

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500188610/23

Klimawandel, Stadtklima und Gebäude- energieeffizienz: Wechselwirkungen und Hand- lungskonzepte für eine nachhaltige Stadt

von F. Ali-Toudert, L. Ji

Finanziert mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg

Januar 2016

KLIMOPASS

Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg

Grundlagenforschung zu regionalen Klimafolgen



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT KLIMOPASS	LUBW Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Dr. Kai Höpker, Tel.:0721/56001465, Kai.Hoepker@lubw.bwl.de Daniel Schulz-Engler, Tel.:0721/56001554, daniel.schulz-engler@lubw.bwl.de , klimopass@lubw.bwl.de
FINANZIERUNG	Gefördert im Rahmen des Forschungsprogramms KLIMOPASS - Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg aus Mitteln der Zukunftsoffensive III
BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT	J.-Prof. Dr. Fazia Ali-Toudert, M. Sc.-Geogr. Limei Ji Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen, Technische Universität Dortmund, Juniorprofessur Energieeffizientes Bauen, Wilhelm-Dilthey-Str. 1, 44227 Dortmund
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U83-W03-N27
STAND	Januar 2016, Internetausgabe Juni 2016

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG.....	5
1. EINLEITUNG.....	7
2. ZIELSETZUNG.....	8
3. UNTERSUCHUNGSMETHODE.....	9
3.1. Town Energy Balance - TEB.....	10
3.2. Das Gebäudeenergiemodell TRNSYS 17.0.....	12
3.3. Das Geographische Informationssystem - GIS.....	12
3.4. Die statistische Versuchsplanung DOE.....	13
4. STRUKTUR DES FORSCHUNGSROJKTES.....	14
5. UNTERSUCHUNGSSTANDORT.....	17
6. KLIMADATEN.....	17
6.1. Quellen der Wetterdaten.....	19
6.2. Auswahl der Wetterdaten.....	20
6.3. Berechnung fehlender Klimadaten.....	25
7. STADT- UND GEBÄUDEDATENLAGE.....	26
8. STADT- UND GEBÄUDEPARAMETRISIERUNG.....	29
8.1. Die Gebäudekubatur: Kompaktheit und Größe.....	29
8.2. Abwärme aus dem Verkehr.....	30
8.3. Die Bebauungsdichte: Höhe-Breite Verhältnis H/W.....	30
8.4. Die Gebäudenutzung.....	30
8.5. Altersklasse und Wärmedämmqualität der Gebäude (UWert).....	32
8.6. Fensterflächenanteil der Gebäude.....	32
8.7. Durchschnittliche Gebäudehöhe.....	32
8.8. Bezugsgröße: Baublock und Einzelgebäude.....	33
9. SIMULATIONSPLÄNE UND -EINSTELLUNGEN.....	39
10. DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	50
10.1. Ergebnisse zum Stadtklima.....	50
10.2. Ergebnisse zum Gebäudenutzenergiebedarf.....	57
10.2.1. Ergebnisse zur DOE statistischen Analyse.....	57

10.2.2. Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen für die aktuelle Klimalage	59
10.2.3. Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen für das prognostizierte Zukunfts-klima	59
10.3. VALIDIERUNG DER ERGEBNISSE.....	63
11. SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK	66
11.1. Zusammenfassung der Ergebnisse	66
11.2. Einschränkungen dieser Forschungsarbeit.....	67
11.3. Ausblick.....	68
REFERENZEN.....	70
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	72

ZUSAMMENFASSUNG

Weltweit entsteht ein Großteil schädlicher Gasemissionen und Abwärme in Städten, verursacht durch Gebäude. Daher ist eine Umgestaltung existierender Gebäude in einem klimagerechten Sinn, sowie ein zukünftiges klimagerechtes und energieeffizientes Bauen unerlässlich, um dem Klimawandel entgegen zu wirken.

Der bereits stattgefundenen Klimawandel stellt eine neue globale Randbedingung für Gebäude dar, die bisher noch nicht in die üblichen energiebezogenen Berechnungen für Gebäude einfließt. Umgekehrt wird der kumulative Einfluss einzelner Gebäude durch Gasemissionen und Abwärme auf das globale Klima kaum berücksichtigt.

Ein wesentlicher Grund dafür ist der Mangel an quantitativen und in geeigneter Form dargestellten Informationen zu diesen Phänomenen. Dieses Defizit kann erst aufgehoben werden, wenn intensive Untersuchungen zu den Aus- und Wechselwirkungen von Globalklima, Stadtklima und Gebäudeklima durchgeführt werden.

Das Projekt soll einen Beitrag dazu leisten. Dieses Projekt zielt darauf ab, die energetischen Konsequenzen des Stadtklimas als Klimawandel im Gange und des mittelfristigen prognostizierten Klimawandels auf die Innenräume zu untersuchen. Eine skalenübergreifende Untersuchungsmethode im Hinblick auf die Erfassung der Energiekennwerte für Heizen und Kühlen urbaner Gebäude steht im Mittelpunkt dieses Forschungsprojektes.

Der Innenraum urbaner Gebäude und seine unmittelbare Umgebung sind hier das Untersuchungsobjekt, während das Stadtklima im Wandel sowie der zukünftige Klimawandel eine zu beachtende Randbedingung darstellt. Stadtklimatisch kann zwischen zwei Betrachtungsweisen unterschieden werden: Die Sommer und die Ganzjahr-Problematik. Bei der Sommer-Problematik ist die „Hitze“ der Schwerpunkt in der energetischen Betrachtung der Stadtluft in den Außenräumen (Strahlung, turbulente Wärmeflüsse, Gebäudewärme, Bodenwärme, anthropogen freigesetzte Wärme), denn die städtischen Freiräume werden im Sommer zunehmend als Aufenthaltsräume benutzt. Hingegen müssen für Innenräume sowohl der winterliche als auch der sommerliche Wärmeschutz im Zusammenhang mit dem Klimawandel bzw. Stadtklima erforscht werden (Überhitzung in der Kühlperiode, Kältestress in der Heizperiode), da diese Räume ganzjährig zum Leben und Arbeiten genutzt werden.

Methodisch werden die thermischen und energetischen Wechselwirkungen zwischen Außen- und Innenräumen anhand von mehreren numerischen Modellen untersucht. Als numerische Modelle dienen insbesondere das Town Energy Model (TEB) für den Außenraum und TRNSYS 17.0 für den Innenraum. Diese Vorgehensweise stellt eine methodische Neuheit dar, da zum ersten Mal Modelle aus unterschiedlichen Maßstabsebenen hinsichtlich Klima und Energie für eine Untersuchung an einer realen Stadt kombiniert werden. Diese Skalenkoppelung ermöglicht eine

ganzheitliche Betrachtung zusammenhängender Prozesse, die bisher nicht bzw. nur sehr eingeschränkt verknüpft wurden. Demzufolge wurden die Wechselwirkungen zwischen Stadt und Gebäude bezüglich Klima und Energie bisher nur unzureichend untersucht. Dadurch konnten insbesondere mögliche Planungskonflikte nicht berücksichtigt werden, wie z.B. der gegensätzliche Effekt der hohen Bebauungsdichte auf Freiräume (erwünschte Verschattung im Sommer) und Innenräume (Verhinderung der Solargewinne im Winter), oder auch die möglichen negativen Nebeneffekte auf den Innenraum, einer für Freiräume nützlichen Vegetation, usw..

Der Standort Stuttgart dient als repräsentatives Untersuchungsgebiet für Baden-Württemberg. Ein Argument dafür ist vor allem die langjährige Forschungstradition dieser Stadt im Bereich Stadtklima und die entsprechend existierenden ausführlichen Informationen und Datensätze zum dortigen Stadtklima, sowohl Messdaten und Stadtklimakartierungen als auch Modellberechnungen, etc..

Aufgrund des ausgedehnten Untersuchungsgebietes wird methodisch die GIS-Technik zentral verwendet, und zwar sowohl für die Vorbereitung (pre-processing) als auch für die Nachbearbeitung der Ergebnisse (post-processing). Eine generische Beschreibung der Stadtstruktur und Einzelgebäude erfolgt durch thermisch-relevante Parameter, welche anhand von GIS aus dem Rohdatenmaterial zu Stuttgart extrahiert und bearbeitet werden. Die Untersuchungsmethode verwendet zudem statistische Methoden (Versuchsplanung „design of experiments“), um die Repräsentativität der erforschten Gebiete in den Simulationspläne in TEB und in TRNSYS ZU gewährleisten und eine Generalisierung der Ergebnisse für die Stadt Stuttgart zu gewährleisten.

In diesem Projekt werden ausführliche Parameterstudien durchgeführt, um herauszufinden, welche Einflüsse und Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Klimaskalen in Bezug auf das Bauwesen (Stadt und Gebäude) herrschen. Dafür werden Versuchspläne entwickelt und verwendet, deren Parameter und Variationsschritte aus der Analyse ausgewählter Stadtstrukturen von Stuttgart und Freiburg definiert werden. Dazu gehören die dominierenden Vertikalprofile der Straßen, Solarausrichtungen, Bebauungsdichten, Himmelsichtfaktoren, Landnutzungen (Vegetation, Wasser), Gebäudekonstruktion (Bauart, Fassadenbau, u.a.), Klimatische Ausgangssituation, usw. Es werden möglichst realistische und plausible Szenarien abgebildet, deren Erkenntnisse auch auf Baden-Württemberg erweitert werden sollen.

Langjährige Klimadatensätze in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung werden als klimatische Ausgangssituation für die geplanten Simulationen betrachtet.

Die statistische Auswertung der Simulationsergebnisse ermöglicht die Übertragung der Energiekennwerte auf die einzelnen Gebäude der Stadt, welche anhand von GIS kartographisch dargestellt werden. Die Ergebnisse werden aus Datenschutzgründen allerdings nur auf Baublockebene angezeigt.

1. EINLEITUNG

Laut IPCC (2007) werden mehr als 50 % der gesamten Weltbevölkerung im Jahr 2030 in Städten leben. Obwohl nur 2.6 % der gesamten Erdoberfläche von Städten bedeckt ist, sind urbane Gebiete für 80% der gesamten Treibhausgasemissionen und für 75% des gesamten Energieverbrauchs verantwortlich. Davon sind 50% auf den Gebäudesektor und 50 % auf den Verkehr und die Industrie zurückzuführen.

Die Wechselwirkungen zwischen Stadt und Gebäude sind klimatisch und energetisch entscheidend. Einerseits spielen die dreidimensionalen urbanen Strukturen selbst (Gebäudekubatur, Anordnung der Gebäude, Baumaterialien, usw.) eine maßgebende Rolle in der Energiebilanz einer Stadt und folglich in der Entstehung eines neuen Klimas: Stadtklima, urbane Wärmeinsel (UHI), sowie eigenständige Mikroklima im unmittelbarer Nähe eines jeden Gebäudes. Andererseits stellt das geänderte Klima neue Randbedingungen für die Gebäude dar, so dass Standard-Klimadaten für Gebäude-Energieanalysen nicht mehr repräsentativ sind. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel. Dieser Zusammenhang kann anhand mehrerer Kenngrößen quantifiziert werden: Vertikalprofil (Höhe-Breite Verhältnis H/W, Sky View Faktor SVF), Solarausrichtung, Plandichte, Eigenschaften der Baumaterialien (Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Albedo, Emissionsgrad, usw.), u.a. Aufgrund dieses engen Zusammenhangs „Gebäude – Klima“ ist es von primärer Bedeutung optimierte und energieeffiziente Gebäude zu planen, um die Abwärme und Emissionen zu reduzieren und damit die weitere Globalerwärmung der Luft zu verhindern.

Aufgrund der Komplexität beider Bereiche „Stadt“ und „Gebäude“ ist ein interdisziplinärer Einsatz zwischen Bauphysik, Städtebau und angewandte Stadtklimatologie notwendig.

Ein typisches Merkmal einer Stadt in Bezug auf das Klima stellt die urbane Wärmeinsel (Urban Heat Island, UHI) dar. Unter einer UHI wird ein städtisches Gebiet verstanden, welches aufgrund der städtischen Strukturen und Aktivitäten wärmer ist, als das umliegende und nicht bebaute Land. Das UHI Phänomen ist komplex und hat sowohl Auswirkungen auf die Lebensqualität in der Stadt, als auch auf den Energiebedarf einer Stadt. Des Weiteren beschränken sich die klimatischen Auswirkungen einer UHI nicht nur auf den lokalen städtischen Bereich, sondern es ergeben sich aufgrund der unnatürlichen Erwärmung eines größeren Gebietes globale Einflüsse auf den weltweiten Klimawandel. Trotz langjähriger und intensiver Untersuchungen des UHI Phänomens können noch wenige Eigenschaften verallgemeinert werden. Nach derzeitigem Stand der Forschung : i) ist die UHI Intensität nachts am größten, ii) nimmt die UHI Intensität mit abnehmender Windgeschwindigkeit zu, iii) ist die UHI Intensität im warmen Halbjahr (Sommer), bei schönem Wetter und klarem Himmel, größer, iv) steigt die UHI Intensität mit zunehmender Stadtgröße und Stadtdichte.

Die Ursachen der Urbanen Wärmeinsel können grundsätzlich auf die urbane Struktur und die Aktivitäten der in der Stadt lebenden Menschen zurückgeführt werden: die 3-Dimensionalität und Bebauungsdichte, die bebauungsbedingte Horizonteinengung, die thermische Eigenschaften der Baumaterialien, geringe Vegetation, wenig Wasser und versiegelte Flächen und durch die Aktivitäten der in den Städten lebenden Menschen entstehen Wärme- und Gasemissionen.

Die globale Erderwärmung und auch das Stadtklima sind nicht bzw. sehr vereinfacht in den üblichen Klimadatenquellen, wie beispielsweise den Testreferenzjahren von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse (TRY) des Deutschen Wetterdienstes, enthalten (DWD 2011). Demzufolge stellt sich die Frage, ob der Kühlenergiebedarf für die Vermeidung der Überhitzung in Gebäuden (Sommerproblematik) unterschätzt wird. Eine Vorhersage zur Winterproblematik (Heizenergiebedarf) ist noch schwieriger zu treffen und benötigt ausführliche numerische Maßstab-gekoppelte Untersuchungen, wie sie in diesem Projekt durchgeführt werden.

2. ZIELSETZUNG

Ziel des KLISGEE Projektes ist die Ermittlung von Gebäudeenergiekennwerten für Heizen und Kühlen anhand von dynamischen numerischen Simulationen für die Stadt Stuttgart unter Berücksichtigung ihrer städtischen und baulichen Eigenschaften (Bebauungsdichte, Baualter, Baunutzung, Bauart, Dämmstandard, usw.) für verschiedene klimatische Randbedingungen, insbesondere des lokalen Stadtklimas und mittelfristiger Klimawandelprognosen. Das Endergebnis wird in Form von GIS-basierten Kartierungen dargestellt, um die typischen räumlichen Unterschiede aufgrund der Bebauung und ihre Wechselwirkungen mit der umgebenden Atmosphäre hervorzuheben.

Bei dieser Zielsetzung werden die energetischen Konsequenzen des Klimawandels auf die Stadt untersucht. Der Innenraum urbaner Gebäude und seine unmittelbare Umgebung sind hier das Untersuchungsobjekt, während das Stadtklima im Gange zw. Die mittelfristige Klimawandelprognose die zu beachtende Randbedingung darstellt. Es werden folgende Ziele verfolgt:

1. Quantifizierung der thermischen Änderungen für das Gesamtgebiet Stuttgarts aufgrund des Klimawandels und der Stadtstruktur selbst.
2. Quantifizierung der Energiekennwerte Heizen und Kühlen auf Gebäudeebene und Baublockebene unter Berücksichtigung von i) stadtklimatischer Randbedingungen (1971 – 2000) und ii) des prognostizierten Klimawandels (2041 – 2050).

Die Besonderheit dieses Forschungsprojektes besteht in der Verbindung von 2 Forschungsbereichen, welche i. d. R. separat betrachtet werden aufgrund der unterschiedlichen Maßstabsebenen und auch Fachdisziplinen. 1) Die Stadtklimatologie: Untersuchungsobjekt Außenraum, Stadtstruktur und 2) die Bauphysik: Untersuchungsobjekt Innenraum, Gebäude, oft isoliert. Ferner die skalenübergreifende Behandlung mit hohem zeitlichem und räumlichem Detailniveau

steht im Vordergrund und stellt aufgrund der Datenlage, der verfügbaren Rechenwerkzeuge sowie des Rechenaufwandes eine Herausforderung dar. Die Untersuchung an einem realen Fallbeispiel „die Stadt Stuttgart“, ermöglicht die Überprüfung und den Nachweis der Eignung der hier vorgeschlagenen ganzheitlichen Methode zur Behandlung der skalenbedingten thermischen Wechselwirkungen im Stadtraum.

Die Neuheit dieses Projektes ist in erster Linie METHODISCH: In diesem Projekt werden zum ersten Mal Modelle aus unterschiedlichen Maßstabsebenen hinsichtlich Klima- und Energieermittlung an einem realen Untersuchungsobjekt kombiniert. Diese Skalenkoppelung ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung zusammenhängender Prozesse, die bisher nicht bzw. nur sehr eingeschränkt verknüpft wurden. Demzufolge wurden die Wechselwirkungen zwischen Stadt und Gebäude bezüglich Klima und Energie bisher nur unzureichend untersucht. Mögliche Planungskonflikte bleiben dadurch unbeleuchtet, wie z.B. der gegensätzliche Effekt der hohen Bebauungsdichte auf die Freiräume (erwünschte Verschattung im Sommer) und Innenräume (Verhinderung der Solargewinne im Winter), oder auch die möglichen negativen Nebeneffekte auf den Innenraum einer für Freiräume nützlichen Vegetation, usw.

Die zweite Neuheit ist INHALTLICH: Die erzielten Ergebnisse des durchzuführenden Projektes werden die vorhandenen Stadtklimaanalysen in Bezug auf die Energieproblematik erweitern. So erfolgt eine Erweiterung der sogenannten Stadtklimafunktionskarten bzw. Planungskarten auf weitere Kartierungen des Energieverhaltens einer gesamten Stadt. Ein weiteres Einsatzpotenzial der neuen Erkenntnisse besteht darin, die Gesetzgebung in Bezug auf Klima und Energieskalen themenübergreifend anzupassen. Das Stadtklima ist derzeit kaum in der Energieeinsparverordnung EnEV integriert und die gegenwärtigen Stadtklimaleitlinien blenden das Innenraumklima beinahe aus. Dieser Ansatz ist äußerst anspruchsvoll, da Sachkenntnisse aus der Stadtklimatologie, Stadtplanung und aus der Bauphysik zugleich benötigt werden.

3. UNTERSUCHUNGSMETHODE

In diesem Projekt werden methodisch i) numerische Modellierungen, ii) statistische Verfahren und iii) GIS-Verfahren angewendet. Die Untersuchungsmethode beruht auf (Siehe [Abbildung 1](#)):

- i. der numerischen Modellierung, durch die Kombination von Stadtklima- und Gebäudeenergiemodellen (TEB, TRNSYS), für die Erfassung der thermischen und energetischen Wechselwirkungen zwischen Außen- und Innenräumen (Stadtklima, Innenraumklima) in ihrer räumlichen und zeitlichen Entwicklung.
- ii. der Verwendung von GIS-Techniken (ArcGIS) und statistischer Methoden (Versuchsplanung DOE), um eine zuverlässige Beschreibung der erforschten Gebiete sowie eine Generalisierung der Ergebnisse für den gesamten Untersuchungsstandort gewährleisten zu können.

- iii. Im Vorfeld wird eine ausführliche Klimaaanalyse des Untersuchungsobjektes durchgeführt, um die aktuellen und für die Zukunft prognostizierten klimatischen Rahmenbedingungen festlegen und verstehen zu können. Diese Analyse schließt den Vergleich verschiedener Datenquellen ein, sowohl Messdaten als auch berechnete Daten.

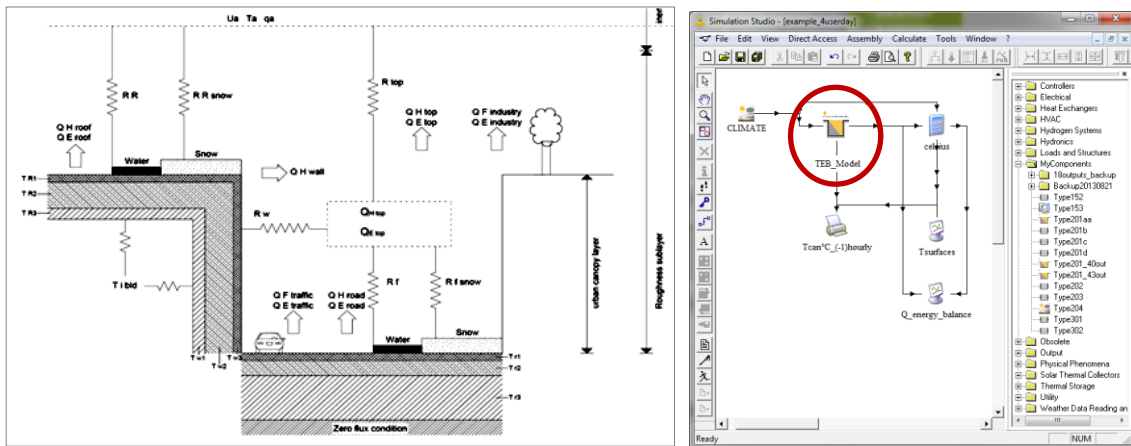
Die Kombination von TEB und TRNSYS zur Zwecke der Ermittlung von Stadtklimaeffekten und Energiekennwerten für Gebäude wurde erstmals von [Ali-Toudert \(2010a, 2010b, 2011, 2013\)](#) vorgeschlagen. Das neuimplementierte TEB in TRNSYS wird in [Ali-Toudert und Böttcher \(2015\)](#) beschrieben.

Die einzelnen Bestandteile der Untersuchungsmethode werden im Folgenden genauer erläutert:

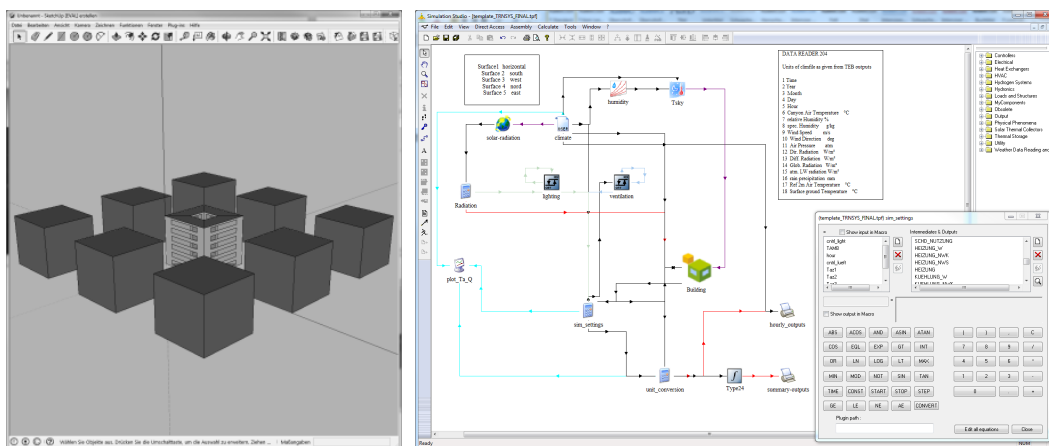
3.1. Town Energy Balance - TEB

Das Modell TEB ([Masson 2000](#), [Lemonsu and Masson 2004](#)) gehört zu den „urban canopy models“, dessen Struktureinheit ein zweidimensionales Straßenprofil bzw. eine Straßenschlucht ist. Das TEB-Modell erlaubt eine Prognose turbulenter Wärmeflüsse in urbanen Strukturen. Eine urbane Struktur wird im TEB Modell durch eine Straßenschlucht beschrieben, welche aus den Flächen Dach, Außenwände und Straße besteht. Zudem besitzen jegliche an eine Straße angrenzenden Gebäude die gleiche Höhe ; eine Straßenschlucht wird als unendlich lang angenommen. Durch eine detaillierte Beschreibung der Oberflächen eines urban canyons wird die Lösung der Energiebilanzgleichungen an Wänden, Straßen und Dächern ermöglicht, basierend auf atmosphärischen Eingabedaten oberhalb des betrachteten Gebietes (offline Modus). Ausgabedaten sind die urbane Lufttemperatur auf 2 m Höhe, die fühlbare und latente Wärme in der Straßenschlucht und auf dem Dachniveau, die Temperaturen der verschiedenen Oberflächen, etc. Damit ermöglicht TEB eine Prognose der urbanen Wärme- bzw. Kühlinselfen in Abhängigkeit der urbanen Struktur und damit die Anpassung ländlicher Klimadaten an die Stadt.

(a) Town energy balance TEB



(b) TRNSYS Energiegebäudemodell



(c) GIS und DOE Versuchsplanung

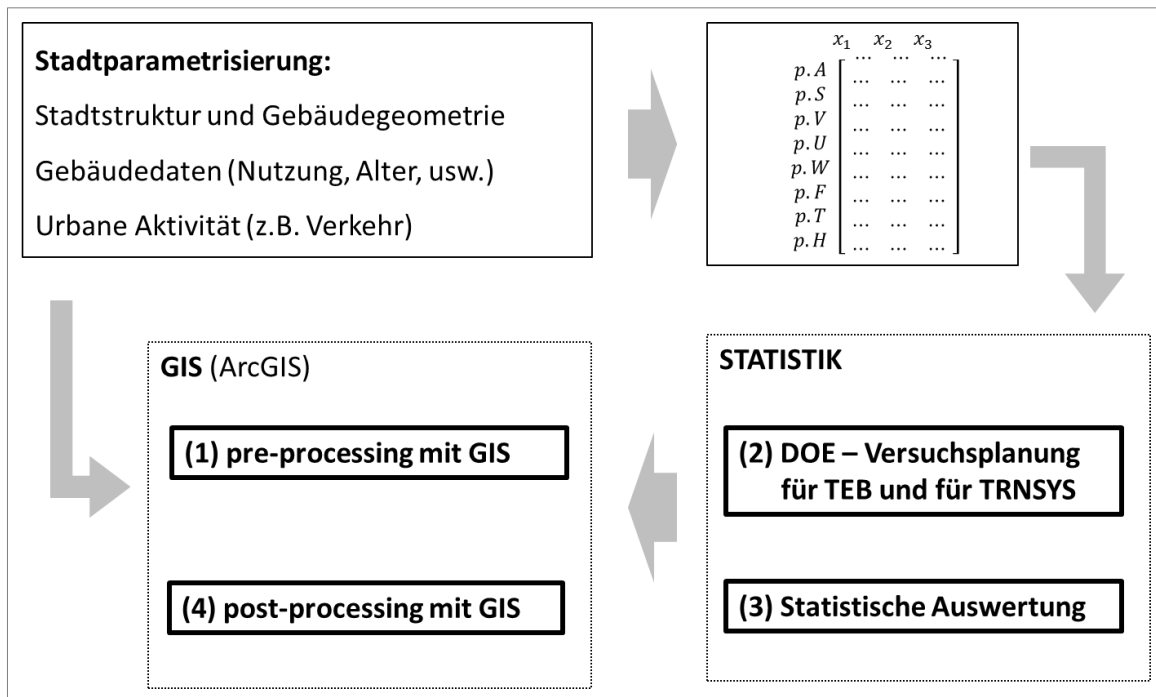


Abbildung 1: Schema der verwendeten Untersuchungsmethode bestehend aus 1) dem Town Energy Balance Model TEB, 2) dem TRNSYS Gebäudeenergiemodell, 3) dem geographischen Informationssystem GIS und dem statistischen Verfahren (DOE)

3.2. Das Gebäudeenergiemodell TRNSYS 17.0

Zusätzlich zur Außenklimaanpassung im städtischen Kontext ist es entscheidend, dass auch ein robustes Energiegebäude-Modell verwendet wird, welches eine thermisch bezogene Verknüpfung mit den Innenräumen ermöglicht (Gebäudethermik).

Mit TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation Programm) steht dem Nutzer ein modular aufgebautes und dynamisches Gebäude- und Anlagen-Simulationsprogramm zur Verfügung (TRANSOLAR 2010). TRNSYS ist weltweit zu einem Standardwerkzeug für Experten zur Energiekonzeptentwicklung und -bewertung geworden. Die folgenden Eigenschaften von TRNSYS können dabei besonders hervorgehoben werden: i) Leistungsstarkes Mehrzonengebäudemodell, ii) kurze Rechenzeiten für eine detaillierte Beschreibung der Untersuchungsobjekte (thermische Eigenschaften der Baustoffe und Bauteile), iii) Trotz einer Konzipierung für Innenräume kann TRNSYS Version 17 mittels eines Zusatzmoduls (TRNSYS3D) Verschattungen einer Nachbebauung, wie typisch in einem Stadtgebiet, berücksichtigen, iv) hohe Flexibilität z.B. durch die mögliche Einbindung eigener Komponenten. Diese letzte Eigenschaft wurde tatsächlich durch die neue Implementierung vom TEB in die TRNSYS Umgebung wahrgenommen (Ali-Toudert and Böttcher 2015), welche ein wesentlicher Grund für die Kombination dieser 2 Modell darstellt.

Die Kombination von TEB (Stadt) und TRNSYS (Gebäude) hat folgende weitere Vorteile: i) Kompatibilität von TEB und TRNSYS bezüglich zeitlicher Auflösung (Simulationen auf Stundenbasis) und der Klimainformation als Eingabe; ii) Sowohl TRNSYS als auch TEB benötigen mit etwa 2-3 Minuten pro Simulationslauf für ein simuliertes Jahr wenig Rechenzeit, was für umfangreiche Parameterstudien ideal ist, wie in diesem Projekt vorgenommen werden; iii) Detaillierte Beschreibung der Canyon- bzw. Gebäudeoberflächen (Dach, Wand, Straße) als mehrschichtige Bauteile mit ihren entsprechenden thermischen Eigenschaften.

3.3. Das Geographische Informationssystem - GIS

Das GIS ist ein Informationssystem, das die räumlichen bzw. geografischen Daten erfasst, bearbeitet, verwaltet und analysiert.

In diesem Projekt wird die GIS-Technik sowohl für das Vorbereiten der Daten (pre-processing) als auch für die Nachbearbeitung der Ergebnisse verwendet (post-processing). Mit Hilfe von GIS werden die Stadtstruktur und Gebäudeeigenschaften räumlich parametrisiert. Der Fokus wird auf eine skalenübergreifende Datenanalyse, d.h. auf Gebäude-, Baublock- und Stadtebene gesetzt. Diese beinhalten die Ermittlung der Stadtstruktur (Höhe-Breite-Verhältnis der Straßencanyons) und der Gebäudegeometrie (Gebäudevolumen und Gebäudeoberfläche) basierend auf 2D und 3D Stadtkarten sowie die Überarbeitung der raumbezogenen statistischen Daten z.B. Verkehrsbelastung, Gebäudealter und Gebäudenutzung.

Für die Nachbearbeitung der Simulationsergebnisse wird GIS für die Übertragung der statistisch ermittelten mathematischen Modelle zum Gebäudeenergiebedarf verwendet.

3.4. Die statistische Versuchsplanung DOE

Die Versuchsplanung (engl. design of experiments, DOE) ist eine Methode, die zunehmend in den Natur- und Ingenieurwissenschaften im Rahmen von Parameterstudien verwendet wird. Diese Methode kommt vor allem bei der Entwicklung und Optimierung von Produkten oder Prozessen zum Einsatz und setzt auf eine reduzierte, aber dennoch repräsentative Darstellung aller relevanten Variablen. Somit macht es die Versuchsplanung möglich, komplexe Phänomene (wie die hier betrachteten Stadtklima- und Energiebedarfsermittlung) mit einer hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei gleichzeitig geringem Zeit- und Ressourcenaufwand zu analysieren.

Mit dieser statistischen Versuchsplanung werden mit möglichst wenigen Versuchen (Einzelexperimente) der Wirkzusammenhang zwischen Einflussfaktoren (= unabhängige Variablen) und Zielgrößen (= abhängige Variable) möglichst genau ermittelt.

Bei quantitativen (metrischen) Faktoren erfolgt die Auswertung mit Hilfe der Regressionsanalyse. Hier kommen Regressionsmodelle, die auf einer Linearkombination von Basisfunktionen beruhen, zum Einsatz. Damit können die Haupteffekte und zweifache Wechselwirkungen linearer oder quadratischer Modelle definiert werden (z.B. mit den Variablen x , y , x^2 , xy , usw.).

In diesem Projekt werden Parameterstudien in Form von Versuchsplänen entwickelt und verwendet, deren Parameter und Variationsschritte aus der Analyse aller Gebäude und Stadtstrukturen Stuttgarts hervorgehen. Dazu gehören die dominierenden Vertikalprofile der Straßen, Bebauungsdichten, Landnutzungen (inkl. Vegetation, Wasser,), Gebäudenutzungen (Wohnen, nicht Wohnen), Gebäudekonstruktion (Dämmqualität, Fassadenbau, usw.), klimatische Ausgangssituation räumlich fein differenziert, usw. Es werden möglichst realistische und plausible Szenarien abgebildet, deren Erkenntnisse auf das Gesamtgebiet übertragen werden können.

4. STRUKTUR DES FORSCHUNGSPROJEKTES

Die sukzessive Vorgehensweise wird in einem aktualisierten Schema in [Abbildung 2](#) dargestellt und nachfolgend kurz erläutert.

I. Ausgangsdaten

Als Ausgangsdaten werden zwei Arten von Informationen verwendet: 1) Wetterdaten unterschiedlichen Ursprungs und 2) Stadtdaten planerischer und statistischer Art.

Zum Klima werden in dieser Forschung werden zwei Zeiträume betrachtet:

- aktuelle klimatische Randbedingungen (1971 – 2000) bzw. (1991 – 2000)
- der prognostizierte Klimawandel (2041 – 2050) bzw. (2041 – 2050)

Diese Wetterdaten werden zunächst als Randbedingungen vorbereitet. Verschiedene Datenquellen werden analysiert und miteinander verglichen, um die klimatische Ausgangssituation zu klären und diese Daten auf ihre Nutzbarkeit für das Projekt zu prüfen. Geeignete Klimadaten für die späteren Modellierungen werden in dieser Arbeitsphase bereitgestellt.

II. Datenvorbereitung: Stadt- und Gebäudeparametrisierung

Die planerischen wie auch die statistischen Stadtdaten werden zur Ermittlung der verschiedenen Stadt- und Gebäudeparameter (Bebauungsdichte; Kompaktheit; Gebäudevolum; Dämmstandard; Fensteranteil; Nutzung usw.) herangezogen. Diese Aufgabe wird auf Baublock- bzw. Gebäudeebene anhand von GIS bearbeitet.

III. Stadtklimasimulation mit TEB

Die vorhandenen Wetterdaten werden anhand des Urban Canyon Modells TEB (Town Energy Balance) umgerechnet, um die Effekte mikroskaliger Unterschiede in den Bebauungsdichten und -arten verschiedener Stadtteile Stuttgarts zu integrieren. Diese Berechnungen werden für alle zuvor identifizierten Stadtypologien durchgeführt, d.h. Stadtbereiche definieren über ihre physischen Eigenschaften wie Bebauungsdichte, Baunutzungsart, Art und Umfang der versiegelten Flächen, Bedeckungsgrad, usw..

IV. Thermische Gebäudesimulation mit TRNSYS

Nachdem die Stadtstrukturen und die Gebäudetypologien definiert sind, werden dynamische Gebäudesimulationen basierend auf der statistischen Methode der Versuchsplanung durchgeführt. Für eine ausführliche Parameterstudie wird eine Matrix, bestehend aus allen entscheidenden urbanen und Gebäudeparametern, zugrunde gelegt. Die Zielgrößen dieser Berechnungen sind die Energiebedarfe für Heizen, Kühlen, Beleuchten und Lüften.

V. Statistische Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Gebäudesimulationen werden statistisch ausgewertet. Das hat den Vorteil, die großen Datenmengen zu bewältigen, während systematisch die Haupteffekte und 2-fach Wechselwirkungen aller Variablen identifiziert und somit mathematische Modelle als generalisierbare Formulierung der Zielkenngrößen Heizen und Kühlen sowie deren Darstellung definiert werden.

VI. Grafische Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zu den Gebäudeenergiekennwerten für Heizen und Kühlen werden mithilfe der in IV definierten mathematischen Modelle räumlich anhand von GIS-Methoden für das gesamte Untersuchungsgebiet Stuttgart dargestellt. Die Datenverarbeitung, die numerische Modellierung (in TEB, in TRNSYS) und die Gesamtanalyse erfolgen feinskalig auf Gebäudeebene. Die grafische Darstellung als GIS-Karten erfolgt allerdings aus Datenschutzgründen auf Baublockebene. Die Zielgrößen der geplanten Untersuchungen sind:

- i. die urbanen Lufttemperaturen und ihre entsprechenden Heizgradtage bzw. Kühlgradtage als erste Schätzung der Stadtklimaeffekte und Klimawandeleffekte auf den Innenraum,
- ii. Nutzbedarf für Heizung (Heizwärmebedarf) und für Kühlung (Kühlbedarf). Endenergiewerte werden zu Vergleichszwecken noch berechnet.

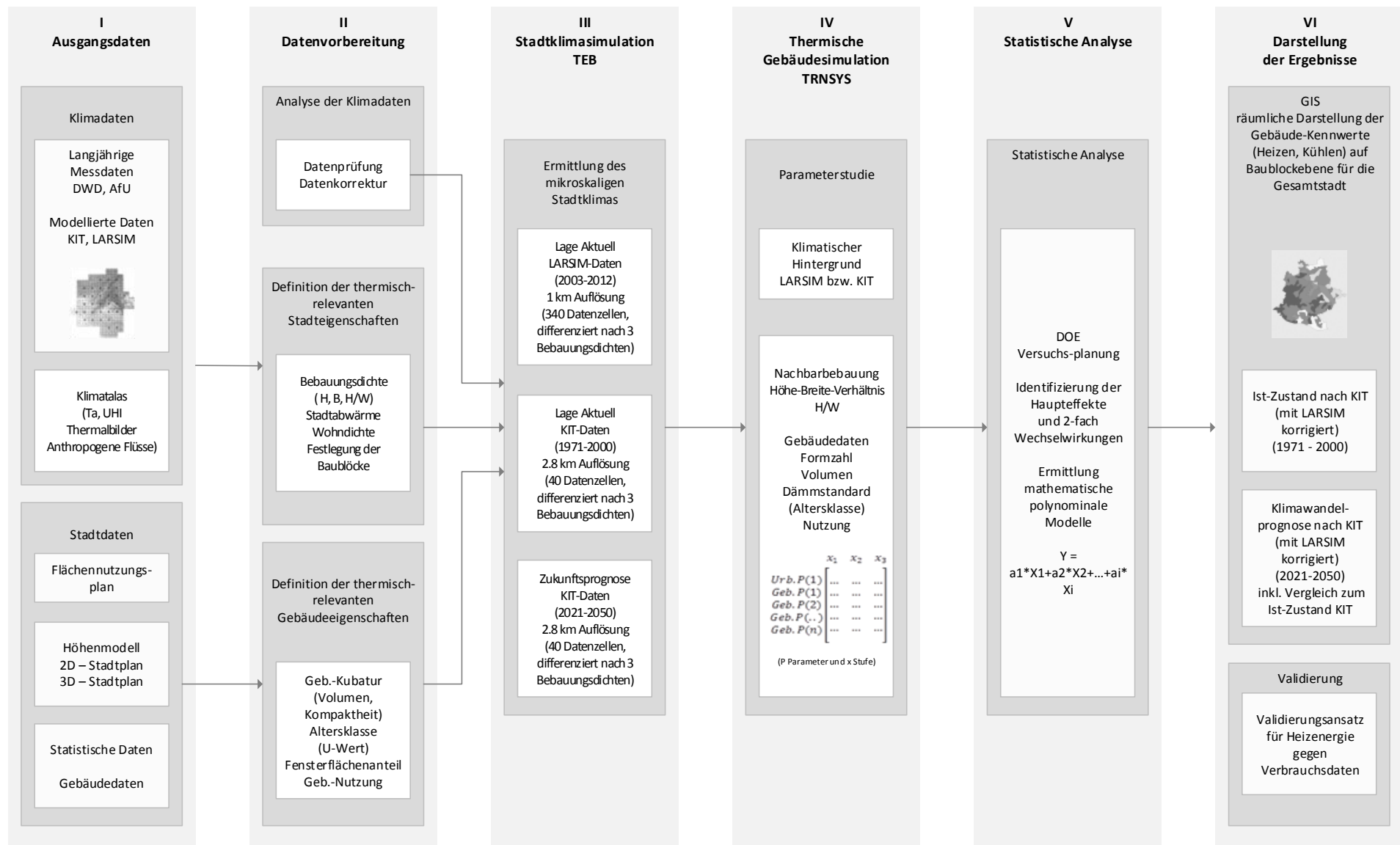


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Untersuchungsvorgehensweise im Rahmen dieses Forschungsprojektes

5. UNTERSUCHUNGSSTANDORT

Der Standort Stuttgart wird als repräsentatives Untersuchungsgebiet für Baden-Württemberg ausgewählt. Ein Argument dafür ist die langjährige Forschungstradition dieser Stadt im Bereich Stadtklima und dementsprechend für diesen Standort ausführlich existierende Informationen und Datenmengen zum dortigen Stadtklima, sowohl in Form von Messdaten und Stadtklimakarrierungen als auch in Form von Modellberechnungen, etc..

Die Stadt Stuttgart verfügt auch über Stadtklimastationen, die zum vorliegenden Projekt reale Referenzklimadaten als Eingabe liefern. Weitere Informationen dazu können der Webseite des Amtes für Umweltschutz der Stadt Stuttgart <http://www.stadtklima-stuttgart.de/> entnommen werden. Die Abteilung Stadtklimatologie des Amtes für Umweltschutz der BW-Landeshauptstadt Stuttgart (Dr. Reuter) stellte die notwendigen Stadtstrukturdaten und meteorologischen Eingangsdaten bereit.

6. KLIMADATEN

Zur Erfassung der klimatischen Randbedingungen vom Großraum Stuttgart wurden folgende Datenquellen gefunden:

- 1) Langjährige Wetterdatensätze mit stündlicher Zeitauflösung:
 - (a) Messdaten des Deutschen Wetterdienstes DWD (DWD 2013a)
 - (b) Stadtwetterdaten des Amtes für Umweltschutz Stuttgart (AU o.J.)
 - (c) Atmosphärisch modellierte Wetterdaten vom dem Karlsruher Institut für Technologie, die im Rahmen des Programmes KLIMOPASS – Teil 1 erstellt worden sind und dem vorliegenden Projekt zur Verfügung gestellt wurden (KIT 2012).
 - (d) mit dem LARSIM Modell interpolierte Wetterdaten (basierend auf Messdaten) der Hochwasserzentrale der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW 2014).
- 2) Der Stadtklimaatlas des Großraums Stuttgart: Dieser Atlas dokumentiert eine Stadtklimaanalyse in Form von gemittelten Werten zu allen klimarelevanten Kenngrößen der urbanen Atmosphäre Stuttgarts. Die Verbandregion Stuttgart (VRS 2013) betreibt u.a. ein Geoinformationsportal mit umfangreichem Kartenmaterial zu diesem Thema. Auch das Amt für Umweltschutz liefert ausführliche Information (AU o. J.).

Abbildung 3 zeigt die verschiedenen Datenquellen mit ihrer entsprechenden Lage und räumliche Auflösung. Diese Datenquellen werden hierunter näher erläutert, um die endgültige Auswahl geeigneter Daten für dieses Forschungsprojekt zu begründen.

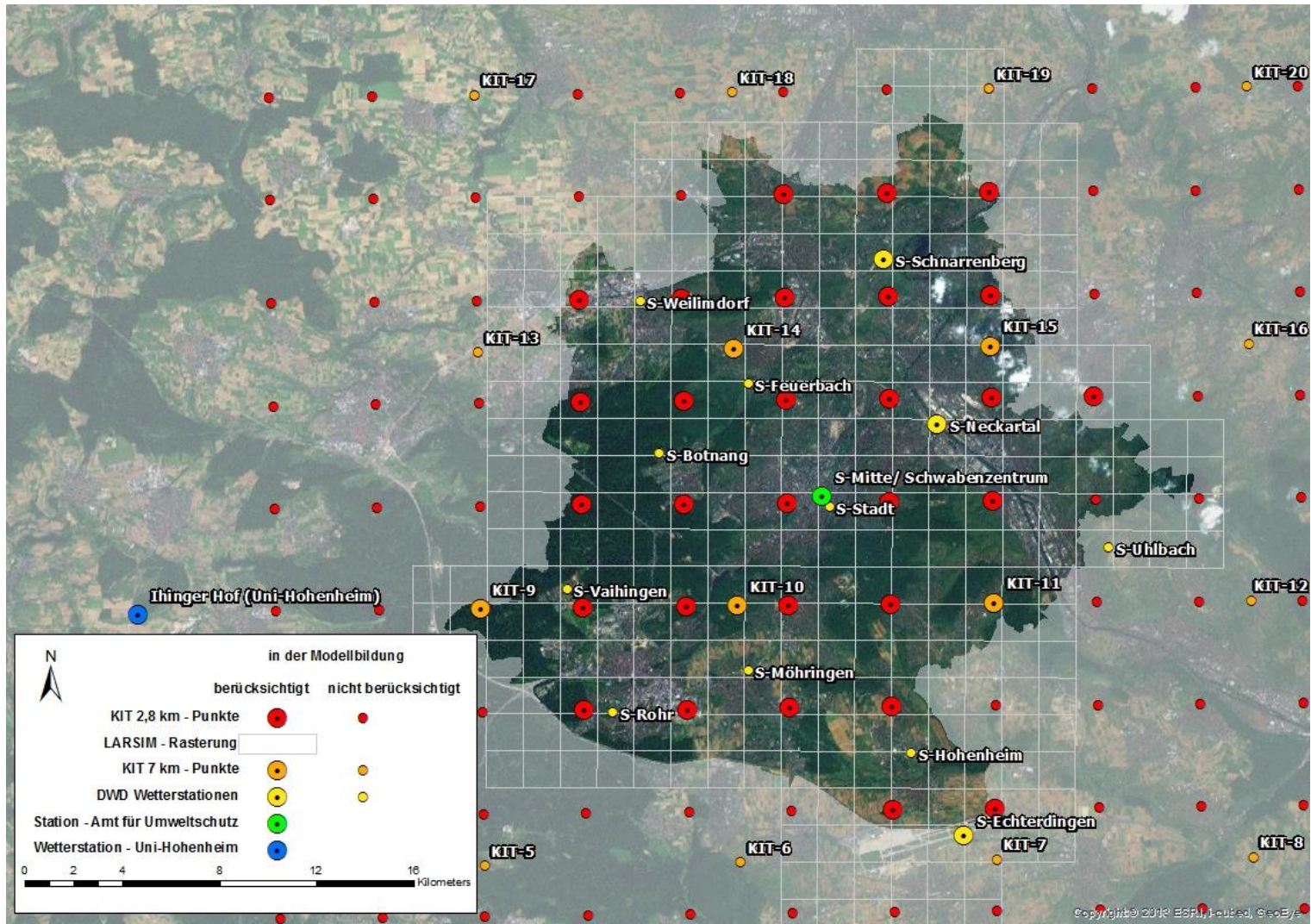


Abbildung 3: Ausgewählte Wetterstationen für das Betrachtungsgebiet Stuttgarts
(DWD 2013b, KIT 2011, Amt für Umweltschutz 2013, LARSIM, Uni-Hohenheim, eigene Darstellung)

6.1. Quellen der Wetterdaten

(a) Deutscher Wetterdienst - DWD

Es werden 13 Wetterstationen an verschiedenen Standorten im Stuttgarter Stadtgebiet vom Deutschen Wetterdienst DWD nach geprüften Standards betrieben, um kontinuierlich Meteor-Daten zu erheben. Die Wetterdaten sind stundenweise gemittelt (DWD 2011). Die räumliche Verteilung der Wetterstationen hat den Vorteil, die meteorologischen mikroskaligen Unterschiede, die aufgrund von Topographie, Flächennutzung, usw. entstehen, zu erfassen. Allerdings weisen diese Stationen Differenzen in der Anzahl der gemessenen Kenngrößen sowie in den erfassten Zeiträumen auf. Dies führt dazu, dass an einigen Stationen Datensätze kompensiert werden müssen, um alle für die Analyse relevanten Daten erheben zu können.

(b) Amt für Umweltschutz Stuttgart - AU

Das Amt für Umweltschutz Stuttgart (AU) verfügt über eine eigene Messstation auf dem Dach ihrer Einrichtung im Stadtzentrum an der Ecke Tor-/Hauptstätter-Straße. Die Stadtstation befindet sich in 25 m Höhe und erhebt seit 1987 die wesentlichen meteorologischen Parameter (AU o.J.). Zudem ist sie seit der Stilllegung der DWD-Stadtmessstation die einzige Messstation in der Innenstadt, d.h. die Stadtklimaeffekte werden direkt mit erfasst. Die Messdaten haben jedoch kleinere Zeitlücken, sodass einige Daten fehlen. Sie werden halbstündlich erfasst und dem Projekt kostenfrei zur Verfügung gestellt.

(c) Karlsruher Institut für Technologie KIT

Die vom Karlsruher Institut für Technologie bereit gestellten Daten sind berechnete stündliche Wetterdaten (KIT 2012). Die Klimadaten wurden basierend auf GCM (Global Climate Model) mit dem regionalen Klimamodel COSMO-CLM heruntergerechnet. Im Modell wurden Topographie, Bodentyp, Hangneigung und die Bedeckung als Anfangsdaten und Randbedingungen gesetzt (KIT 2014). Datensätze zu 2 Zeiträume standen zur Verfügung:

- Einerseits für den 30-jährigen Zeitraum 1971-2000. Dieser Datensatz wird in diesem Projekt als aktueller Zustand des Klimas betrachtet.
- Andererseits für den 30-jährigen Zeitraum 2021- 2050. Dieser Datensatz liefert eine Prognose für den zukünftigen Klimawandel.

(d) LARSIM

Nach einem Vergleich aller Wetterdaten im Hinblick auf ihre zeitliche und räumliche Auflösung in Bericht 4 (Ali-Toudert und Ji 2013) wurde entschieden, die LARSIM-Wetterdaten der Hochwasserzentrale der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) als klimatische Randbedingung für alle hier geplanten numerischen Modellierung zu nutzen. Die LARSIM-Wetterdaten mit einer Auflösung von 1 km² basieren auf den Messdaten der

vorhandenen Wetterstationen im gesamten Baden-Württemberg ([Abbildung 4](#)). Die Wetterdaten für den Zeitraum 2003-2012 wurden stündlich aufgezeichnet ([LUBW 2013](#)).

(e) Universität Hohenheim - Uni H

Die Wetterwarte der Universität Stuttgart-Hohenheim erhebt seit 1972 Wetterdaten. Diese beschränken sich allerdings auf Angaben zu Lufttemperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer. Diese Daten werden dem Projekt kostenfrei zur Verfügung gestellt.

(f) WebGIS Server und Stadtklima Atlas

Der Verband Region Stuttgart (VRS) stellt auf seiner Webseite zahlreiche Karten mit klimarelevanten Daten zur Nutzung mit der geobasierten Software ArcGIS zur Verfügung ([Verband Region Stuttgart o.J.](#)). Im Gegensatz zu den oben genannten Datenquellen, die stündliche Daten liefern, wird hier die Information in Form von Stadtklimakarten entweder als Jahresmittelwerte oder für bestimmte Zeitpunkte dargestellt.

6.2. Auswahl der Wetterdaten

Die Wetterdaten aus den oben genannten unterschiedlichen Quellen sind teilweise räumlich, zeitlich oder aufgrund des Messumfangs nicht identisch. Daher ist es wichtig, die Vollständigkeit der meteorologischen Kenngrößen, die Qualität und die Kompatibilität der Daten zu prüfen. Ziel ist es, geeignete Klimadaten mit möglichst bester räumlicher und zeitlicher Auflösung für das Projekt festzulegen.

Um die Daten aus unterschiedlichen Quellen vergleichen und überprüfen zu können, werden alle Messstationen für möglichst naheliegende Lagen gegenübergestellt. In [Abbildung 6](#) zeigt ein Beispiel dieser Gegenüberstellung für Lufttemperatur und Globalstrahlung). Für KIT-Punkt 9 (Siehe [Abbildung 3](#)) werden die Daten von 1971-1980 als Datengrundlage genommen, für KIT-Punkt 15 hingegen wird der Zeitraum 2021-2030 gewählt. Die übrigen Datensätze haben zwecks Vergleichbarkeit den Zeitraum 2003-2013.

Die langjährigen Messdaten des DWD sind für den Zeitraum 2003 - 2012 verfügbar. Vier Wetterstationen sind in dem Untersuchungsgebiet vorhanden. Allerdings sind die Daten aufgrund der ausgeprägten Topografie Stuttgarts nicht einfach interpolierbar. Dies ist nur möglich anhand geeigneter Modelle wie es bei den LARSIM-Daten durchgeführt wurde. Die LARSIM-Daten sind durch geo-statistische Verfahren auf der Basis von Messdaten in einer Auflösung von 1 km interpoliert worden. In [Abbildung 6](#) wird der Punkt mit der Nr. 5170 in unmittelbarer Nähe zur Wetterstation Schnarrenberg für einen Vergleich gewählt. Die Lufttemperatur ähnelt den gemessenen Daten. Die Globalstrahlung ist jedoch niedriger als die Messdaten.

Die KIT-Daten sind atmosphärisch modellierte Daten und nicht Bias-korrigiert. Folglich ergibt sich daraus, dass z.B. die Lufttemperatur systematisch um mehrere Kelvin kälter erscheint und

der des Tagesverlauf der Lufttemperatur relativ glatter im Vergleich zu den Messdaten. Der Zeitraum der vorliegenden KIT-Daten unterscheidet sich von den übrigen Datensätzen von 2003-2012, sodass diese nicht dem Vergleichszweck dienen können. Die KIT-Daten sind für 2 Zeiträume vorhanden, als Ist-Zustand (1971 – 2000) und als Klimawandelprognose (2021-2050). Ihre Verwendung ist für dieses Projekt notwendig, denn andere Zukunftsprognosen sind nicht vorhanden.

Um die modellierten KIT-Klimadaten näher zur Realität zu bringen, werden sie mit Messdaten verglichen und darauf basierend korrigiert. Als Lösung wurden schließlich zwei Schritte für die Bereitstellung der Klimadaten gefolgert:

1. die KIT Daten mit einer 2.8 km Auflösung werden anhand einer bi-linearen Interpolation erstens auf 1 km Auflösung interpoliert, um diese auf die LARSIM-Auflösung zu bringen.
2. Die LARSIM-Daten (2003-2012) dienen dann als Messdaten für die stündliche Bias-Korrektur der KIT Daten. Dafür wurden die gleichen Korrektur-Annahmen verwendet wie die von KIT selbst für die tagesbasierte Bias-Korrektur angewendet wurden.

Für die bi-lineare Interpolation werden die Koordinaten der LARSIM-Punkte mit der Auflösung von 1 km genutzt. Damit bleiben die Rasterungen von LARSIM und die interpolierten KIT-Daten gleich. Als Algorithmus wird für jeden klimatischen Parameter ein durchschnittlicher Tagesverlauf (Tagesgang mit 24 Zeitpunkten) für den jeweiligen Monat mit LARSIM- und KIT-Daten identifiziert. Die beiden Tagesverläufe aus LARSIM- und KIT-Daten bilden für jeden Zeitpunkt einen Korrekturfaktor, für ein Monat insgesamt 24 Faktoren. Für das ganze Jahr werden jeweils $24 * 12 = 288$ Korrekturfaktoren für jeden klimatischen Parameter ermittelt. Mit diesem Algorithmus werden die Lufttemperatur, relative Feuchte, direkte und diffuse Strahlung, der Luftdruck, Niederschlag und Wind interpoliert.

Somit stehen zeitlich und räumlich gut aufgelöste Klimadaten für das Projekt zur Verfügung: KIT-Daten; 30 jähriges Set pro Zeitraum, 2 Zeiträume (aktuell, Zukunft), Auflösung 1 km, mit gesamter Abdeckung des Betrachtungsgebiet.

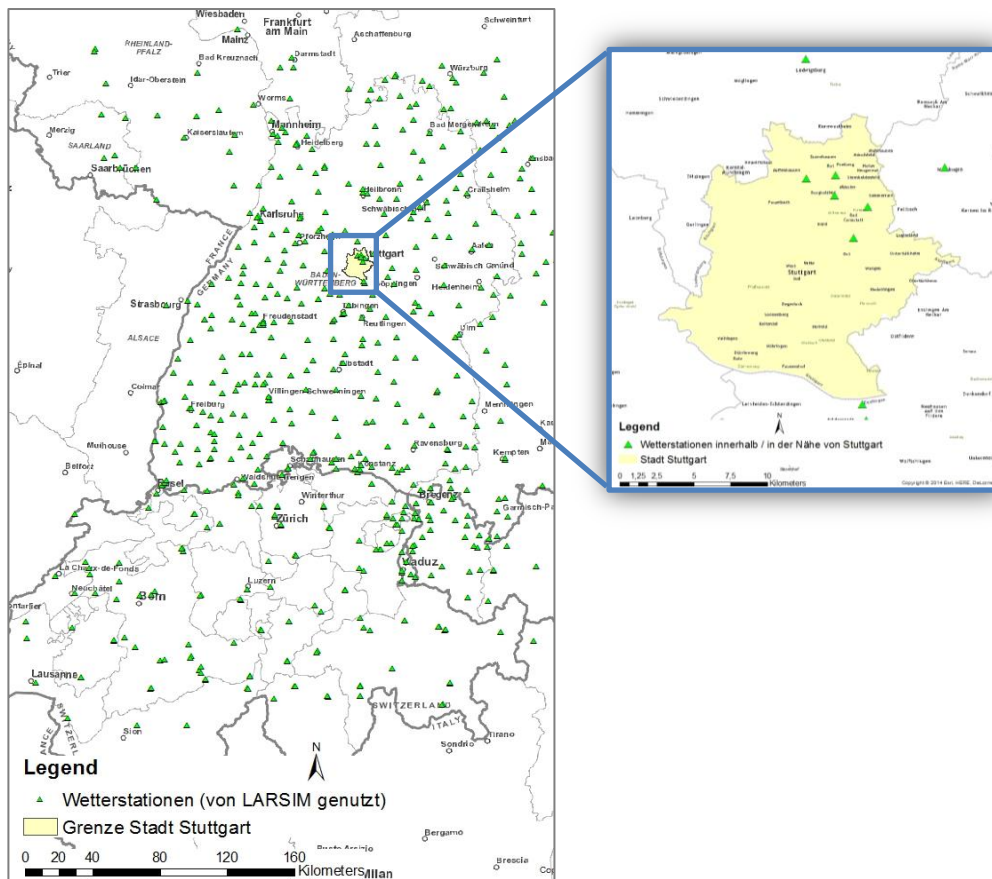


Abbildung 4: Wetterstationen als Grundlage für die Interpolation der Wetterdaten des LARSIM-Modells (LUBW 2013, ESRI GIS Server)

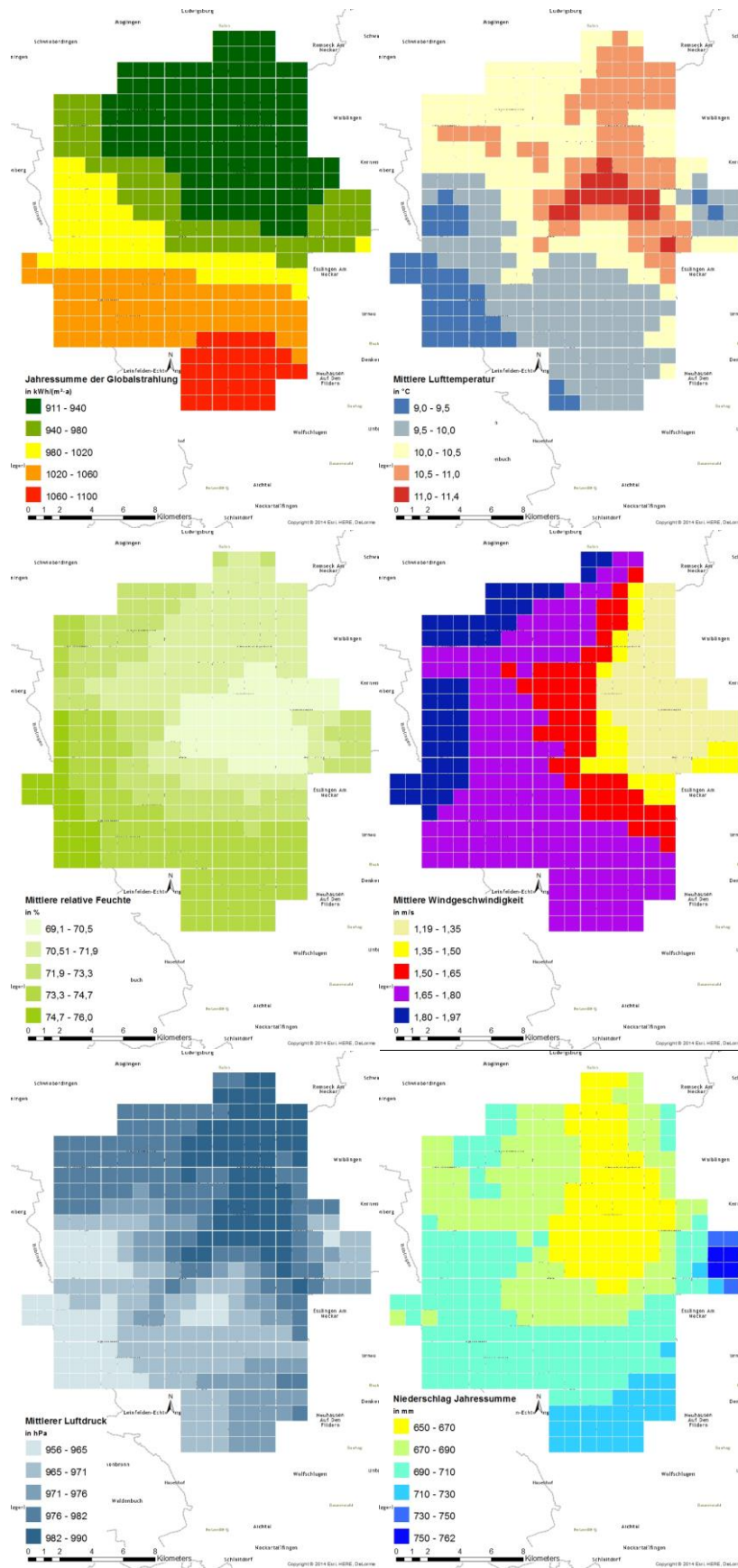
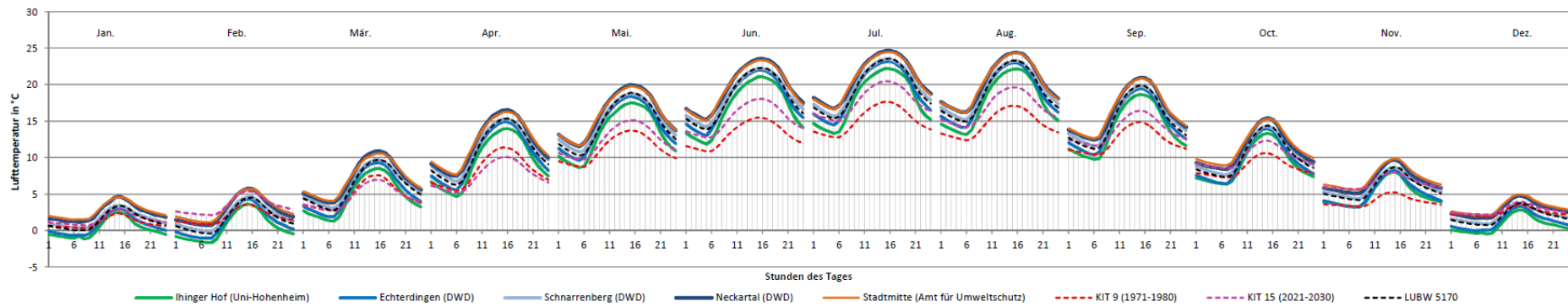


Abbildung 5: Räumliche Differenzierung nach LARSIM der Klimaparameter Globalstrahlung, Lufttemperatur, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit, Luftdruck und Niederschlag im Jahresdurchschnitt/Jahressumme (Daten: LUBW 2013, eigene Darstellung)

Lufttemperatur



Globalstrahlung

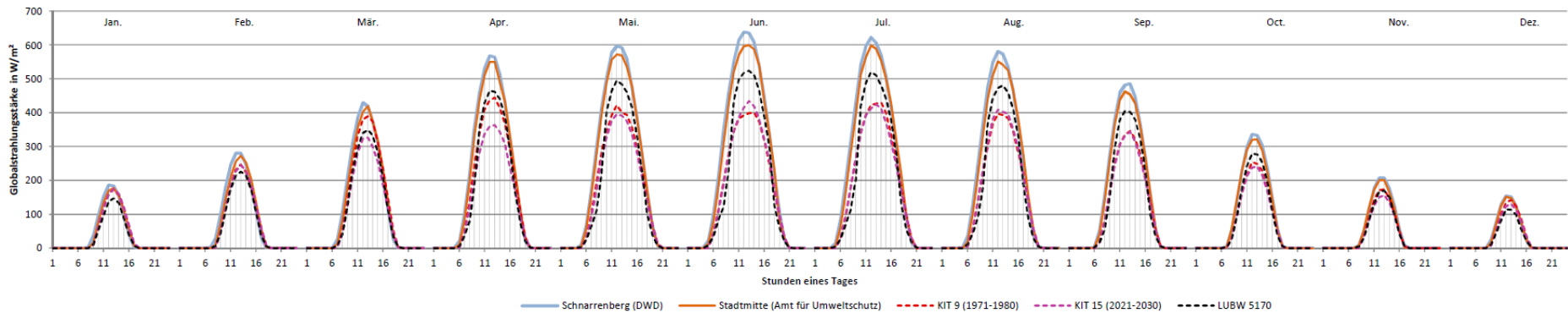


Abbildung 6: Mittlere monatliche Tagesgänge für Lufttemperatur und Globalstrahlung aus den verschiedenen Klimadatenquellen für Stuttgart

6.3. Berechnung fehlender Klimadaten

Für die späteren numerischen Modellierungen mit TEB und TRNSYS werden direkte Strahlung S , diffuse Strahlung D , sowie die Himmelstemperatur T_{sky} (Umformulierung der atmosphärischen Langwelligen Strahlungen A) als Eingaben benötigt. Diese sind in den Klimadatensätzen nicht vorhanden und müssen umgerechnet werden. Dies erfolgte basierend auf die Globalstrahlung in TRNSYS-Studio anhand der Types 16 und 69.

Ferner werden für die Modellierung des Urban Canyon Mikroklimas im TEB Modell die Eingaben zur Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit auf einer bestimmten Höhe über Dachniveau benötigt (Siehe [Meteo France 2012](#)) und nicht auf 2 m bzw. 10 m Höhe wie bei gemessenen bzw. berechneten Klimadaten üblich vorhanden ist. Grund dafür ist das TEB-Konzept, welches in dem Online-Modus, i. d. R. mit dem atmosphärischen Klimamodell MESO-NH gekoppelt wird. In diesem Projekt wird TEB allerdings im Offline-Modus benutzt, mit den Klimadaten als Eingaben. Deshalb muss eine Höhenverschiebung dieser Daten vorgenommen werden. Dies erfolgt anhand von TEB mit mehreren Iterationen (i. d. R. 3 Iterationen). Die resultierenden Daten werden als Forcing Daten genannt, während die Daten auf 2 m und 10 m als Referenzdaten genannt und für Vergleichszwecke verwendet werden; nämlich für die Bildung der Temperaturdifferenz $T_{\text{can}} - T_{\text{ref}}$ um die Erwärmung bzw. Abkühlung der Canyons auf 2 m Höhe zu quantifizieren.

7. STADT- UND GEBÄUDEDATENLAGE

Für die Bearbeitung des Forschungsprojektes werden verschiedene Informationsquellen in digitaler Form zur Stadt Stuttgart herangezogen, welche in [Abbildung 7](#) und [Abbildung 8](#) und [Tabelle 1](#) beispielhaft dargestellt sind. Diese beinhalten einen 2D-Plan, einen 3D-Plan, eine Baublock-Karte, eine Karte zu Gasemissionen aus dem Verkehr (NO₂ und CO₂). Der Stadtklimaatlas und Energieatlas standen auch zur Verfügung sowie eine digitale Datenbank mit statistischen Informationen zu den einzelnen Gebäuden (wie z.B. Gebäudevolumen, Baualter, Gebäudenutzung, Lage, usw.) und zu den Baublöcken wie z.B. Wohndichte. Ohne klaren Hinweis in der Literatur über einen möglichen Zusammenhang zwischen Wohndichte und anthropogener Abwärme wurde die Wohndichte für die Ermittlung der Abwärme nicht genutzt. Das Geländemodell steht zwar zur Verfügung, wird allerdings nicht benutzt, denn die Gebäudehöhen sind in den 3D-Plan enthalten. Auch der Flächennutzungsplan wurde in den früheren Bearbeitungsphasen des Projektes für die Ermittlung der Mikroklimazonen benutzt, wurde allerdings für die spätere Bearbeitung nicht verwendet. Dieses Material könnte jedoch für Validierungszwecke der Ergebnisse zum Nutzen kommen.

Tabelle 1: Anzahl der Gebäude nach ihrer Nutzung (statistische Datenbank)

Gebäudenutzung	Anzahl der Gebäude	Gebäudenutzung	Anzahl der Gebäude
Wohnhaus	88858	Tankstellengebäude	107
Garage	41769	Zoogebäude	88
Überdachung	12898	Hochschulgebäude	86
Betriebsgebäude	5804	Friedhofsgebäude	85
Schuppen	5308	Sporthalle	84
Wohn- und Geschäftshaus	5122	Scheuer und Stall	71
Lagergebäude	4468	Kiosk	66
Tiefgarage	3737	Schutzhütte	56
Geschäftshaus	3447	Wohn- und Verwaltungsgebäude	55
Gartenhaus	3082	Kläranlagengebäude	48
Bürogebäude	2792	Museumsgebäude	45
Unterkellerung	1750	Wasserbehälter	43
Wohn- und Bürogebäude	953	Feuerwehrgebäude	40
Wartehalle	777	Schutzbunker	38
Schulgebäude	738	Polizeigebäude	35
Stall	733	Turm	35
Umformer	721	Badegebäude	33
Werkstattgebäude	659	Wohn- und Wirtschaftsgebäude	32
Sportgebäude	624	Hallenbad	32
Wohn- und Betriebsgebäude	619	Bibliotheksgebäude	22
Fabrikgebäude	522	Jugendherberge	18
Kindergarten	459	Vergnügungsstätte	16
Gewächshaus	435	Empfangsgebäude	15
Gaststätte	390	Kapelle	12
Scheuer	386	Post	11
Heim	376	Schleusengebäude	11
Verwaltungsgebäude	373	Sendeturm	10
Kirche	370	Wochenendhaus	8
Gemeindehaus	324	Aussichtsturm	7
Hotel	294	Gerichtsgebäude	6
Krankenhausgebäude	238	Rathaus	6
Wirtschaftsgebäude	232	Justizvollzugsanstaltsgeb.	6
Veranstaltungsgebäude	227	Campingplatzgebäude	5
Altersheim	221	Kurmittelgebäude	3
Forschungsinstitut	188	Forsthaus	3
Energieversorgungsgebäude	130	Wasserturm	1
Toilettengebäude	111	Schloß	1
Parkhaus	108	Müllverbrennungsgebäude	1

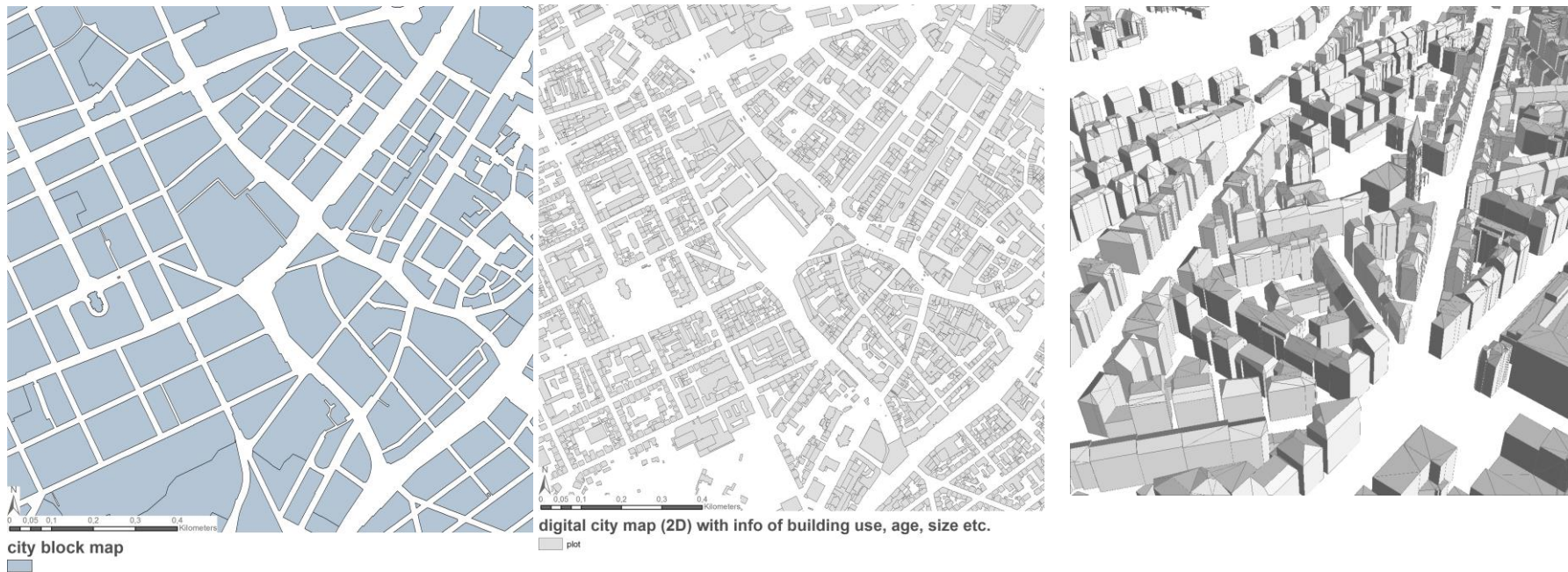


Abbildung 7: Ausschnitt aus 1) der Baublock-Karte (links, eigene Darstellung), 2) dem 2D-Stadtplan (Mitte) und 3) dem 3D-Stadtplan (rechts) Stuttgarts

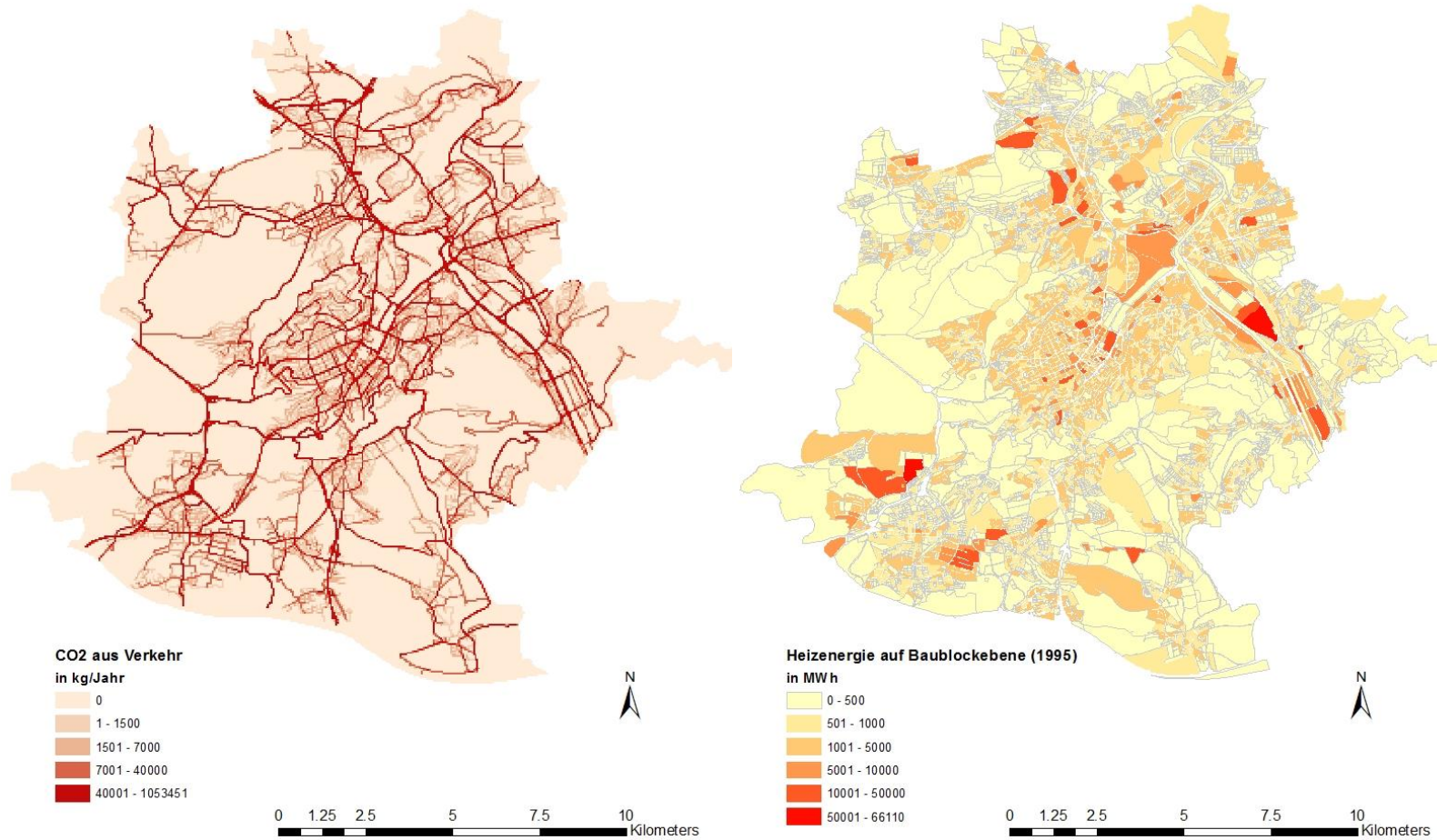


Abbildung 8: Abwärme aus dem Verkehr und Energieatlas der Stadt Stuttgart

8. STADT- UND GEBÄUDEPARAMETRISIERUNG

Ziel eine systematische Untersuchung des gesamten Baubestandes Stuttgarts in Bezug auf Stadtklima und Innenraumenergie durchzuführen, bringt die Frage mit sich: Wie kann die Stadt für diesen Zweck beschrieben werden? In der Tat ist eine Modellierung der Einzelgebäude mit ihren realen geometrischen und baukonstruktiven Eigenschaften nicht möglich und auch nicht zielführend, denn einerseits ist das technisch beinahe unmöglich und andererseits wäre eine Übertragbarkeit solcher Ergebnisse nicht gewährleistet. Stattdessen ist eine generische Beschreibung der Stadtstruktur und Einzelgebäude nach ihren thermisch-relevanten Eigenschaften im Zusammenhang mit einem 3-stufigen Versuchsplan effizienter und zugleich zeitsparender. Die [Tabelle 2](#) listet die für die numerischen Modellierungen mit TEB und TRNSYS notwendigen Parameter inklusive ihre Informationsquellen und räumliche Bezugsgröße auf. Die ID-Kennzeichnung dient der Einordnung bei den kodierten Versuchsplänen (Siehe [Kapitel 9](#)). Diese Parameter werden hierunter näher erläutert.

8.1. Die Gebäudekubatur: Kompaktheit und Größe

Thermisch relevant ist die Kompaktheit eines Gebäudes, welche den Wärmeaustausch des Innenraumklimas (Wärmegewinn oder Wärmeverlust) mit der Außenwelt durch die Gebäudehülle bestimmt. Zusätzlich ist das Gebäudevolumen als Größenzahl thermisch relevant. Beide, Kompaktheit und Volumen wurden als Hauptindikatoren der Gebäudekubatur ausgewählt.

Das A/V-Verhältnis (Gesamtgebäudeoberfläche durch Gebäudevolumen) wird oft für die Beschreibung der Gebäudekompaktheit benutzt. Allerdings ist das A/V-Verhältnis vom Gebäudevolumen stark abhängig. Es ist deswegen nicht möglich die gleichen Stufen von A/V-Verhältnis für jede Stufe eines Gebäudevolumens im Versuchsplan zu nehmen und dies wäre erforderlich, denn bei der Versuchsplanung müssen alle Parameter äquidistant sein. Aus diesem Grunde wurde statt das A/V Verhältnis der Gebäudeformkoeffizient für die Beschreibung der Gebäudekompaktheit benutzt, da dieser vom Volumen unabhängig ist. Die Bodenplatte wurde halbiert, da sie keinen direkten Kontakt zur Außenluft hat. Damit wird das Gebäudevolumen auf 5.5 Flächen statt 6 Flächen reduziert.

$$\text{Formkoeffizienz} = \frac{\sqrt[5]{(4\pi)^5} \sqrt{a}}{\sqrt[3]{3v}}$$

a ist Gebäudeoberflächengröße und v ist Gebäudevolumen

Für die Gebäudekubatur wurden die Gebäudevolumen und Gebäudeoberflächengröße mit Hilfe von ArcGIS ermittelt. Der Formkoeffizient wurde dadurch ermittelt.

8.2. Abwärme aus dem Verkehr

Für den Verkehr wurde eine Verkehrsemissionskarte von der Stadt Stuttgart zur Verfügung gestellt. Die Abwärme wurde wie folgt umgerechnet.

Benzin und Diesel haben unterschiedliche Heizwert und Emissionsfaktoren von CO₂. Für die Umrechnung wurden die Verkehrsmittel von Benzin und Diesel getrennt betrachtet. Dafür wurden der Anteil von Benzin und Diesel, sowie der Anteil der Pkw, Lkw und öffentlichen Verkehrs in Stuttgart (Görres 2010), Anteil der Kraftwagenbestand (Büringer und Schmidtmeier 2012) nach unterschiedlichen Abgasnormen im ganzen Land Baden-Württemberg aufgrund der fehlenden Daten in Stuttgart verwendet. Mit den Emissionsgrenzwerten in Euroabgasnormen wurden das CO₂ in die Menge von Benzin- bzw. Dieserverbrauch umgerechnet. Für die weitere Umrechnung auf Abwärme wurden die Wirkungsgrade der Benzin- und Dieselfahrzeuge und die Heizwerte berücksichtigt.

8.3. Die Bebauungsdichte: Höhe-Breite Verhältnis H/W

Als Indikator für die Bebauungsdichte wird die H/W Ratio des Straßenraums gewählt. Dabei wird die Variable H (Höhe) aus dem Mittelwert der Gebäudehöhe eines Baublocks ermittelt. Die Breite der Straße (Variable W) hingegen wird aus der digitalen Baublock-Karte und den Gebäudedaten mithilfe von nicht-bebauten-Flächengrößen und dem Perimeter von Baublöcken und Gebäuden auf Baublockebene errechnet. Das Rechenverfahren wurde im Zwischenbericht Nr. 4 erläutert.

8.4. Die Gebäudenutzung

Die Gebäudenutzung wurde in 3 Typen differenziert: 1) Wohnen (TYP_W), 2), nicht Wohnen „konventionell“ (TYP_NWK) wie Büro- oder Gewerbebauten und nicht Wohnen „Sondernutzung“ wie Sporthallen). Diese 3 Nutzungstypen wurden aufgrund der in TRNSYS festzulegenden Einstellungen zur Raumkonditionierung (Heizung, Lüftung, Beleuchtung, innere Wärmequellen, usw.) ausgewählt. Die Werte basieren auf der EnEV und DIN 18599 Vorschriften. (Siehe Tabelle 8). Die tatsächliche Gebäudenutzung ist in der Datenbank des Stadtmessungsamts für jedes einzelne Gebäude vorhanden (Tabelle 1). Diese sind zwar sehr differenziert, z. T. allerdings nicht leicht zu gruppieren. Eine Mischnutzung wurde deshalb bei der späteren Übertragung der Ergebnisse anhand der mathematischen polynomialen Modelle auch noch berücksichtigt.

Tabelle 2: Gewählte Stadt- und Gebäudeparameter für TEB und TRNSYS- Simulationen

ID	Parameter	Quelle	Kommentar	Input für		räumliche Bezugsgröße
				TEB	TRNSYS	
V	beheiztes Volumen im Gebäude	3D digitale Stadtkarte	GIS Ermittlung des Gebäudevolumens	-	X	Gebäude
S	Kompaktheit des Gebäudes (Form-Koeffizient)	3D digitale Stadtkarte	GIS Ermittlung des Gebäudevolumens und der Oberfläche	-	X	Gebäude
A	Bebauungsdichte (Höhe-Breite-Verhältnis H/W)	3D digitale Stadtkarte und Baublockkarte	GIS Ermittlung der Gebäudeabstände und -höhen	X	X	Baublock
W	Fensterflächenanteil	nicht vorhanden	Geschätzt aus der Gebäudenutzung und Gebäudetypologie Deutschlands mithilfe von 2D und 3D digitalen Stadtkarten	-	X	Gebäude
U	Wärmedämmqualität (U-Wert)	nicht vorhanden	Baualter und Renovierungszeit aus der 2D digitalen Stadtkarte	X	X	Baublock für TEB, Gebäude für TRNSYS
T	Gebäudenutzung	2D digitale Stadtkarte	gruppiert als Wohnen, nicht Wohnen "konventionell" und nicht Wohnen "Sondernutzung"	-	X	Gebäude
F	Verkehrsabwärme	Verkehrsmodell von Stuttgart	Umrechnung aus CO2 Emission	X	-	50 m Raster
H	Durchschnittliche Gebäudehöhe	3D digitale Stadtkarte und Baublockkarte	GIS Ermittlung der Gebäudehöhen	X	-	Baublock
B	Bebaute Fläche zur Grundfläche	3D digitale Stadtkarte und Baublockkarte	GIS Ermittlung der Gebäudegrundfläche und Baublockflächengröße	X	-	Baublock
D	Wohndichte	statistische Daten	nicht verwendet	-	-	Baublock
O	Gebäude- und Straßenausrichtung	-	nicht berücksichtigt. Gebäudeöffnungen in allen Himmelsrichtungen angenommen	-	-	-

8.5. Altersklasse und Wärmedämmqualität der Gebäude (UWert)

Das statistische Amt Stuttgarts übermittelte Daten über die Altersklasse der Gebäude, gegeben durch das Baujahr und Baurenovierung (angenommen auch Energetische Sanierung), wenn zutreffend. Die räumliche Darstellung der jeweiligen Altersklasse wird in Abbildung 13 dargestellt. Die Altersklasse wird in diesem Projekt für die Ermittlung der Wärmedämmqualität der Gebäude und zwar mit Bezug auf die Gebäudetypologie Deutschlands gebraucht (IWU). Diese Einschätzung ist gewiss approximativ; insbesondere weil die Wärmedämmqualität eine erhebliche Auswirkung auf das thermische Verhalten der Gebäude hat. Allerdings sind keine besseren Daten vorhanden. Trotzdem besteht die Möglichkeit, durch die hier verwendete systematisch koordinierte Versuchsplanung die Ergebnisse zum Heizen und Kühlen nachträglich zu korrigieren, falls neue Informationen zur Wärmedämmqualität eines Gebäudes vorhanden sind.

8.6. Fensterflächenanteil der Gebäude

Der 3D-Stadtplan beinhaltet keine Informationen über Fenster. Der Fensterflächenanteil wurde nach dem Gebäudetypologie-Katalog Deutschlands (IWU 2005) geschätzt. Dabei wurde der Fensterflächenanteil nach Wohn-Typ definiert (Einfamilien-, Reihen- Mehrfamilien- oder großes Mehrfamilienhaus) und Baualtersklasse (Nach Baujahr). Der Fensterflächenanteil variiert bei Wohngebäude je nach Wohn-Typ zwischen 11 % und 19 %. Für Nicht-Wohngebäude wurde 30 % angenommen, da hier keine Informationen vorliegen.

8.7. Durchschnittliche Gebäudehöhe

In den Gebäudedaten werden die Gebäudevolumen, Grundfläche, Anzahl der Obergeschosse und die Geschossfläche für einzelne Gebäude angegeben. Die Gebäudehöhe kann anhand des Gebäudevolumens durch die Grundfläche, Geschossfläche durch die Grundfläche mal die Geschosshöhe oder Anzahl der Geschosse mal die Geschosshöhe ermittelt werden. Die Geschosshöhe wird durch eine Korrelationsanalyse entsprechend dem jeweiligen Gebäudetyp (Gebäudenutzung) ermittelt. Für die übrigen Gebäudetypen ist die Korrelation der Geschoszahl und Gebäudehöhe nicht signifikant, somit lässt sich in diesen speziellen Fällen die Geschosshöhe nicht auf diese Weise errechnen. Durch die Anwendung der drei oben genannten Möglichkeiten, zur Ermittlung der Gebäudehöhe, kann die Höhe von bis zu 90% der Gebäude ermittelt werden.

Für TRNSYS wurde die Lichthöhe bzw. Stockwerkhöhe nach dem Gebäudetypologie-Katalog Deutschlands (IWU 2005) benutzt, um die Anzahl der Stockwerke und somit auch die Gesamtnutzfläche pro Gebäude ermitteln zu können. Angenommen wurde 3 m für Wohngebäude und 3.8 m für nicht Wohngebäude. Dies ist notwendig, um die in TRNSYS ausgegebenen absoluten Nutzenergiekennwerte (in kJ/h) in spezifischen Nutzenergiebedarf umzurechnen (kWh/m²a). Der letztere ist flächenbezogen und ermöglicht eine energetische Vergleichbarkeit zwischen den Gebäuden.

8.8. Bezugsgröße: Baublock und Einzelgebäude

Grundsätzlich werden die Parameter auf Gebäudeebene definiert, so dass die Energieergebnisse auf dieser Maßstabebene auch darstellbar sind. Aus Datenschutzgründen werden allerdings die Endergebnisse auf Baublockebene grafisch dargestellt. Abbildung 9 zeigt beispielhaft die ermittelte Kompaktheit anhand des Form-Koeffizienten auf Gebäude- und Baublockebene.

Die Baublöcke werden aus der Baublockkarte übernommen. In Einzelfällen werden diese überarbeitet, um die Hintergrundraasterung der Klimadaten für die späteren Berechnungen zu berücksichtigen.

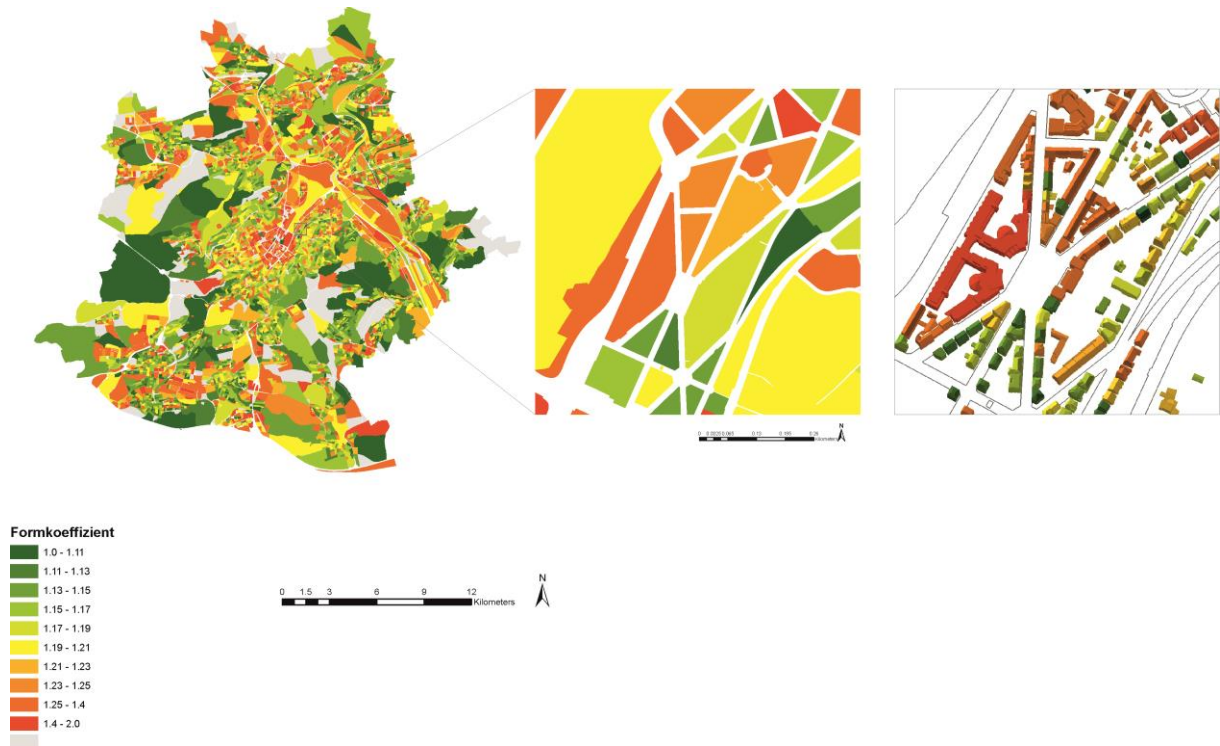
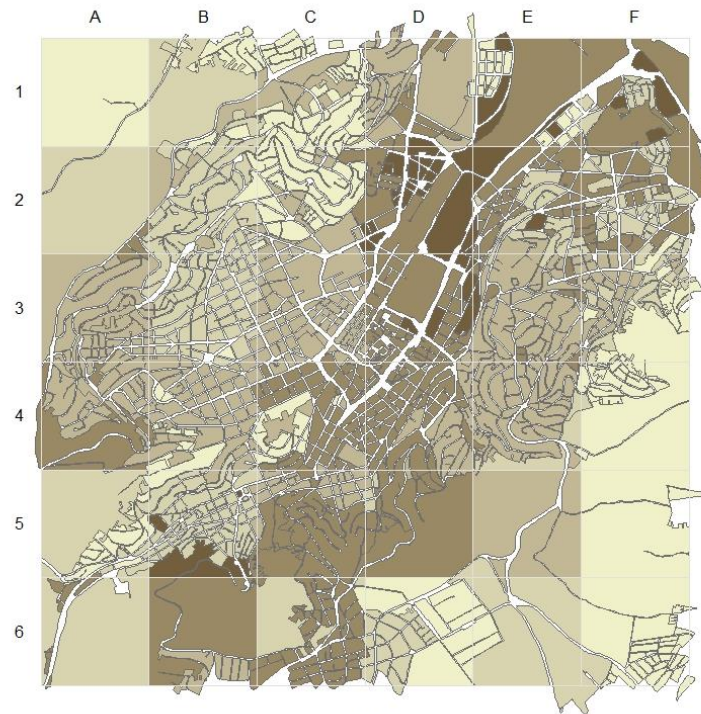
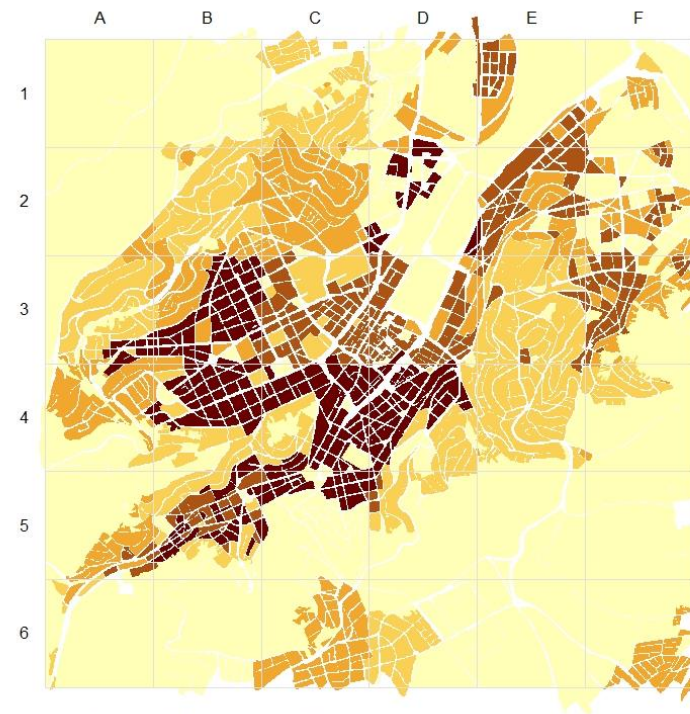
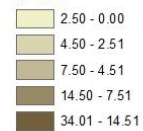


Abbildung 9: Die skalenerübergreifende Betrachtung der Projektziele am Beispiel der Kompaktheit (Form-Koeffizient)



Verkehrsabwärme Umrechnung aus CO2 Emission
in W/m^2



Höhe-Breite-Verhältnis der Straßencanyons

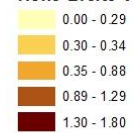
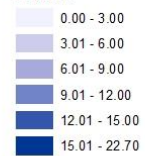


Abbildung 10: räumliche Verteilung der Verkehrsabwärme (links) und der Bebauungsdichte H/W (rechts)



**Durchschnittliche Gebäudehöhe
in Meter**



**Bebaute Fläche pro Grundstücksfläche
in Prozent**

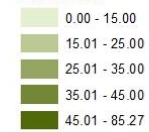


Abbildung 11: Räumliche Verteilung der durchschnittlichen Gebäudehöhe (links) und der Bebauten Fläche pro Grundstücksfläche (rechts)

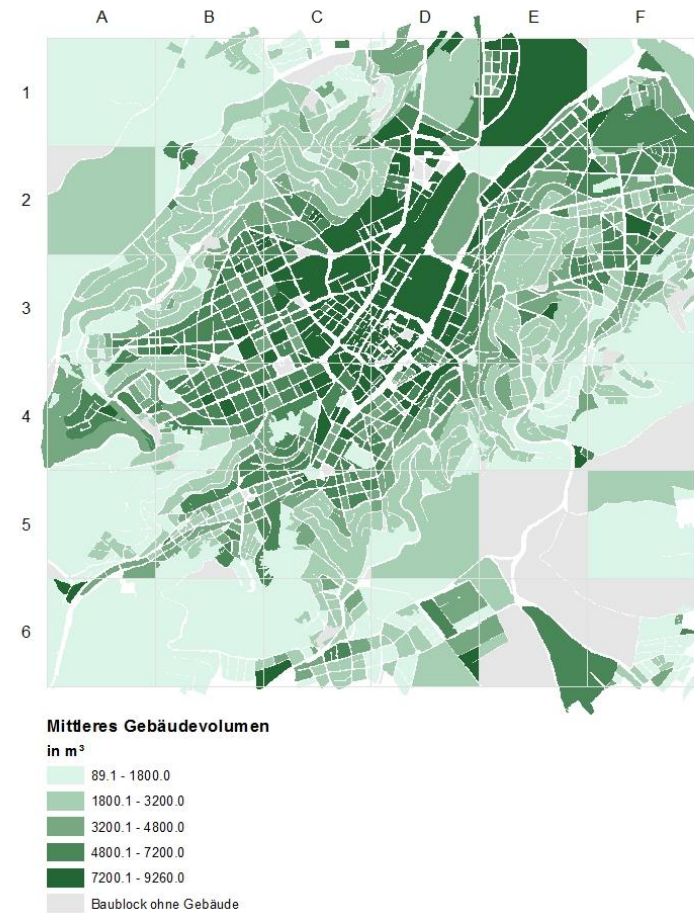
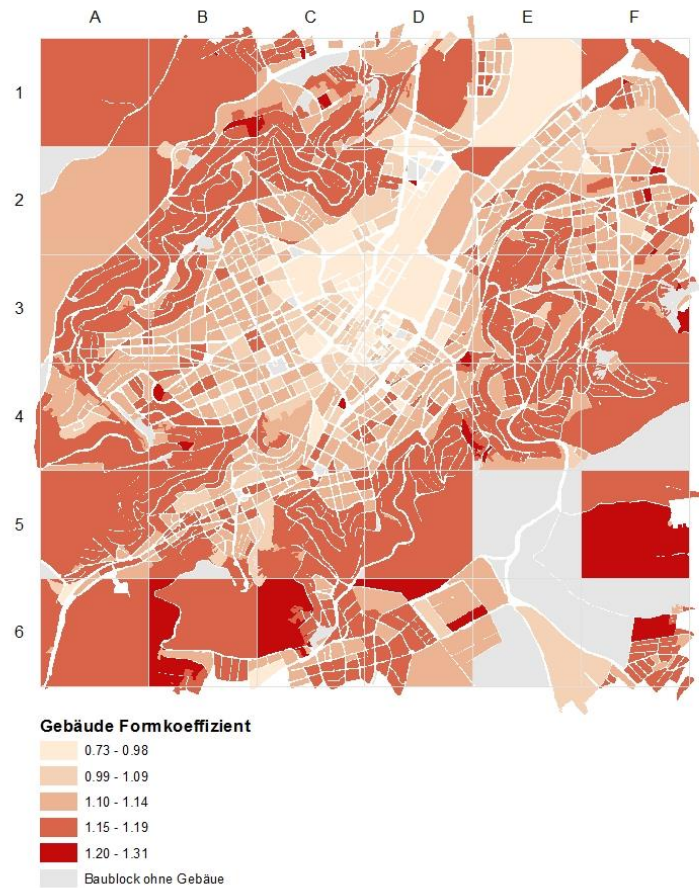


Abbildung 12: Räumliche Verteilung der Gebäudekompaktheit (Form-Koeffizient, links) und des mittleren Gebäudevolumens (rechts)

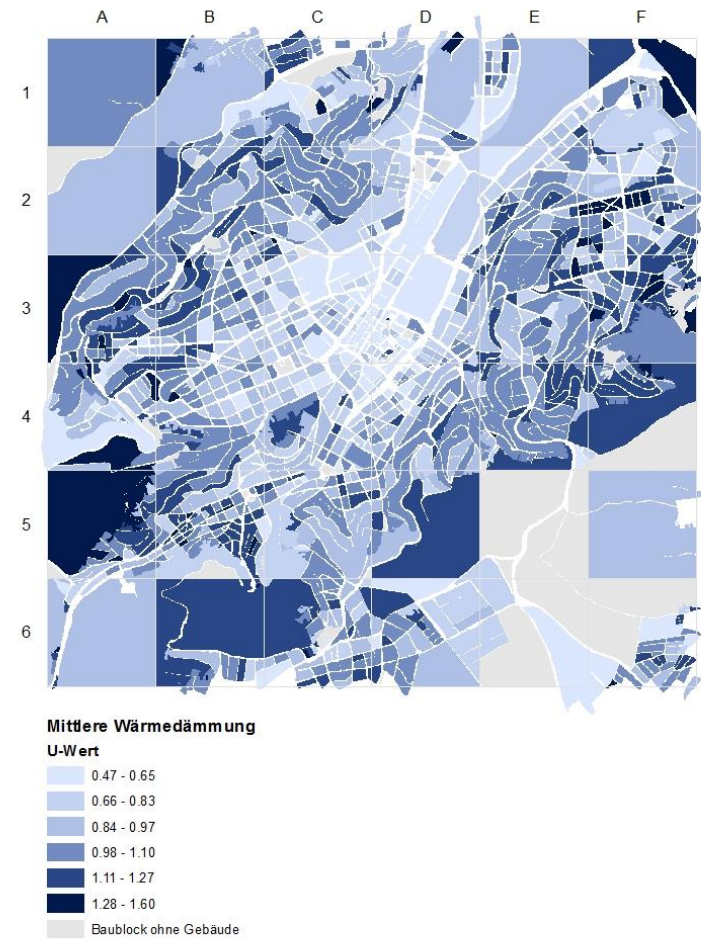
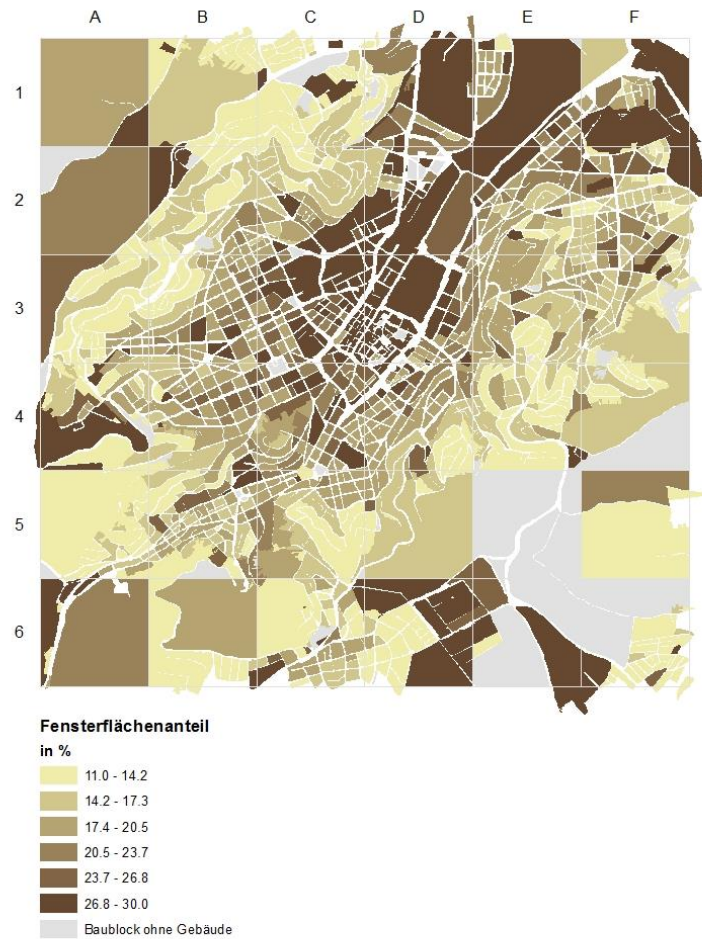


Abbildung 13: Räumliche Verteilung des Fensterflächenanteils (links) und des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U-Wert (rechts)

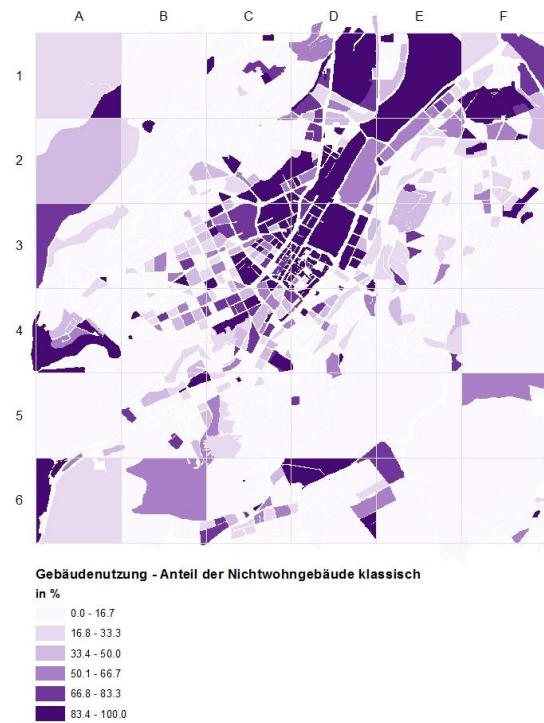


Abbildung 14: Räumliche Verteilung nach Gebäudenutzung Wohnen (links), nicht Wohnen konventionell (Mitte) und nicht Wohnen Sonderfälle (rechts)

9. SIMULATIONSPLÄNE UND -EINSTELLUNGEN

Aufgrund der Größe des Betrachtungsgebietes, sowie die skalenübergreifende Behandlung des Themas und die umfangreiche Beschreibung der Stadt bis hin zum Einzelgebäude ist der Zeitaufwand für die gesamten Simulationen erheblich gewesen. [Abbildung 15](#) zeigt den Zeitaufwand im Falle einer systematischen Modellierung aller geplanten Versuche.

Im ersten Teil der Stadtklimaprognose mit TEB wurden folgende Simulationen durchgeführt:

1. Vorbereitung der Klimadaten für TEB (Forcing-Daten auf Dachebene). Dieser Schritt wurde systematisch für die 340 vorhandenen Klimadateien für 30 Jahre und 2 Zeiträume durchgeführt. Dabei dauerten die Simulationen mehrere Wochen auf mehreren Rechnern (mit zeitgemäßer CPU).
2. Darauffolgend wurden die tatsächlichen TEB Berechnungen für 10 Jahre und für ein kleineres Stadtgebiet berechnet (siehe [Abbildung 17](#)), bestehend aus 36 Klimadateien (mal 3 aufgrund einer erweiterten Differenzierung nach Bebauungsdichte locker; mittel und dicht, dies ergibt 99 Klimadaten pro Zeitraum wie in [Abbildung 18](#) zu sehen ist). Auch hier wurden die 2 Zeiträume (Aktuell, Zukunft) berechnet.

Mit derselben Systematik als in 1) oben, würden die TRNSYS-Simulationen Jahre lang dauern ([Abbildung 15](#)). Um die Rechenzeit im Teil 2 bzgl. der Ermittlung der Energiekennwerte mit TRNSYS zu kürzen, gleichzeitig die Repräsentativität der Simulationen beizubehalten, wurden die TRNSYS-Simulationen mit folgenden Randbedingungen durchgeführt:

1. 10 Jahre pro Zeitraum statt 30 Jahre (1991-2000 und 2041-2050)
2. Für drei repräsentative Klimadateien, definiert mit einer statistischen Clusteranalyse der 99 untersuchten Klimadateien im TEIL 1 (siehe [Abbildung 15](#)).
3. Teil-faktorieller Versuchsplan (siehe [Abbildung 16](#)). Dies reduziert die Fälle auf ein Drittel, nämlich 243 statt 729. Somit beträgt das gesamte Simulationsset 4374 Fälle.
4. Das Betrachtungsgebiet wurde auch auf das bebaute Kerngebiet Stuttgarts und nicht mehr auf den gesamten Großraum (36 statt 340 Zellen) wie in [Abbildung 17](#) dargestellt ist, reduziert. Alle späteren Ergebnisse sowohl für die Stadtklimaeffekte (TEB) als die Energiekennwerte (TRNSYS) beziehen sich einheitlich auf dieses Gebiet.

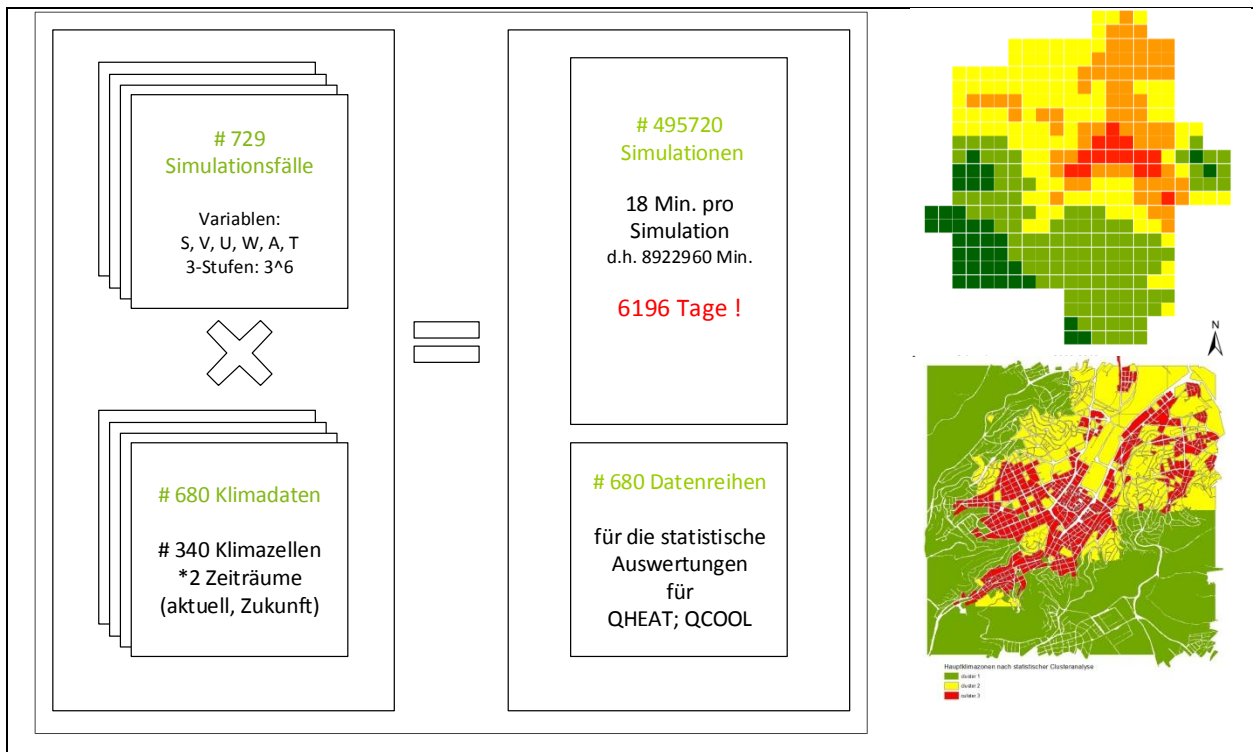


Abbildung 15: Umfang der Berechnungen mit TRNSYS und deren Zeitaufwand (links) und die 3 repräsentativen Klimadaten (rechts unten) aus der Cluster-analyse für die TRNSYS Simulationen

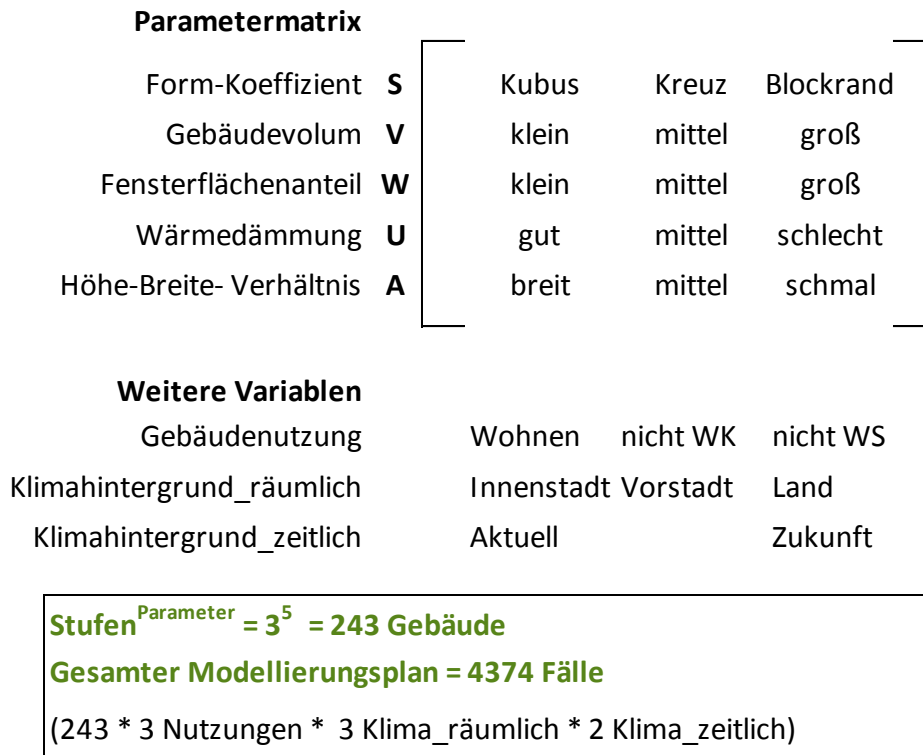


Abbildung 16: Versuchsplan für die TRNSYS-Simulationen

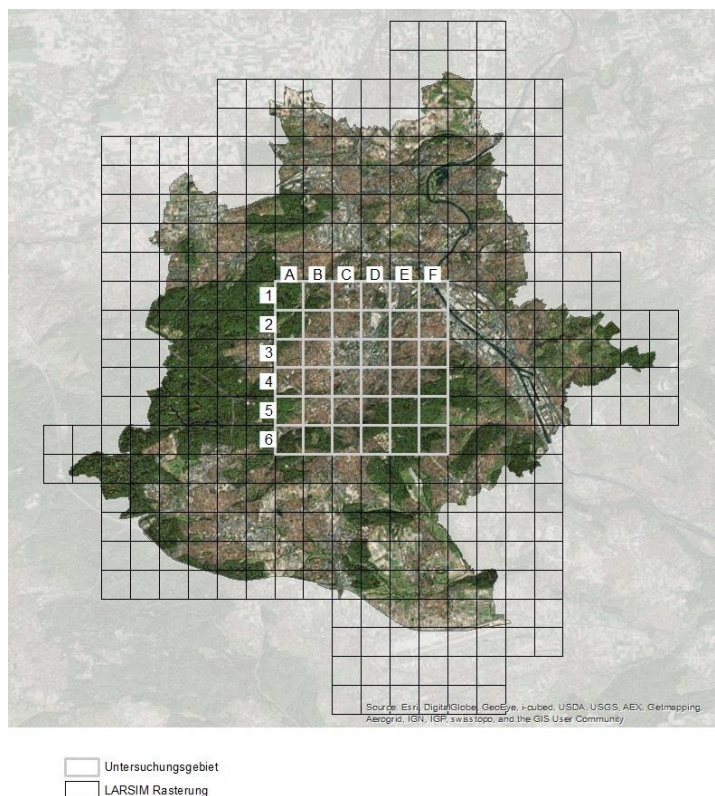


Abbildung 17: Reduziertes Untersuchungsgebiet für die Gebäudeenergiemodellierung (A bis F, 1 bis 6)

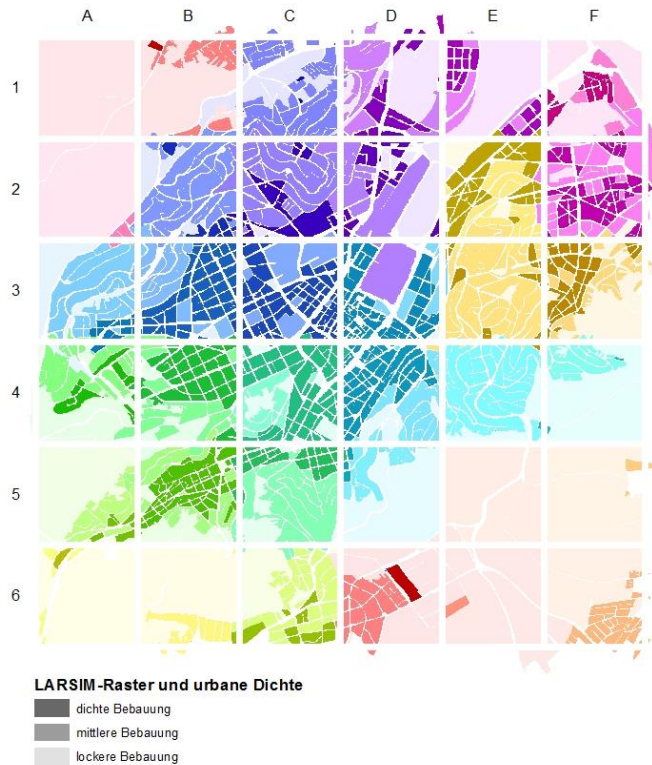


Abbildung 18: Differenzierung der verschiedenen Stadtstrukturen nach Dichte pro Zelle, gekennzeichnet mit einem dunklen, mittleren und hellen Ton mit der derselben Farbe in jeder Zelle

Die [Tabelle 3](#) zeigt das Protokoll der TEB-Eingaben. Die verschiedenen Fälle wurden anhand einer externen Parametertabelle (batch file) generiert. Die [Abbildung 19](#) zeigt die mit TRNSYS3D in Sketch-Up gezeichneten generischen Gebäudeformen inklusive ihrer bebauten Umgebung. Basierend auf einer Matrix für Form-Koeffizient und Gebäudevolumen-Werte in 3 äquidistanten Stufen (siehe [Tabelle 7](#)) wurden drei Grundformen definiert: ein Kubus-, kreuz- und Blockrandförmige Gebäude. Städtisch wurden die Abständen zu der Nachbarbebauung auf einem Höhe-Breite-Verhältnis von 0,2, 1,0 und 1,8 gesetzt.

Voraussetzung bei der Definition der verschiedenen Wertbereiche und Stufen ist ihre Repräsentanz für die Stadt Stuttgart, in dem sie alle vorkommenden Fälle mit beinhalten (siehe [Tabelle 6](#)). Und so wurde auch der U-Wert festgelegt. Nach [Tabelle 4](#) wurde [Abbildung 20](#) erstellt, welche die repräsentativen Wärmedurchgangskoeffizienten für alle Gebäude nach dem Gebäudetypologie-Katalog Deutschlands abgedeckt. Für nicht-Wohngebäude wurden dieselben Annahmen nach Baujahr gemacht. In TEB und in TRNSYS müssen die Außenbauteile (Außenwände, Decken, Bodenplatten) mit ihren thermischen Eigenschaften definiert. Diese wurden systematisch als 3 schichtige Bauteile mit den nach [Tabelle 5](#) festgelegt abhängig von U-Wert. Schließlich werden in [Tabelle 8](#) die in TRNSYS festgelegten Steuerungen für Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung und Innere Wärmequellen aufgelistet.

Die [Abbildung 21](#) zeigt die Oberfläche eine TEB-Projektes unter TRNSYS-Studio und [Abbildung 22](#) das Beispiel einen Simulationslauf für TEB Berechnung auf Stundenbasis. Angezeigt werden die verschiedenen Lufttemperaturen und deren Differenz (T_{forcing} auf Dachniveau, T_{can} auf 2 m Höhe im Canyon und T_{ref} als Referenztemperatur auf 2 m außerhalb der Stadt). Positive Werte für $T_{\text{can}} - T_{\text{ref}}$ weisen auf eine Erwärmung der Canyon Luft hin. Die [Abbildung 23](#) zeigt die Oberfläche eines TRNSYS-Projektes unter TRNSYS-Studio und [Abbildung 24](#) das Beispiel eines simulationslauf mit Darstellung der Innenraumtemperaturen und Energiebedarfskennwerte für Heizen und Kühlen auf Stundenbasis.

Tabelle 3: Protokoll der TEB-Eingaben

<pre> * Model "Type201_TEB_Model" (Type 201) UNIT 14 TYPE 201 Type201_TEB_Model PARAMETERS 64 2 ! 1 Mode 0 ! 2 Read material properties from file 0 ! 3 Anthropogenic heat flux as input wall_o_hor ! 4 Wall surface over horizontal surface 0.1 ! 5 Road albedo 0.94 ! 6 Road emissivity 0.2 ! 7 Wall albedo 0.94 ! 8 Wall emissivity 0.2 ! 9 Roof albedo 0.94 ! 10 Roof emissivity Troad_deep ! 11 Road deep temperature Tstart_surf ! 12 Road surface temperature 297.15 ! 13 Building inside air temperature Tstart_surf ! 14 Wall surface temperature Tstart_surf ! 15 Roof surface temperature 3 ! 16 Number of road layer HC_road1 ! 17 (Volumetric) Heat capacity of road layer -1 TC_road1 ! 18 Thermal conductivity of road layer -1 D_road1 ! 19 Thickness of road layer -1 HC_road2 ! 20 (Volumetric) Heat capacity of road layer -2 TC_road2 ! 21 Thermal conductivity of road layer -2 D_road2 ! 22 Thickness of road layer -2 HC_road3 ! 23 (Volumetric) Heat capacity of road layer -3 TC_road3 ! 24 Thermal conductivity of road layer -3 D_road3 ! 25 Thickness of road layer -3 3 ! 26 Number of wall layer HC_wall1 ! 27 (Volumic) heat capacity of wall layer-1 TC_wall1 ! 28 Thermal conductivity of wall layer-1 D_wall1 ! 29 Thickness of wall layer-1 HC_wall2 ! 30 (Volumic) heat capacity of wall layer-2 TC_wall2 ! 31 Thermal conductivity of wall layer-2 D_wall2 ! 32 Thickness of wall layer-2 HC_wall3 ! 33 (Volumic) heat capacity of wall layer-3 TC_wall3 ! 34 Thermal conductivity of wall layer-3 D_wall3 ! 35 Thickness of wall layer-3 3 ! 36 Number of roof layer HC_roof1 ! 37 (Volumetric) Heat capacity of roof layer-1 TC_roof1 ! 38 Thermal conductivity of roof layer-1 D_roof1 ! 39 Thickness of roof layer-1 HC_roof2 ! 40 (Volumetric) Heat capacity of roof layer-2 TC_roof2 ! 41 Thermal conductivity of roof layer-2 D_roof2 ! 42 Thickness of roof layer-2 </pre>	<pre> HC_roof3 ! 43 (Volumetric) Heat capacity of roof layer-3 TC_roof3 ! 44 Thermal conductivity of roof layer-3 D_roof3 ! 45 Thickness of roof layer-3 bld_frac ! 46 Fraction of buildings bld_height ! 47 Building height forc_abv_roof ! 48 Height of air temperature and humidity measurement forc_abv_roof ! 49 Height of wind measurement 0 ! 50 Simulation start time 01 ! 51 Simulation start day 01 ! 52 Simulation start month 1991 ! 53 Simulation start year LATITUDE ! 54 Latitude LONGITUDE ! 55 Longitude ALTITUDE ! 56 Surface orography ALTITUDE ! 57 Weather station orography QF_H_traffic ! 58 Anthropogenic sensible heat flux due to traffic 0 ! 59 Anthropogenic latent heat flux due to traffic QF_H_indus ! 60 Anthropogenic sensible heat flux due to industry 0 ! 61 Anthropogenic latent heat flux due to industry 1 ! 62 Town roughness length z_0 0 ! 63 Initial water on roof per m^2 0 ! 64 Initial water on road per m^2. INPUTS 10 13,8 ! Type204_climate:Ta_K ->Air temperature 13,10 ! Type204_climate:q_kg_kg ->Specific air humidity [kg/kg] 13,11 ! Type204_climate:WS_ms ->Wind speed 13,12 ! Type204_climate:WD_deg ->Wind direction 13,14 ! Type204_climate:S_wm2 ->Direct solar (short wave) radiation 13,15 ! Type204_climate:D_wm2 ->Diffuse solar (short wave) radiation 13,17 ! Type204_climate:A_wm2 ->Atmospheric (long wave) radiation 13,18 ! Type204_climate:RR_kg_s_m2 ->Rain precipitation 0,0 ! [unconnected] Snow precipitation 13,13 ! Type204_climate:p_pa ->Atmospheric surface pressure *** INITIAL INPUT VALUES 0 0 0 0 0 0 0 0 0 *----- NOTA: Die PARAMETERS Eingaben in BLAU Sind Variablen abhängig vom Simulationsfall (Geometrie des Canyons, thermische Eigenschaften der Bauteile, geographische Lage, Start-Temperaturen, anthropogene Wärme). Deshalb, werden diese für jede Simulation aus einer Parametertabelle (batchfile) eingelesen. Die INPUTS listen die notwendigen Klimainformationen. </pre>
---	--

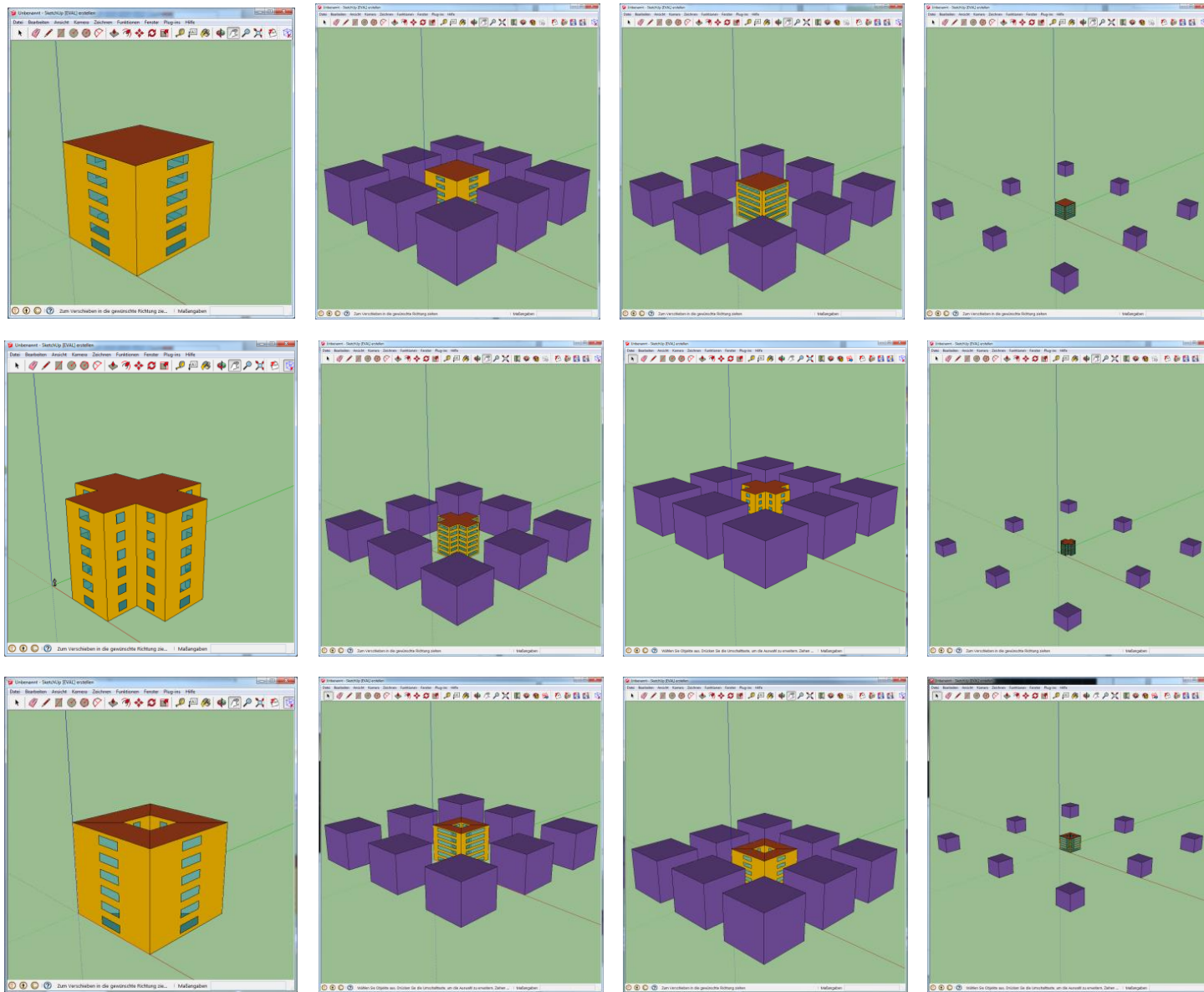


Abbildung 19: In TRNSYS untersuchte Stadtstrukturen und Gebäudetypen

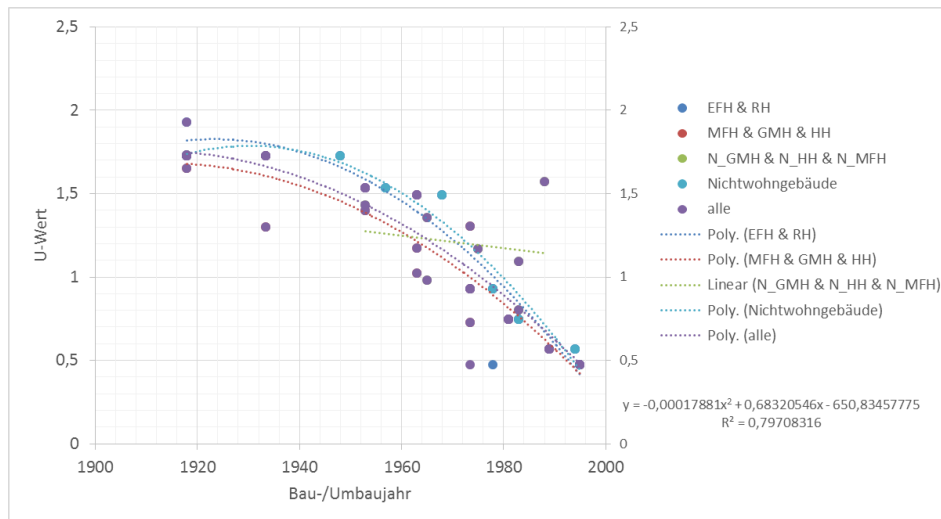


Abbildung 20. Mittlere U-Werte nach dem IWU-Gebäudetypologie-Katalog Deutschlands

Tabelle 4: Mittlere U-Werte für Wohngebäude nach dem IWU-Gebäudetypologie-Katalog Deutschlands

Ausschnitt aus der gebäudetypologie Deutschland (IWU)			Uwert
Einfamilienhaus	bis 1918 A	EFH_A	1,928
	bis 1918 B	EFH_B	1,727
	1919-1948	EFH_C	1,727
	1949-1957	EFH_D	1,535
	1958-1968	EFH_E	1,49
	1969-1978	EFH_F	0,928
	1979-1983	EFH_G	0,746
	1984-1994	EFH_H	0,564
	ab 1995	EFH_I	0,473
Einfamilien-Reihenhaus	bis 1918 B	RH_B	1,727
	1919-1948	RH_C	1,727
	1949-1957	RH_D	1,535
	1958-1968	RH_E	1,49
	1969-1978	RH_F	0,928
	1979-1983	RH_G	0,746
	1984-1994	RH_H	0,564
	ab 1995	RH_I	0,473
	Mehrfamilienhaus / Nicht Wohngebäude	bis 1918 A	MFH_A
bis 1918 B		MFH_B	1,727
1919-1948		MFH_C	1,727
1949-1957		MFH_D	1,535
1958-1968		MFH_E	1,49
1969-1978		MFH_F	0,928
1979-1983		MFH_G	0,746
1984-1994		MFH_H	0,564
ab 1995		MFH_I	0,473
großes Mehrfamilienhaus	bis 1918 B	GMH_B	1,6498
	1919-1948	GMH_C	1,2988
	1949-1957	GMH_D	1,3972
	1958-1968	GMH_E	1,1731
	1969-1978	GMH_F	1,3007
	1958-1968	HH_E	1,02
	1969-1978	HH_F	0,7255
sonstige Gebäude	1946-1960	N_MFH_D (industrieller Wohnungsbau)	1,4314
	1961-1969	N_GMH_F (industrieller Wohnungsbau)	0,9775
	1961-1969	N_MFH_E (industrieller Wohnungsbau)	1,3538
	1969-1978	EFH_F_F (Fertighaus)	0,4729
	1970-1980	N_HH_F (industrieller Wohnungsbau)	1,1685
	1981-1985	N_GMH_G (industrieller Wohnungsbau)	1,0909
	1981-1985	N_HH_G (industrieller Wohnungsbau)	0,8026
	1986-1990	N_GMH_H (industrieller Wohnungsbau)	1,5683

Tabelle 5: Thermische Eigenschaften der Bauteile der Gebäude wie in TEB und TRNSYS abgebildet

Bauschichten	Thermische Eigenschaften				
	Lambda(J)	c Wärmespeicherkap.	rau (dichte)	Lambda (W)	Dicke
	kJ/h m K	kJ/kg K = Wh/kg K	kg/m³	W m K	m
ID TRNSYS	TC_COND	HC_CAP	DENSITY	TC_COND	d
61 Beton_2000	5,76	1	2000	1,6	0,15
MINERALD05	0,18	0,9	80	0,050	variabel f (U-Wert)
61 Beton_2000	5,76	1	2000	1,6	0,15

Tabelle 6: TEB und TRNSYS Simulationseinstellungen für die Dämmqualität, Fensterflächenanteil und urbane Dichte (Variablen U, W und A)

Var.	Erläuterung Variable	Sim.-Stufen			Kommentare	
		-1	0	1		
U	Wärmedämmqualität U-Wert	opake Bauteile (Außenwände)	0,1	1,2	2,3	Nach Gebäudetypologie Deutschland (IWU), mittlere Werte nach Baualter
		Fenster	0,4	3,1	5,8	
W	Fensterflächenanteil (Fenster zu Gesamtgebäudehülle)	Fenster	10%	30%	50%	Mittelwert für Wohngebäude nach dem Gebäudetypologie Deutschland (IWU)
A	Höhe-Breite-Verhältnis (Geb./Str.)	Außenraum	0,2	1	1,8	lockere, mittlere, dichte Bebauung relevant für Stuttgart

Tabelle 7: TRNSYS Simulationseinstellungen für die repräsentative Gebäudekubatur (Kompaktheit, Größe) für die Stadt Stuttgart (Variablen S und V)

Kubus	klein	mittel	groß
Höhe	6,0	16,8	21,0
Breite	6,0	16,8	21,0
Länge	6,0	16,8	21,0
Volumen	216,0	4738,5	9261,0
Oberfläche: 5,5 seitig	198,0	1551,6	2425,5
Oberfläche/Volumen	0,9	0,3	0,3
Formkoeffizient	1,1	1,1	1,1

Kreuz	klein	mittel	groß
Höhe	3,8	16,8	21,0
Breite	3,7	8,7	10,9
Länge (ausgestreckt)	2,9	5,9	7,4
Volumen	216,0	4738,5	9261,0
Oberfläche: 5,5 seitig	230,1	1801,6	2816,3
Oberfläche/Volumen	1,1	0,4	0,3
Formkoeffizient	1,1	1,1	1,1

Blockrand	klein	mittel	groß
Höhe (Außen)	3,2	16,8	21,0
Breite (Außen)	9,0	18,0	22,5
Breite (Innen)	3,7	6,4	8,0
Volumen	216,0	4738,5	9261,0
Oberfläche: 5,5 seitig	263,5	2060,2	3220,5
Oberfläche/Volumen	1,2	0,4	0,3
Formkoeffizient	1,2	1,2	1,2

Tabelle 8: TRNSYS-Simulationseinstellungen für HVAC Systeme (überwiegend nach EnEV und DIN-18599)

	Wohngebäude	nicht-Wohngebäude
Nutzungszeit	6:00 bis 13:00	07:00 bis 18:00 05:00 bis 18:00 für die Heizung inkl. Vorheizung
Lüftung	0.7 bis 0.79	Luftwechselrate nach Belegung der Räume definiert
Heizung	20 °C während der Nutzungszeit 16 °C außerhalb der Nutzungszeit	21 °C während der Nutzungszeit 17 °C außerhalb der Nutzungszeit
Kühlung	26 °C während der Nutzungszeit	26 °C während der Nutzungszeit
Innere Wärmequellen	2.815 W/m ²	Typ- und Belegung abhängig
Beleuchtung	abhängig von der anfallende Solarstrahlung auf die Fassade (bei 120 W/m ² : künstliche Beleuchtung, bei 200 W/m ² : Tageslicht)	
Sonnenschutz	abhängig von der anfallende Solarstrahlung auf die Fassade (bei 120 W/m ² : kein Sonnenschutz, bei 140 W/m ² : Sonnenschutz)	

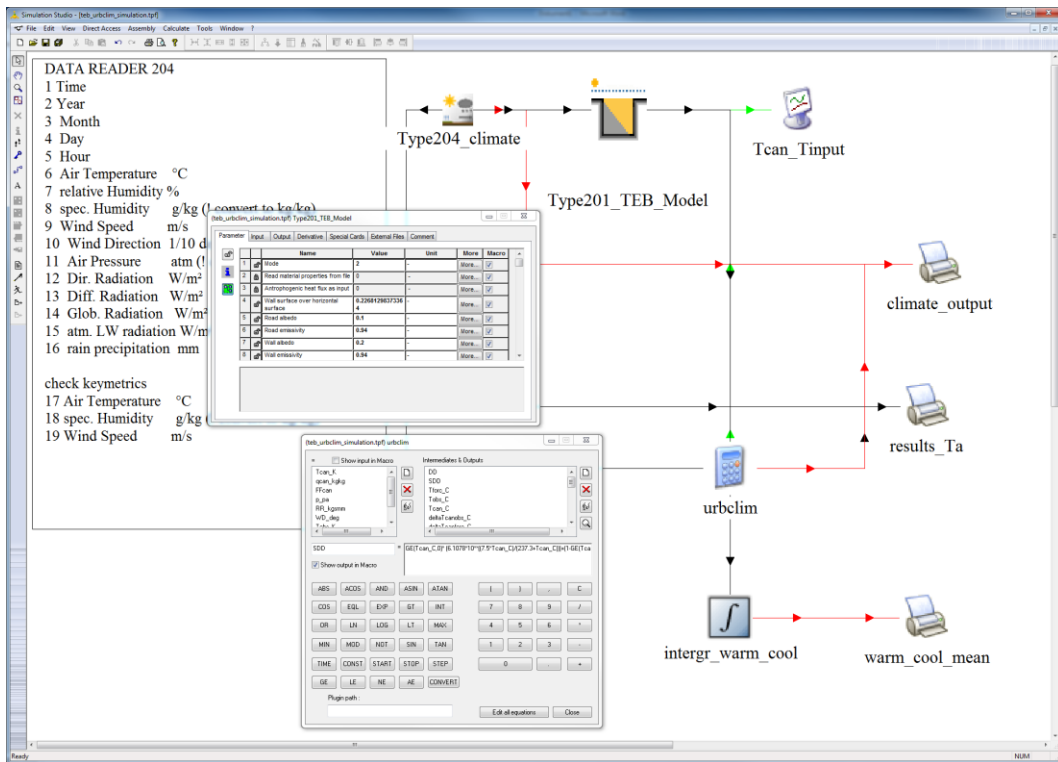


Abbildung 21 Die TRNSYS-Studio Oberfläche für die Ermittlung der Stadtklimaefekte anhand TEB-Type 201

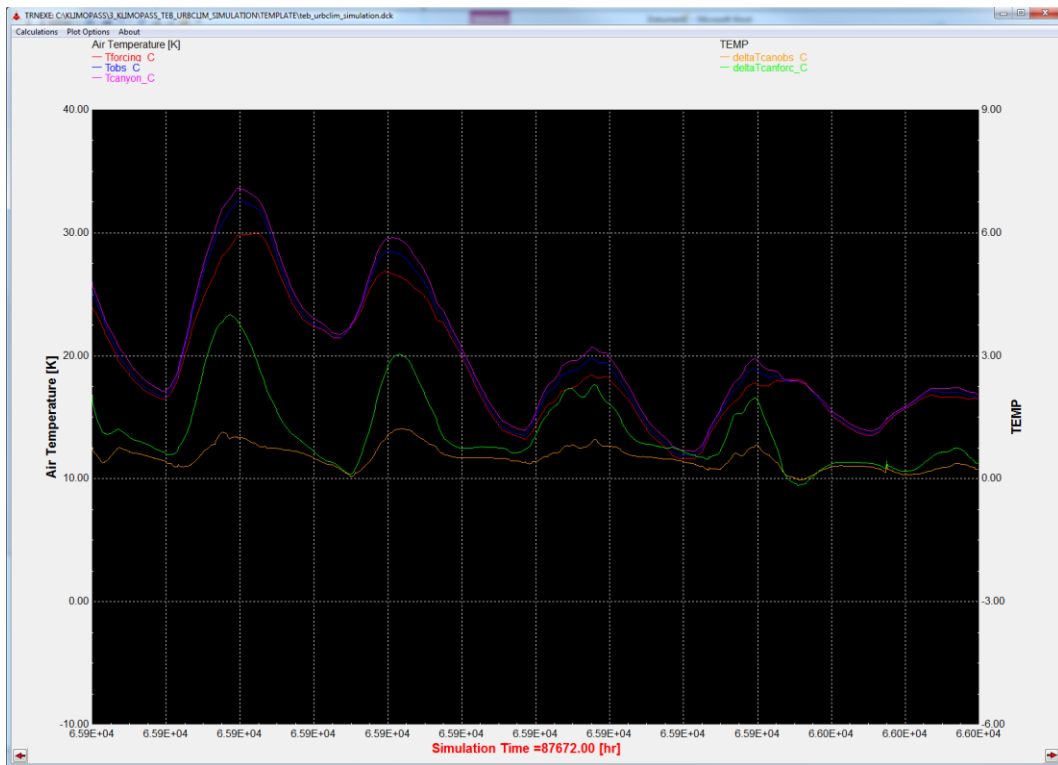


Abbildung 22: Beispiel einer TEB-Simulation für die Ermittlung der urbanen Lufttemperaturen (Tcanyon, linke Achse) im Vergleich zu Tobs auf 2 m Höhe und Tforcing auf 30 m Höhe (delta TWerte in Kelvin, rechte Achse)

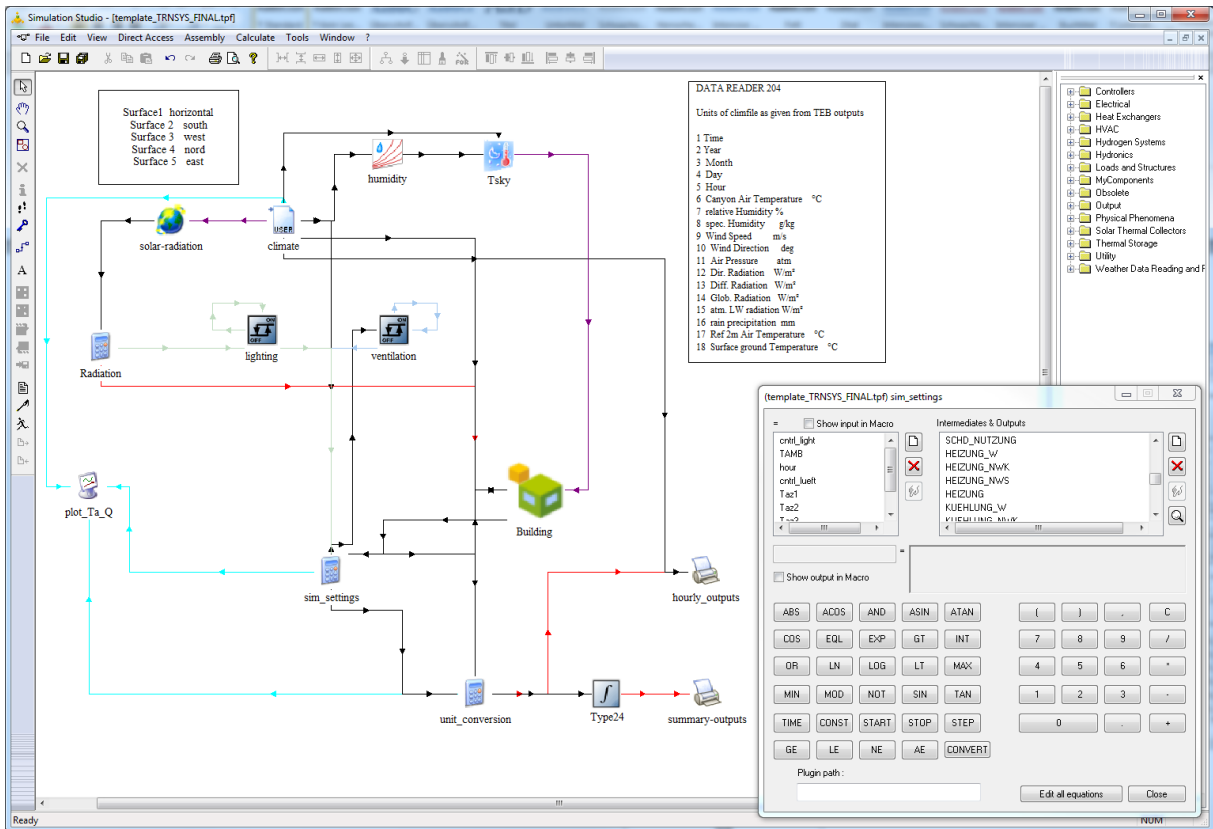


Abbildung 23: Die TRNSYS-Studio Oberfläche für die thermische Gebäudemodellierung und Ermittlung der Energiekennwerte Heizen und Kühlen (243 Fälle)

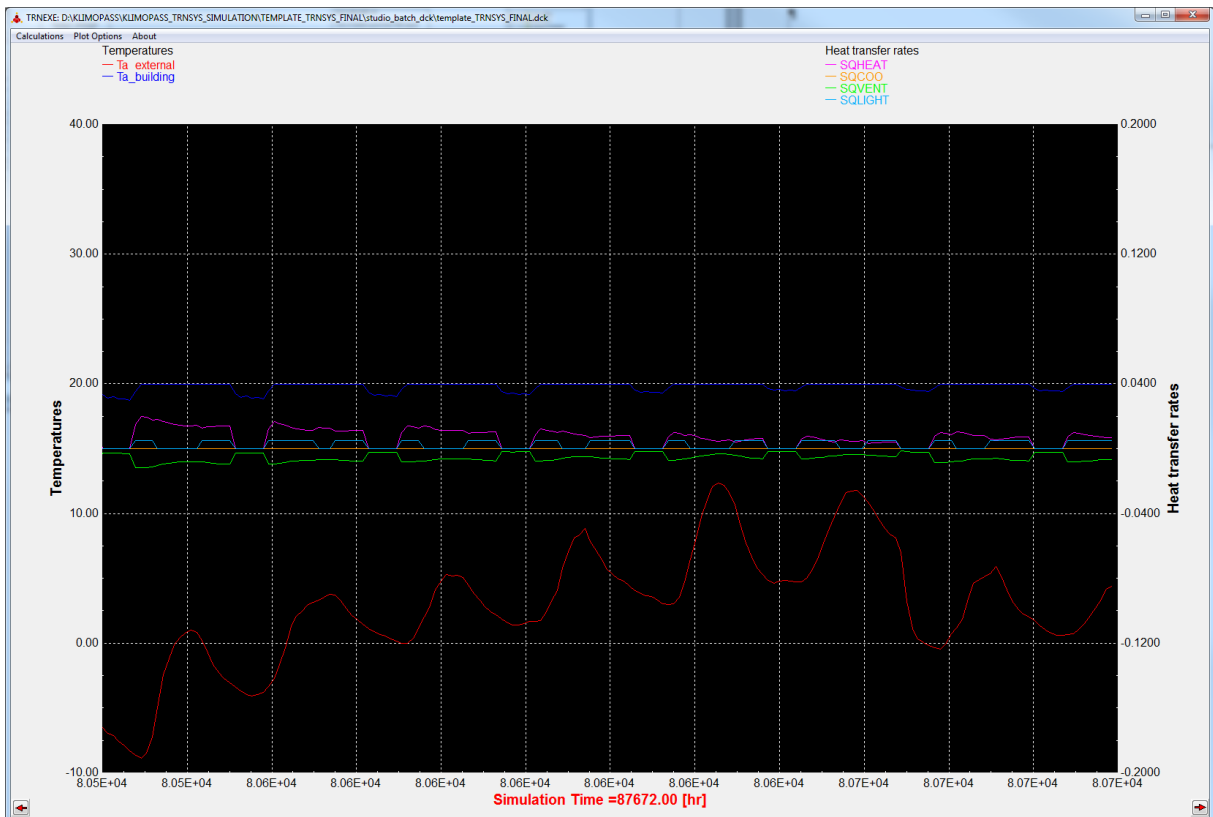


Abbildung 24: Beispiel einer TRNSYS-Simulation für die Ermittlung der Energiekennwerte Heizen (QHEAT)

10. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die folgenden Abbildungen berichten über 1) die Ergebnisse zur Stadtklimauntersuchung anhand des Town Energy Balance Modells TEB für die Ermittlung der thermischen Änderungen innerhalb der Stadt, sowie über 2) die resultierenden Energiekennwerte aus den darauffolgenden thermischen Gebäudesimulationen mit TRNSYS 17.

10.1. Ergebnisse zum Stadtklima

Im folgendem werden die von TEB berechneten Stadtklimaeffekte dargestellt und interpretiert. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Außenräume (Canyon auf 2 m Höhe) und nicht auf die Gebäude, obwohl die gesamten Stadtgebiete in den Abbildungen farbig zum Verständnis dargestellt sind.

Abbildung 25 zeigt die mittlere Stärke der Erwärmung bzw. der Abkühlung der Luft in den Straßenschluchten innerhalb der Stadt Stuttgart für den Zeitraum 1991 – 2000. Dies entspricht der Lufttemperaturdifferenz zwischen der mit TEB berechneten Urban Canyon Lufttemperatur und der Referenzlufttemperatur auf selber Höhe (2 m) über Straßenniveau $\Delta T_{\text{can}} - T_{\text{ref}}$. Der Canyon kann sich im Durchschnitt bis 0.87 K erwärmen und bis 0.74 K abkühlen, während die höchste Erwärmung 2.64 K betragen kann (d.h. ohne Berücksichtigung der Verkehrseffekte morgens, siehe **Abbildung 27**). Beide Karten in **Abbildung 25** zeigen räumliche Ähnlichkeit, was auf ähnliche Ursachen hindeutet. In der Tat hängt die räumliche Differenzierung dieser Erwärmung oder Abkühlung stark von der Bebauungsdichte ab. Diese wird durch das Straßenprofil Höhe-Breite-Verhältnis H/W gegeben (siehe **Abbildung 10**). Ein weiterer wirkender Faktor ist die Verkehrsabwärme (siehe **Abbildung 10**). Je größer der H/W ist, desto ausgeprägter die Erwärmung des Straßenprofils aufgrund von mehr Wärmespeicherung bzw. späterer Wärmewiedergabe beim warmen Wetter, aber auch eine gewisse Abkühlung in den Tagesstunden, dort wo Verschattung vorkommt. Beispielsweise erfahren in **Abbildung 25** die Stadtgebiete in den Zellen C5 aber auch in B3, B4, B5, C4 und D4 extreme $\Delta T_{\text{can}} - T_{\text{ref}}$ Werte wo H/W mehr als 1.3 bis zu 1.8 beträgt. Das gleiche gilt bei den Zellen C3 und D3 und E2 auch wenn mit etwas niedrigeren Werten, da der H/W Wert zwischen 0.89 und 1.29 liegt. An den umliegenden Stadthängen ist $\Delta T_{\text{can-ref}}$ kleiner gegen 0.5 K aufgrund der relativ lockeren Bebauung. Die Zelle C2 auch weist auf diesen Zusammenhang hin, denn sie ist wärmer bzw. kälter als ihre unmittelbare Umgebung aufgrund der etwas höheren Bebauungsdichte aber gleichzeitig deutlich weniger anthropogenen Abwärme.

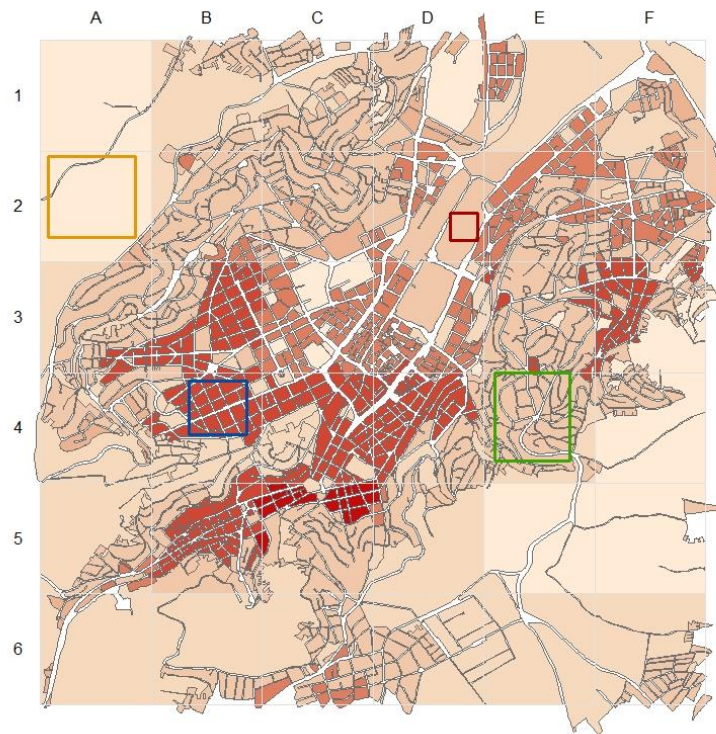
Um die Bedeutung dieser Stadtklimaeffekte besser nachvollziehen zu können werden in **Abbildung 26** die entsprechenden Heizgradtage HDD (Basis 18 °C) bzw. Kühlgradtage CDD (Basis 24 °C) der nach TEB prognostizierten urbanen Lufttemperaturen im Vergleich zu der klimatischen Ausgangslage von 1991 – 2000 dargestellt. Die Heizgradtage HDD (für die jeweiligen 10 Jahre Betrachtungszeitraum) sind vom - 209 bis - 2502 °C weniger geworden, da die urbane Lufttem-

peratur höher ist. Die räumliche Verteilung von HDD-Unterschied ähnelt sehr stark der Verteilung der mittleren Erwärmung in [Abbildung 25](#), d.h. ist vor allem auf die Bebauungsdichte in der Form von engen Straßenprofilen zurückzuführen. Die Stadtklimaeffekte bezogen auf die Änderung der Kühlgradtage CDD sind deutlich niedriger als auf die Heizgradtage. Bei den Kühlgradtagen ist es auch zu bemerken, dass beide als positive und negative Werte vorkommen. Dies bedeutet, dass die 24 °C Obergrenze viel (bei positiven Werten) oder wenig (bei negativen Werten) öfter überschritten wird, wenn das Stadtklima mitberücksichtigt wird. In den innenstädtischen Gebieten (Zellen B, C, D, in den Bereichen 3 und 4) ist der Bedarf an Kühlung geringer aufgrund der Kühleffekte der Verschattung tagesüber als bei der Referenzklimalage (siehe [Abbildung 25](#) rechts). In den übrigen Stadtgebieten müsste mehr abgekühlt werden, da die urbane Lufttemperatur höher ausfällt.

Die vorherigen Abbildungen sind als Mittelwerte ohne direkten zeitlichen Bezug dargestellt, da bisher der Fokus auf der räumlichen Verteilung lag. Mithilfe eines zeitlichen Tages- und Jahresverlaufs können die thermischen Prozesse der Wärmeaufnahme und Wärmewiedergabe im Canyon besser nachvollzogen werden und somit auch die resultierende Straßenerwärmung bzw. Abkühlung besser interpretiert werden.

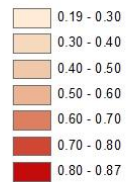
Die [Abbildung 27](#) zeigt anhand von vier Beispielen die thermischen Prozesse innerhalb eines Canyons in ihrer Abhängigkeit von dem Höhe-Breite-Verhältnis der Straßenschlucht und auch dem Verkehr, denn beide haben sich als entscheidend erwiesen. Bei einer dichten Bebauung kommt sowohl Erwärmung wie auch Abkühlung des Canyons vor. Generell ist der Canyon zum 2/3 des gesamten Betrachtungszeitraums wärmer und zum 1/3 kühler. Die Erwärmung tritt verstärkt in den Nachtstunden ein, als Folge der nächtlichen Wärmeabgabe. Ihre Stärke ist auch am höchsten im warmen Halbjahr wie bei einer urbanen Wärmeinsel zu erwarten ist. Eine Abkühlung kommt allerdings auch vor, und zwar zu den Mittags- bis Frühnachmittagsstunden aufgrund der Verschattung des Straßenniveaus durch das hohe Höhe-Breite-Verhältnis der Straße. Diese Abkühlung ist intensiver im Herbst, wahrscheinlich bedingt durch die Eingabeklimadatei. Bei einer mittleren bzw. lockeren Bebauung ist der Canyon immer wärmer auch wenn die Werte kleiner als 1 Kelvin sind. Bei der lockeren Bebauung ohne ausgeprägte Verkehrswärmeabgabe ist die Erwärmung des Canyons direkt von den Solarstrahlungsmengen abhängig. Somit beginnt der Canyon kurz vor Mittag deutlich wärmer zu werden und erreicht sein Maximum gegen 14 Uhr. Dieses Muster ist klarer in den Sommermonaten, wenn die Solarstrahlung am stärksten ist. In den Nachtstunden ist die Temperaturdifferenz sehr klein bis vernachlässigbar. Dies erklärt sich durch den hohen Himmelsichtfaktor, der eine schnelle Wärmeabgabe ermöglicht. Bei den mittleren und lockeren Bebauungsfällen mit starkem Verkehr zeigt sich die Erwärmung des Canyons zusätzlich in dem Zeitraum zwischen 7:00 und 19:00 stärker, aufgrund der Annahme in TEB, dass der Verkehr in dieser Periode stattfindet.

Um das Zukunft-Szenario mit der aktuellen Klimelage vergleichen zu können, wird die Änderung in den Heizgradtagen HDD ([Abbildung 28 links](#)) bzw.- Kühlgradtagen CDD ([Abbildung 28 rechts](#)) zwischen dem Zeitraum 2041 – 2050 und 1991 - 2000 abgebildet. Beide beinhalten die TEB berechneten Stadtklimaeffekte. Die Karte links zeigt als Ausgangslage ohne Stadtklimaeffekte (LARSIM korrigierte KIT-Klimadaten) ein deutlich gerastertes Bild aufgrund der angenommenen Auflösung von 1 km. Da die Landnutzung in der ursprünglichen Interpolation der Klimadaten mitberücksichtigt wurde, ist die ausgeprägte Topografie des Gebietes (Tal oder Hänge) sowie zum Teil auch die bebauten Stadtgebiete erkennbar (Talbereich: Zellen in Rot, Hänge in Orange und Gelb). Die Zukunftsprognose des Klimas ist generell wärmer als die aktuelle Situation, so dass weniger Heizgradtage die Folge sind. Die Änderung bzw. Erwärmung im dichten bebauten Tal ist geringer als das restliche, höher gelegene Stadtgebiet. Die Vergleichskarte rechts in [Abbildung 28](#) zeigt zwar einen ähnlichen Trend zur zunehmenden Erwärmung in der Zukunft, allerdings mit deutlich besser erkennbarer Stadtstruktur, wenn die Stadtklimaeffekte mitberücksichtigt werden. Im Allgemeinen gilt, die Änderung der HDD in der Innenstadt aufgrund des Klimawandels ist geringer als in den ländlichen Gebieten, da je dichter die Stadt ist, desto besser kann sie die klimatischen Veränderungen glätten.



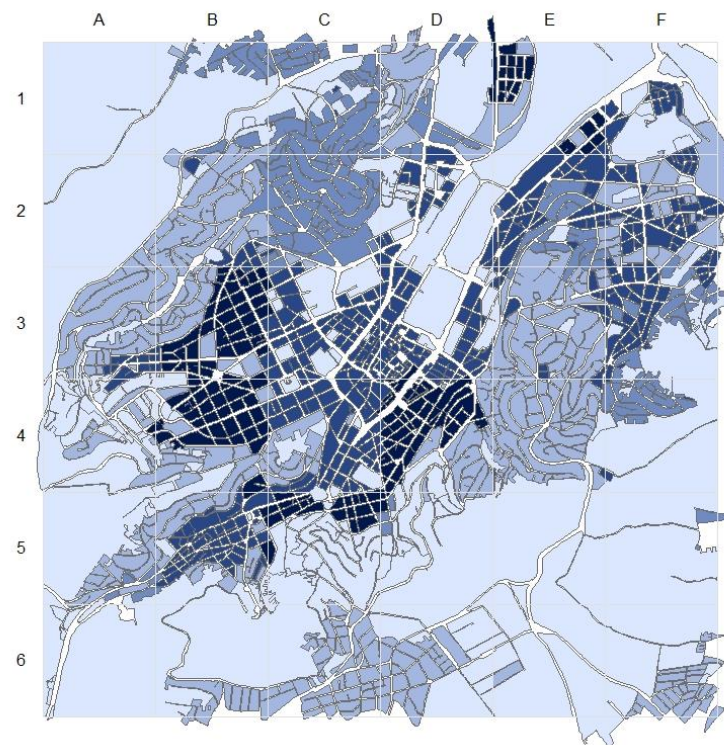
Mittlere Stärke der Erwärmung des Urban Canyons 1991-2000

in Kelvin



Fallbeispiel für zeitliche Analyse

- dichte Bebauung ohne starken Verkehr
- mittlere Bebauung mit starkem Verkehr
- lockere Bebauung ohne starken Verkehr
- lockere Bebauung mit starkem Verkehr



Mittlere Stärke der Abkühlung des Urban Canyons 1991-2000

in Kelvin

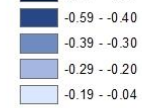
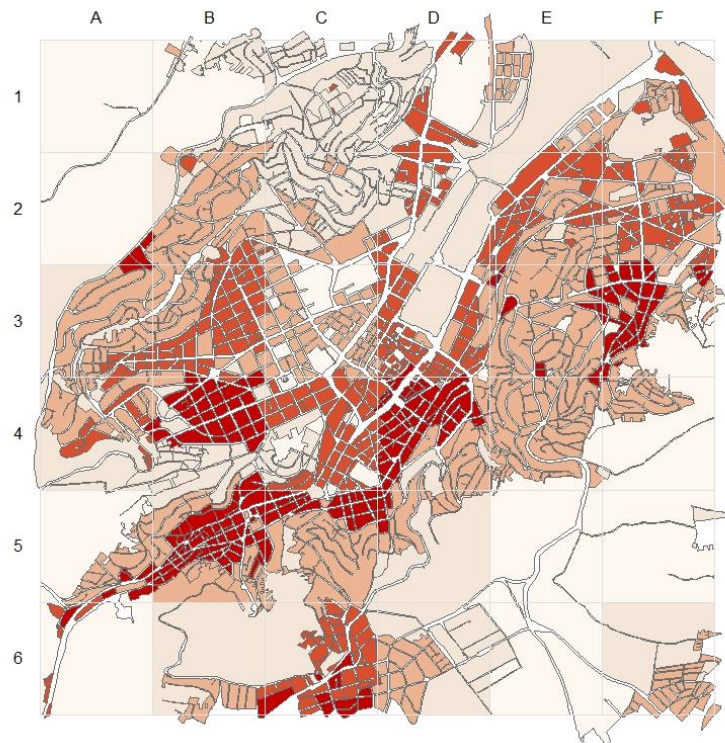
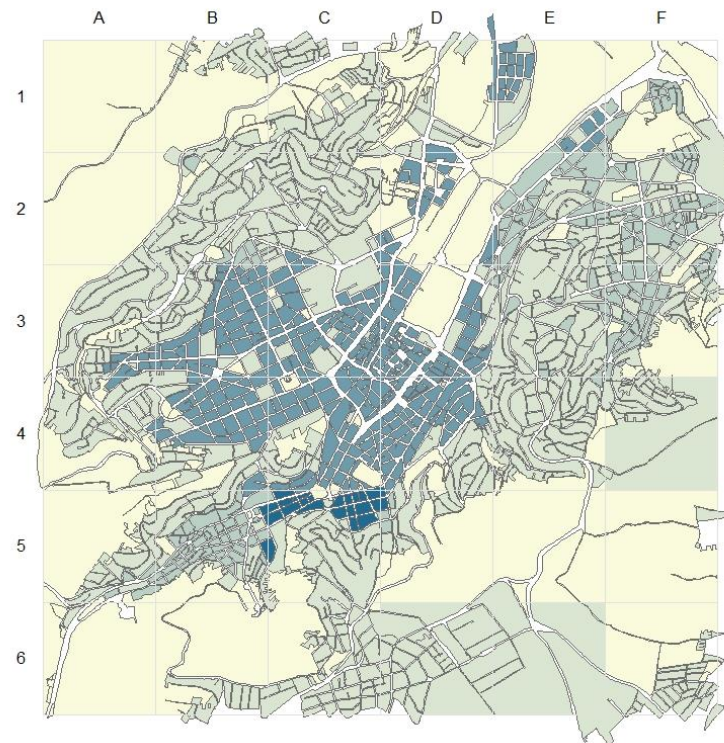
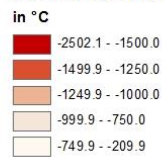


Abbildung 25: Mit TEB berechneter Stärke der Erwärmung des Urban Canyons für Stuttgart für den Zeitraum 1991-2000 inkl. hot-spots für zeitliche Analyse



**Änderung der Heizgradtage (Basis 18°C)
aufgrund der Stadtklimaefekte 1991-2000
(TEB-Berechnung)**



**Änderung der Kühlgradtage (Basis 24°C)
aufgrund der Stadtklimaefekte 1991-2000
(TEB-Berechnung)**

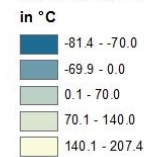


Abbildung 26: Mit TEB berechneten Heizgradtage HDD Änderung für Stuttgart mit Berücksichtigung der Stadtklimaefekte im Vergleich mit der aktuellen Klimalage (1991-2000)

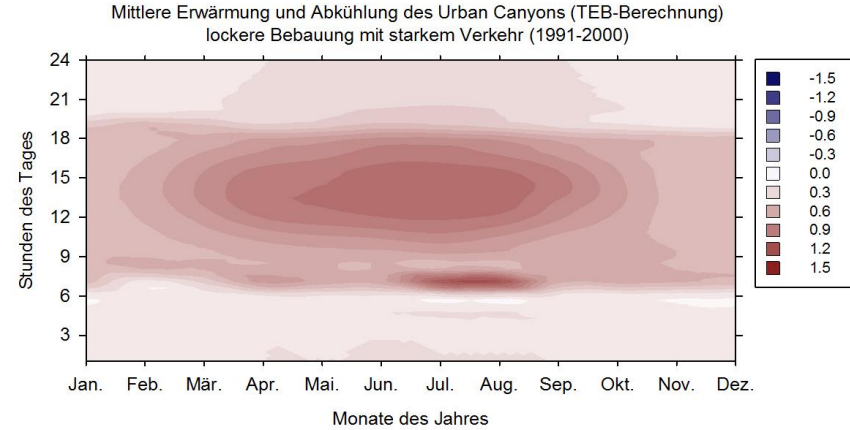
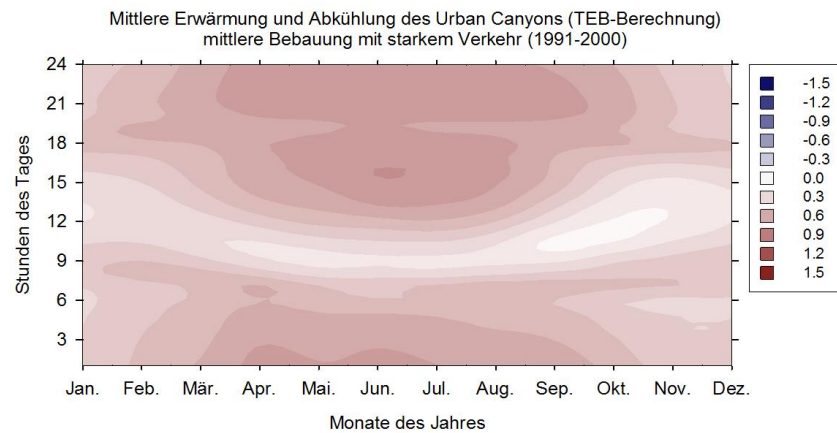
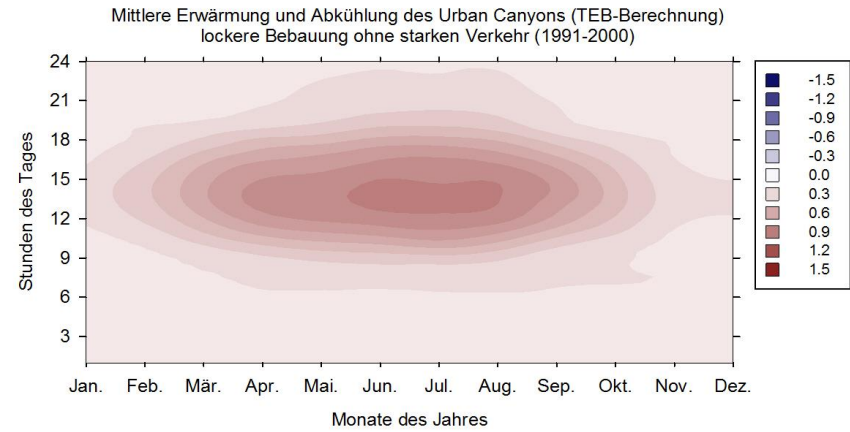
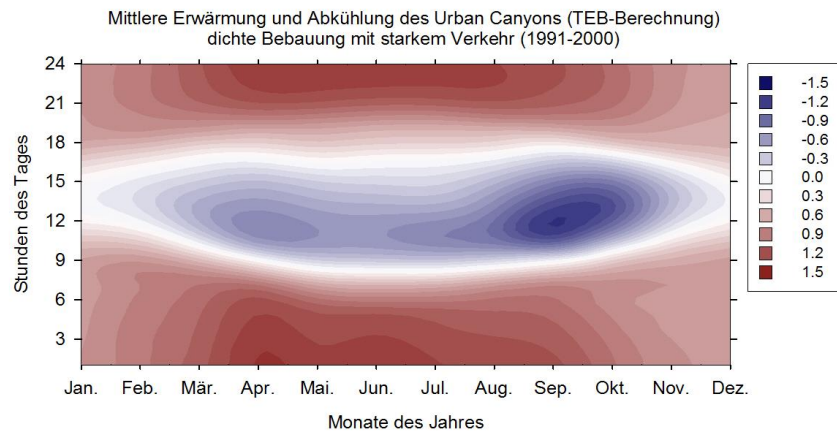


Abbildung 27: Mittlerer Tages- und Jahresverlauf der Erwärmung bzw. Abkühlung der Lufttemperatur im Canyon für den Zeitraum 1991 – 2000 (TEB Berechnung)

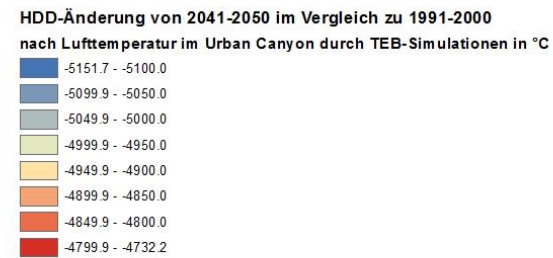
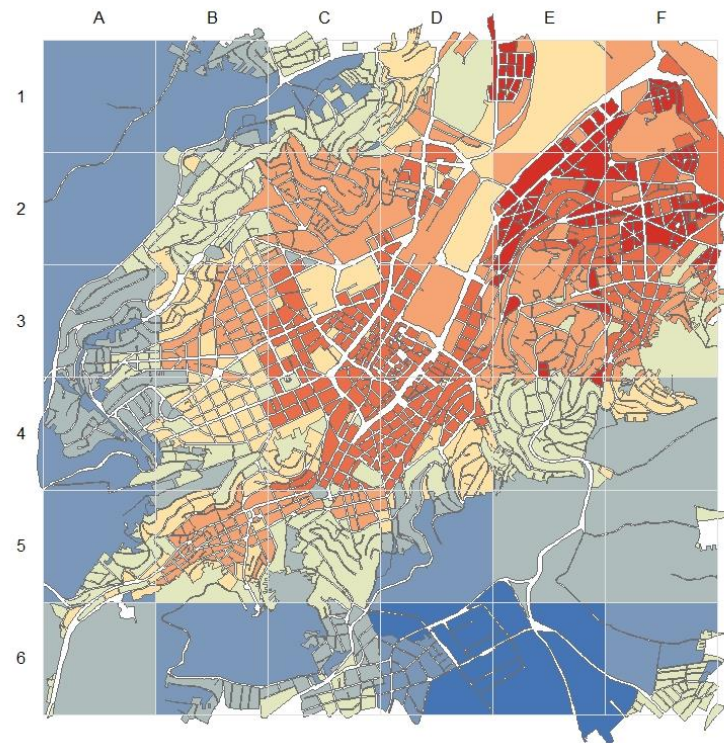
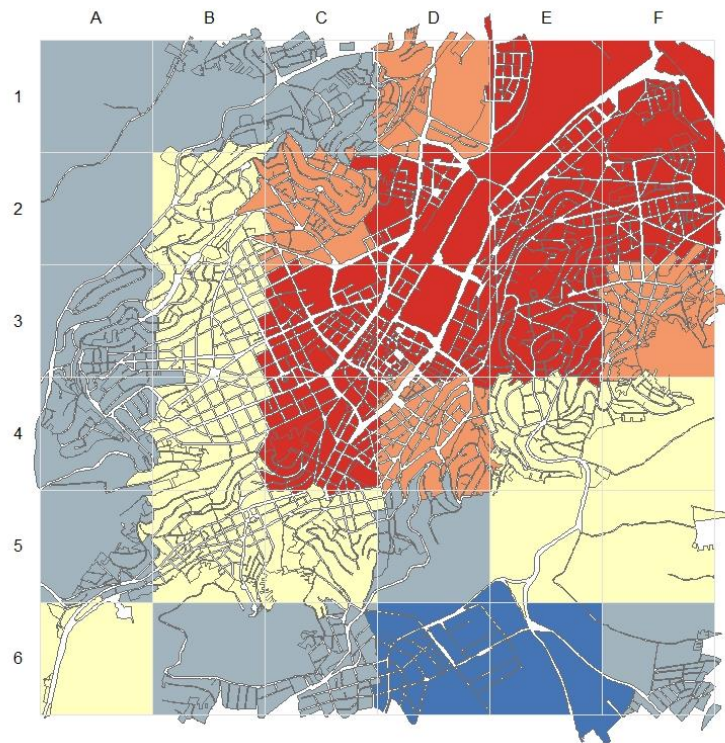


Abbildung 28: Mit TEB berechneten Heizgradtage HDD Änderung für Stuttgart für die Klimawandelprognose von (2041-2050) im Vergleich mit der aktuellen Klimalage (1991-2000)

10.2. Ergebnisse zum Gebäudenutzenergiebedarf

Die Ergebnisse zur Energieermittlung liegen auf Gebäudeebene vor. Diese werden aus Datenschutzgründen auf Baublockebene reduziert dargestellt und diskutiert. Bei der Darstellung der Ergebnisse können in den Abbildungen großflächige Bereiche, vor allem am Stadtrand, missverstanden werden, wenn der Baublock den Wert weniger Einzelgebäude übernimmt und dennoch als Gesamtfläche erscheint (siehe z.B. Zelle A1, A2 oder F5 in [Abbildung 29](#)). Der Leser wird daran erinnert, dass ein Baublock durch eine physische Grenze, idealerweise durch Straßen, definiert wird, bedeutet allerdings nicht zwingend eine Blockrandbebauung.

10.2.1. Ergebnisse zur DOE statistischen Analyse

Die [Tabelle 9](#) zeigt an einem Beispiel die Ergebnisse einer statistischen Analyse der TRNSYS-Berechnungen. Eine lineare Regression quantifiziert für jede abhängige Variable wie Heizen oder Kühlen ihren Zusammenhang mit den sogenannten abhängigen Variablen, welche im Versuchsplan als 3-stufige Parameter definiert werden (-1, 0, +1). Diese Regression zeigt alle Variablen, die eine Auswirkung auf den Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf haben, nach ihrer Relevanz absteigend. Diese Auswirkungen können Haupteffekte (d.h. für 1 Variable wie U, V oder $V_q = V^2$) oder 2-fach-Wechselwirkungen (wie z. B. VU, SU). Der Bestimmtheitsmaß R^2 bzw. seine korrigierte Form $\text{Korr.-}R^2$ geben in Prozentzahl den Anteil an Auswirkung jeder Variable bzw. 2-facher Wechselwirkung an. Mehrere Modelle mit zunehmenden Einflussfaktoren werden aufgelistet. Die letzten Modelle (10 für Heizen und 9 für Kühlen) zeigen die beste Trefferquote mit einem $\text{Korr.-}R^2$ von 96.3 % für Heizen und 92.4 % für Kühlen, d.h. die Daten lassen sich zu diesen Werten mit den entsprechend aufgelisteten Variablen erklären. Das R^2 ist etwas niedriger beim Kühlen aufgrund der lufttemperaturabhängigen Lüftung, welche bei steigender Temperatur aktiviert wird.

Beim Heizen zeigt sich die Wärmedämmqualität der Gebäudehülle, gegeben mit dem U-Wert als entscheidenden Faktor mit 46.1 % Verantwortung für das Endergebnis, gefolgt bei dem Gebäudevolumen V und ihre Wechselwirkung UV mit 26.7 % bzw. 10.8 % Relevanz. Alle weiteren Variablen sind unter 10 % und sind somit weniger bestimmend.

Beim Kühlen ist der U-Wert ebenso am wichtigsten mit einem $\text{Korr.-}R^2$ von 64.5 %, sogar mit einem quadratischen und nicht linearen Verlauf (U^2 , 20.8 %). Das heißt, alleine der U-Wert erklärt den Zusammenhang zu 85.3 %. Daneben spielt der Fensterflächenanteil, das Volumen und das Straßenprofil noch eine kleine Rolle.

Die B-Koeffizienten quantifizieren dann die jeweiligen Variablen und ermöglichen die Bildung einer polynomialen Formel. Das positive bzw. negative Zeichen der B-Werte gibt Aufschluss ob die Variable mit Zunahme oder Abnahme den Energiebedarf reduziert, abhängig von der angenommenen Kodierung im Versuchsplan (-1, 0, +1). Jede Formel wird für den entsprechenden Fall angewendet (z.B. hier Wohngebäude und für den Bereich, wo diese Klimadatei gilt). Der Energiebedarf für jedes einzelne Gebäude wird anhand dieser Formel mit seinen realen Werten für U, V, S, W und A in kodierter Form berechnet.

Tabelle 9: Beispiel einer statistischen Analyse für Heizen (SQHEAT) und Kühlen (SQCOOL) für den Nutzungstyp Wohnen und eine Klimadatei aus dem Innenstadtbereich für den Zeitraum 1991 – 2000

SQHEAT INNENSTADT AKTUELLE KLIMALAGE (1991 - 2000)									
TYP_W (Wohnen)	R	R2	korrig_R2	Änd. R2	Modell	Variable	B_Koef.	Sig.	
					10	(Konstante)	105,999	0,000	
1	,684a	0,468	0,461	0,468		U	128,789	0,000	
2	,857b	0,735	0,728	0,267		V	-97,278	0,000	
3	,918c	0,843	0,837	0,108		VU	-75,733	0,000	
4	,947d	0,897	0,892	0,054		Vq	75,912	0,000	
5	,961e	0,924	0,919	0,027		W	30,947	0,000	
6	,971f	0,943	0,939	0,019		S	25,828	0,000	
7	,976g	0,953	0,949	0,010		SU	22,934	0,000	
8	,979h	0,959	0,954	0,006		VW	-17,657	0,001	
9	,982i	0,964	0,959	0,005		WU	15,612	0,002	
10	,984j	0,968	0,963	0,004		SV	-15,022	0,003	
a. Einflußvariablen : (Konstante), U									
b. Einflußvariablen : (Konstante), U, V									
c. Einflußvariablen : (Konstante), U, V, VU									
d. Einflußvariablen : (Konstante), U, V, VU, Vq									
e. Einflußvariablen : (Konstante), U, V, VU, Vq, W									
f. Einflußvariablen : (Konstante), U, V, VU, Vq, W, S									
g. Einflußvariablen : (Konstante), U, V, VU, Vq, W, S, SU									
h. Einflußvariablen : (Konstante), U, V, VU, Vq, W, S, SU, VW									
i. Einflußvariablen : (Konstante), U, V, VU, Vq, W, S, SU, VW, WU									
j. Einflußvariablen : (Konstante), U, V, VU, Vq, W, S, SU, VW, WU, SV									

SQCOOL INNENSTADT AKTUELLE KLIMALAGE (1991 - 2000)									
TYP_W (Wohnen)	R	R2	korrig_R2	Änd. R2	Modell	Variable	B_Koef.	Sig.	
					9	(Konstante)	1,197	0,000	
1	,806a	0,649	0,645	0,649		U	-2,215	0,000	
2	,926b	0,857	0,853	0,208		Uq	2,170	0,000	
3	,938c	0,880	0,875	0,023		WU	0,513	0,000	
4	,948d	0,898	0,893	0,018		VU	-0,453	0,000	
5	,952e	0,907	0,901	0,009		A	-0,261	0,003	
6	,957f	0,916	0,909	0,009		UA	0,314	0,004	
7	,960g	0,922	0,915	0,007		Sq	0,387	0,010	
8	,963h	0,928	0,920	0,006		SV	-0,258	0,016	
9	,965i	0,932	0,924	0,004		V	0,173	0,046	
a. Einflußvariablen : (Konstante), U									
b. Einflußvariablen : (Konstante), U, Uq									
c. Einflußvariablen : (Konstante), U, Uq, WU									
d. Einflußvariablen : (Konstante), U, Uq, WU, VU									
e. Einflußvariablen : (Konstante), U, Uq, WU, VU, A									
f. Einflußvariablen : (Konstante), U, Uq, WU, VU, A, UA									
g. Einflußvariablen : (Konstante), U, Uq, WU, VU, A, UA, Sq									
h. Einflußvariablen : (Konstante), U, Uq, WU, VU, A, UA, Sq, SV									
i. Einflußvariablen : (Konstante), U, Uq, WU, VU, A, UA, Sq, SV, V									

10.2.2. Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen für die aktuelle Klimalage

Die statistische Analyse, wie oben geschildert, erklärt am besten die nächsten Abbildungen für Heizen und Kühlen wenn diese mit den Stadt- und Gebäudeparametern in [Kapitel 8](#) gegenübergestellt werden: Alle Formeln (Anzahl jeweils 18 für Heizen und Kühlen) müssen allerdings herangezogen werden und räumlich entsprechend eingeordnet werden. Aber prinzipiell zeigt sich derselbe Trend bei allen Fällen (Wohnen, nicht Wohnen, verschiedene Klimadaten), auch wenn mit etwas unterschiedlichem B-Koeffizienten, dennoch in naheliegender Größenordnung.

Die [Abbildung 29](#) (links) zeigt den spezifischen Nutzenergiebedarf für Heizen für den Zeitraum 1991 – 2000. Die Nutzenergie kann 413 kWh/m²a erreichen für einige wenige Häuser am Stadtrand aufgrund schlechter Wärmedämmung, ansonsten liegt die Heizenergie zwischen 44 bis 163 kWh/m²a für etwa 80 % der gesamten Baublöcke. Der Heizenergiebedarf ist am niedrigsten für große Gebäude mit sehr gut wärmegeprägter Gebäudehülle, welche überwiegend innenstädtisch liegen (Vgl. [Abbildung 12](#) und [Abbildung 13](#)). Wohngebiete auf den Hängen weisen mehr Heizenergiebedarf auf aufgrund ihres schlechteren Wärmedurchgangskoeffizienten, welcher anhand ihrer Baualtersklassen geschätzt wird.

Die [Abbildung 29](#) (rechts) zeigt für den Kühlenergiebedarf eine umgekehrte Situation, wo die Wohnviertel einen niedrigen Bedarf an Kühlen haben dadurch, dass die Gebäudehülle viel Transmissionswärmeverluste durch die schlecht wärmegeprägte Gebäudehülle erfährt. Während die innenstädtischen Stadtbereiche mehr Bedarf an Kühlen haben, weil sie besser wärmegeprägt sind. Ein verstärkender Grund zum erhöhten Kühlenergiebedarf ist ein großer Fensterflächenanteil. Stadtklimaeffekte können hier auch eine Rolle gespielt haben, bspw. im Falle hoher Bebauungsdichte.

Tatsächlich, da wo die Wärmedämmung unzureichend ist, ist die Auswirkung der klimatischen Randbedingung größer im Innenraum zu spüren, da die thermische Verbindung zwischen Innenraum – und Außenraumklima durch die Gebäudehülle stärker ist.

10.2.3. Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen für das prognostizierte Zukunftsklima

Die Auswirkung des Klimawandels auf dem Gebäudeenergiebedarf für den Zeitraum 2041 – 2050 wird in [Abbildung 30](#) geschildert, und zwar als Differenz zum aktuellen Gebäudeenergiebedarf für Heizen und Kühlen (1991 – 2000). Verständlicherweise ist dieser Vergleich theoretisch, denn die Angaben zu den Gebäuden im Jahr 2041 können nicht erraten werden. Angesichts der stetigen Verschärfung der EnEV in Deutschland, ist es zu erwarten, dass Gebäude mit einer schlechten thermischen Gebäudehülle wie für das aktuelle Szenario z.T. angenommen wurde undenkbar sind. Insbesondere wenn die 50 Jahre Lebensdauer eines Gebäudes mit einbezogen wird. Dessen ungeachtet, ermöglicht dieser Vergleich, eine generelle Aussage über die Auswirkung einer globalen Erwärmung zu treffen.

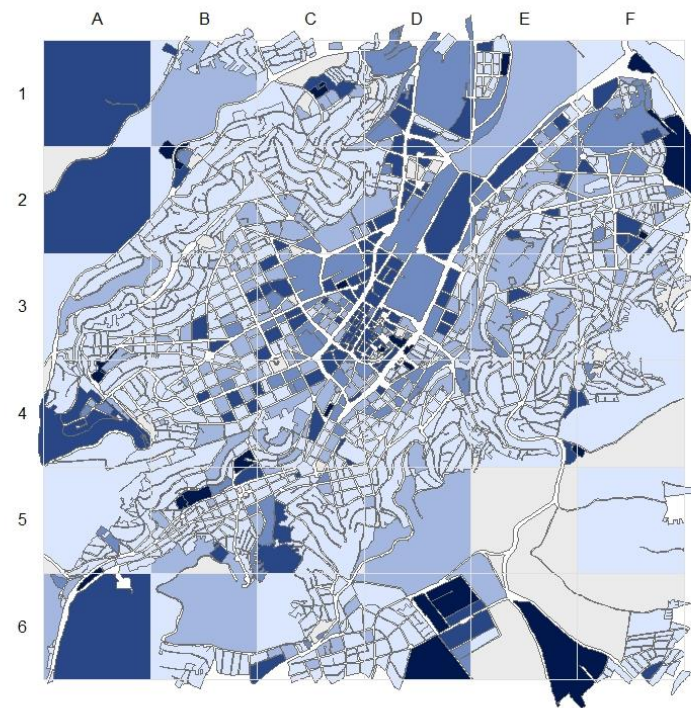
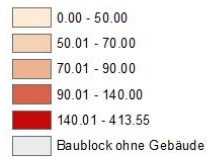
In [Abbildung 30](#) (links) wird es deutlich, dass der Bedarf an Heizenergie niedriger wird in der Zukunft. Die innenstädtischen Gebiete erfahren weniger Reduzierung des Heizenergiebedarfs, denn das Mikroklima ist stärker vom Klimawandel geprägt. Umgekehrt ist der Heizenergiebe-

darf an den Stadtrandgebieten deutlich geringer, da diese Stadtteile deutlich wärmer sind in der Zukunft. Beim Kühlen ist die Lage umgekehrt. Die Innenstadt benötigt mehr Kühlung aufgrund der erhöhten Lufttemperaturen, während die umgebenden Wohngebiete zwar mehr gekühlt werden müssen, allerdings im wesentlich kleineren Maße.



QHEAT (aktuell 1991_2000)

kWh/m²a



QCOOL (aktuell 1991_2000)

kWh/m²a

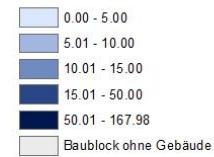


Abbildung 29: Mit TRNSYS berechnete Nutzenergie für Heizen (links) und Kühlen (rechts) für die Stadt Stuttgart für den Zeitraum (1991- 2000)

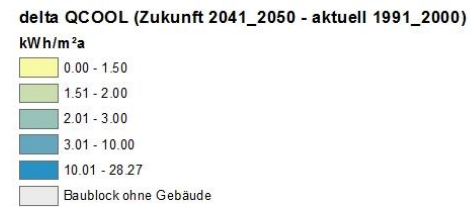
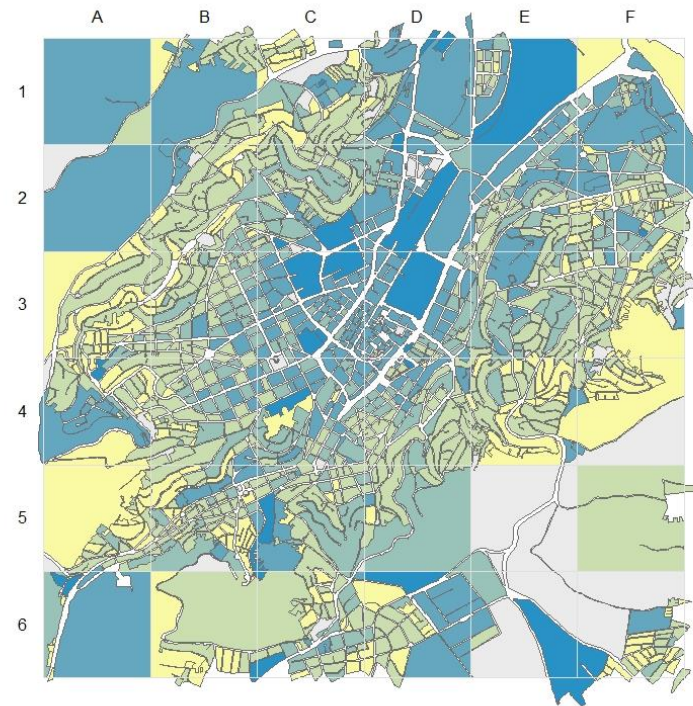
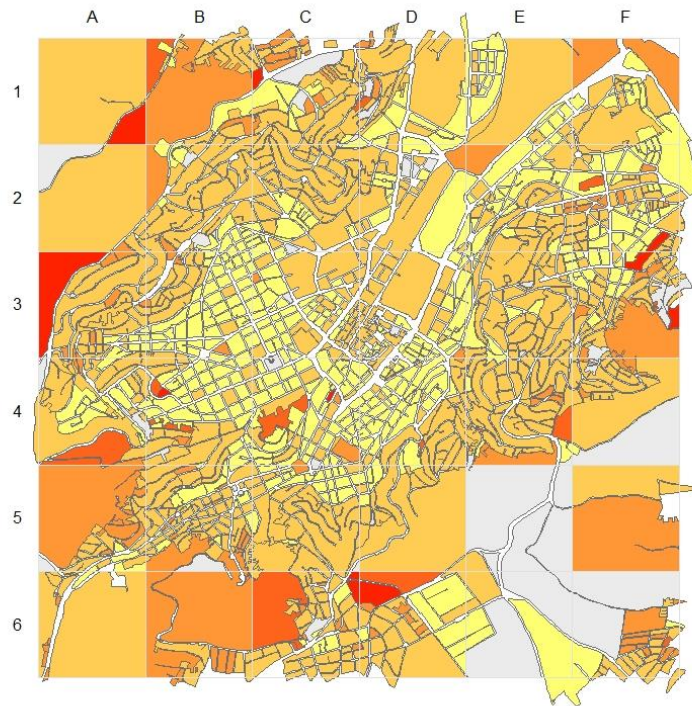


Abbildung 30: Mit TRNSYS berechnete Nutzenergie­differenz für Heizen (links) und Kühlen (rechts) für die Stadt Stuttgart zwischen den Zeitraum (2041 – 2050) und (1991 2000)

10.3. Validierung der Ergebnisse

Die hier vorgestellte Methode wird zum ersten Mal auf einem ausgedehnten realen Untersuchungsgebiet angewendet. Daher sind die daraus entstandenen Ergebnissen in der Abwesenheit von vergleichbaren Untersuchungen nicht einfach zu validieren. Ansätze für einen späteren Validierungsversuch sind allerdings vorhanden, welche im Rahmen des Forschungsprojektes aus Zeitgründen nur begrenzt möglich waren.

Eine Möglichkeit ist die Gegenüberstellung mit dem Energieatlas der Stadt Stuttgart, vorausgesetzt, dass die Information zum tatsächlichen Energieverbrauch nach Zweck bzw. Energieträger kann differenziert werden. Zu berücksichtigen ist auch die Tatsache, dass diese Energiekarte vom Jahr 1995 ist. Der erste Vergleich zwischen den hier erzielten Energiekennwerten für Heizen für den Zeitraum 1991-2000 und dem Energieatlas Stuttgart vom 1995 werden in [Abbildung 31](#) gegenübergestellt. Die [Abbildung 32](#) zeigt die gleiche Gegenüberstellung vergrößert für den Innenstadtbereich. Generell gilt es festzustellen, dass die berechneten Werte mit der hier angewandten Methode ein ähnliches Gesamtbild der Energiedichte wie bei den Referenzwerten des Energieatlases liefert. Angesichts der hohen Komplexität des Stadtgebildes, spricht dies deutlich für die Eignung dieser Methode für solche Untersuchungen und stellt damit ein wichtiges Ergebnis dieser Forschung dar. Zu den beobachteten Diskrepanzen können mehrere mögliche Gründe genannt werden, welche hierunter diskutiert werden.

Die Wohngebiete erscheinen deutlich wärmer am Stadtrand. Dies geschieht wahrscheinlich aufgrund der Annahme einer systematischen Soll-Luftraumtemperatur von 20 °C (nach EnEV). Diese wird durchgehend für den Nutzungszeitraum vom 6:00 bis 23:00 und für das gesamte Haus inklusive seine Nebenräume angenommen. Die Lüftung wird bis 0.79 Vol./Std für schlecht gedämmte Wohnhäuser angesetzt, welche nach den verfügbaren Angaben zum Baujahr bzw. Renovierungsjahr am Rand der Stadt meistens der Fall ist. Diese Annahmen sind eventuell übertrieben, bedenkt man das individuelle Nutzerverhalten (Sparmotivation, Abwesenheit, usw.). Solche Besonderheiten wären durchaus in TRNSYS, dank seines dynamischen Rechenverfahrens auf Stundenbasis, abbildbar, allerdings sind solche Informationen nicht vorhanden.

Zum Teil sind auch die Baublöcke zwischen beiden Datenquellen unterschiedlich definiert. Die Baublock-Karte, die zu diesem Projekt zur Verfügung stand, ist aktueller. Dazu kommt noch die eigene Überarbeitung dieser Baublock-Karte um diese in Übereinstimmung mit dem 2D-Plan zu bringen (z.B. neue Gebäude bilden einen neuen Baublock). Die Ergebnisse sollten daher erst in einer einheitlichen Baublock-Karte dargestellt werden, um diese vollständig vergleichbar zu machen. Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung der Ergebnisse ist die Mikroklimazonierung Stuttgarts heranzuziehen. Diese Karte wurde ursprünglich in den ersten Phasen der Bearbeitung für die Klimabeschreibung erstellt, welche später nicht mehr benutzt wurde. Die Stadtklimaefekte können mit solchen Karten verglichen werden. Dafür müssten diese Mikroklimakarten noch zeitlich differenziert werden (z.B. Jahreszeit: Sommer, Winter; Tageszeit: morgens; mittags; abends).

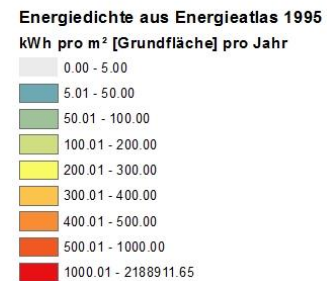
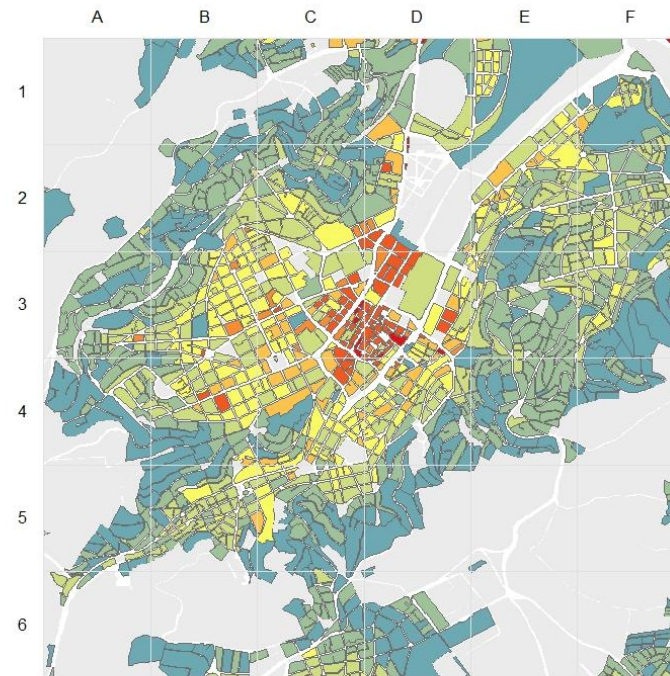
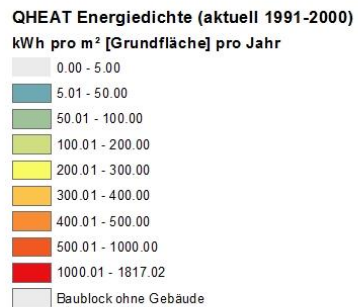
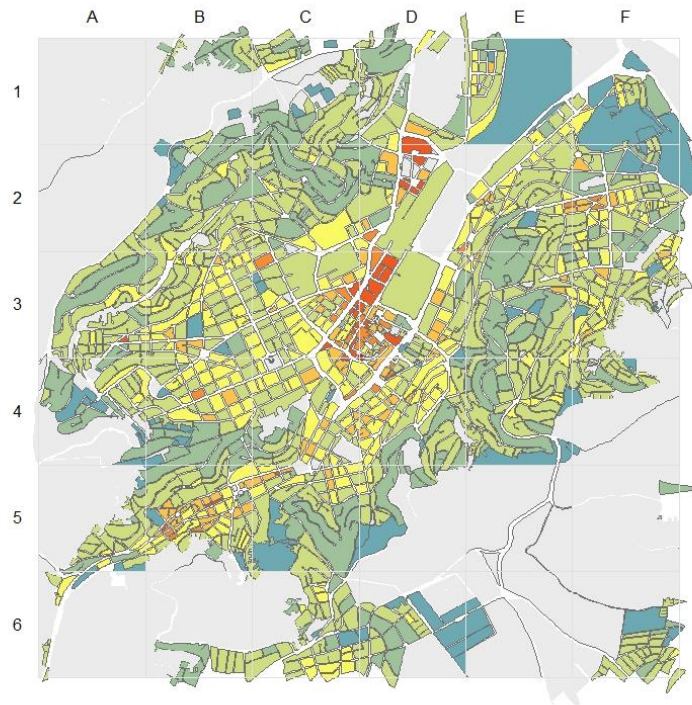
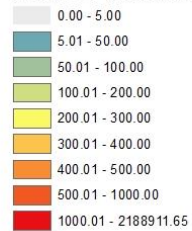


Abbildung 31: Vergleich der mit TRNSYS-berechneten Endenergiedichte für den Zeitraum 1991 – 2000 mit der aus dem Energieatlas vom 1995 für die gesamte Stadt Stuttgart



Energiedichte aus Energieatlas 1995

kWh pro m² [Grundfläche] pro Jahr



QHEAT Energiedichte (Endenergie) (aktuell 1991-2000)

kWh pro m² [Grundfläche] pro Jahr

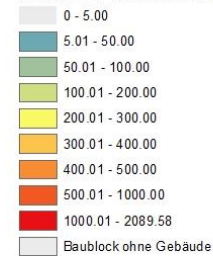


Abbildung 32: Vergleich der mit TRNSYS-berechneten Endenergiedichte für den Zeitraum (1991 – 2000) mit der aus dem Energieatlas vom 1995 für die Innenstadt Stuttgarts

11. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

11.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Dieses Projekt hatte methodische und inhaltliche Ziele. Methodisch wurde erstmals die Kombination mehrerer Rechenwerkzeuge und Techniken kombiniert (TEB, TRNSYS, GIS, DOE). Inhaltlich wurden 2 Ziele definiert und erreicht: 1) die Ermittlung der Stadtklimatischen Effekte und 2) die Ermittlung des Nutzenergiebedarfes für Heizen und Kühlen auf Gebäude- und Baublockebene für die Stadt Stuttgart.

(a) Zur Untersuchungsmethode:

Die gesamte Untersuchungsmethode stellte sich als geeignet heraus. Die kombinierte Berechnung mit TEB und TRNSYS wurden bereits in [Ali-Toudert \(2010a, 2010b, 2015\)](#) empfohlen und diese wurde hier an einem realen ausgedehnten Gebiet positiv bestätigt. Die GIS-Technik hat sich als eine robuste Methode sowohl für die Vorbereitung der Stadt- und Gebäudedaten (pre-processing) als auch für die Nachbearbeitung der Ergebnisse (post-processing) herausgestellt. Der skalenübergreifende Charakter dieser Forschung konnte somit auch umgesetzt werden. Die generische Beschreibung der Stadt, Baublöcke und Einzelgebäude anhand von thermisch relevanten Parametern in Verbindung mit einer systematischen Versuchsplanung ermöglichte eine zeitlich vertretbare Erfassung aller Gebäude ohne Qualitätsverlust. Somit wurde die unmögliche Betrachtung jedes Einzelgebäudes mit eigenen realen Eigenschaften umgegangen und gelöst. Darüber hinaus konnte die Versuchsplanung mit einer teil-faktoriellen Matrix den Zeitrechenaufwand erheblich reduzieren. Der Vorteil dieser Methode besteht auch in der Möglichkeit nachträgliche Korrekturen der Ergebnissen im Falle einer Verbesserung der Datenlage zu den Gebäuden vorzunehmen, z.B. sollte für ein Gebäude eine genauere Information zu seiner Wärmedämmqualität oder Fensterflächenanteil vorliegen, könnte die Schlussfolgerung zu seinem Energiebedarf aus den früheren kodierten Berechnungen neu ermittelt werden.

(b) Zu den Stadtklimaeffekten:

Die Stadtklimauntersuchung zeigte, dass die Stadtstruktur (Straßenprofil, die Proportion der bebauten Fläche) zur Erwärmung des Canyons führt. Diese Erhöhung kann 2 Kelvin erreichen, beträgt aber im Durchschnitt bis 0.87 K. Diese Erwärmung tritt verstärkt in den Nachtstunden auf und weist damit auf eine Wärmeinsel hin. Gleichzeitig erfahren solche Stadtstrukturen auch Episoden der Abkühlung aufgrund von mehr Verschattung durch die Gebäude. Dies geschieht in den Mittagsstunden als sogenannte Kühlinself. Bei lockerer bis mittlerer Bebauung sind diese Phänomene weniger in ihrer Stärke ausgeprägt. Die TEB-Berechnungen zum Stadtklima für das Zukunftsszenario haben zudem gezeigt, dass das warme Mikroklima nicht nur durch die Topographie des Standortes beeinflusst wird, sondern auch maßgebend durch die Stadtstruktur. Diese Ergebnisse bestätigen die Notwendigkeit, Stadtklimaeffekte mit zu berücksichtigen.

(c) Zu dem ermittelten Gebäudeenergiebedarf:

Die TRNSYS-Berechnungen, basierend auf einem systematischen Versuchsplan, ermöglichten die Ermittlung des Gebäudeenergiebedarfs für Heizen und Kühlen für jedes einzelne Gebäude. Die damit verbundene statistische Analyse macht es auch möglich, die Stadt- und Gebäudeparameter mit dem größten Einfluss zu identifizieren. Der Vergleich der berechneten Energiekennwerte mit den vorhandenen Verbrauchsdaten bestätigt die Eignung dieser Vorgehensweise. Für die klimatische Lage von Stuttgart ist die Qualität der Wärmedämmung sowie das Gebäudevolumen am wichtigsten, sowohl für Heizen als für Kühlen, auch wenn der Kühlbedarf als absoluter Wert deutlich geringer ist. Ein wesentliches Ergebnis dieses Projektes ist die erreichte räumliche und feine Darstellung der Energiekennwerte für Heizen und Kühlen für die gesamte Stadt.

11.2. Einschränkungen dieser Forschungsarbeit

Für die Durchführung dieser Forschungsarbeit sind erhebliche Informationsmengen notwendig gewesen. Der Untersuchungsstandort Stuttgart ist aufgrund der langjährigen Expertise im Bereich der Stadtklimatologie und die detaillierte bzw. ausführliche Datenbank sicherlich eine der besten Orte in Deutschland. Trotzdem ist die Qualität der Daten in Zusammenhang mit dem projektbezogenen Bedarf bezüglich zeitlicher oder räumlicher Auflösung sowie Aktualität und Genauigkeit unterschiedlich, so dass diese auch in der gesamten Aus- und Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden mussten. Die unten stehende Auflistung der Datenmängel dient der Vollständigkeit der Berichterstattung dieser Arbeit und weist auf mögliche Verbesserungen im Ausblick hin.

(a) Klimadaten:

Der Zeitaufwand für die Bereitstellung der Klimadaten war erheblich. Grund dafür war der Bedarf an zeitlich und räumlich fein aufgelösten Informationen um die mikroskalige Differenzierung des Stadtklimas sichtbar machen zu können. Wie im [Kapitel 6](#) beschrieben wurde, war eine direkte Nutzung der verfügbaren Klimadaten nicht möglich. Stattdessen wurden mehrere Arbeitsschritte unternommen, um für das Projekt notwendige Klimadaten aus verschiedenen Quellen erstellen zu können (u. A. Gegenüberstellung aller Quellen, bi-lineare Interpolation, Bias-Korrektur). Schließlich konnten Klimadaten für 30 Jahre und 2 Zeiträume (Aktuell, Zukunft) als Stundenwerte mit einem Raster von 1 km² für das gesamte Gebiet Stuttgart angepasst werden.

Aufgrund der Anzahl und Länge der Klimadatensätze war der Rechenaufwand so groß, dass diese z.T. für den zweiten Teil des Projektes (Energieberechnung mit TRNSYS) reduziert worden sind. Das Auswahlverfahren beruhte auf einer statistischen Clusteranalyse der ausführlichen TEB-Berechnungen. Für Aufgaben wie in diesem Forschungsprojekt geplant waren, hätten Hochleistungsrechner benutzt werden müssen, um die Simulationspläne in ihrer Gesamtheit bewältigen zu können. Trotzdem sollte die Qualität der Ergebnisse nicht einträchtig sein, da die Repräsentativität der ausgewählten Informationen gesichert ist.

(b) Stadt- und Gebäudedaten:

In diesem Projekt wurden möglichst alle Informationen zur Beschreibung der Stadt und deren Gebäude verwendet. Die Datenlage für Stuttgart kann als gut bezeichnet werden. Die 2D und 3D Pläne sowie die zusätzlichen statistischen Daten ermöglichten eine vernünftige Bearbeitung des Themas. Und trotzdem fehlten ein paar wichtige Informationen, welche, obwohl modellierbar sind, nur mit einfachen Annahmen für die Stadt definiert werden konnten. Somit konnte deren Einfluss bei den Ergebnissen nur mit Einschränkung berücksichtigt werden. Dies gilt u. A. für die Qualität der Wärmedämmung der Gebäude, welche nur anhand der Baualtersklassen bestimmt werden konnte. Es ist nicht klar, ob alle energetischen Renovierungen in der Datenbank dokumentiert sind. Der Fensterflächenanteil ist nicht gegeben, weder in der Datenbank noch im 3D-Plan. Die anthropogene Abwärme konnte als Annäherungswerte ermittelt werden, überwiegend aus einer Verkehrskarte als Mittelwert für das Jahr. Kein Tagesgang oder Wochengang konnte berücksichtigt werden. Die Abwärme aus den Gebäuden wurde pauschal zu einem Drittel der Verkehrswerte gesetzt, da diese Information gar nicht vorhanden war.

(c) Ergebnisse zum Klimawandel-Szenario:

Sämtliche Berechnungen in diesem Projekt wurden für die aktuelle Klimalage gegeben mit dem Zeitraum 1991 2000, und für die Zukunftsprognose des Klimawandels, gegeben für 2041 - 2050. Die Energiekennwerte für den Klimawandel setzen allerdings die gleichen Annahmen bezüglich der Stadt- und Gebäudebeschreibung voraus, da keine Vorhersage in die Zukunft für solche Informationen vorhanden bzw. möglich ist.

11.3. Schlussfolgerung und Ausblick

(a) Validierung der Energiekennwerte:

Wie im Kapitel 10.3 erläutert wurde, ist eine Validierung der hier berechneten Energiekennwerte denkbar. Alle im Kapitel 10.3 möglichen Gründe zur Abweichung der berechneten Daten im Vergleich zu den Verbrauchsdaten könnten in einem nächsten Schritt bzw. in einem Folgeprojekt geprüft werden. Allerdings geht es hier um die Heizenergie, da weitere Angaben zum Kühlenergieverbrauch nicht vorhanden sind (klimabedingt). Ferner konnten einige Annahmen für die TEB und TRNSYS Simulationen nach ihrer Repräsentativität aufgrund fehlender Informationen für Stuttgart nicht geprüft werden, wie z.B. keine Angaben zum Fensterflächenanteil; Angaben zur Wärmedämmqualität eventuell nicht aktuell sind, wenn nicht alle energetischen Renovierungen dokumentiert sind. Die anthropogene Abwärme aus dem Verkehr und der Stadt selbst konnte nur zum Teil abgebildet werden, usw. Eine enge Zusammenarbeit mit der Stadt Stuttgart wäre sicherlich hilfreich und ist wünschenswert. Einzelheiten der Berechnungen könnten dann genau überprüft werden und dementsprechend auch Verbesserungen vorgeschlagen werden.

(b) Weiterentwicklung der Rechenwerkzeug

Um die hier angewandte Methode zukünftig an weiteren Untersuchungen zeiteffizient verwenden zu können und auch um die Vorbereitung der Versuche zu reduzieren, ist die Weiterentwicklung eines gesamtheitlichen Rechenwerkzeugs mit integrierter thermischer Rückkopplung zwischen Außenraum (Stadtklima, Mikroklima) und Innenraum (Raumklima, Energie) sehr wünschenswert. Dies ist bereits ein Forschungsziel an der JP-EEB. Die neue Implementierung von TEB in TRNSYS als Type 201 ist ein erster Meilenstein dafür.

(c) Klima-relevante städtebauliche Planungshinweise:

Die hier erzielten Ergebnisse zum Stadtklima liefern eine Grundlage für die Weiterbearbeitung von Stadtklimarelevanten Planungsaktionen im Hinblick auf thermische Behaglichkeit und Vermeidung vom Hitzestress im Sommer. Die Modellierungen mit TEB liefern Ergebnisse mit Fokus auf die zeitliche Komponente, so dass eine jahresbezogene Gesamtbetrachtung von Planungskonzepten möglich ist.

REFERENZEN

- Ali-Toudert, Ji L. (2013): Forschungsprogramm KLIMOPASS-TEIL1 - Forschungsprojekt KLISGEE - Klimawandel, Stadtklima und Gebäudeenergieeffizienz: Wechselwirkungen und Handlungskonzepte für eine nachhaltige Stadt: Zwischenbericht N° 4. Internes Dokument.
- Ali-Toudert F. , Ji L. 2014 : GIS-Mapping of the Building Energy Demand with Consideration of Urban Climate Effects for the City of Stuttgart. Third International Conference on Countermeasures to urban Heat Island, Venice October 13-15th 2014.
- Ali-Toudert F. 2010a: Heating and cooling energy demand of office urban buildings in the sub-tropics: relevance of the urban microclimate, urban geometry and building construction. Inter-national RHEVA Conference CLIMA2010, Antalya, Turkey, (angenommen in der Sonderausgabe von der Fachzeitschrift ASHRAE HVAC & R.
- Ali-Toudert F. 2010b: Kombinierte Stadtklima- und Gebäudeenergiemodellierung zur Bestimmung des Energiebedarfes von urbanen Gebäuden. International Building Performance Simulation Association IBPSA-Conference, 22.-24.09.2010, Vienna, Austria.
- Ali-Toudert F., Böttcher S. 2015: Implementation of the TEB model as a new TRNSYS-TYPE for the Assessment of Urban Microclimate prior to Building Thermal Simulation. Ninth International Conference on Urban Climate ICUC9. Toulouse, France, July 20 – 24th 2015
- Ali-Toudert F., Ji L. 2015 : GIS-Mapping the Building Heating and Cooling Energy Demand for the City of Stuttgart, Germany. 17èmes Journées Internationales de Thermique Marseille, France, November 4 – 6th 2015 (JITH 2015)
- Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung Stuttgart (2012): Flächennutzungsplan für Stadt Stuttgart.
- Amt für Umweltschutz (2013): Verkehrsbelastung in Stuttgart.
- Amt für Umweltschutz Stuttgart (Hg.) (1997): Energieatlas. URL: http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_kliks_karten-energieatlas
- Amt für Umweltschutz Stuttgart (Hg.) (2009): Mittlere Stickstoffdioxid-Belastung. URL: http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?luft_flaeche_berechnung_no2.
- Auto-umwelt.at (Hg.) (2010): Gesetzliche Vorschriften: Emissionsgesetzgebung für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge. URL: http://www.auto-umwelt.at/_gesetzg/gesvs_abg.html .
- Bruse M. 2010: ENVI-met website. <http://www.envi-met.com>.
- Büringer, H. und Schmidtmeier, D. (2012): Aktuelle Entwicklung des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hg.) (Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg). URL: http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/veroeffentl/Monatshefte/PDF/Beitrag12_03_07.pdf
- Deutscher Wetterdienst (2011): Testreferenzjahre TRY http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/spez_themen/try/try_node.html
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2013): Wetterdaten im Zeitraum 1987-2013.

ESRI GIS Server: URL:

http://server.arcgisonline.com/arcgis/rest/services/Reference/World_Boundaries_and_Places_Alternate/MapServer .

European Environment Agency (Hg.) (2014): Corine Land Cover 2006 raster data. URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-3>.

Görres, J. (2010): Forschungsvorhaben Stadt mit Energie-Effizienz SEE Stuttgart. Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz. URL: http://www.kommunale-stadtwerke.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Stuttgart/Termine/2010/2010-06-26_SEE/Gesamtvortrag.pdf.

IPCC 2007, Intergovernmental Panel for Climate Change, Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

kfz-tech.de (Hg.) (2013): Wirkungsgrad (Efficiency). URL: <http://www.kfz-tech.de/Formelsammlung/Wirkungsgrad.html>.

LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz) (Hg.) (2010): Stickstoffdioxid (NO₂)-Belastungen in der Bundesrepublik Deutschland. Ursachen – Minderungsmaßnahmen – weiteres Vorgehen. URL: http://www.mugv.brandenburg.de/sixcms/media.php/4055/lai_118.pdf.

LUBW – Hochwasserzentrale der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2013): Herunterskalierte stündliche Wetterdaten in 1km² Auflösung für den Zeitraum 2003-2012.

Masson V., 2000 : A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models. Boundary-Layer Meteorol., 94, 357-397.

Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim (Hg.) (2011): Modellgestützte Voruntersuchungen zur Fortschreibung des Luftreinhalteplanes im Rahmen der NO₂-Notifizierung. Braunschweig. URL: <http://www.umwelt.niedersachsen.de/download/61980>.

Stadt Stuttgart (2013): Testdaten. URL: <http://www.stuttgart.de/item/show/492022>.

Stadtmessungsamt (2013): GIS-Daten: Baublockkartierung.

Stadtwerk Emmendingen (2012): Vergleichbarkeit der Kraftstoffe Erdgas, Super und Diesel. URL: http://swe-emmendingen.de/wp-content/uploads/2012/09/erdgas_tankstelle_umrechnung.pdf.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hg.) (2013): Emissionen an Stickoxiden (NO_x) durch den Straßenverkehr. Stadtkreis Stuttgart.

Transsolar 2010 http://www.transsolar.com/_software/

WMBW 2008: Städtebauliche Klimafibel Online <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/index-v.html>

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schema der verwendeten Untersuchungsmethode bestehend aus 1) dem Town Energy Balance Model TEB, 2) TRNSYS Gebäudeenergiemodell TRNSYS, 3) Geographische Informationssysteme GIS und Statistische Verfahren (DOE) ..	11
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Untersuchungsvorgehensweise im Rahmen dieses Forschungsprojektes	16
Abbildung 3: Ausgewählte Wetterstationen für das Betrachtungsgebiet Stuttgarts (DWD 2013b, KIT 2011, Amt für Umweltschutz 2013, eigene Darstellung)	18
Abbildung 4: Wetterstationen als Grundlage für die Interpolation der Wetterdaten des LARSIM-Modells (LUBW 2013, ESRI GIS Server)	22
Abbildung 5: Räumliche Differenzierung nach LARSIM der Klimaparameter (Globalstrahlung, Lufttemperatur, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit, Luftdruck und Niederschlag) im Jahresdurchschnitt/Jahressumme (Daten: LUBW 2013, eigene Darstellung) ..	23
Abbildung 6: Mittlere monatliche Tagesgänge für Lufttemperatur und Globalstrahlung aus den verschiedenen Klimadatenquellen für Stuttgart.....	24
Abbildung 7: Ausschnitt aus 1) der Baublockkarte (links, eigene Darstellung), 2) dem 2D-Stadtplan (Mitte) und 3) 3D-Stadtplan (rechts) Stuttgarts.....	27
Abbildung 8: Abwärme aus dem Verkehr und Energieatlas der Stadt Stuttgart.....	28
Abbildung 9: Die skalenübergreifende Betrachtung der Projektziele am Beispiel der Kompaktheit (Form-Koeffizient).....	33
Abbildung 10: räumliche Verteilung der Verkehrsabwärme (links) und der Bebauungsdichte H/W (rechts).....	34
Abbildung 11: Räumliche Verteilung der durchschnittlichen Gebäudehöhe (links) und der bebauten Fläche pro Grundstücksfläche (rechts).....	35
Abbildung 12: Räumliche Verteilung der Gebäudekompaktheit (Form-Koeffizient, links) und des mittleren Gebäudevolumens (rechts)	36
Abbildung 13: Räumliche Verteilung des Fensterflächenanteils (links) und des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U-Wert (rechts)	37
Abbildung 14: Räumliche Verteilung nach Gebäudenutzung Wohnen (links), nicht Wohnen konventionell (Mitte) und nicht Wohnen Sonderfälle (rechts).....	38
Abbildung 15: Umfang der Berechnungen mit TRNSYS und deren Zeitaufwand (links) und die 3 repräsentativen Klimadateien (rechts unten) aus der Cluster-analyse für die TRNSYS Simulationen.....	40
Abbildung 16: Versuchsplan für die TRNSYS-Simulationen	40

Abbildung 17: Reduziertes Untersuchungsgebiet für die Gebäudeenergiemodellierung (A bis F, 1 bis 6)	41
Abbildung 18: Differenzierung der verschiedenen Stadtstrukturen nach Dichte pro Zelle, gekennzeichnet mit einem dunklen, mittleren und hellen Ton mit der derselben Farbe in jeder Zelle	41
Abbildung 19: In TRNSYS untersuchte Stadtstrukturen und Gebäudetypen	44
Abbildung 20. Mittlere U-Werte nach dem IWU-Gebäudetypologie-Katalog Deutschlands	45
Abbildung 21 Die TRNSYS-Studio Oberfläche für die Ermittlung der Stadtklimaeffekte anhand TEB-Type 201	48
Abbildung 22: Beispiel einer TEB-Simulation für die Ermittlung der urbanen Lufttemperaturen (Tcanyon, linke Achse) im Vergleich zu Tobs auf 2 m Höhe und Tforcing auf 30 m Höhe (delta TWerte in Kelvin, rechte Achse)	48
Abbildung 23: Die TRNSYS-Studio Oberfläche für die thermische Gebäudemodellierung und Ermittlung der Energiekennwerte Heizen und Kühlen (729 Fälle).....	49
Abbildung 24: Beispiel einer TRNSYS-Simulation für die Ermittlung der Energiekennwerte Heizen (QHEAT, sichtbau Abb. Oben);	49
Abbildung 25: Mit TEB berechneter Stärke der Erwärmung des Urban Canyons für Stuttgart für den Zeitraum 1991-2000 inkl. hot-spots für zeitliche Analyse	53
Abbildung 26: Mit TEB berechneten Heizgradtage HDD Änderung für Stuttgart mit Berücksichtigung der Stadtklimaeffekte im Vergleich mit der aktuellen Klimalage (1991-2000)	54
Abbildung 27: Mittlerer Tages- und Jahresverlauf der Erwärmung bzw. Abkühlung der Lufttemperatur im Canyon für den Zeitraum 1991 – 2000 (TEB Berechnung).....	55
Abbildung 28: Mit TEB berechneten Heizgradtage HDD Änderung für Stuttgart für die Klimawandelprognose von (2041-2050) im Vergleich mit der aktuellen Klimalage (1991-2000)	56
Abbildung 29: Mit TRNSYS berechnete Nutzenergie für Heizen (links) und Kühlen (rechts) für die Stadt Stuttgart für den Zeitraum 1991 2000	61
Abbildung 30: Mit TRNSYS berechnete Nutzenergie differenz für Heizen (links) und Kühlen (rechts) für die Stadt Stuttgart zwischen den Zeitraum (2041 – 2050) und (1991 2000)	62
Abbildung 31: Vergleich der mit TRNSYS-berechneten Endenergiedichte für den Zeitraum 1991 – 2000 mit der aus dem Energieatlas vom 1995 für die gesamte Stadt Stuttgarts.....	64

Abbildung 32: Vergleich der mit TRNSYS-berechneten Endenergiedichte für den Zeitraum 1991 – 2000 mit der aus dem Energieatlas vom 1995 für die Innenstadt Stuttgarts.....	65
---	----

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Anzahl der Gebäude nach ihrer Nutzung (statistische Datenbank)	26
Tabelle 2: Stadt- und Gebäudeindikatoren in der Gebäudeenergiesimulation.....	31
Tabelle 3: Protokoll der TEB-Eingaben	43
Tabelle 4: Mittlere U-Werte für Wohngebäude nach dem IWU-Gebäudetypologie-Katalog Deutschlands.....	45
Tabelle 5: Thermische Eigenschaften der Bauteile der Gebäude wie in TEB und TRNSYS abgebildet.....	46
Tabelle 6: TEB und TRNSYS Simulationseinstellungen für die Dämmqualität,	46
Tabelle 7: TRNSYS Simulationseinstellungen für die repräsentative Gebäudekubatur.....	46
Tabelle 8: TRNSYS-Simulationseinstellungen für HVAC Systeme (überwiegend nach EnEV und DIN-18599)	47
Tabelle 9: Beispiel einer statistischen Analyse für Heizen (SQHEAT) und Kühlen (SQOOL) für den Nutzungstyp Wohnen und eine Klimadatei aus dem Innenstadtbereich für den Zeitraum 1991 – 2000.....	58