

Umwelt- und Gesundheitsschutz (UGZ) Stadt Zürich

Erkenntnisse aus der Analyse von Stadtklimamodellen im Planungs- und Bauprozess

Zusammenfassung
Zürich, 29. April 2024

Myriam Steinemann (INFRAS), Anna Ehrler (INFRAS), Marius Zumwald

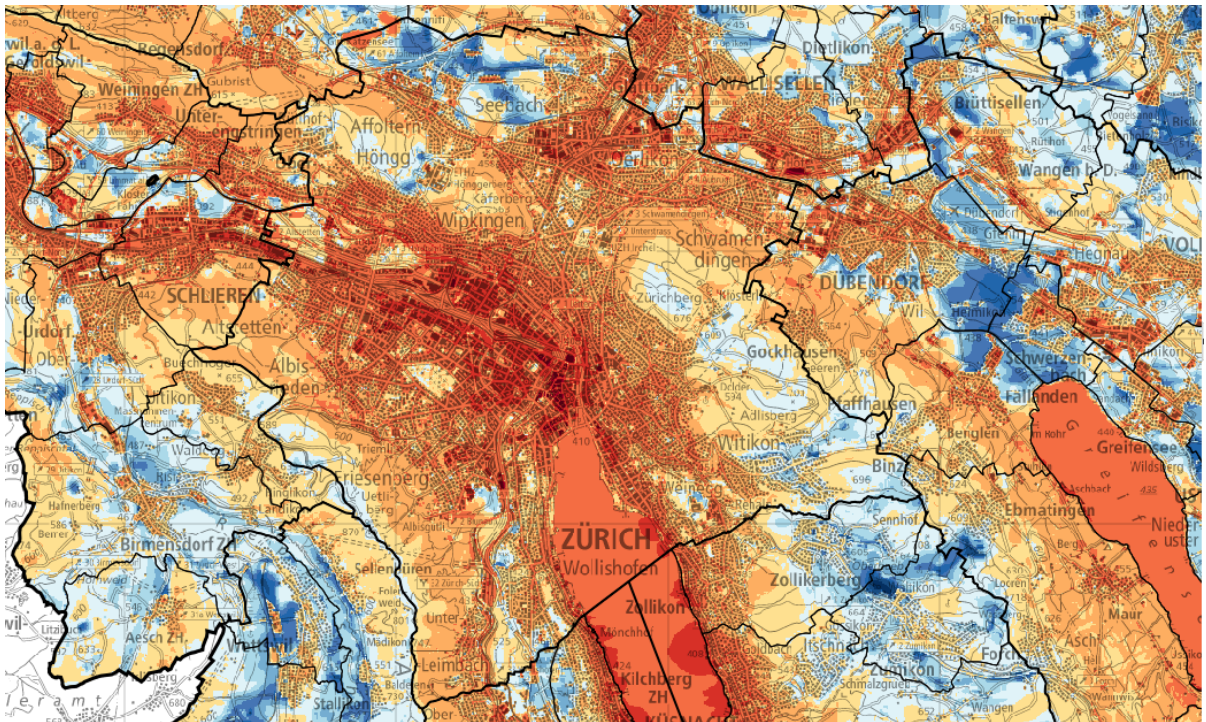


Bild: Klimaanalysekarten Kanton Zürich (Quelle: AWEL)

INFRAS

Forschung und Beratung
www.infras.ch

Stadtklimamodelle im Planungs- und Bauprozess

Modelle für Stadtklimasimulationen können helfen, mögliche Auswirkungen von Bauvorhaben oder Massnahmen zur Hitzeminderung zu simulieren. Auf dem Markt sind zahlreiche Modelle verfügbar, es fehlen aber vielfach transparente Informationen zu deren Eigenschaften. Eine erste Analyse gibt Hinweise auf die Eignung unterschiedlicher Modelltypen.

Hitzeminderung in städtischen Gebieten ist ein hochaktuelles Thema in Politik, Forschung und der Wirtschaft. An neue Bauten und Umgebungsgestaltungen werden hohe Anforderungen gestellt: sie dürfen zu keiner Verschlechterung der klimatischen Situation führen bzw. sollten bestehende Belastungen vermindern, etwa durch neue Grünflächen, die gezielte Beschattung oder die Sicherstellung der Durchlüftung.

Um die möglichen Auswirkungen auf das Stadtklima bei geplanten Bauvorhaben oder bei Massnahmen zur Hitzeminderung angemessen berücksichtigen zu können, kann es sinnvoll sein, Modellsimulationen durchzuführen.

Die Stadt Zürich hat bereits verschiedene Modelle für solche Simulationen eingesetzt und der Markt für Stadtklimamodelle entwickelt sich sehr dynamisch. Es ist eine Herausforderung zu beurteilen, wann eine Simulation sinnvoll ist und falls ja, welches Modell für das jeweilige Bauvorhaben und die Planungsphase am besten geeignet ist. Um die Eignung verschiedener Stadtklimamodelle abzuschätzen, hat die Stadt Zürich die Eigenschaften ausgewählter Stadtklimamodelle und deren Anwendbarkeit im Planungs-/Bauprozess untersuchen lassen. Die Beurteilung, wann grundsätzlich eine Simulation sinnvoll ist, war nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Empfehlungen

Die Wahl des geeigneten Modells ist sorgfältig und durch eine präzise Definition der Anforderungen an die Simulation zu treffen. Zudem ist es wichtig, dass die Behörden am Ball bleiben, Kompetenzen entwickeln und auf eine Standardisierung hinwirken. So kann sichergestellt werden, dass Modellsimulationen heute und in Zukunft nutzbringend eingesetzt und Modelle verglichen werden können.

Sorgfältig abwägen, ob eine Simulation geeignet ist und was die Simulation erfüllen soll

Die Entscheidung, ob sich eine Stadtklimasimulation lohnt und welches Modell im konkreten Fall am besten geeignet ist, ist anspruchsvoll. Es gilt in jedem Fall abzuwägen, ob eine detaillierte Simulation den gewünschten Mehrwert schafft, der den Aufwand rechtfertigen würde. Es sollte daher immer auch in Erwägung gezogen werden, inwiefern für gewisse Zwecke einfache quantitative oder qualitative Aspekte anstelle einer Simulation eine genügend gute Entscheidungsgrundlage darstellen. So kann beispielsweise, um den Einfluss von Bauprojekten auf das Lokalklima zu bewerten, der Versiegelungsgrad auf dem Grundstück eine einfache und zielgerichtete Möglichkeit darstellen, Projekte standardisiert zu vergleichen. Ist der Entscheid für die Durchführung einer Simulation gefallen, sollte die Wahl eines geeigneten Modells sorgfältig und mit genügend Zeit für genaue Abklärungen getroffen werden. Denn die Wahl kann nicht allein anhand der Eigenschaften des Modells getroffen werden. Vielmehr hängt die Eignung eines Modells vom definierten Ziel, den Nutzer:innen und den spezifischen Umständen, unter denen eine Stadtklimasimulation durchgeführt wird, ab. Damit eine Simulation zielgerichtet durchgeführt werden kann, ist auf eine präzise Definition der Anforderungen zu achten, namentlich:

- Definition und zielführende Auswahl der zu simulierenden Parameter wie Wind, Temperatur, PET oder Strahlung.
- Format und Aufbereitung der Inputdaten etwa in Form eines 3D-GIS-Modells.
- Definition der erforderlichen Outputdaten und Resultate wie Kennzahlen oder GIS-Modell. Die Ergebnisse müssen verständlich und gut interpretierbar sein.
- Modellevaluation: Es ist zu berücksichtigen, ob das ausgewählte Stadtklimasimulationsmodell in einem ähnlichen Kontext evaluiert wurde (siehe folgende Empfehlung).

Spezifische Modellevaluationen im städtischen Kontext durchführen bzw. einfordern

Die Evaluation, also die systematische Untersuchung und Bewertung eines Modells, zielt darauf ab, dessen Genauigkeit und Eignung festzustellen, indem beispielsweise Modellvorhersagen mit Messungen verglichen werden. Um zu verstehen, ob modellierte Ergebnisse korrekt und zweckmässig sind, soll eine gezielte Evaluation der Modelle im spezifischen Kontext der Stadt Zürich erfolgen. Eine gezielte Evaluation ermöglicht es, die Zuverlässigkeit und Zweckmässigkeit eines Modells zu überprüfen, Stärken und Schwächen zu identifizieren und Verbesserungspotenziale aufzuzeigen. Konkret wird zwischen zwei anwendbaren Evaluationsarten unterschieden:

- Die *indirekte* Evaluation: Einfordern von Evaluationsstudien in einem vergleichbaren Kontext, z.B. in einer anderen westeuropäischen Stadt mit vergleichbaren landschaftlichen Merkmalen.
- Die *direkte* Evaluation: Überprüfen der Modellresultate im Kontext der Anwendung, z.B. durch eine Messkampagne, welche die Modellresultate mit Messungen des gleichen Standortes vergleicht.

Kompetenzen bei Bestellenden aufbauen und pflegen

Die Bestellung und der sinnvolle Einsatz von Stadtklimamodellen erfordern ein beträchtliches Know-how. Eine hohe Bestellerkompetenz ist notwendig, um das Gewünschte bestellen, Resultate richtig interpretieren und stadtklimatische Anforderungen an Planungs- und Bauprojekte korrekt formulieren und prüfen zu können. Dies erfordert in den Behörden den Aufbau und die Pflege entsprechender Ressourcen. Weiter

wird empfohlen, Hilfestellungen wie etwa ein Fragekatalog für die Bestellenden zu entwickeln, die sie im Dialog mit möglichen Serviceanbietern unterstützen, die zentralen Fragen zu klären und eine bedürfnisgerechte Bestellung zu tätigen.

Standardisierung anstreben

Die Anforderungen an Klimasimulationen bzw. den darauf aufbauenden Dienstleistungen sind heute sehr unterschiedlich, es gibt im Unterschied zum Gebäudebereich keine Normen oder einheitliche Standards, die sicherstellen, dass die Simulationsresultate vergleichbar sind. Mittelfristig ist anzustreben, dass sich Normenorganisationen dieser Thematik annehmen und Standards definieren, die die Stadtklimasimulationen erfüllen sollen.

Den Markt weiterverfolgen

Der Markt für Stadtklimamodelle entwickelt sich sehr dynamisch. Nicht nur kommen neue Modelle hinzu. Auch bestehende Modelle werden kontinuierlich weiterentwickelt und es werden neue Dienstleistungen basierend auf bestehenden Modellen angeboten. Für planende bzw. beratende Stellen namentlich der Stadt Zürich bedeutet dies: Den Markt kontinuierlich beobachten, wichtige Neuentwicklungen nach Möglichkeit antizipieren und neue Einsatzmöglichkeiten bei Bedarf prüfen.




Erkenntnisse aus der Analyse

Es gibt kein allgemeingültiges Rezept, welches Modell für welche Planungsphase oder Projektart am besten geeignet ist. Denn die Wahl des geeigneten Modells hängt vor allem von der Modellanwendung und den spezifischen Gegebenheiten des Projekts ab. Fehlen adäquates Know-how, Daten oder Ressourcen, kann auch ein prinzipiell geeignetes Modell nicht nutzbringend eingesetzt werden. Zudem variieren Transparenz und Dokumentation der Modelle stark, was die Auswahl des Modells zusätzlich erschwert.

Kein Pauschalrezept für die Wahl des geeigneten Modells

Stadtklimamodelle können nutzbringend in verschiedenen Planungsphasen eingesetzt werden: in der strategischen Planung etwa zur Prüfung, ob Kaltluftströme im Planungssperimeter relevant sind; im Rahmen von Vorstudien, in denen die Auswirkungen der Gebäudeanordnung auf Kaltluft und Beschattung oder Auswirkungen der Materialisierung von Fassaden auf das Umgebungsklima modelliert werden; oder in der Projektierung, während der beispielsweise die Auswirkungen von Pflanzenarten auf das Umgebungsklima abgeschätzt werden können (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Einsatzmöglichkeiten für Stadtklimasimulationen im Planungsprozess

Ebene	Städtebau 	Gebäude 	Freiraum 
1 Strategische Planung	Prüfen, ob Kaltluftströme oder die Hitzebelastung im Planungssperimeter relevant sind.	Simulationen sind in dieser Phase nicht empfohlen	Simulationen sind in dieser Phase nicht empfohlen
2 Vorstudien	<ul style="list-style-type: none"> ■ Auswirkungen der Gebäudeanordnung /-formen auf Kaltluftströme, Beschattung etc. prüfen und vergleichen. ■ Bedarf von grösseren Wasserelementen abklären 	Auswirkungen der Gestaltung/Materialisierung von Dächern und Fassaden auf Umgebungsklima prüfen und vergleichen	<ul style="list-style-type: none"> ■ Auswirkungen des Baumbestands auf Umgebungsklima/Bedarf von Baumneupflanzungen prüfen ■ Notwendigkeit von Verschattungs- und Kühlelementen prüfen und Handlungsansätze vergleichen
3 Projektierung	Simulationen sind in dieser Phase nicht empfohlen	Auswirkungen der Gestaltung/Materialisierung von Dächern und Fassaden auf Umgebungsklima prüfen und ggf. anpassen.	Auswirkungen der Oberflächenmaterialien und Pflanzenarten und der Verortung von Verschattungs-/Kühlelementen auf Umgebungsklima prüfen und ggf. anpassen
4 Ausschreibung	<i>Möglichkeiten zur Beeinflussung des Lokalklimas gering</i>		
5 Realisierung	<i>Möglichkeiten zur Beeinflussung des Lokalklimas gering</i>		
6 Bewirtschaftung	<i>Möglichkeiten zur Beeinflussung des Lokalklimas gering</i>		

grüne Farbe = Fokus für den Einsatz von Stadtklimasimulationen. Phasen gemäss [SIA-Leistungsmodell 112](#). Quelle: Eigene Interpretation basierend auf AHB 2020.¹

¹ Amt für Hochbauten (AHB) Stadt Zürich 2020: Stadtklimatische Anliegen in der Projektentwicklung von städtischen Hochbauten. Schlussbericht. EBP Schweiz AG im Auftrag der Stadt Zürich.

Ein Pauschalrezept, ob, wann und unter welchen Umständen ein bestimmtes Modell für eine stadtklimatische Analyse geeignet ist, gibt es allerdings nicht. Spezifische Vorteile eines Modells lassen sich nur durch die spezifischen Gegebenheiten im Projekt erkennen. Denn die Eignung von einem Modell ist nicht nur abhängig von den Modelleigenschaften, sondern vor allem von dessen Anwendung und den spezifischen Gegebenheiten des Projekts. So spielen etwa Faktoren wie die Nutzer:innen des Modells, die Modelleinstellungen und die verwendeten Inputdaten (z.B. Topographie, Wetter, Klima) eine wichtige Rolle. Zudem ist entscheidend, welche konkrete Fragestellung beantwortet werden soll und welche Ressourcen (Budget, Zeitplan, Datengrundlagen für die Modellierung) im Projekt zur Verfügung stehen.

Unterschied zwischen der Eignung von Modellen und deren Einsatz in Dienstleistungen

Es besteht ein grundlegender Unterschied zwischen der Eignung eines Modells für einen spezifischen Einsatz (z.B. ob eine Aussenraumgestaltung mit neuen Bäumen simuliert werden kann) und seiner Anwendung als Teil einer Dienstleistung. Die Eignung ist eine notwendige, jedoch nicht hinreichende Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz. So können ungenügendes Know-How, unvollständige Daten zur lokalen Situation oder fehlende Berechnungsressourcen dazu führen, dass ein prinzipiell geeignetes Modell nicht zweckmässig eingesetzt wird. Während die Beurteilung der Zweckmässigkeit möglich ist, sofern eine umfassende Dokumentation vorliegt, ist kaum zu beurteilen, wie ein Dienstleister ein Modell konkret anwendet und nutzt.

Variierende Transparenz und Beurteilungsbasis

Die Möglichkeit, Modelle einheitlich zu bewerten, wird durch eine unterschiedliche Verfügbarkeit von Dokumentationsunterlagen stark beeinflusst. Dies gilt insbesondere für kommerzielle Modelle, welche mit wenigen Ausnahmen nicht ausführlich dokumentiert sind. Die Bestellenden sind hier auf die Angaben der Anbieter angewiesen und müssen diesen vertrauen. Dies kann dazu führen, dass Simulationen beauftragt werden, die für den angestrebten Zweck nicht ideal oder ungeeignet sind.

Übersicht Modelltypen

Es existieren unterschiedlichste Ansätze, wie mikroklimatische Bedingungen modelliert werden können. Im Rahmen der Analyse wurde eine allgemeine Typologie von Modelltypen erarbeitet. Diese bietet Orientierung, um die Fähigkeiten der Modelle einzuordnen und die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern.

Im Allgemeinen kann zwischen drei Modelltypen unterschieden werden: Biometeorologisch-strahlungsbasierte, computergestützte Fluidodynamik (CFD) und datengetriebene Modelle. Die ersten zwei Typen beruhen auf einer expliziten physikalischen Repräsentation der Einflussfaktoren, welche zu überhitzten Aussenräumen führen. Datengetriebene Modelle dagegen erlernen diese Zusammenhänge aus Mess- und Simulationsdaten. Insbesondere im Bereich der datengetriebenen Modelle wie auch von Hybridformen der drei Typen können in den nächsten Jahren viele Neuerungen erwartet werden. Dies stellt das Beurteilen der Zweckmässigkeit von Modellen vor Herausforderungen.

Biometeorologische-strahlungsbasierte Modelle

Diese Art von Modellen fokussiert auf die Abbildung der kurz- und langwelligen Strahlung und deren Beeinflussung durch unterschiedliche Landoberflächen, Gebäudegeometrien, Bäume etc. Es handelt sich um eine fokussierte Betrachtung der Energiebilanz ohne Simulation der Strömungsdynamik. Strahlungsbasierte Modelle basieren auf gut verstandenen physikalischen Zusammenhängen. Ihre Glaubwürdigkeit und Zuverlässigkeit werden durch eine umfangreiche wissenschaftliche Literatur unterstützt.

CFD-basierte Modelle

CFD-basierte Modelle verwenden computergestützte Fluidodynamik (CFD)³, um die Luftbewegung in städtischen Gebieten zu simulieren. Dabei werden Konvektions-, Wärmeleitungs- und Strahlungsprozesse gekoppelt und berechnet. Solche Modelle werden hauptsächlich zur Vorhersage von Lufttemperatur, Windschwindigkeit und Oberflächentemperatur verwendet. Einige dieser Simulationstools haben jedoch spezielle Module zur Strahlungsberechnung entwickelt. Auch CFD-Modelle basieren auf gut verstandenen physikalischen Zusammenhängen. Eine umfangreiche wissenschaftliche Literatur stützt ihre Glaubwürdigkeit und Zuverlässigkeit. Zwei vorherrschende Ansätze in CFD sind RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) und LES (Large Eddy Simulation). Generell sind RANS-Modelle für urbane Anwendungen weniger genau und sie berücksichtigen im Gegensatz zu LES-basierten Modellen weniger Prozesse, die sich beispielsweise in urbanen Strassenzügen abspielen.

Datengetriebene Modelle

Datengetriebene Modelle bieten eine Alternative zur traditionellen physikalischen Modellierung. Sie stützen sich vorwiegend auf die Analyse von Messdaten und statistischen Verfahren wie dem maschinellen Lernen. Solche Modelle «lernen» aus den Daten, um Zusammenhänge zu identifizieren und Vorhersagen für zukünftige Situationen zu treffen. D.h. physikalische Prozesse werden nicht direkt abgebildet. Sie basieren hauptsächlich auf Daten, entweder von Messstationen, den Resultaten von Wetter- oder von CFD-Modellen. Prinzipiell ist eine ausführliche und kontinuierliche Validierung durch lange Messzeitreihen möglich, da ein einmal trainiertes Modell wenig Rechenintensität benötigt.

Die zentralen Eigenschaften der drei Modelltypen sind in der Folge zusammenfassend beschrieben.

Tabelle 2: Eigenschaften der drei Modelltypen

Modelltyp	Biometeorologisch-strahlungs-basiert	CFD-basiert	Datengetrieben
Charakteristika			
Komplexität	Mittel	Gross-sehr gross	Einfach-gross
Rechenintensität	Mittel	Gross-sehr gross	Training: klein-gross Vorhersage: klein
Evaluation	Indirekt und direkt	Indirekt und direkt	Nur direkt sinnvoll, laufend möglich
Einsatzmöglichkeiten	Mittel	Breit	Spezifisch. D.h. idealer Einsatz für einen bestimmten Zweck, für den sie trainiert wurden.
Stärken	An zentralen Lagen ohne relevante Luftzirkulation können Szenarien kosteneffizient simuliert werden.	Anwendbar in komplexen Situationen.	Eine kontinuierliche Verbesserung durch regelmässige Daten- und Modellaktualisierung, sowie Evaluation, ist möglich.
Anwendungsgebiete	Abbilden von Ist-Zustand und Szenarien inkl. Klimawandel. Fokus auf thermischem Komfort.	Abbilden von Ist-Zustand und Szenarien inkl. Klimawandel. Physikalische Prozesse umfassend abgebildet.	In städtischen und regionalen Kontexten sind sie sehr gut zur Vorhersage von Lufttemperaturen geeignet.
Einschränkungen	Bei komplexer Strömungsdynamik nicht geeignet (z.B. Waldrand an Hanglage).	Fokus auf wenige/vereinfachte Wettersituationen aufgrund hoher Rechenkapazität.	Extrapolation kann zu unplausiblen Resultaten führen. Die Qualität der Modelle hängt stark von den Trainingsdaten ab.

Diese Einschätzung basiert auf einer idealisierten Klassifikation und deren prinzipiellen Möglichkeiten.

Komplexität: Beschreibt die Komplexität des Modells in der Abbildung der Prozesse, der verwendeten Daten und des benötigten Knowhows.

Rechenintensität: beschreibt die nötige Rechenintensität, um ein Gebiet zu simulieren. Bei datengetriebenen Modellen muss zwischen der Trainingsphase und der Vorhersage mit einem trainierten Modell unterschieden werden.

Evaluation: Indirekt: Einfordern von Evaluationsstudien in einem vergleichbaren Kontext. Direkt: Überprüfen der Modellresultate im Kontext der Anwendung, z.B. durch eine Messkampagne.

Einschränkungen: Beschreibt Anwendungsfälle in denen der Modelltyp nicht geeignet ist.

Einsatzmöglichkeiten: Beschreibt die Diversität von Anwendungsfällen, in der ein Modell eingesetzt werden kann.

Tabelle 3 stellt eine Übersicht über eine Auswahl von Stadtklimamodellen dar und teilt sie den drei Modelltypen zu. Angebotene Dienstleistungen können verschiedene Modelltypen kombinieren.

Tabelle 3: Modelltypen und ausgewählte Stadtklimamodelle

Modelltyp	Stadtklimamodelle
Biometeorologische-strahlungsbasierte Modelle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Solweig ▪ LadyBug ▪ RayMan
CFD-basierte Modelle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ENVI-Met ▪ FITNAH 3D ▪ Palm-4U ▪ QKM HSLU ▪ OpenFoam ▪ Asmus
Datengetriebene Modelle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Meteoblue-mCCM ▪ Neuralconcept

Quelle: Eigene Analyse