige Sekunden später. Was sich ändert, ist, welche Teile der Luftströmung um die Modelle sichtbar ist. Kurz nach dem Einspeisen, wenn erst wenig Nebel in der Luft ist, sind manche Details besser erkennbar. Wenn schon viel Nebel über das Modell geströmt ist, kann sich dieser stärker verteilen. Dadurch verschlechtert sich die Sicht der Kamera und weniger Details sind erkennbar.

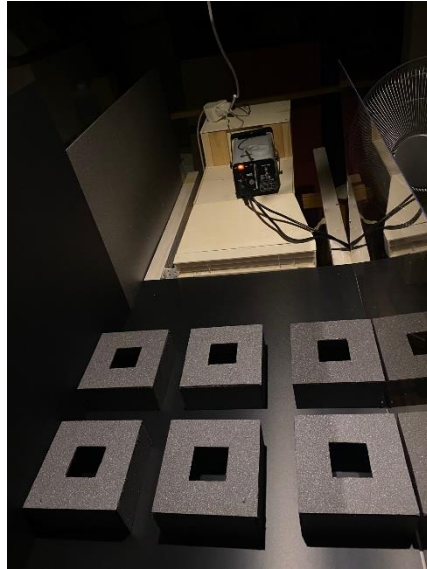
Die Grundplatte in der Versuchsanordnung wird rechts und links zur Strömungsrichtung von zwei Wänden umschlossen, um so den Einfluss von Luftbewegungen im Raum zu verhindern. Eine dieser Wände besteht aus Plexiglas, um der Kamera Sicht auf die Modelle zu gewähren, damit diese auch seitliche Aufnahmen machen kann. Die Farbe der Grundplatte und der Wand gegenüber dem Plexiglas ist schwarz, um den Kontrast zum weissen Nebel und den grauen Modellen zu erhöhen. Beleuchtet wird der Aufbau von oben durch eine Leuchtstoffröhre und einer an der Decke befestigten Lampe.

Die verwendete Kamera ist eine Nikon D5000. Es wurde mit folgenden Einstellungen fotografiert:

Blendenzahl:	F/3.8
Belichtungszeit:	1/30 Sek.
ISO-Empfindlichkeit:	ISO-1000



*Abbildung 13 Wind-Nebel
Erzeugungsvorrichtung (eigenes
Foto)*



*Abbildung 14 Versuchsaufbau
(eigenes Foto)*



*Abbildung 15 Versuchsaufbau mit
Kamera (eigenes Foto)*

4.3 Modelle und deren Eigenschaften

Alle Siedlungstypen sind angelehnt an die echten Siedlungen in der Stadt Zürich (siehe typische Stadtstrukturen in Abbildung 9 und 10).

Blockrandsiedlung:

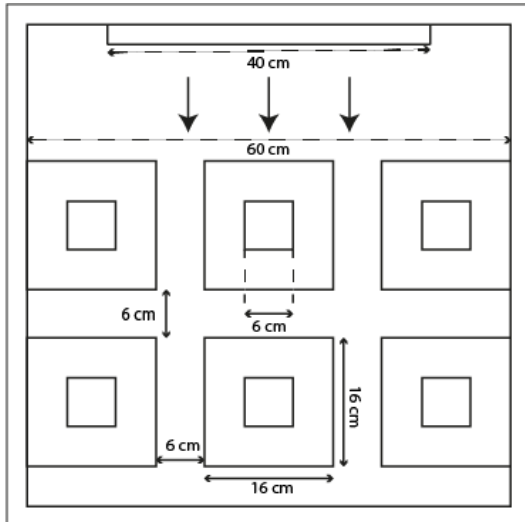


Abbildung 16 Plan des Blockrandsiedlungsmodells (eigene Grafik)

Abmessungen:

Länge Haus	16 cm
Breite Haus	16 cm
Höhe Haus	7.5 cm
Fassadenfläche (windzugewandt)	360 cm ²
Fläche Grundriss (mit Innenhof)	1536 cm ²

Die Größenverhältnisse der Blockrandsiedlung entsprechen einer echten Blockrandsiedlung in Zürich Wiedikon. Sie sind in vereinfachter Form im Massstab 1:300 nachgebaut.

Zeilensiedlung längs

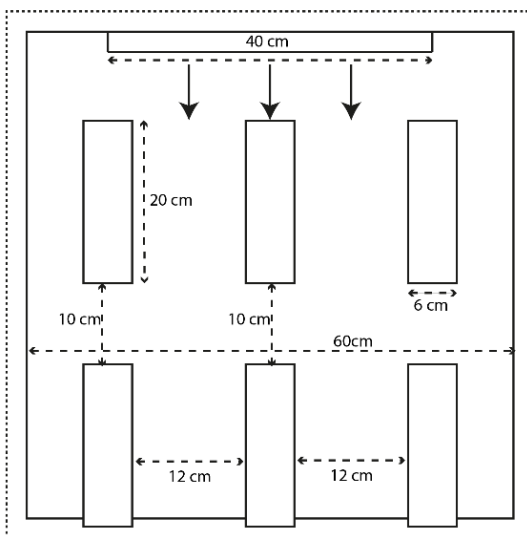
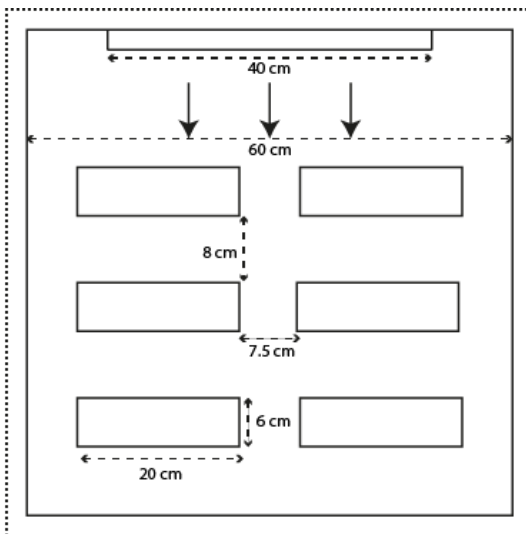


Abbildung 17 Plan des Zeilensiedlungsmodells längs (eigene Grafik)

Abmessungen:

Länge Haus	20 cm
Breite Haus	6 cm
Höhe Haus	6.5 cm
Fassadenfläche (windzugewandt)	117 cm ²
Fläche Grundriss (mit Innenhof)	720 cm ²

Zeilensiedlung quer



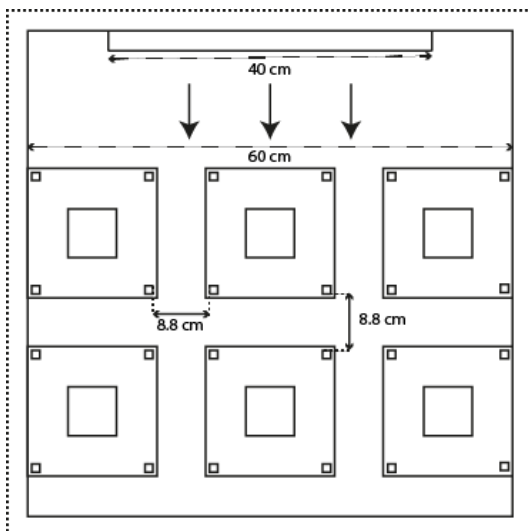
Abmessungen:

Länge Haus	6 cm
Breite Haus	20 cm
Höhe Haus	6.5 cm
Fassadenfläche (windzugewandt)	260 cm ²
Fläche Grundriss (mit Innenhof)	720 cm ²

Abbildung 18 Plan des Zeilensiedlungsmodells quer (eigene Grafik)

Blockrandsiedlung Stelzen

Die Form und die Masse der Blockrandsiedlung auf Stelzen sind quasi identisch zur normalen Blockrandsiedlung. Der einzige Unterschied ist, dass diese Siedlung auf Stelzen steht. Als Grundrissfläche wird daher nur die Fläche der Stelzen gezählt.



Abmessungen:

Länge Haus	16 cm
Breite Haus	16 cm
Höhe Haus	7.5 cm
Höhe Stelzen	6 cm
Breite Stelzen	1 cm
Länge Stelzen	1 cm
Fassadenfläche (windzugewandt)	366 cm ²
Fläche Grundriss	24 cm ²

Abbildung 19 Plan des Blockrandsiedlungsmodells auf Stelzen (eigene Grafik)

4.4 Datenerfassung

Dokumentiert werden die Durchführungen von einer Kamera, die in Intervallaufnahmen einmal pro Sekunde ein Bild aufnimmt. Durch die Reproduzierbarkeit des Experiments ist es möglich, die Position der Kamera zu verändern und so aus verschiedenen Perspektiven Aufnahmen zu erstellen. In jeder Position werden drei Wiederholungen gemacht.

Die Kamerapositionen:

- erste Reihe auf Bodenhöhe seitlich
- erste Reihe seitlich erhöht
- Rückseite auf Bodenhöhe
- Rückseite erhöht
- Vogelperspektive
- zweite Reihe auf Bodenhöhe seitlich

4.5 Auswertung

Die Auswertung wird qualitativ anhand der entstandenen Fotografien unternommen. Die Strömungsverläufe werden beschrieben und mit entsprechenden Fotografien belegt. Da in dieser Arbeit keine Videos dargestellt werden können, ist es schwierig, auf den einzelnen Bildern die genaue Strömungsrichtung und das Strömungsverhalten festzustellen. Durch die in Intervallen geschossenen Fotos ist es jedoch möglich, bei der Analyse die Bewegung des Nebels zu erkennen. Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, alle Fotos einzelner Intervalldurchläufe abzubilden. Um trotzdem nachvollziehbare Beobachtungen zu präsentieren, wird mit dem wissenschaftlichen Open Source Bildbearbeitungs- und -verarbeitungs-Programm «FIJI (Fiji is just ImageJ)» nachträglich die Nebelbewegung und Auffälligkeiten in einzelnen Bildern als Overlay markiert. Die Strömungsrichtung wird mit Pfeilen markiert. Auffällige Strömungsmuster können auch mit Rechtecken hervorgehoben werden.

Um den Nebel auf den Fotos besser erkennbar zu machen, verstärkte ich den Kontrast der Bilder mit dem Tool «Enhance Local Contrast». Das Programm wendet die Methode «Contrast Limited Adaptive Histogram Equalisation»(CLAHE) an. Dadurch werden Kontraste verstärkt und Details hervorgehoben. Dies macht den Nebel besser erkennbar. CLAHE wurde mit folgenden, standardmässigen Einstellungen durchgeführt: Blocksize: 127, Histo-Bins: 256, Max. Slope: 3.00, «fast». Das CLAHE wird ebenfalls in FIJI durchgeführt.

4.6 Ergebnisse

4.6.1 Keine Bebauung

Der Nebel tritt aus dem Spalt der Vorrichtung aus und bewegt sich als ein dichter Schwall von anfänglich ein paar Zentimetern Höhe in Windrichtung, Richtung Ausgang des Windkanals. Der Nebel fliesst langsam, jedoch nicht vollständig laminar. Es sind einige kleine Verwirbelungen beobachtbar (Abbildung 20). Die Nebelschicht vergrössert sich, da sich der Nebel etwas mit der Luft verdünnt. Nicht aller Nebel bleibt bodennah. Ein Teil steigt nach etwa 15 cm horizontaler Entfernung nach Austritt nach oben und verdünnt sich mit der stillen, sich nicht bewegenden, höheren Luft. Der Grossteil des Nebels wird aber in Bodennähe durch den Luftstrom weitergetragen (Abbildung 21). Neben dem Aufsteigen und ein paar Verwirbelungen sind keine Auffälligkeiten zu beobachten.

Folgende Bilder sind, sofern nicht anders gekennzeichnet, selbst aufgenommen.



Abbildung 20 Verhalten des Nebels im Windkanal ohne Bebauung mit leichten Verwirbelungen (Perspektive: oben)

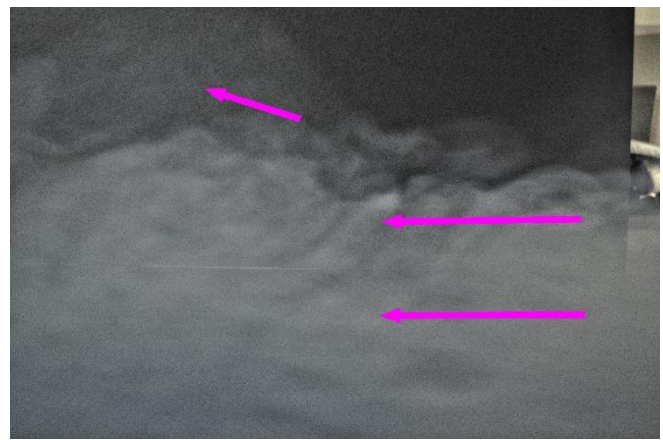


Abbildung 21 Nebelverhalten im Windkanal ohne Bebauung, Nebel mit leichtem Aufstieg (Perspektive: seitlich)

4.6.2 Blockrandsiedlung

Der Nebel tritt aus dem Spalt der Wind-/Nebelerzeugungsvorrichtung bodennah aus. Er bewegt sich zunächst als ein einige Zentimeter hoher Schwall auf die Häusermodelle zu. Die Hauptströmung nähert sich in den Fotos von rechts der vertikalen Wand, die durch die ersten drei Gebäude der Blockrandsiedlung geformt wird. An der Wand wird der Hauptluftstrom nach oben abgelenkt. Es formen sich zwei Wirbel oberhalb und unterhalb des Hauptstroms.

In Abbildung 22 und Abbildung 23 ist die Hauptströmungsrichtung mit den grossen Pfeilen dargestellt. Die kleinen Pfeile markieren die Wirbel. Die Nummerierung in Abbildung 23 bezeichnet den Wirbel oberhalb (1) und unterhalb des Hauptstroms (2). Die Grösse und Position der Wirbel variieren leicht, jedoch ist der Wirbelbildung in allen Aufnahmen der Kameraposition R1B konsistent und deutlich erkennbar.



Abbildung 22 Ablenkung des Luftstroms vor Luvseite der Blockrandbebauung

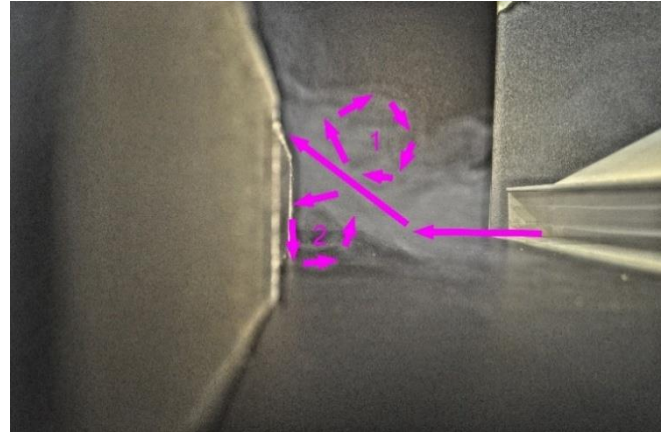


Abbildung 23 Ablenkung und Wirbelbildung vor Luvseite der Blockrandbebauung

Ein Teil des Nebels staut sich kurzfristig in Form von Wirbeln vor der Fassade an. Dies ist in Abbildung 24 erkennbar.

Abbildung 25 zeigt, wie sich der umgelenkte Nebel verhält, nachdem er die vordere Gebäudekante passiert hat. Ein Grossteil zieht horizontal weiter über die Dächer hinweg, während ein kleiner Teil vertikal aufsteigt. Das ist durch die vertikal nach oben gerichteten Pfeilen gekennzeichnet.

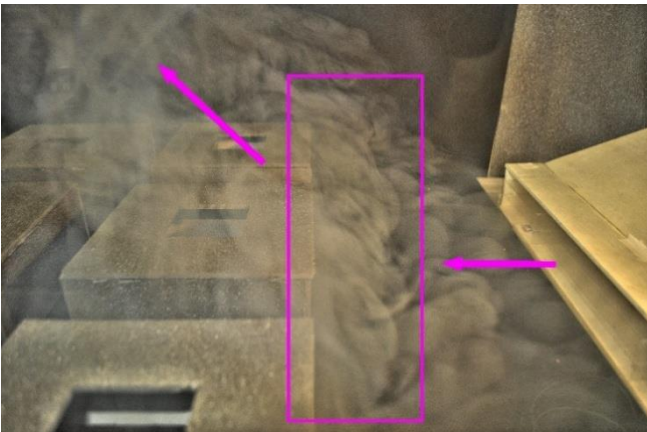


Abbildung 24 Aufstau, Umlenkung und Wirbelbildung vor Luvseite der Blockrandbebauung

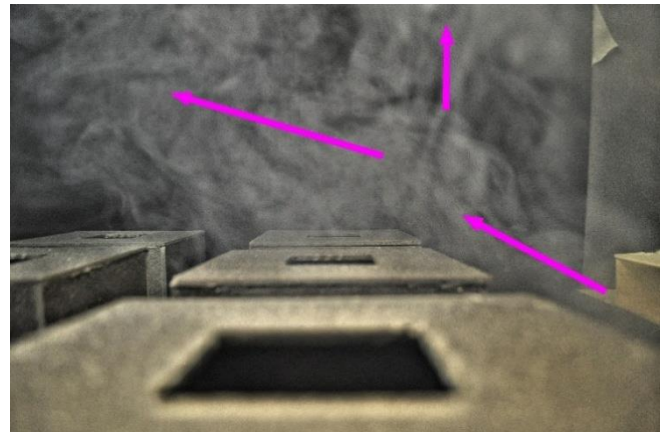


Abbildung 25 Teile des Nebels bewegen sich jeweils horizontal oder vertikal über den Dächern der Blockrandbebauung

Der Teil des Nebels, der nicht schon an der Luv-Front nach oben abgelenkt wird, dringt in die Zwischenräume, beziehungsweise in die parallel zur Strömung verlaufenden Strassenschluchten zwischen den Gebäuden ein. Dort wird er wie in einem Kanal weiter in die Siedlung hineingeleitet. Gut erkennbar ist das zum Beispiel auf Abbildung 26 und Abbildung 27.

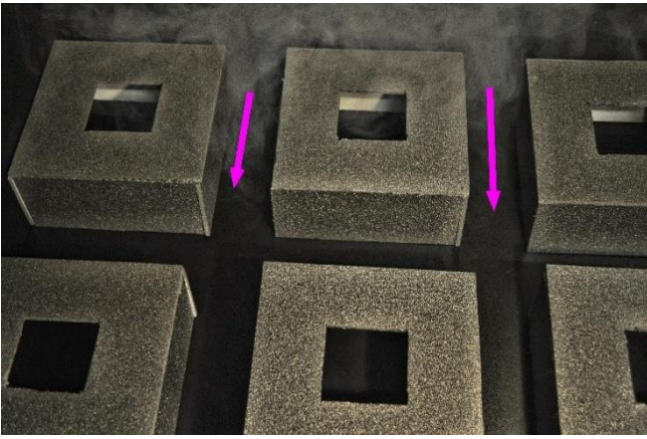


Abbildung 26 Nebel gelangt in Blockrandsiedlung durch Strassenschlucht

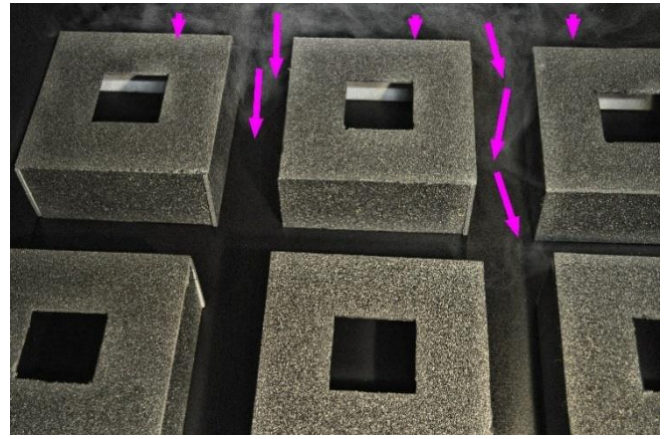


Abbildung 27 Nebel gelangt in Blockrandsiedlung durch Strassenschlucht

Erreicht der Nebel eine Strassenschlucht, die rechtwinklig zu der Strömungsrichtung verläuft, so verteilt sich der Nebel auch nach rechts und links bezüglich seiner Fliessrichtung (Abbildung 28). Dadurch fliesst auch etwas Nebel in den quer verlaufenden Zwischenräumen. Jedoch konnte diese Verteilung nur schwach festgestellt werden. Der Grossteil des Nebels zieht geradeaus weiter und verlangsamt sich stark (Abbildung 29).

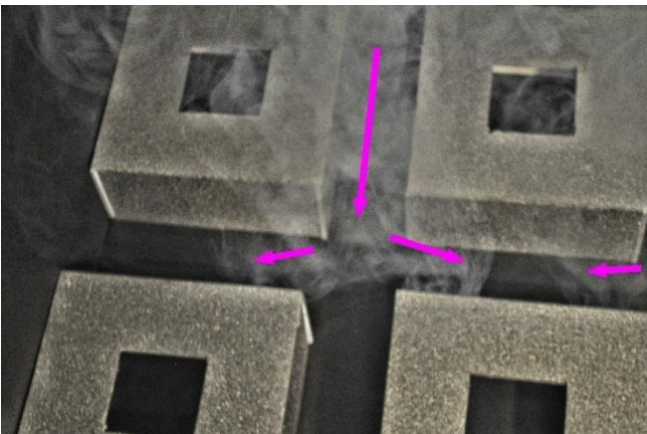


Abbildung 28 Nebel verteilt sich in quer verlaufende Strassenschluchten

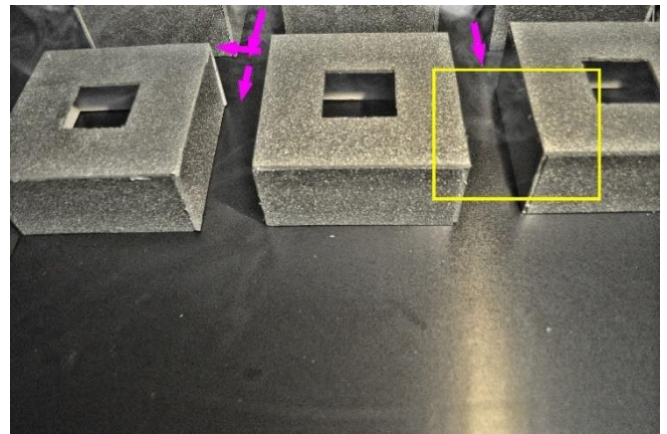


Abbildung 29 Grossteil des Nebels zieht geradeaus weiter

Rund die Hälfte der quer zur Windrichtung verlaufenden Strassenschluchten werden gar nicht mit Nebel gefüllt (Abbildung 30). Ein Teil des Nebels zieht nach oben ab.

Nur ein sehr geringer Teil des Nebels schafft es tatsächlich durch die Kanäle bis in die freie Fläche hinter den sechs Blockrandgebäuden. Siehe Abbildung 31.

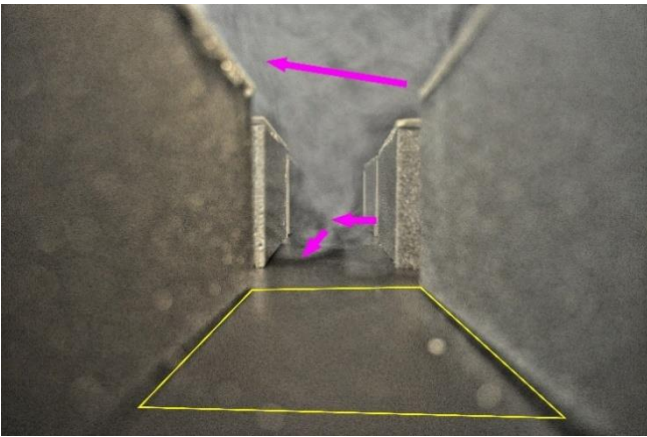


Abbildung 30 Die Querstrassen werden nicht vollständig mit Nebel gefüllt

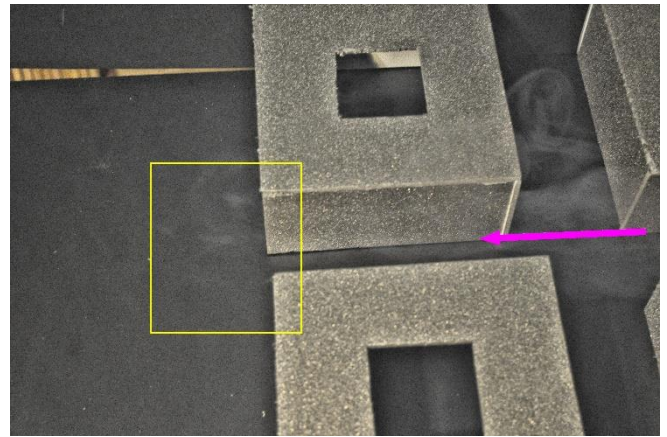


Abbildung 31 Wenig Nebel erreicht die Freifläche

Nebel, der sich bereits über der Siedlung befindet, findet seinen Weg teilweise wieder in die Strassenschluchten zurück. Dies ist auf Abbildung 32 gut erkennbar.

Zu beobachten ist ferner, dass ein Teil des Nebels, der er an der ersten Fassade hochgestiegen ist, sich weiter im Raum mit einer aufwärtsgerichteten Bewegung verteilt. Dies hat zur Folge, dass die Sicht für die Kamera nach einigen Sekunden erheblich eingeschränkt wurde (Abbildung 33).

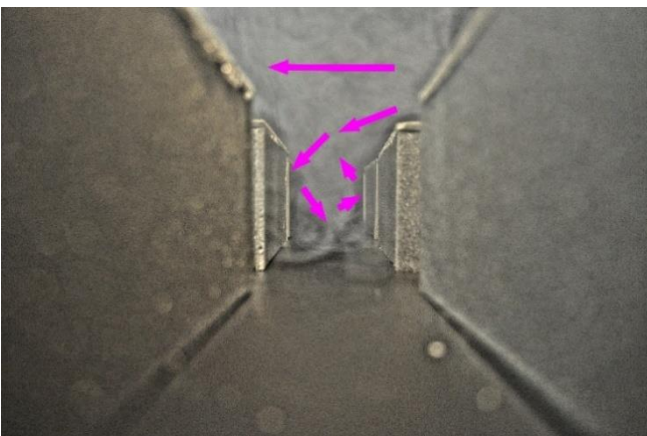


Abbildung 32 Nebel erreicht Strassenschlucht auch von oben

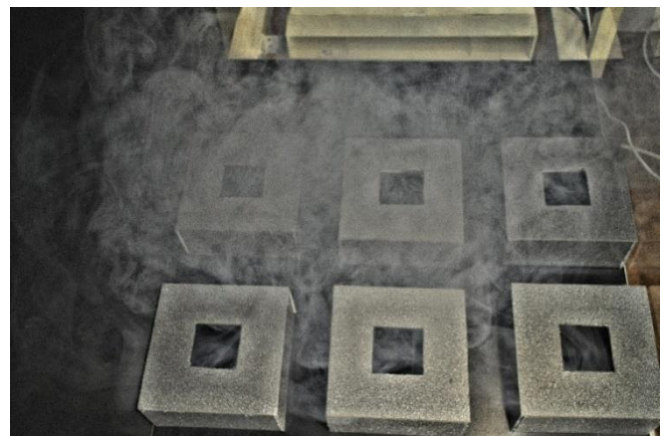


Abbildung 33 Nebel steigt auf und verdeckt die Sicht

Da der bodennahe Nebel schneller fließt als der aufsteigende Nebel, können dennoch verwertbare Fotos gemacht werden. Diese entstehen jedoch nur jeweils in den ersten 7 Sekunden der Intervallaufnahme. Danach war der Windkanal oft zu stark vernebelt, um auf den Fotos noch klare Details zu erkennen. Dies betraf insbesondere jene Kamerapositionen, die von oben Fotos schiessen.

4.6.3 Zeilensiedlung längs

Auch bei der Zeilensiedlung mit Ausrichtung parallel zum Wind bewegt sich der Nebel bodennah auf die Siedlung zu. Ein Teil des Nebels trifft auf die Luvseite der ersten Häuserreihe. Da diese Häuser dem Nebel im Weg stehen, bahnt er sich einen Weg um sie herum. Die Mehrheit des von der Fassade blockierten Nebels

weicht entweder nach rechts oder nach links aus (siehe: Abbildung 34). Der ausweichende Nebel formt dabei teilweise ein Dreieck, das einer Bugwelle eines Schiffs ähnelt. Sichtbar ist dies in Abbildung 35.

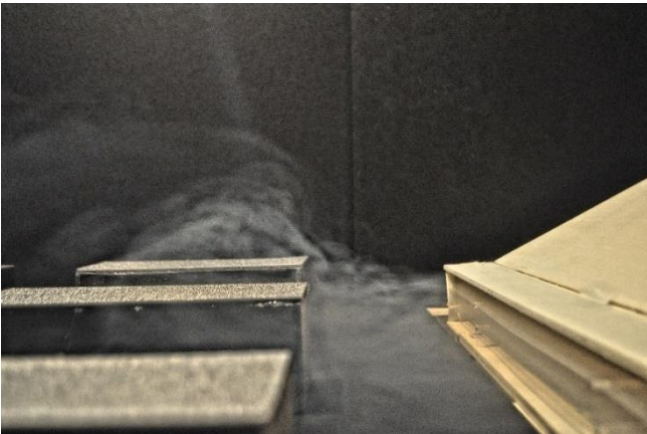


Abbildung 34 Die Zeilenbebauung lenkt Teil des Nebels nach oben um

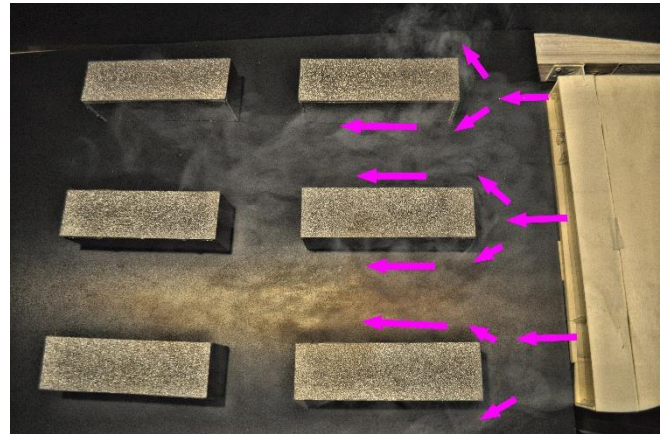


Abbildung 35 Nebel wird von Zeilenbebauung seitlich umgelenkt

Der ausweichende Nebel schmiegt sich nach kurzer Zeit meist wieder an die langen Seitenwände der Gebäude an. In Abbildung 36 ist auch gut zu sehen, wie der Nebel dem Gebäudeumriss folgt und wie Nebel hinter die Leeseite der Bebauung gelangt. Die Barrierewirkung ist gut auf Abbildung 37 zu sehen. Dort zeigen vor allem die äusseren zwei Gebäude der ersten Reihe gut, wie die Luft umgelenkt wird.

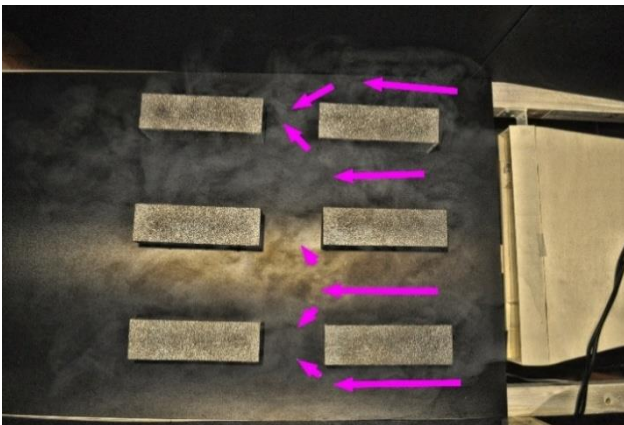


Abbildung 36 Nebel fließt entlang der Gebäude und gelangt an windabgewandte Seite

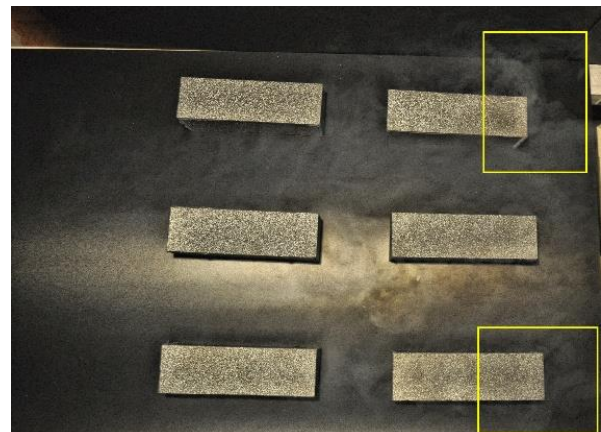


Abbildung 37 Aufstau und Umlenkung bei äusseren Häusern

Die Mehrheit des Nebels ist von den Gebäuden nicht beeinflusst, sondern fließt problemlos Richtung Ausgang des Windkanals und wird nur von den durch die Hindernisse entstehenden Verwirbelungen leicht beeinflusst. Zu beobachten ist, dass ein kleiner Anteil des Nebels oberhalb der Gebäude zu sehen ist, obwohl der Luftstrom bodennah startet. Siehe Abbildung 38. Ein Teil des Nebels bewegt sich trotz fehlender Hindernisse oder aufwärtsgerichteter Luftströme nach oben. Die Aufwärtsbewegung ist auf Abbildung 39 sichtbar.

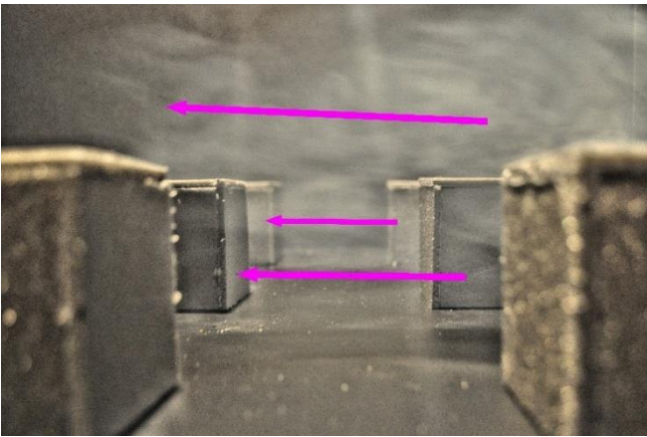


Abbildung 38 Nebel fließt auf Bodenhöhe und über den Gebäuden

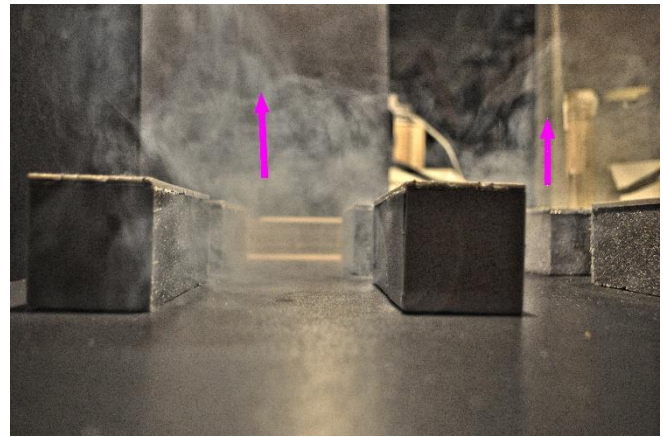


Abbildung 39 Leichte Aufwärtsbewegung des Nebels feststellbar

Die hintern drei Häuser der Zeilensiedlung wirken sich ähnlich auf den Wind aus, wie die vorderen drei. Es sind ähnliche Muster zu erkennen, wie die Umlenkung des Nebels nach aussen um die Häuserecken und nach oben. Auch sie stellen ein Hindernis dar und leiten den Nebel primär auf die Seiten um (Abbildung 40).

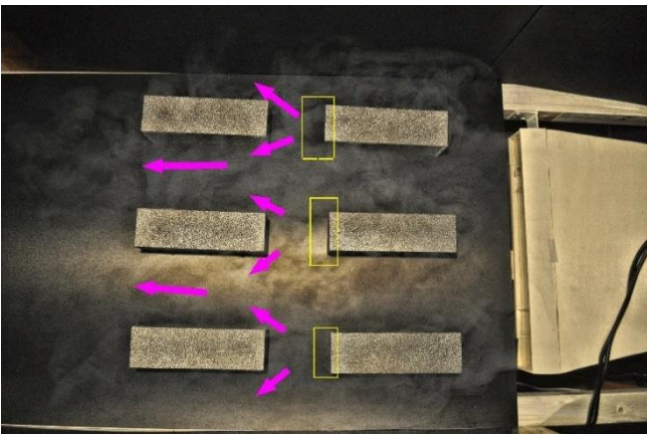


Abbildung 40 Die zweite Häuserreihe lenkt Nebel um und hinter der ersten Reihe entstehen kleine Windschatten

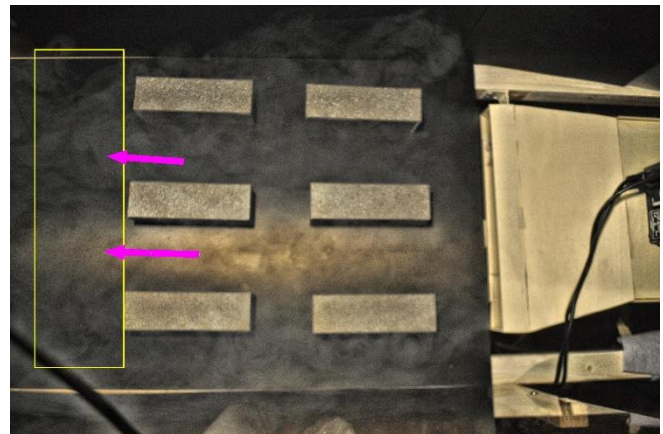


Abbildung 41 Der Nebel erreicht die Freifläche hinter der Siedlung

Der Nebel gelangt gut durch die breiten Lücken zwischen den Häusern. Selbst die kurze windabgewandte Seite wird mit Nebel umschlossen. Es entsteht ein kleiner Windschatten, der sichtbar auf Abbildung 40 ist. Der Nebel gelangt gut durch die Siedlung hindurch und die Mehrheit des anfänglichen Nebels erreicht die Freifläche hinter der Siedlung immer noch auf Bodenhöhe. Siehe Abbildung 41.

4.6.4 Zeilensiedlung quer

Der Nebel bewegt sich auf die erste Reihe querstehender Zeilenhäuser zu. Aufgrund der Position und Orientierung der Häuser wird ein Grossteil des von der Maschine ausgestossenen Nebels erst für kurze Zeit vor der Luvseite der Häuser gestaut, und daraufhin nach oben abgeleitet (Abbildung 42). Die Stauwirkung ist gut auf Abbildung 43 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich vor der Front eine Anstauung mit einer Verwirbelung formt.

Der nach oben steigendem Nebel verliert seine horizontale Geschwindigkeit während des Aufsteigens, wodurch seine Bewegung ab einem gewissen Punkt verstärkt vertikal ist. Der Nebel verliert dabei seine kompakte Struktur (Abbildung 42).



Abbildung 42 Nebel wird von der Fassade der Zeilensiedlung quer nach oben umgelenkt

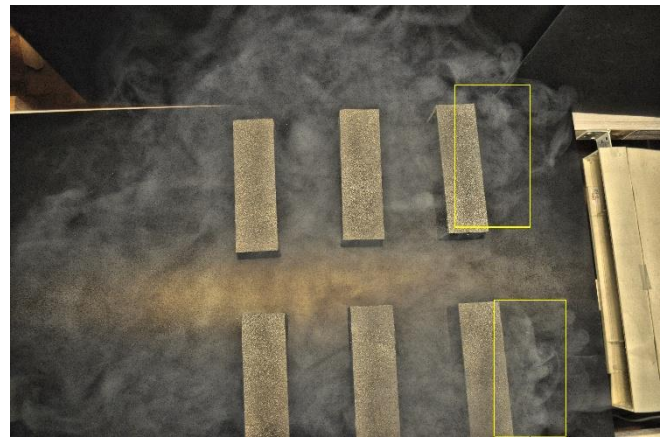


Abbildung 43 Stauwirkung der Fassade ersichtlich

Zwischen den Häusern der ersten Reihe bewegt sich der Nebel ungehindert und dringt in die Siedlung vor. Sichtbar ist, dass sich ein Teil des Nebels auch ohne Hinderniseinwirkung nach oben entweicht und sich mit dem Nebel, der zuvor von der ersten Häuserreihe über dem Modell vermischt (Abbildung 45).

Ein Teil des Nebels bleibt aber auf Bodennähe. Dieser Nebel dringt auch in die quer zur Windrichtung verlaufenden Freiräume ein. Ein Teil gelangt auch von oben wieder in die Strassenzwischenräume. Dort sammelt sich der Nebel während der Durchführungen des Experiments. (Abbildung 44). Auffallend ist, dass sich in den Zwischenräumen der ersten und der zweiten Häuserreihe mehr Nebel ansammelt als zwischen der zweiten und der dritten. Siehe Abbildung 45.



Abbildung 44 auch gelangt in die Zwischenräume quer zur Windrichtung (Strassenschluchten)

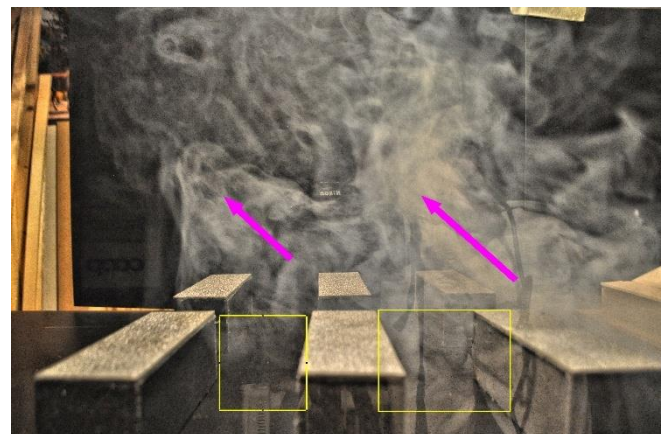


Abbildung 45 Nebel steigt auf. Er verteilt er sich in Strassenschluchten. (Reihe 1 mehr als Reihe 2)

Der Nebel bahnt sich nicht nur durch die Mitte einen Weg in die Siedlung, sondern auch von aussen. Siehe Abbildung 46.

Die Mehrheit des Nebels wird bereits von der ersten Häuserfront abgeblockt und nach oben umgelenkt. Ein Teil des Nebels steigt auch ohne, dass ein Hindernis den Weg versperrt, mitten in der Häusersiedlung nach

oben. Dennoch erreicht Nebel die Freifläche hinter der letzten Häuserreihe. Vor allem der mittlere Kanal ermöglicht dem Nebel das Vordringen. (Abbildung 47)

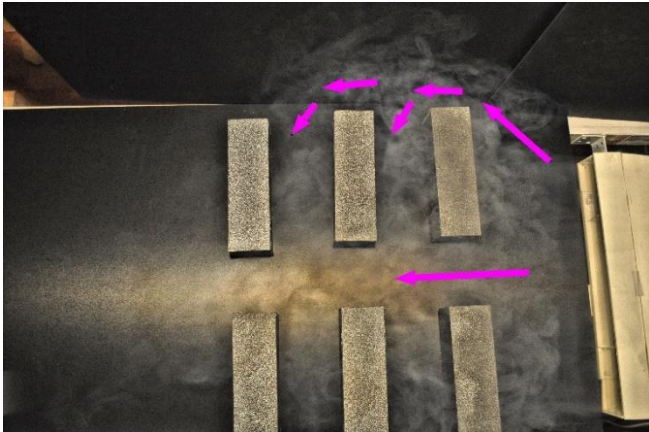


Abbildung 46 Nebel strömt von aussen in die Zwischenräume der Siedlung

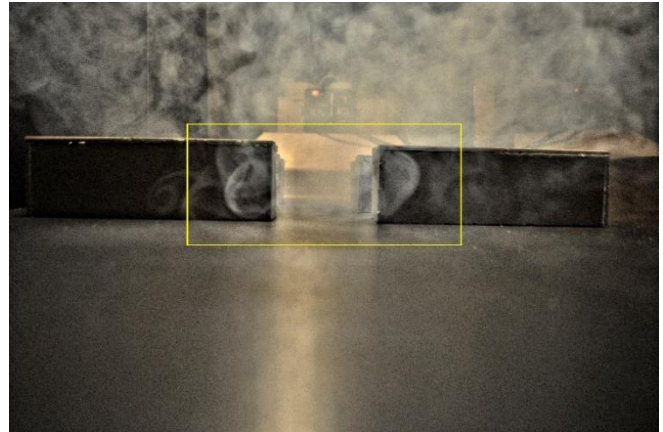


Abbildung 47 Nebel gelangt durch mittlere Strassenschlucht auf Freifläche

Auffallend in dieser Versuchsanordnung ist die Menge an Nebel, die oberhalb der Häusermodelle zu sehen ist. Er ist undurchsichtig und ungeordnet und verteilt sich in alle Richtungen, wobei die generalisierte Bewegungsrichtung immer noch in Windrichtung ist. Das Nebelfeld verdeckt die Sicht der Kamera (vor allem wenn die Kamera von oben fotografiert) und macht es schwierig, die Nebelbewegungen nahe am Boden zu erkennen.

4.6.5 Blockrandsiedlung Stelzen

Der Nebel tritt aus der Maschine aus und bewegt sich in Richtung der Blockrandgebäude auf Stelzen. Die Nebelhöhe nimmt während des Fließens etwas zu, sodass die Nebelschicht höher ist als der 6 cm hohe Zwischenraum unterhalb der Häuser (Abbildung 49). Dadurch fließt nicht der gesamte Nebel unterhalb der Häuser hindurch, sodass der obere Teil des Nebels beim Auftreffen auf die Häuser abgebremst und umgeleitet wird. Vor der ersten Häuserreihe formt sich daher ein kleiner vertikaler Wirbel. (Abbildung 48)

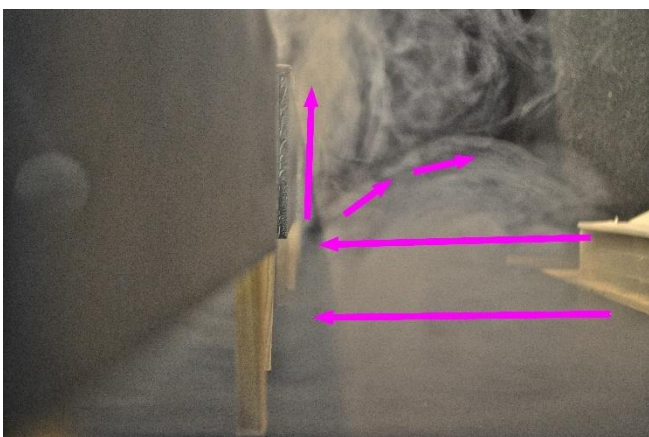


Abbildung 48 Der obere Teil des Nebels wird abgelenkt, der untere fließt unterhalb der Häuser hindurch

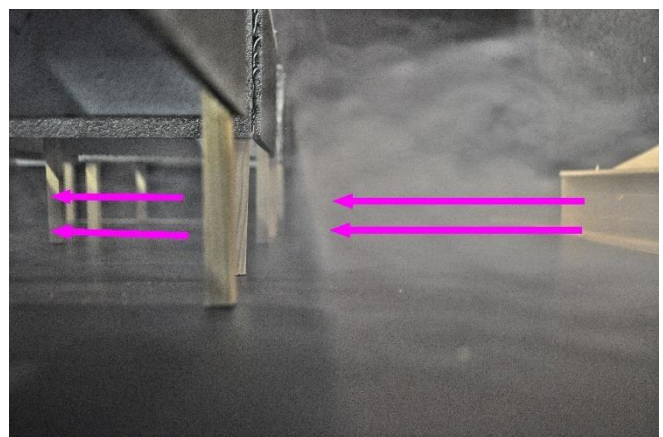


Abbildung 49 Nebel fließt unterhalb der Gebäude hindurch

Auch in dieser Modellanordnung bewirkt die erste Häuserreihe ein Aufstauen des Nebels. Der Nebel wird an der Häuserwand nach oben umgelenkt. Siehe Abbildung 50. Die Aufstauwirkung kann auch von oben erkannt werden (Abbildung 50). Der umgelenkte Teil des Nebels gerät mit dem Aufsteigen aus dem Hauptstrom, verliert an Geschwindigkeit und verteilt sich langsam in den höheren Luftschichten über dem Häusermodell. Er verdünnt sich dort mit der Luft.

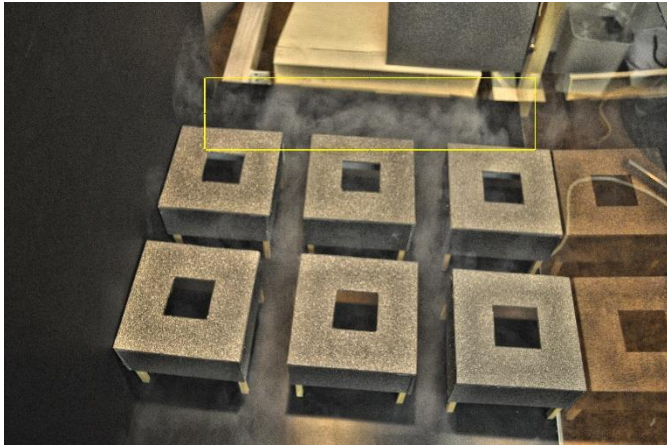


Abbildung 50 Aufstauwirkung sichtbar von oben

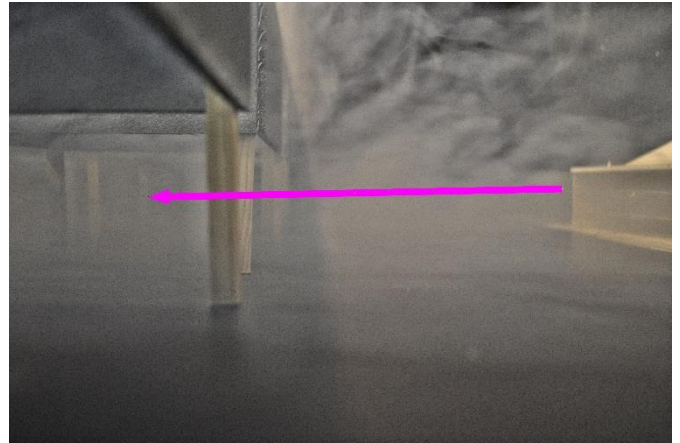


Abbildung 51 Grossteil des Nebels fliesst unter den Gebäuden hindurch

Der Grossteil des Nebels schafft es jedoch unter den Häusern hindurch und wird nicht durch Gebäude aufgehalten, sondern strömt ungehindert unter den Häusern hindurch. (Abbildung 51)

Der unter den Häusern fließende Nebel erreicht den Zwischenraum zwischen der ersten und der zweiten Häuserreihe. Der Nebel bleibt als dichter Nebel bestehen und verdünnt sich nicht stark mit der Umgebungsluft. Dort trennt sich wieder ein Bruchteil des Nebels vom Hauptstrom und steigt zwischen den Gebäuden hinauf. Siehe Abbildung 52. Unterhalb der Gebäude verteilt sich der Nebel gleichmässig und die 24 Stelzen haben keinen wahrnehmbaren Effekt auf die Nebelverteilung.

Die hintere Freifläche in diesem Modell wird mit dichtem Nebel geflutet, unter den Häusern hervor fließt. (Abbildung 53)



Abbildung 52 Nebel steigt zwischen Gebäude auf



Abbildung 53 Nebel erreicht Freifläche hinter der Siedlung

4.6.6 Zusätzliche Informationen

Insgesamt sind während des Versuchs etwas über 1000 Fotos entstanden. Die relevantesten wurden hier präsentiert.

4.7 Diskussion des Versuchs

4.7.1 Vergleich der Strömungsphänomene zwischen den Bebauungstypen

4.7.1.1 Bodennahe Durchlässigkeit

Bodennahe Durchlässigkeit beschreibt, den bodennahen Durchzug des Nebels durch die Siedlung.

- Keine Bebauung: Der Nebel wird nicht gebremst oder umgelenkt. Nur ein kleiner Teil des Nebels steigt auf. Der Rest erreicht das Ende des Windkanals.
- Blockrandsiedlung: Die Blockrandsiedlung hat eine sehr geringe Durchlässigkeit. Es kommt nur ein sehr kleiner Teil des Nebels an der Freifläche hinter der Siedlung an. Die Luvseite wirkt wie eine grosse, geschlossene Barriere, die den Grossteil des Nebels nach oben umlenkt.
- Zeilensiedlung längs: Die Zeilensiedlung zeigt eine grosse Durchlässigkeit. Die parallel zum Wind stehenden Zeilen ermöglichen es, dass der Nebel gut entlang der korridorartigen Zwischenräume fließen kann. Nur ein kleiner Teil des Nebels wird nach oben abgelenkt. Der Hauptstrom bleibt weitestgehend kompakt und erreicht die hintere Freifläche gut.
- Zeilensiedlung quer: Die Anordnung der quer stehenden Häuser wirkt wie eine Schranke. Sie verringert die Durchlässigkeit stark. Nur ein geringer Teil gelangt zu der Freifläche. Die Menge Nebel, die die Siedlung durchquert, ist kleiner als bei der Zeilensiedlung längs. Vor allem wegen des grösseren mittleren Kanals ist die Durchlässigkeit aber etwas höher als bei der Blockrandsiedlung.
- Blockrand auf Stelzen: Die Blockrandsiedlung auf Stelzen gewährt eine grosse Durchlässigkeit. Durch die Höherlegung der Gebäude wird vermieden, dass die Gebäude zu stark auf den bodennahen Luftstrom einwirken. Die Durchlässigkeit ist sehr hoch, ähnlich der Zeilensiedlung längs.

4.7.1.2 Stärke des Aufstaus an der Luv-Seite

Keine Bebauung:	nicht vorhanden
Blockrandsiedlung:	sehr stark
Zeilensiedlung längs:	gering
Zeilensiedlung quer:	stark
Blockrand auf Stelzen:	mittel

4.7.1.3 Aufsteigen des Nebels

Bei allen Stadtstrukturen wurde zwar ein Aufsteigen des Nebels auch ohne Hinderniseinwirkung beobachtet. Trotzdem beeinflusst die Gebäudeanordnung durch Umlenkung die Menge des aufsteigenden Nebels entscheidend. Je mehr Nebel von einer Struktur aufgestaut und nach oben umgelenkt wird, desto mehr Nebel vermischt sich mit der Umgebungsluft und steigt weiter. Er entfließt dem System.

- Keine Bebauung: Obwohl keine Hindernisse im Kanal den Nebel beeinflussten, löste sich dennoch ein Teil des Nebels vom Hauptstrom und verteilte sich nach oben.
- Blockrandbebauung: Bei der Blockrandsiedlung wurde der Grossteil des Nebels erst angestaut und dann nach oben hin umgelenkt. Dadurch bot sich dem Nebel mehr Gelegenheit, sich mit der Umgebungsluft zu verdünnen und sich zu verteilen. Mit dem Aufsteigen verlangsamte sich die horizontale Bewegung des Nebels.

- Zeilenbebauung längs: Nur eine geringe Menge Nebel stieg auf.
- Zeilenbebauung quer: Der Aufstau und die Umlenkung waren etwas geringer als bei der Blockrandsiedlung.
- Blockrand auf Stelzen: Es wird eher wenig Nebel zu Beginn umgelenkt. Das Aufsteigen des Nebels wird zusätzlich durch die Häuser verhindert. Befindet sich Nebel zwischen Boden und Unterseite der Häuser, so ist er gefangen und kann nicht aufsteigen.

4.7.1.4 Wind von oben

Der Versuch zeigt, dass Nebel, welcher an der Vorderseite des Modells aufgestiegen ist, teilweise von oben wieder in das Modell zurückkehrt. Dies ist bei der Zeilenbebauung quer am stärksten beobachtbar. Aber auch bei den beiden Blockrandbebauungen konnte dieses Muster festgestellt werden.

4.7.2 Diskussion der theoretischen Durchlüftungsparameter im Versuch

Der Einfluss der theoretischen Parameter kann am Modellversuch festgestellt werden. Folgend werden die beobachteten Effekte nochmals diskutiert:

- Packing-Density: Die Packing-Density entspricht der Grundrissfläche der Modelle geteilt durch die Fläche der Platte, auf der die Modelle stehen.
- Die grösste Packing-Density hat die Blockrandsiedlung. Es war zu erwarten, dass sich die Blockrandsiedlung schlecht durchlüften lässt. Am Modellversuch hat sich dies bestätigt. Die Packing-Density bei der Blockrandsiedlung auf Stelzen war am geringsten, was mit der im Modell beobachteten, guten Durchlüftung übereinstimmt. (Nur Stelzen zählen als Grundstücksfläche.) Die Zeilensiedlung längs und quer weisen die gleiche Packing-Density auf, jedoch unterscheidet sich deren Durchlüftbarkeit stark. Es spielen also weitere Faktoren eine Rolle.
- Frontal-Area-Density: Die Frontal-Area-Density wird ermittelt, indem man die dem Wind zugewandten Fassadenfläche durch die Fläche der Grundplatte teilt.
- Der Einfluss der Frontal-Area-Density (FAD) kann anhand der Aufstauungen beobachtet werden. Sie war bei der queren Zeilenbebauung viel ausgeprägter waren als bei der Zeilensiedlung längs (mehr als doppelt so gross).
- Die Blockrandbebauung auf Stelzen hat eine grössere FAD im Vergleich zur regulären Blockrandsiedlung. Der Effekt der Stelzen hebt die Frontfläche an, was dazu führte, dass die erhöhte Frontfläche nicht allzu stark mit dem Wind interagiert. Dies zeigt, dass sich eine grosse Frontfläche als alleiniger Faktor nicht zwingend negativ auswirken muss.
- Orientierung: Anhand der zwei Zeilensiedlungstypen konnte bewiesen werden, dass die Orientierung zur Windquelle der Gebäude eine Rolle spielt. Die Orientierung der Zeilensiedlung quer (90°) und Zeilensiedlung längs (0°) bestätigt dies.
- Strassenschluchten: Die Zeilensiedlung quer hat die breitesten, quer zum Wind verlaufenden Strassenschluchten. Die Strassenschluchten der Blockrandsiedlungen sind schmaler. Der Effekt der Breite der Strassenschluchten kann im Versuch beobachtet werden. Die breiteren Strassenschluchten der Zeilensiedlung quer werden stärker mit von oben kommendem Nebel gefüllt als die schmalere Strassenschluchten der Blockrandsiedlung.

Das Verhältnis zwischen der Gebäudehöhe zur Strassenbreite (H/W) hat dies beeinflusst. Die Blockrandsiedlung ist höher als die Zeilensiedlung. Zudem sind die Strassenschluchten schmaler. Das heisst das Verhältnis H/W der Blockrandsiedlung ist grösser als das der Zeilensiedlung quer. Die Häuser der Blockrandbebauung haben eine Höhe von 7.5 cm. Die Breite der Strassenschlucht beträgt 6 cm. Das Verhältnis H/W ist in diesem Fall grösser als 1. Trotzdem konnte Nebel von oben auf Strassenniveau reichen. Die Zeilensiedlung quer hat ein kleineres H/W-Verhältnis ($6.5 \text{ cm} / 8 \text{ cm} = 0.8125$). Daher gelangt der Nebel von oben auch besser in die Strassenschlucht. Die Theorie aus Kapitel «2.4.3 Einfluss der Bebauung auf die Durchlüftung» besagt, dass das H/W möglichst klein aber unbedingt kleiner als 0.7 sein muss, damit Luft von oben über den Gebäuden auf den Boden gelangt. Warum trotzdem Nebel von oben in die Strassenschlucht eindringen konnte, bleibt offen.

4.7.3 Validität

Die Modellversuche haben die Parameter der Bebauung in vereinfachten Bedingungen und anhand idealisierter Modelle untersucht. In Wirklichkeit ist eine Stadt geometrisch komplexer und die Vorgänge und somit die Durchlüftbarkeit von vielen zusätzlichen Faktoren abhängig. Diese Versuche haben lediglich das Szenario einer Windrichtung und einer Windstärke simuliert. In Wirklichkeit verändern sich Windrichtung und Windstärke, was die Aussagekraft der Versuche relativiert. In meinem Modell wurde der Einfluss verschieden warmer Oberflächen nicht abgebildet. Ausserdem wurden sonstige Objekte wie Bäume oder stehende Autos nicht berücksichtigt.

Wie verhalten sich die simulierten Ströme im Vergleich zu den echten? Der Nebel in meinem Versuch hat sich nicht genau gleich wie Kaltluft verhalten. Unter anderem, weil der Luftstrom nicht gekühlt werden konnte (aus technischen und v.a. finanziellen Gründen). Der Unterschied war im Aufsteigen des Nebels ersichtlich. Kaltluftströme bleiben in Realität aufgrund der höheren Dichte bodennah und stauen sich eher an, anstatt in den Himmel abgelenkt zu werden. Kaltluft verliert in realen Siedlungen durch Erwärmung, bedingt durch erwärmten Untergrund, ihre Kraft, da der Druckunterschied zwischen warmer Stadtluft und kalter Frischluft verloren geht. Im Modell konnte die anziehende Wirkung des Tiefdruckgebiets in der Stadt nicht simuliert werden.

In den Versuchen wurde die Kraft des Luftstroms mit Distanz zur Quelle schwächer. In der Realität werden Kaltluftströme abgeschwächt, indem sie durch warme Oberflächen erwärmt werden. Dadurch verlieren sie ihre treibende Kraft. Das beobachtete Abschwächen mit Distanz zur Quelle im Modell könnte ähnlich stark gewesen sein, wie wenn ein Kaltluftstrom in Realität auf warme Oberflächen gestossen wäre und dadurch abbremsen (reine Vermutung). Dafür fehlt mir jedoch die Beweisbarkeit, zumal die Abbremsung der Luftströme in Realität zusätzlich von der Temperatur der Kaltluft, der Fliessgeschwindigkeit und dem Volumen der Kaltluftströme abhängt.

Die Tatsache, dass sich der Nebel anders als echte Kaltluftströme verhielt (Aufsteigen), hatte jedoch die unbeabsichtigte Nebenwirkung, dass auch Luftbewegungen oberhalb der Modelle stattfanden. Somit konnte die Wirkungen der Strassenschlucht-Breite untersucht werden. Durch das Aufsteigen des Nebels bildeten sich sozusagen auch eine Art synoptische Winde oberhalb der Stadt. Hier ist jedoch anzumerken, dass für eine realistischere Simulation synoptischer Winde eine höhere Windgeschwindigkeit von Nöten gewesen wäre. Dies könnte erklären, weshalb trotz eines H/W-Verhältnis über 1, Wind auf Bodenniveau gelangte. Jedoch kann der Einfluss der Bebauung auf Winde in der UCL durch den Modellversuch trotzdem angedeutet werden. Bei der Blockrandsiedlung auf Stelzen hat das Aufsteigen des Nebels die Ergebnisse wahrscheinlich etwas verfälscht. Wäre der Nebel nämlich bodennäher und dichter gewesen, hätte er besser unter den Häusern hindurchfliessen können.

Als Grund für das Aufsteigen eines Teils des Nebels ohne Einwirkung von Bebauung vermute ich einfache Diffusion. Eventuell könnten kleine thermische Unterschiede zwischen der Luft direkt über der Grundplatte und der Umgebungsluft das Aufsteigen nach oben verstärkt haben. Das Bestrahlen des Versuchsaufbau mit mehreren Lampen zum Ausleuchten der Anlage, könnte zur Folge gehabt haben, dass sich die Oberfläche und die Luft darüber leicht erwärmt haben. Dies wiederum könnte zu aufsteigender Luft geführt haben. Die aufsteigende Luft hat wahrscheinlich besonders leichte Nebel-Aerosole erfasst und nach oben getragen. Das ist jedoch nur eine Vermutung. Die leicht erwärmte Oberfläche konnte die Kaltluftströme nicht wie in Realität abbremsen, da die Luftströme im Modell nicht gekühlt waren. Sprich es war kein wirklicher Dichteunterschied vorhanden, der hätte geschwächt werden können.

4.8 Fazit und Anwendung der Ergebnisse

Das Strömungsverhalten der Kaltluft konnte in den verschiedenen Versuchen mit Erfolg simuliert und sichtbar gemacht werden. Einige physikalische Unterschiede zwischen simulierten und realen Kaltluftströmen sind jedoch nicht zu übersehen. Die Unterschiede der beobachteten Strömungsmustern zwischen den Modellen, konnte klar der unterschiedlichen Morphologie der Siedlungen zugeschrieben werden.

Meine Untersuchungen haben gezeigt, dass die Zeilenbebauung längs das Fliessverhalten der Kaltluftströme am wenigsten beeinflusst. Gefolgt von der Blockrandsiedlung auf Stelzen. Geringere Durchströmung weist die Zeilensiedlung quer auf. Am wenigsten Durchlüftung fand bei der Blockrandsiedlung statt. Die Menge an Nebel, die hinten an der Freifläche ankam, war dafür ein wichtiger Indikator.

Als besonders relevant ist die blockierende Wirkung der Luv-Fassade aufgefallen. Auch die Ausrichtung länglicher Gebäude hat einen grossen Einfluss. Die Durchlüftung von Siedlungen ist jedoch von weiteren Faktoren abhängig (Packing- und Frontal-Area-Density). Im Versuch konnte dies sichtbar gemacht werden.

In städtischem Kerngebiet sind kompakte Bauweisen wie Blockrandsiedlungen häufig. Diese schwächen Kaltluftströme jedoch stark ab oder blockieren sie vollständig. Mein Versuch konnte dies bestätigen.

Auf der Kaltluftstromkarte der Stadt Zürich (Abbildung 6) ist ersichtlich, dass Kaltluftströme aus dem Umland Kerngebiete nicht erreichen. Zurückzuführen ist das auf die dichten Bauweisen, die spätestens am Rand des Kerngebiets beginnen. Blockrandsiedlungen blockieren zudem Binnenwinde innerhalb der Stadt. Obwohl es Freiflächen gibt, auf denen Kaltluft entsteht, kann sich diese nicht in die Umgebung ausbreiten, wenn sie von der Bebauung blockiert wird. Dieses Problem kann nicht einfach gelöst werden.

Blockrandgebäude am Rand von Freiflächen auf Stelzen zu setzen, wäre in der Theorie eine effektive Lösung, damit die Binnenwinde weiter in die Stadt vordringen können. In meinem Versuch war ersichtlich, dass dadurch die Durchlässigkeit der Siedlungen stark erhöht werden kann. Einerseits wäre das Setzen von ganzen Gebäuden auf Stelzen sehr teuer, andererseits würde dies das Stadtbild stark verändern und im Konflikt mit dem Denkmalschutz stehen. Auch die technische und finanzielle Umsetzbarkeit ist in Frage zu stellen.

In Zukunft wird es wahrscheinlich zur Hitzeminderung nötig sein, an kritischen Stellen in dicht bebautem Gebiet, einzelne Gebäude zu entfernen, um dadurch mehr offene, unversiegelte Flächen zu generieren. Es können auch schon bestehende Freiflächen vergrössert werden. Dies würde Quartiere auflockern, was die Durchlüftung fördert. Zudem kann auf vergrösserten Freiflächen mehr Kaltluft entstehen, was sich zusätzlich positiv auswirkt. Das Entfernen von Gebäuden ist aber angesichts notwendiger Verdichtung und des hohen Bodenwerts nur schwer durchzusetzen.

Im Versuch hat sich gezeigt, dass adäquat ausgerichtete Zeilenbebauung nur einen geringen Effekt auf die Kaltluftströme hat. Zeilenbebauungen sind durchgrünte Stadtkörper und momentan eher am Stadtrand aufzufinden. Dass sich weniger dicht bebaute Bauweisen am Stadtrand befinden, ist eine gute Voraussetzung, um Kaltluftströme zu erhalten. Zeilensiedlungen in Zürich stammen häufig aus der Nachkriegszeit.¹⁰² Bisher wurden sie am Strassenverlauf ausgerichtet statt an der Windrichtung. Diese Siedlungen sind inzwischen häufig sanierungsbedürftig und werden entweder renoviert oder abgerissen. Bei einem Neubau sollte zukünftig auf die Fliessrichtung von Kaltluft Rücksicht genommen werden.

Damit Städte von Kaltluftströmen wirksam abgekühlt werden können, bedarf es deren Erhaltung und Förderung. Voraussetzung dafür ist eine umfassende Wissensvermittlung. Entscheidungsträger in Politik und Verwaltung, in Architekturbüros und Baufirmen müssen über die zunehmende Wichtigkeit der Kaltluft in der Städtekuhlung informiert sein. Aber auch Privatpersonen in der Rolle von Stimmbürgerinnen und Stimmbürger oder als Bauherrschaft müssen die Relevanz der Durchlüftung urbaner Räume erkennen. Alle Parteien, die in der Stadtplanung und beim Bau von Gebäuden involviert sind, sollten zusammenarbeiten. Nur so kann eine bestmögliche Kaltluftversorgung dank cleverer Bauweise grossflächig ermöglicht werden. Der Kanton Zürich stellt für diesen Zweck bereits heute Planungskarten zur Verfügung, die Kaltluftströme miteinbeziehen.

Das Erschaffen einer klimaangepassten Stadt bedarf einer langfristigen Strategie und die Umsetzung zahlreicher Massnahmen. Das ist aber zwingend nötig, damit die Stadt auch in Zukunft ein attraktiver Lebensraum bleibt.

¹⁰² Martina Jenzer, Roland Frischknecht, Jasmine Wohlwend Piai, «Umgang mit Wohnsiedlungen der Nachkriegszeit».

5. Bilanz

5.1 Zusammenfassung

Städte sind ein wichtiger und attraktiver Lebensraum für Menschen. Wegen des Klimawandels werden die klimatischen Rahmenbedingungen in Städten zunehmend problematischer. Aufgrund von dichter Bebauung erwärmen sich Städte stärker als das Umland. Dies nennt sich Städtische Wärmeinsel-Effekt. Er entsteht auch ohne den Einfluss des Klimawandels, der Klimawandel verstärkt ihn jedoch. Gründe für die starke Erwärmung von Städten sind unter anderem die Eigenschaften der Baumaterialien und die Stadtmorphologie: Gängige Baumaterialien haben eine geringe Albedo und eine geringe Wärmespeicherkapazität. Die Stadtmorphologie bremst Winde und verhindert das Abstrahlen von Wärmeenergie in die Atmosphäre. Um den Städtischen Wärmeineffekt zu mindern, gibt es zahlreiche Massnahmen. Dazu zählen Begrünung, wie zum Beispiel das Pflanzen von Bäumen, und der Einsatz von Wasserkörpern. Sie kühlen die Umgebungsluft ab. Zudem können natürlich entstehende Winde für die Stadtkühlung und den Schadstoffabtransport genutzt werden. Um das Potenzial der Winde voll auszunützen, müssen Städte aber entsprechend baulich angepasst werden. Die urbane Ventilation und deren Förderung ist ein hochaktuelles Thema der Städteplanung.

In meiner Maturarbeit zeige ich den Einfluss von verschiedenen Gebäudetypologien auf das Strömungsverhalten von Kaltluftströmen. Dazu habe ich Strömungsversuche an Modellen im selbstgebauten Windkanal durchgeführt. Vor allem die Fläche der windzugewandten Front der Häuser und die Orientierung von Gebäuden mit Bezug zur Windrichtung erwiesen sich als entscheidende Faktoren in meinen Experimenten. Dichte Bauweisen sind ein wichtiger Faktor, der jedoch durch kluge Gebäudeanordnung beeinflusst werden kann.

5.2 Schlussfolgerungen

Von den ersten Ideen bis zur finalen Umsetzung meiner Versuchsanlage und dem Verfassen dieser Maturarbeit bin ich einen langen, spannenden Weg gegangen. Es war eine Bereicherung, ausserhalb des schulischen Pflichtstoffes meinen Interessen nachgehen zu können.

Ich habe viel neues über Klimaanpassung von Städten im Allgemeinen und Kaltluftströmen zu ihrer Kühlung im Speziellen erfahren. Recherchen in solch einem Umfang durchzuführen, war für mich neu. Ich habe erst mit der Zeit gelernt, effizient zu recherchieren und relevante, verlässliche Quellen zu nutzen.

Die Methode meiner Arbeit basiert auf eigenen Strömungsversuchen. Während des Bauens des Windkanals bin ich daher immer wieder auf Schwierigkeiten gestossen, für die ich kreative Lösungen finden musste. Allein der Bau und die Durchführung meiner Versuche waren sehr zeitintensiv und anstrengend. In meiner vorliegenden Arbeit kommen der Prozess mit den dahinterstehenden Überlegungen zu meinem Vorgehen beim Bau des Experimentaufbaus nicht ausreichend zur Geltung. Der finale Aufbau des Windkanals und insbesondere die Vorrichtung, die die Nebelmaschine mit dem Luftstrom verbindet, erforderte viel Zeit und Überlegung. Allein darüber hätte ich eine ganze Maturarbeit schreiben können. Im Anhang dieser Arbeit wird der Prozess zum Aufbau der Versuchsanlage skizziert und mit Bildern visualisiert, um der Leserschaft diesen wichtigen Teil der Arbeit zu erläutern. Da ich bereits viel Erfahrung mit dem Verarbeiten von Holz hatte, fiel mir das eigentliche Bauen der Vorrichtungen nicht schwer. Hingegen war der Weg bis hin zu einer funktionierenden Anlage die Herausforderung. Dass mir ohne Unterstützung gelang, eine sehr gut funktionierende Versuchsanlage zu bauen, erfüllte mich mit Genugtuung.

Das Auswerten von über 1000 Fotos zur Dokumentation der Strömungsversuche stellte eine weitere Herausforderung dar. Aufwändig war, alle Bilder durchzuschauen und geeignete Bilder zu identifizieren. Die gewählten Bilder anschliessend zu bearbeiten und Strömungsmuster festzuhalten, ging dann vergleichsweise schnell.

Zur Bildbearbeitung wurde mir von ChatGPT FIJI empfohlen. Es eignete sich für meinen Zweck gut. Da das Programm wissenschaftlich genutzt wird, war dessen Bedienung nicht einfach. Ich musste die Verwendung des Programms erst erlernen.

Die Grafiken meiner Modelle und das Titelbild habe ich mit Adobe Illustrator erstellt. Wie man Adobe Illustrator bedient, habe ich auch extra für diese Arbeit gelernt.

Von Anfang an war mir das saubere Zitieren wichtig, weshalb ich die Zitiersoftware Zotero verwendete.

Rückblickend würde ich weniger Zeit mit Details und themenverwandten Bereichen verbringen, auf die ich während meiner Recherche ebenfalls gestossen bin. Andererseits waren diese Exkurse wichtig, um mir Klarheit zu Thema und Vorgehen meiner Maturarbeit zu verschaffen.

6. Danksagung

Für die hilfreiche Betreuung meiner Maturarbeit danke ich Frau Ursula Zehnder sehr.

Für die Lektüre meiner Arbeit bedanke ich im Voraus bei meiner Korreferentin, Frau Michelle Gubler.

Herrn Dr. Jonas Schwaab, stellvertretender Professor in Digitaler Umweltplanung an der Leibniz Universität Hannover, danke ich für die anfängliche Unterstützung bei der Ideenfindung.

Bei Herrn Christian Gees, dem ehemaligen Bereichsleiter des GIS-Zentrums der Stadt Zürich, bedanke ich mich ebenfalls für das informative Telefonat.

Zuletzt geht grosser Dank an meine Mutter für das Korrekturlesen.

7. Verzeichnisse

7.1 Quellenverzeichnis

- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft - Sektion Klima und Mobilität. «Sicherstellung der Kaltluftzirkulation». Kanton Zürich. Zugriffen 9. November 2025. <https://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/klima/hitze-im-siedlungsraum/massnahmen-gegen-hitze/kaltluftzirkulation.html>.
- Architekt, Der. «Städtebau: Planung und Entwicklung urbaner Räume». Architektur und Bau, 6. Juni 2024. <https://www.architekturfotoblog.de/grundlagen-der-architektur/staedtebau-planung-und-entwicklung-urbaner-raeume/>.
- Azman, Farhana Najwa, Eslam Reda Lotfy, Ashraf Amer Abbas, und Zambri Harun. «Flow structure in modern cities: wind tunnel investigation». *Jurnal Kejuruteraan* 30, Nr. 1 (2018): 39–46.
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. «Klima der Schweiz». Regierungsseite. Rekorde und Extreme. Zugriffen 13. Oktober 2025. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz/rekorde-und-extreme.html>.
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. «Tal- und Bergwinde - MeteoSchweiz». MeteoSchweiz. Zugriffen 14. Dezember 2025. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/wetter-und-klima-von-a-bis-z/tal-und-bergwinde.html>.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU). «Hitze in Städten». 2018. https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/de/dokumente/website/massnahmen/leitfaden/hitze_in_staedten.pdf.download.pdf/hitze_in_staedten.pdf.
- Byrd Polar and Climate Research, The Ohio State University. «What is an Urban Heat Island (UHI)?» Byrd Polar and Climate Research. Zugriffen 26. Oktober 2025. <https://byrd.osu.edu/what-urban-heat-island-uhi>.
- Das Lexikon für Architektur und Bauwesen. «Blockrandbebauung». Zugriffen 4. Dezember 2025. <https://www.architektur-lexikon.de/cms/lexikon/35-lexikon-b/4353-blockrandbebauung.html>.
- Designing Buildings the Construction Wiki. «Urban Grain». Definition. Zugriffen 4. Dezember 2025. https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Urban_grain.
- Deutscher Wetterdienst. «Stadtklima - die städtische Wärmeinsel». [dwd.de](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html). Zugriffen 8. November 2025. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html.
- Directory, Sustainability. «Roughness Length → Term». *Lifestyle → Sustainability Directory*, 24. Oktober 2025. <https://lifestyle.sustainability-directory.com/term/roughness-length/>.
- Directory, Sustainability. «Urban Ventilation → Term». *Pollution → Sustainability Directory*, o. J. Zugriffen 4. Dezember 2025. <https://pollution.sustainability-directory.com/term/urban-ventilation/>.
- e-genius. «Städtisches Mikroklima». Zugriffen 8. Dezember 2025. <https://www.e-genius.at/mooc/smart-cities-teil-3/woche-11-grundlagen-der-quartiersanierung/118-wohnqualitaet/mikroklima>.
- Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL). «Sommersmog in der Schweiz. Stellungnahme der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (EKL)». 2011. https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/dokumentation/Sommersmog_D_2011-07-18.pdf.

- Elbadri, Rana, Hassan Abdel-Salam, und Mohamed Fikry. «Airflow in Urban Environment: an Approach to Improve Egyptian Buildings Regulations». CORP–Competence Center of Urban and Regional Planning, 2023, 25–35.
- Geoportal Kanton Zürich. *GIS-Browser Geoportal Kanton Zürich*. Zürich, o. J. 1:70000. Zugegriffen 13. Dezember 2025. <https://geo.zh.ch/maps?x=2681494&y=1250886&scale=113766&basemap=arelkbackgroundzh>.
- «Glossar der Stadtklimaanalyse Mannheim 2020». *Stadtklimaanalyse Mannheim 2020*, o. J. Zugegriffen 29. November 2025. <https://stadtklimaanalyse-mannheim.de/glossar/>.
- Grün Stadt Zürich. «Fachplanung Hitzeminderung». Regierungsseite. Stadt Zürich. Zugegriffen 30. November 2025. <https://www.stadt-zuerich.ch/de/umwelt-und-energie/klima/klimaanpassung/hitze/fachplanung-hitzeminderung.html>.
- Guo, Bin, Miaoyi Chen, Xiaowei Zhu, u. a. «Exploring the effect of the architecture morphology on urban ventilation at block scale using CFD-GIS and random forest combined method». *Sustainable Cities and Society* 122 (März 2025): 106241. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106241>.
- Guo, Fei, Peisheng Zhu, Shiyuan Wang, Dongwen Duan, und Yun Jin. «Improving Natural Ventilation Performance in a High-Density Urban District: A Building Morphology Method». *10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19-22 October 2017, Jinan, China* 205 (Januar 2017): 952–58. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.149>.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. «Häufigkeit und Intensität von Wärmeinselsituationen am Beispiel „Frankfurt am Main“». HLNUG. Zugegriffen 26. Oktober 2025. <https://www.hlnug.de/themen/nachhaltigkeit-indikatoren/indikatorensysteme/klimafolgenindikatoren-hessen/staedtsche-waermeinsel>.
- Jan Carmeliet. «Führt Verdichtung zu mehr Hitzestress in Städten?» ETH Zürich, 3. Juli 2025. <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2025/07/fuehrt-verdichtung-zu-mehr-hitzestress-in-staedten1.html>.
- Katarina Fischer. «Hitzeinseleffekt: Warum es in unseren Städte so heiß ist und was dagegen hilft». National Geographic, 13. Juli 2022. <https://nationalgeographic.de/umwelt/2022/07/hitzeinseleffekt-warum-es-in-unseren-staedte-so-heiss-ist-und-was-dagegen-hilft/>.
- Kuttler, Wilhelm, und Stephan Weber. «Characteristics and phenomena of the urban climate». *Meteorol Z* 32, Nr. 1 (2023): 15–47.
- Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie. «Der Wärmeinseleffekt (1)». Stadtklima Stuttgart. Zugegriffen 26. Oktober 2025. https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_waermeinsel.
- Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie. «Der Wärmeinseleffekt (2)». Stadtklima Stuttgart. Zugegriffen 26. Oktober 2025. <https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?id=1022,0,0,1,0,0>.
- Marschall, Kurt G. Baldenhofer, Nicolas. «Advektion». ENSO-Lexikon. Zugegriffen 29. November 2025. <https://www.enso.info/enso-lexikon/lemma/advektion>.
- Martina Jenzer, Roland Frischknecht, Jasmine Wohlwend Piai. «Umgang mit Wohnsiedlungen der Nachkriegszeit». o. J. https://www.peristyle.ch/sites/default/files/uploads/low_ka_2_2016_Dossier_6_A4.pdf#page=2.75.

- MeteoSchweiz. «Hitze in Städten - MeteoSchweiz». Zugegriffen 4. Dezember 2025.
<https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klimawandel/extremere-hitze/hitze-in-staedten.html>.
- MeteoSchweiz. «In den Städten ist es heisser als auf dem Land». Zugegriffen 6. Dezember 2025.
<https://www.meteoschweiz.admin.ch/ueber-uns/meteoschweiz-blog/de/2023/08/in-den-staedten-ist-es-heisser-als-auf-dem-land.html>.
- MeteoSchweiz. «Klimawandel - MeteoSchweiz». Zugegriffen 4. Dezember 2025.
<https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klimawandel.html>.
- MeteoSchweiz. «Temperaturvergleich Stadt Land/Hitzeinsel Affoltern Kaserne».
https://www.meteoschweiz.admin.ch/images/1904/blog/2023/08/Hitzeinsel_Affoltern_Kaserne21082023.jpg/Hitzeinsel_Affoltern_Kaserne21082023.jpg.
- Miles, Peter. «What Is the Urban Heat Island Effect and Urban Surface Roughness?» *Age of Awareness*, 30. März 2022. <https://medium.com/age-of-awareness/what-is-the-urban-heat-island-effect-and-urban-surface-roughness-7e4d1a9f56d5>.
- MonAm. «High blood pressure (age: 15+)». Regierungsseite. 26. August 2024.
<https://ind.obsan.admin.ch/en/indicator/monam/high-blood-pressure-age-15>.
- NCCS, National Centre for Climate Services. «Hitzebedingte Sterblichkeit». Zugegriffen 13. Dezember 2025. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/das-nccs/themenschwerpunkte/klimawandel-und-gesundheit/hitzebedingte-sterblichkeit.html>.
- NCCS, National Centre for Climate Services. «Kernaussagen CH2018». Zugegriffen 4. Dezember 2025.
<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/kernaussagen.html>.
- Ng, Edward. *Designing High-Density Cities: For Social and Environmental Sustainability*. Earthscan, 2010.
- Palusci, Olga, und Carlo Cecere. «Urban Ventilation in the Compact City: A Critical Review and a Multidisciplinary Methodology for Improving Sustainability and Resilience in Urban Areas». *Sustainability* 14, Nr. 7 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14073948>.
- Pflanzenforschung.de. «Evapotranspiration». Zugegriffen 6. Dezember 2025.
<https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/evapotranspiration-10021>.
- Regula Gehrig, Nadine König, und Simon Scherrer. *Städtische Wärmeinseln in der Schweiz - Klimatologische Studie mit Messdaten in fünf Städten*. Nr. 273. 2018.
- Salvati, Agnese, Maria Kolokotroni, Alkis Kotopouleas, Richard Watkins, Renganathan Giridharan, und Marialena Nikolopoulou. «Impact of reflective materials on urban canyon albedo, outdoor and indoor microclimates». *Building and Environment* 207 (Januar 2022): 108459.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108459>.
- Schweizer Radio und Fernsehen (SRF). «Hitzewelle im Büro - Studie: Bäume kühlen wie zehn Klimaanlage». 7. Juli 2017. <https://www.srf.ch/meteo/meteo-stories/hitzewelle-im-buero-studie-baeume-kuehlen-wie-zehn-klimaanlagen>.
- Spektrum Akademischer Verlag. «Kaltluft». Spektrum, 2001.
<https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/kaltluft/3954>.
- Spektrum Akademischer Verlag. «Stadtgrenzschicht». Spektrum, 2001.
<https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/stadtgrenzschicht/7535>.

- Spektrum Akademischer Verlag. «Synoptische Wettersysteme». Spektrum, 2000.
<https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/synoptische-wettersysteme/16193>.
- Stadt Zürich. «Visualisierungen Solarstadt 2040». Zugegriffen 4. Dezember 2025. <https://www.stadt-zuerich.ch/de/aktuell/news/2025/visualisierungen-solarstadt-2040.html>.
- Stadt Zürich Amt für Städtebau. «Bauen an der Stadt». o. J. Zugegriffen 13. Oktober 2025.
<https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/web/de/planen-bauen/bauberatung-und-dienstleistungen/dokumente/architektur/best-practice-architektur.pdf>.
- «Street Canyon - an overview | ScienceDirect Topics». Zugegriffen 13. Dezember 2025.
<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/street-canyon>.
- Sven Titz und Nikolai Thelitz. «Es wird noch heisser». *Neue Zürcher Zeitung* (Zürich), 15. August 2025.
- Svenson Cornehl, Yannik Wiget, Patrick Vögeli, und Nicolas Fäs. «04.27 Uhr: Drohnenflug mit Wärmebildkamera über die Europaallee, 24 Grad». *Tages-Anzeiger*, 21. Juli 2022.
<https://www.tagesanzeiger.ch/04-27-uhr-drohnenflug-mit-waermebildkamera-ueber-die-europaallee-24-grad-293282692109>.
- Tietz, Christian. «Sechster Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC». Text. Umweltbundesamt, Umweltbundesamt, 12. Mai 2023. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/grundlagen-des-klimawandels/weltklimarat-ipcc/sechster-sachstandsbericht-des-weltklimarates-ipcc>.
- TU Dresden Fakultät Architektur und Landschaft. «Grundlagen Städtebau». o. J. Zugegriffen 26. Oktober 2025. https://tu-dresden.de/bu/architektur-landschaft/istb/stbe/ressourcen/dateien/studium/VL_Grundlagen-Staedebau_Skript.pdf?lang=de.
- Unger, János. «Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database». *International journal of environment and pollution* 36, Nr. 1–3 (2009): 59–80.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. «Sustainable cities and human settlements». Zugegriffen 8. Dezember 2025. <https://sdgs.un.org/topics/sustainable-cities-and-human-settlements>.
- «Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar - K - Kaltluftfluss». Zugegriffen 30. November 2025.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101334&lv3=101390>.
- Wilke, Sibylle. «Gesundheitsrisiken durch Hitze». Text. Umweltbundesamt, Umweltbundesamt, 10. August 2017. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze>.
- Wilke, Sibylle. «Trends der Lufttemperatur». Umweltbundesamt, Umweltbundesamt, 24. November 2025.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur>.
- YIP KATHLEEN und TANEN DAVID. *Hitzeerschöpfung*. (MSD Manual Profi-Ausgabe) 2025 (Mai 2025). <https://www.msmanuals.com/de/profi/verletzungen-vergiftungen/hitzekrankheit/hitzeerschöpfung>.
- Zhao, Yi, Ruibin Li, Lu Feng, Yan Wu, Jianlei Niu, und Naiping Gao. «Boundary layer wind tunnel tests of outdoor airflow field around urban buildings: A review of methods and status». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167 (2022): 112717.

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Temperaturunterschiede Zürich Affoltern und Zürich Kaserne 14.-22.8.2023	7
Abbildung 2 Vergleich Anzahl Tropennächte und Hitzetage in Zürich Affoltern und Zürich Kaserne von 1990-2020	8
Abbildung 3 Handlungsfelder und Handlungsansätze der Stadt Zürich zur Hitzeminderung	12
Abbildung 4 Graphische Visualisierung der urbanen Ventilation	13
Abbildung 5 Schematische Darstellung der Flurwinde (Country Breeze)	14
Abbildung 6 Screenshot GIS-Karte und Legende nächtlicher Kaltluftströme in der Stadt Zürich (Stand 2024)	16
Abbildung 7 Schematische Darstellung von Stadtgrenzschicht (UBL) und Stadthindernisschicht (UCL)	17
Abbildung 8 Räumliche Verteilung der durchgrünten und kompakten Stadtkörper in der Stadt Zürich	18
Abbildung 9 Grundriss und Fotografie einer Blockrandsiedlung in der Stadt Zürich	19
Abbildung 10 Grundriss und Fotografie einer Zeilensiedlung in der Stadt Zürich	19
Abbildung 11 Einfluss von Gebäuden auf Wind im UCL und UBL	20
Abbildung 12 Grafik zeigt Einfluss des Verhältnisses von Gebäudehöhe und Strassenbreite auf Winde	21
Abbildung 13 Wind-Nebel Erzeugungsvorrichtung (eigenes Foto)	25
Abbildung 14 Versuchsaufbau (eigenes Foto)	25
Abbildung 15 Versuchsaufbau mit Kamera (eigenes Foto)	25
Abbildung 16 Plan des Blockrandsiedlungsmodells (eigene Grafik)	26
Abbildung 17 Plan des Zeilensiedlungsmodells längs (eigene Grafik)	26
Abbildung 18 Plan des Zeilensiedlungsmodells quer (eigene Grafik)	27
Abbildung 19 Plan des Blockrandsiedlungsmodells auf Stelzen (eigene Grafik)	27
Abbildung 20 Verhalten des Nebels im Windkanal ohne Bebauung mit leichten Verwirbelungen (Perspektive: oben)	29
Abbildung 21 Nebelverhalten im Windkanal ohne Bebauung, Nebel mit leichtem Aufstieg (Perspektive: seitlich)	29
Abbildung 22 Ablenkung des Luftstroms vor Luvseite der Blockrandbebauung	30
Abbildung 23 Ablenkung und Wirbelbildung vor Luvseite der Blockrandbebauung	30
Abbildung 24 Aufstau, Umlenkung und Wirbelbildung vor Luvseite der Blockrandbebauung	30
Abbildung 25 Teile des Nebels bewegen sich jeweils horizontal oder vertikal über den Dächern der Blockrandbebauung	30
Abbildung 26 Nebel gelangt in Blockrandsiedlung durch Strassenschlucht	31
Abbildung 27 Nebel gelangt in Blockrandsiedlung durch Strassenschlucht	31
Abbildung 28 Nebel verteilt sich in quer verlaufende Strassenschluchten	31
Abbildung 29 Grossteil des Nebels zieht geradeaus weiter	31
Abbildung 30 Die Querstrassen werden nicht vollständig mit Nebel gefüllt	32
Abbildung 31 Wenig Nebel erreicht die Freifläche	32
Abbildung 32 Nebel erreicht Strassenschlucht auch von oben	32
Abbildung 33 Nebel steigt auf und verdeckt die Sicht	32
Abbildung 34 Die Zeilenbebauung lenkt Teil des Nebels nach oben um	33
Abbildung 35 Nebel wird von Zeilenbebauung seitlich umgelenkt	33
Abbildung 36 Nebel fliesst entlang der Gebäude und gelangt an windabgewandte Seite	33
Abbildung 37 Aufstau und Umlenkung bei äusseren Häusern	33
Abbildung 38 Nebel fliesst auf Bodenhöhe und über den Gebäuden	34
Abbildung 39 Leichte Aufwärtsbewegung des Nebels feststellbar	34
Abbildung 40 Die zweite Häuserreihe lenkt Nebel um und hinter der ersten Reihe entstehen kleine Windschatten	34
Abbildung 41 Der Nebel erreicht die Freifläche hinter der Siedlung	34
Abbildung 42 Nebel wird von der Fassade der Zeilensiedlung quer nach oben umgelenkt	35
Abbildung 43 Stauwirkung der Fassade ersichtlich	35
Abbildung 44 auch gelangt in die Zwischenräume quer zur Windrichtung (Strassenschluchten)	35
Abbildung 45 Nebel steigt auf. Er verteilt er sich in Strassenschluchten. (Reihe 1 mehr als Reihe 2)	35

Abbildung 46	Nebel strömt von aussen in die Zwischenräume der Siedlung.....	36
Abbildung 47	Nebel gelangt durch mittlere Strassenschlucht auf Freifläche	36
Abbildung 48	Der obere Teil des Nebels wird abgelenkt, der untere fliesst unterhalb der Häuser hindurch.....	36
Abbildung 49	Nebel fliesst unterhalb der Gebäude hindurch	36
Abbildung 50	Aufstauwirkung sichtbar von oben	37
Abbildung 51	Grossteil des Nebels fliesst unter den Gebäuden hindurch	37
Abbildung 52	Nebel steigt zwischen Gebäude auf	37
Abbildung 53	Nebel erreicht Freifläche hinter der Siedlung	37
Abbildung 54	Anfängliche Skizze meines Versuchsaufbaus	53
Abbildung 55	Experimentieren am Karton-Prototypen	53
Abbildung 56	Prototyp des bodennahen Ausgangs der Nebel/Windmaschine	53
Abbildung 57	Beginn Bau der Holz-Version	53
Abbildung 58	Integrierung von Nebelmaschine, Ventilator und Holzvorrichtung	53
Abbildung 59	Die fertige Nebel/Windvorrichtung	53
Abbildung 60	Der fertige Ausgang der Vorrichtung.....	54
Abbildung 61	Bau der Häusermodelle	54
Abbildung 62	Versuchsaufbau mit Kamera	54

8. Anhang

8.1 Bau des Windkanals

Der Bau des Windkanals war mit viel Aufwand verbunden. Die Entwicklung meines Windkanals kommt un dieser Arbeit kaum zur Geltung, obwohl sie sehr zeitintensiv war, gut geplant werden musste und mit viel Trial-and-Error verbunden war. Es folgt daher ein Einblick in die Entwicklung und den Gedankengang des Windkanalbaus.

Zuerst galt es herauszufinden, welche Methode sich zur Nebelerzeugung eignet. In professionellen Windkanälen wird ein Paraffinöl erhitzt, welches verdampft und Nebel erzeugt. Nebel auf diese Weise zu erzeugen ist sehr teuer und ungeeignet für einen Versuch in einem kleinen geschlossenen Raum. Das Einatmen von Paraffin-Aerosolen ist gesundheitsschädlich.

Ein weitere Möglichkeit Nebel herzustellen wäre, Trockeneis zu benutzen. Wenn das Trockeneis (gefrorenes CO₂ mit einer Temperatur von -79 °C) an Luft gelangt, sublimiert es und es bildet sich kaltes CO₂-Gas. In der Luft bringt das kalte Gas den in der Luft enthaltenen Wasserdampf zum Kondensieren. Dadurch entsteht ein sichtbarer Nebel. Der Vorteil des Trockeneis ist, dass der erzeugte Nebel wegen seiner niedrigen Temperatur zu Boden sinkt, was für meinen Modellversuch ideal gewesen wäre. Jedoch musste ich meinen Versuch in einem geschlossenen Raum durchführen, um störende Luftzüge zu vermeiden. Trockeneis, das zu gasförmigem CO₂ wird, ist in geschlossenen Räumen aber gefährlich. Das Gas ist dichter als Sauerstoff und bildet eine sauerstoffarme Bodenschicht, weshalb Erstickungsgefahr besteht. Aus diesem Grund musste ich von der Verwendung von Trockeneis absehen.

Eine weitere Nebelerzeugungsmethode ist, direkt Wasserdampf zu erzeugen. Dafür gibt es auf dem Markt viele Geräte, zum Beispiel für Aquarien. Meine Befürchtung bei der Wasserdampf-Methode war jedoch, dass der Nebel nicht stabil genug sei und sich schnell wieder auflöse. Für mein Experiment benötigte ich hingegen Nebel, der sich einige Minuten in der Luft hält.

Meine Wahl fiel schliesslich auf eine gängige Party-Nebelmaschine. Sie ist kostengünstig in Anschaffung und Betrieb und ihr Nebel aus Glycerin ist gesundheitlich unbedenklich. Andererseits ist eine solche Partymaschine recht gross und klobig. Zudem versprüht sie den Nebel mit hoher Geschwindigkeit, weshalb ich eine Vorrichtung bauen musste, um den Nebelstrom erst zu verlangsamen, denn Kaltluftströme sind nun einmal langsame Winde.

Nach einigen Skizzen und Entwürfen habe ich zuerst einen Prototypen aus Karton hergestellt, der den Ventilator und die Nebelmaschine miteinander verbindet. Den Prototypen habe ich ein paar Mal angepasst, bis der Nebel die gewünschte Austrittsgeschwindigkeit und einen bodennahen Strom gebildet hat. Das finale Design der Wind-Nebel-Maschine habe ich dann aus Holz gefertigt. Die fertige Vorrichtung habe ich auf Böcke gestellt und mit einer Grundplatte verbunden, auf der später die Modelle stehen sollten. Um zu vermeiden, dass Luftströme den Versuch beeinflussen, habe ich zwei grosse Wände rechts und links von der Grundplatte montiert. Eine der Wände besteht aus Akrylglas, damit Fotos geschossen werden können. Die Abbildungen 54 bis 62 zeigen verschiedene Etappen bei Planung und Bau der Anlage zur Simulierung und Sichtbarmachung von Kaltluftströmungen in Modell-Siedlungsräumen.

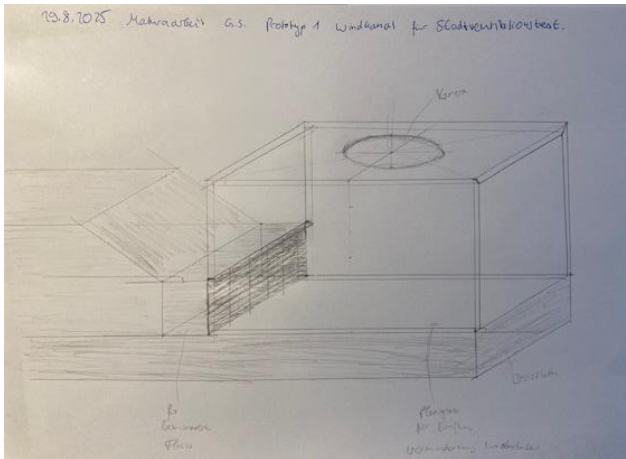


Abbildung 54 Anfängliche Skizze meines Versuchsaufbaus



Abbildung 55 Experimentieren am Karton-Prototypen



Abbildung 56 Prototyp des bodennahen Ausganges der Nebel/Windmaschine

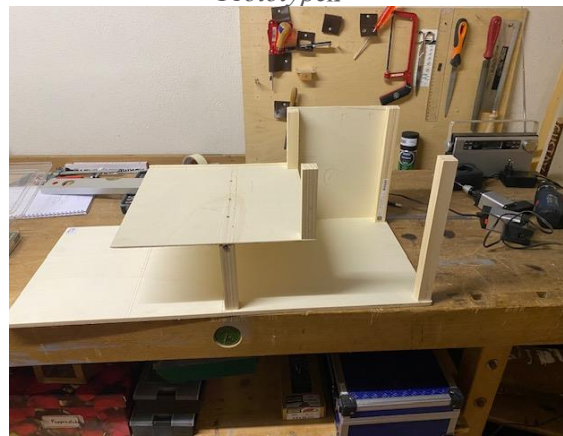


Abbildung 57 Beginn Bau der Holz-Version



Abbildung 58 Integrierung von Nebelmaschine, Ventilator und Holzvorrichtung



Abbildung 59 Die fertige Nebel/Windvorrichtung

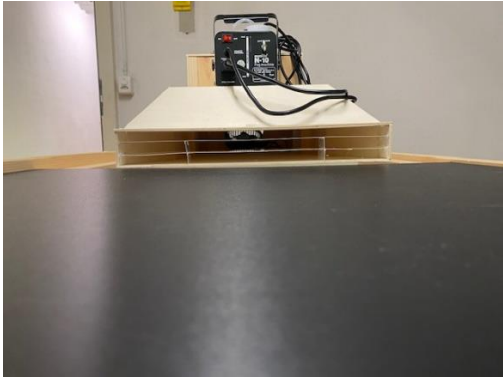


Abbildung 60 Der fertige Ausgang der Vorrichtung



Abbildung 61 Bau der Häusermodelle



Abbildung 62 Versuchsaufbau mit Kamera