

Frank Petzold, Thomas Auer

**Simulationsgestützte  
Entwurfsplanung im städtebaulichen  
Kontext unter Berücksichtigung  
energetischer und raumklimatischer  
Aspekte**

F 3100

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0232-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

# Endbericht

**Simulationsgestützte Entwurfsplanung  
im städtebaulichen Kontext unter Berücksichtigung  
energetischer und raumklimatischer Aspekte**

**München, Dezember 2017**

Forschung im Auftrag des BBR im Rahmen der Forschungsinitiative  
Zukunft Bau

Technische Universität München

Lehrstuhl für Architekturinformatik

Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen

Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer



**Simulationsgestützte Entwurfsplanung  
im städtebaulichen Kontext unter Berücksichtigung  
energetischer und raumklimatischer Aspekte**

Impressum:

Endbericht Dezember 2017

Lehrstuhl für Architekturinformatik

Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen

Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Projektlaufzeit:

Januar 2017 bis Dezember 2017

Tel. +49 89 289-221 71

Fax +49 89 289-221 79

E-Mail: [info@ai.ar.tum.de](mailto:info@ai.ar.tum.de)

Das Forschungsprojekt wurde gefördert mit Mitteln der  
Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.59), Stiftung Bayrisches Baugewerbe, Euroboden GmbH

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Lehrstuhl für Architekturinformatik

Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen

Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer



## Zusammenfassung

Energetische und raumklimatische Aspekte werden bei Entwurfsentscheidungen in städtebaulichen Planungsphasen heutzutage meist nur ungenügend berücksichtigt. Die Ursachen hierfür finden sich unter anderem in unzureichenden Bedienschnittstellen bzw. Softwarelösungen. Zur Auflösung dieser Diskrepanz wurden im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes CDP // ENERGY Anforderungen an Analysemethoden zur Betrachtung energetischer und raumklimatischer Aspekte in kreativen Planungsphasen untersucht, aufbauend hierauf Lösungsansätze konzeptionell entwickelt und als Applikationen prototypisch umgesetzt.

Die Arbeit am Projekt erfolgte in einem interdisziplinären Team zwischen dem Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen (Prof. Thomas Auer) und dem Lehrstuhl für Architekturinformatik (Prof. Frank Petzold). Ausgehend von raumklimatischen bzw. energetischen Gesichtspunkten wurde eine Anforderungsanalyse für die Bereiche Fernwärmeversorgung, erneuerbare Energiepotentiale sowie Tageslicht- und thermische Simulationen auf Gebäudeebene erarbeitet. Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen konnten dann fünf Berechnungsmethoden zur Evaluierung bzw. Grobplanung für diese Themenfelder erarbeitet werden. Die prototypische Implementierung von drei dieser Methoden erfolgte auf Basis der bestehenden CDP // Collaborative Design Plattform.



## Abstract

Energy- and indoor climate-related aspects are generally not sufficiently considered in design decisions during the urban planning phases. The reasons for this include inadequate user interfaces and software solutions. To resolve this discrepancy requirements for analysis methods for the examination of energy- and indoor climate-related aspects in the creative planning phases were investigated within the framework of the interdisciplinary research project CDP // ENERGY. Based on this, solution concepts were developed and implemented as prototypical applications.

The project was carried out by an interdisciplinary team consisting of the Chair of Building Technology and Climate Responsive Design (Prof. Thomas Auer) and the chair of Architectural Informatics (Prof. Frank Petzold). Based on climate- and energy-related aspects, requirements analysis in the areas of district heating supply, renewable energy potentials as well as daylight and thermal simulations at the building level was developed. Considering these requirements, five evaluation and rough planning calculation methods were then developed for these subject areas. The prototypical implementation of three of these methods was based on the existing CDP // Collaborative Design Platform.



# Inhaltsverzeichnis

<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>3</b>
<b>2 EIGENE VORARBEITEN: CDP // COLLABORATIVE DESIGN PLATFORM.....</b>	<b>5</b>
2.1    HARDWARE .....	6
2.2    SOFTWARE .....	10
<b>3 FORSCHUNGSANSATZ.....</b>	<b>13</b>
3.1    WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN STÄDTEBAU, ENERGIE UND KOMFORT.....	13
3.2    KONZEPTIONELLE ANFORDERUNGEN ENERGIE UND KOMFORT .....	15
3.3    TECHNISCHE ANFORDERUNGEN AN ENTWURFSUNTERSTÜTZENDE SYSTEME .....	16
<b>4. PLUG-IN WÄRMENETZ .....</b>	<b>17</b>
4.1    ENERGETISCHE GRUNDLAGEN UND ANFORDERUNGEN AN DAS PLUG-IN.....	17
4.1.1 <i>Berechnung des Wärmebedarfs der Gebäude.....</i>	<i>17</i>
4.1.2 <i>Regeln zur Definition des Netzverlaufs.....</i>	<i>18</i>
4.1.3 <i>Berechnung der Wärmeabnahme pro Trassenmeter .....</i>	<i>19</i>
4.1.4 <i>Dimensionierung der Heizzentrale.....</i>	<i>21</i>
4.2    IMPLEMENTIERUNG.....	25
4.2.1 <i>Berechnung des Wärmebedarfs der Gebäude.....</i>	<i>25</i>
4.2.2 <i>Ermittlung des optimalen Netzverlaufs und Positionierung der Heizzentrale .....</i>	<i>26</i>
4.3    VALIDIERUNG.....	30
<b>5. PLUG-INS ERNEUERBARE ENERGIEPOTENZIALE .....</b>	<b>31</b>
5.1    PLUG-IN SOLARPOTENZIAL.....	31
5.1.1 <i>Energetische Grundlagen und Anforderungen an das Plug-in.....</i>	<i>31</i>
5.1.2 <i>Implementierung .....</i>	<i>41</i>
5.1.3 <i>Validierung .....</i>	<i>44</i>
5.2    PLUG-IN POTENZIAL OBERFLÄCHENNAHE GEOTHERMIE.....	48
5.2.1 <i>Energetische Grundlagen und Anforderungen an das Plug-in.....</i>	<i>48</i>
5.2.2 <i>Implementierung .....</i>	<i>55</i>

<b>6.</b>	<b>PLUG-INS SIMULATION INNENRAUM .....</b>	<b>59</b>
6.1	PLUG-IN TAGESLICHTSIMULATION.....	60
6.1.1	<i>Tageslicht Grundlagen und Anforderungen an das Plug-in .....</i>	<i>61</i>
6.1.2	<i>Implementierung.....</i>	<i>74</i>
6.1.3	<i>Validierung.....</i>	<i>75</i>
6.2	PLUG-IN THERMISCHE SIMULATION.....	77
6.2.1	<i>Energetische Grundlagen und Anforderungen an das Plug-in .....</i>	<i>77</i>
6.2.2	<i>Implementierung.....</i>	<i>82</i>
<b>7.</b>	<b>ANWENDUNGSKONZEPT - WO SEHEN WIR DIE ANWENDUNG .....</b>	<b>85</b>
7.1	BENUTZERSZENARIO .....	86
	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>89</b>
	<b>ABKÜRZUNGEN .....</b>	<b>91</b>
	<b>QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>93</b>
	<b>ABBILDUNGEN UND TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>97</b>
	<b>ANHANG.....</b>	<b>103</b>

## Danksagung

Das Projektteam bedankt sich bei der Stadt München für die Bereitstellung digitaler Gebäudedaten des Untersuchungsgebiets.

Weiterhin bedankt sich das Team bei der Stiftung Bayerisches Baugewerbe und Euroboden GmbH für die finanzielle Unterstützung des Projektes.

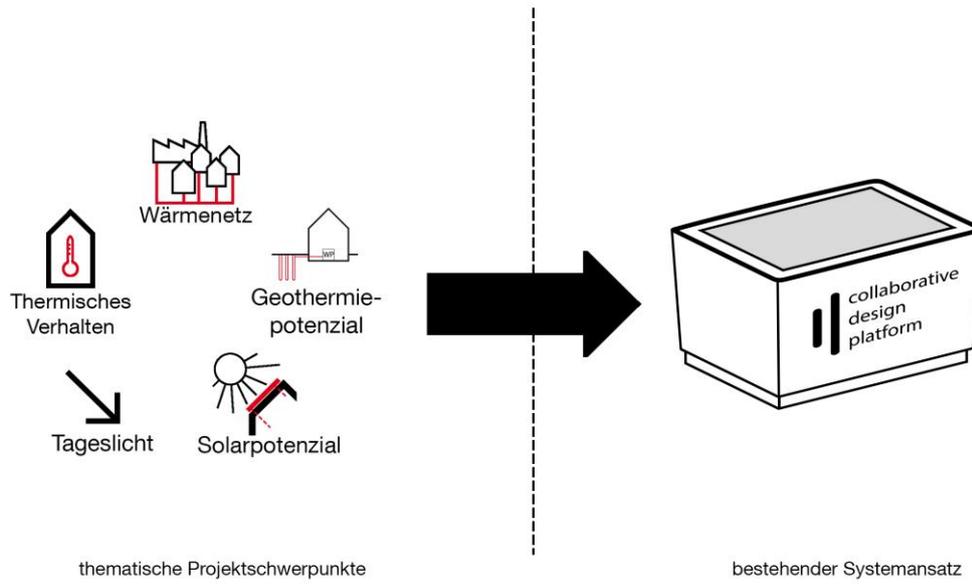


# 1 Einleitung

Für die Energieeffizienz und die Innenraumqualität von Gebäuden sind frühe Entscheidungen auf städtebaulicher Ebene höchst relevant. Die Auswirkungen diesbezüglich unbefriedigender städtebaulicher Konzepte müssen mit teilweise sehr aufwendigen Maßnahmen in der Gebäudeplanung kompensiert werden (erhöhte Dämmstandards, aufwendige Klimaanlage usw.) und führen zu einem erhöhten Energiebedarf im Gebäudebetrieb. Ein möglicher Ansatz zur Behebung dieser Problematik liegt in der Überprüfung von energetischen Aspekten in städtebaulichen Entwurfsszenarien durch Analysen und Simulationen. Aktuell ist jedoch deren Einsatz durch mangelhafte Bedienschnittstellen (Maus und Tastatur sind in frühen kreativen Planungsphasen nicht geeignet) sowie unzureichende bzw. ungeeignete Softwarelösungen (meist werden hoch exakte Daten zur Berechnung benötigt) nur bedingt möglich.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens lag in der Aufhebung dieser Diskrepanz. Im Fokus lag hierbei die Untersuchung und Konzeption relevanter Analyse- und Simulationsmethoden für energetische und raumklimatische Aspekte zum Einsatz in frühen städtebaulichen Planungsphasen. Ausgehend davon erfolgte die Erweiterung der bereits entwickelten städtebaulichen Entwurfsplattform „CDP // Collaborative Design Platform“ um zusätzliche Komponenten zur Bewertung der Energieeffizienz und des Innenraumkomforts von Gebäuden sowie der energetischen Versorgungsmöglichkeiten im Untersuchungsgebiet (Abb. 1.1).

Dies wird ermöglicht durch eine enge Kooperation zwischen dem *Lehrstuhl für Architekturinformatik* und dem *Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen* der Technischen Universität München. Während die technischen Vorgaben und die Vorgehensweise zu den Energieeffizienz- und Behaglichkeitskriterien vom Lehrstuhl für Gebäudetechnologie entwickelt wurden, übernahm der Lehrstuhl für Architekturinformatik die Erweiterung und informationstechnische Umsetzung an der CDP // Collaborative Design Platform.



**Abb. 1.1 Forschungsrahmen. Erweiterung der bestehenden Entwurfsplattform CDP um zusätzliche Analyse- und Simulationsmethoden zum Thema Energie**

## 2 Eigene Vorarbeiten:

### CDP // Collaborative Design Platform

Die Frage nach einem sinnvollen und nützlichen Einsatz des Rechners bereits in frühen Phasen der architektonischen Planung (z.B. städtebaulicher Maßstab 1:500) steht im Zentrum der Forschungsgruppe CDP // Collaborative Design Platform. Ausgehend von den Anforderungen im Entwurfs-, Planungs- und Kommunikationsprozess wurden im Rahmen der Dissertation „Interaktionsformen für das digitale Entwerfen: Konzeption und Umsetzung einer rechnergestützten Entwurfsplattform für die städtebaulichen Phasen in der Architektur“ Anforderungen an eine Entwurfsplattform untersucht und als Prototyp und Machbarkeitsnachweis ("Proof of Concept") entwickelt (Schubert 2014). Im Kern des Projektes steht die Frage nach Möglichkeiten der digitalen Unterstützung in frühen kreativen Entwurfsphasen. Auf Basis der Analyse des Entwurfsprozesses und den damit verbundenen Anforderungen an Entwurfswerkzeuge wurde eine digitale Designplattform konzipiert und prototypisch umgesetzt – im Kern steht die direkte Kopplung von physischen Arbeitsmodellen und Handskizzen mit interaktiven digitalen Inhalten wie Analysen und Simulationen in Echtzeit.



**Abb. 2.1 CDP // Collaborative Design Platform – etablierte Entwurfswerkzeuge und digitale Analyse nahtlos (z.B. Schattenanalyse im Jahresverlauf) verbunden**

Durch die Verwendung etablierter Entwurfswerkzeuge wie Arbeitsmodell und Handskizzen als Eingabemedien („Tangible User Interface“, TUI) wird neben der Eingabe vager Informationen vor allem das „Visual Thinking“ und somit der Prozess der Ideenfindung gefördert. Durch das Rekonstruieren der auf dem Tisch platzierten Arbeitsmodelle in Echtzeit in digitale 3-D-Körper dienen diese im Gegensatz zu gängigen „Tangible User Interfaces“ nicht nur als Adaption der Steuerung. Durch diese „markerlose“, direkte Verbindung von physischer und digitaler Welt sind die physischen Arbeitsmodelle als Gesamtkörper mit der Simulation verbunden und werden zu direkten Akteuren im digitalen Entwurfsszenario. Plastische Verformungen der Arbeitsmodelle, wie etwa zerschneiden oder verformen, aber auch Positionsänderungen, werden direkt in der Szene aktualisiert und in den Echtzeitberechnungen berücksichtigt. Hierdurch erweitert sich der momentan vorhandene Informationsgehalt rein physischer Arbeitsmodelle und Skizzen um zusätzliche digitale Informationsebenen (z.B. Analyse und Simulationen). Auf diese Weise ist es möglich, in gewohnter Art und Weise Arbeitsmodelle zu erstellen und mittels dieser zu entwerfen. Die zusätzliche Echtzeitinteraktion ermöglicht es dem Entwerfer, direkte objektive Schlussfolgerungen seines Entwurfes berechnen und darstellen zu lassen.

Zur konkreten Umsetzung der konzeptionell beschriebenen Idee lässt sich ein kombinierter Systemansatz bestehend aus Hard- und Software mit entsprechenden Anforderungen definieren.

## 2.1 Hardware

Ausgehend von dem beschriebenen Konzept wurden die hardwaretechnischen Komponenten entwickelt. Aufgrund der flexiblen und vielfältigen Eingabemöglichkeiten wurde als Basis eine „Multitouchlösung“ gewählt. Angesichts der mangelnden kommerziell verfügbaren Alternativen (geringe Größe, keine/wenige Schnittstellen und fehlende Erweiterbarkeit) wurde das System 2010 im Eigenbau umgesetzt.

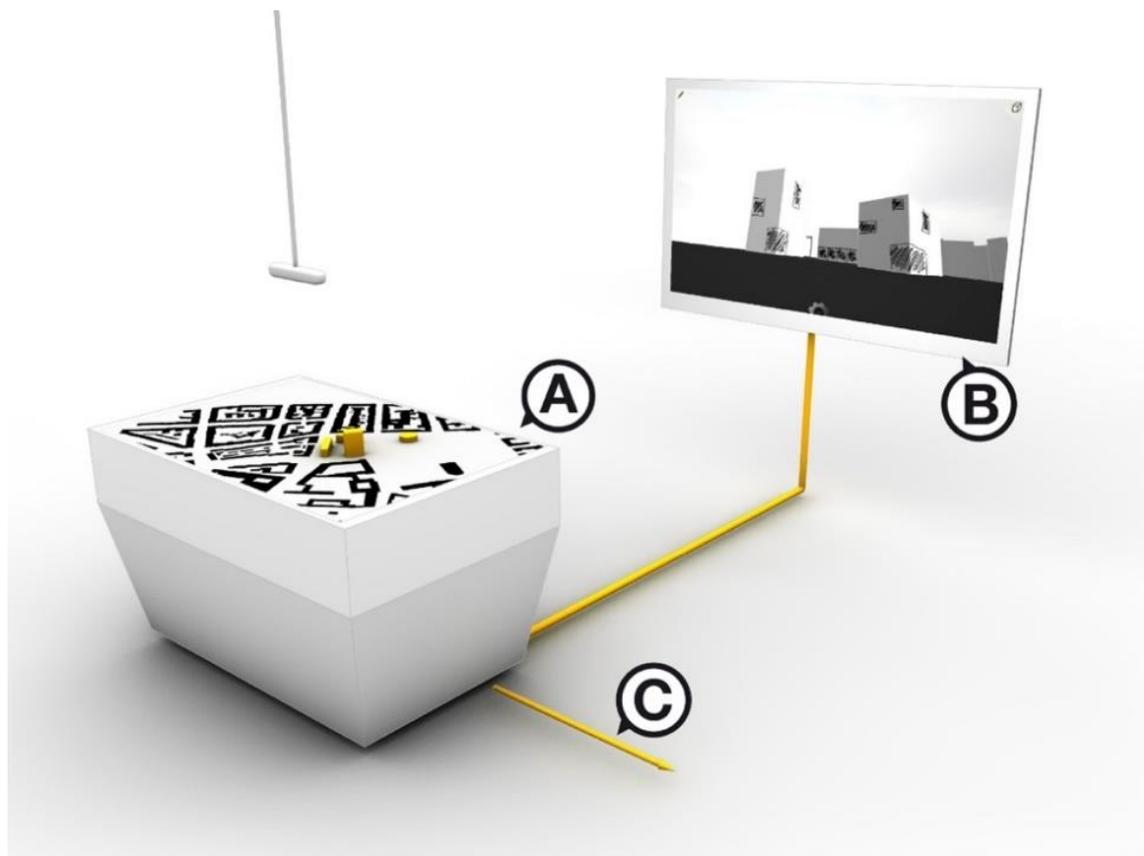


Abb. 2.2 CDP Hardware: (A) Planview, (B) Infopanel, (C) flexible Erweiterung

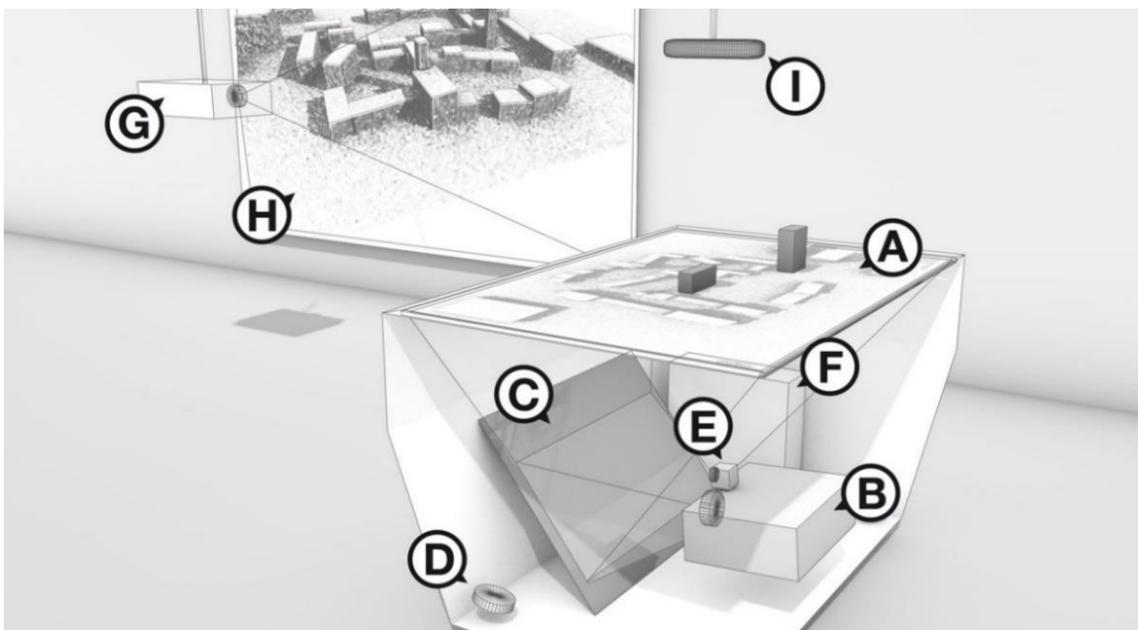
Der Systemaufbau besteht aus einem großformatigen „Multitouchtisch“ als Planview (A), dem Infopanel (B) sowie der Möglichkeit einer flexiblen Erweiterung der Hardwarebasis (C).

### Planview (A)

Um das Erkennen jeglicher Objekte zu ermöglichen, wurde als technisches Verfahren die „Diffused Illumination“ (DI)-Technik gewählt. Hierbei wird das Tischinnere mit IR-Licht diffus ausgeleuchtet. Im Gegensatz zur FTIR-Variante („Frustrated Total Internal Reflection“) reflektieren nicht nur Berührungen der Tischoberfläche, sondern auch platzierte Objekte das IR-Licht, sodass diese über die IR-Kameras wahrgenommen werden können.

Der interaktive Tisch selbst hat eine matte Projektionsfläche (A). Das hochauflösende Projektionsbild (B) wird über einen Spiegel (C) umgeleitet und von unten auf der Projek-

tionsfläche (A) dargestellt. Die Projektionsfläche wird von Infrarotstrahlern (D) ausgeleuchtet. Eine Infrarotkamera (E) nimmt über den Spiegel (C) ein Bild von der Unterseite der Projektionsfläche (A) auf. Auf dem IR-Kamerabild sind Gegenstände und Berührungen der interaktiven Oberfläche erkennbar. Eine Besonderheit stellt die Echtzeit-3-D-Objekterkennung dar. Mittels einer 3-D-Tiefenkamera (I) (Microsoft Kinect Kamera) können auf dem Tisch platzierte Modelle und Gegenstände als 3-D-Punktwolke rekonstruiert werden. In Kombination mit dem Kamerabild (E) ist es so möglich, ein digitales dreidimensionales Abbild der auf dem Tisch befindlichen Modelle zu erstellen (Schubert et al. 2011). Ein Rechner (F) verarbeitet die Kameradaten und erzeugt das Projektionsbild. Parallel hierzu werden sowohl der aktuelle Bearbeitungsstand (3-D-gescannte Arbeitsmodelle) als auch die digitalen Umgebungsdaten (GIS-Daten) am Rechner (F) verarbeitet (siehe Abb. 2.3).



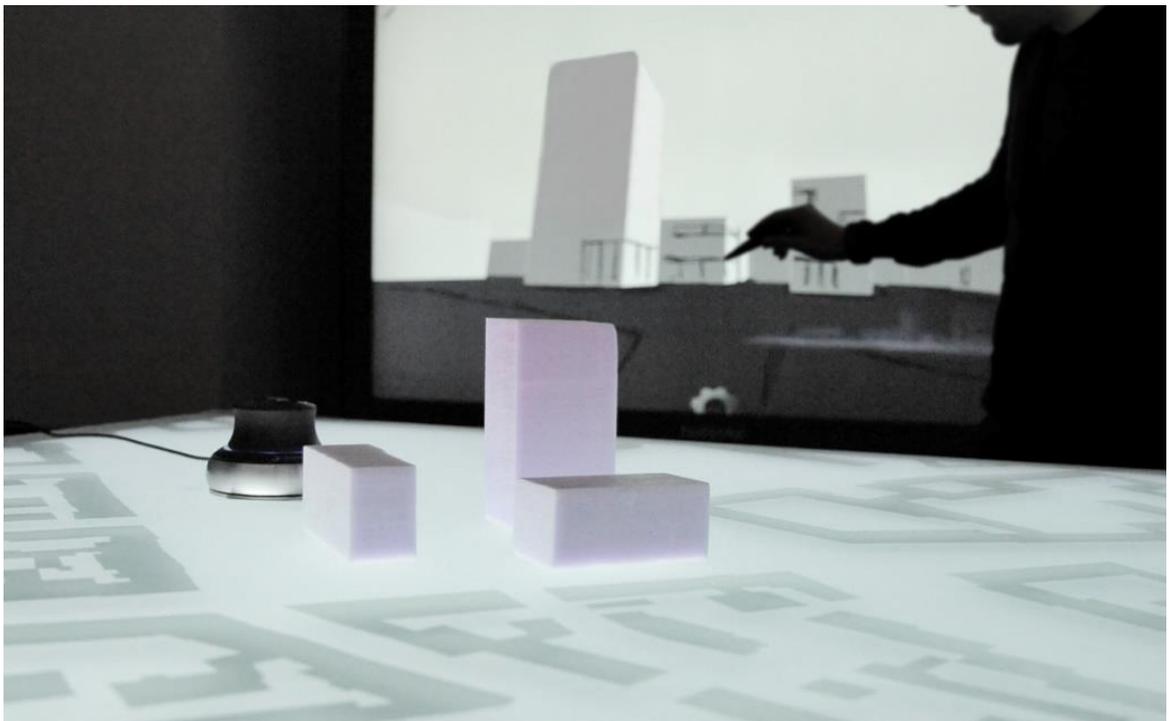
**Abb. 2.3 Hardwarekonzept: Multitouchtisch im Eigenbau kombiniert mit 3-D-Tiefenkamera und zusätzlicher perspektivischer Anzeige**

### **Infopanel (B)**

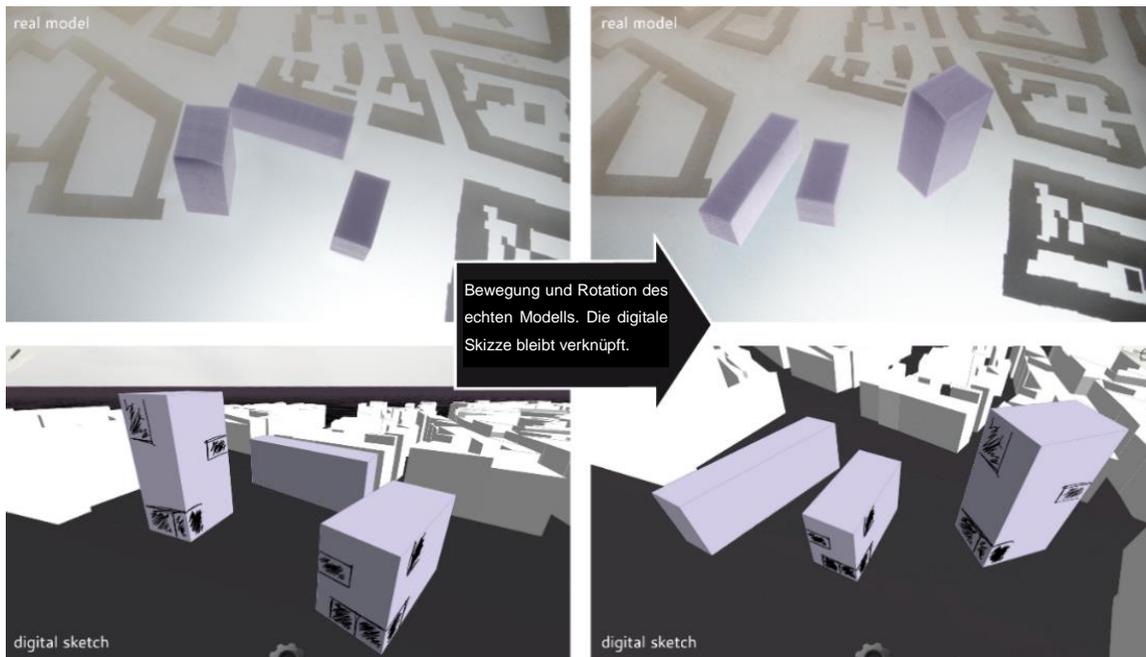
Ein zusätzlicher vertikaler Touchscreen erweitert den „Planview“ um eine perspektivische Ansicht der Entwurfsszenerie. Die Möglichkeit der Stifteingabe über die „Touchfunktion“ des Bildschirms erlaubt ein interaktives Skizzieren in der Perspektive. Unterschiedliche Skizzenmodi erlauben neben dem direkten Skizzieren auf den Gebäuden

sowohl ein Erweitern und/oder Ergänzen dieser mittels Handskizze, wie auch ein Skizzieren analog zur Nutzung einer Skizzenrolle. Die Skizzen sind jedoch nur ein grafisches Abbild und besitzen keine objektspezifischen, semantischen Informationen wie z.B. die Objektinformation „Fenster“ oder „Tür“.

Die Skizzen sind hierbei direkt mit dem jeweiligen physischen Arbeitsmodell verbunden und dessen fester Bestandteil. Detaillierte Informationen zu den Skizzenmethoden sind in folgender Veröffentlichung einsehbar (Schubert 2012).



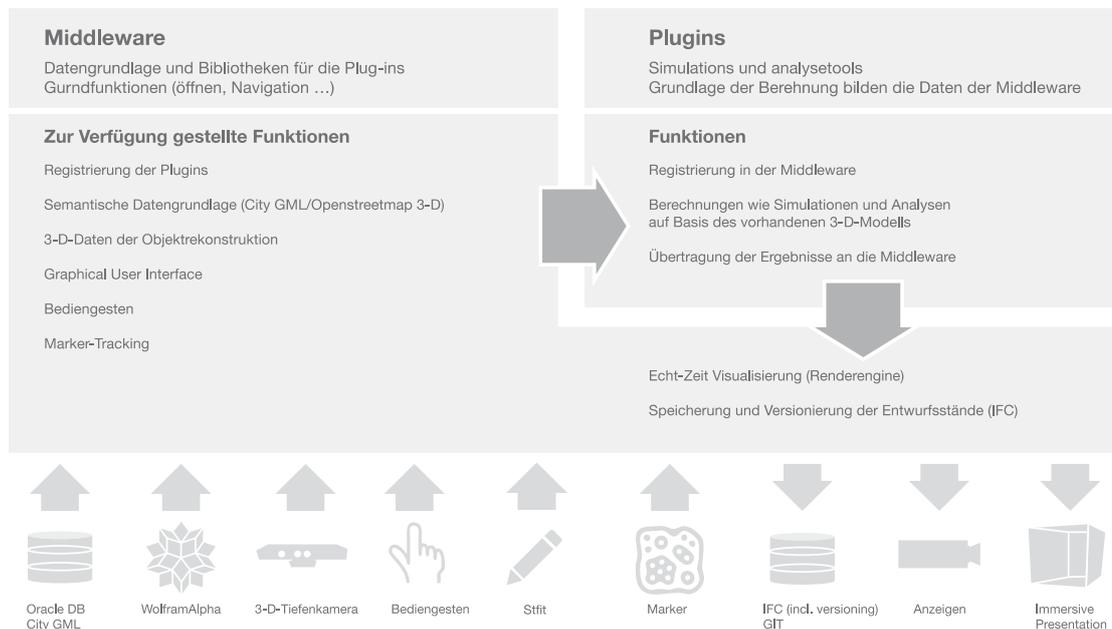
**Abb. 2.4** Infopanel als perspektivische Erweiterung der Entwurfsszenerie



**Abb. 2.5 Interaktive Skizze und physikalisches Modell sind direkt miteinander gekoppelt**  
 – Verschieben und Rotation der Volumen berücksichtigt auch die Skizze

## 2.2 Software

Um auf die individuellen Anforderungen verschiedener Entwurfsaufgaben und Entwurfsmethoden reagieren zu können, ist neben der Hardware auch das softwaretechnische Konzept auf eine möglichst flexible Erweiterung ausgelegt. Auf der softwaretechnischen Seite wurde diese Anforderung durch eine Plug-in-Softwarearchitektur realisiert. Das implementierte Softwarekonzept besteht daher aus zwei gekoppelten Komponenten: Middleware (C++) und Plug-ins (C#).



**Abb. 2.6 Softwarekonzept: Plug-in-Architektur ermöglicht ein individuelles Erweitern des Systems und somit einfaches Reagieren auf Entwurfsaufgaben**

## Middleware

Ausgehend von den bei Schubert (2014) definierten Anforderungen wurde ein Konzept für die Middleware erarbeitet. Im Rahmen eines interdisziplinären Lehrprojektes zusammen mit der Fakultät für Informatik wurde dieses in C++ prototypisch umgesetzt. Die Middleware bildet die Schnittstelle zwischen Entwurf (in Form von Arbeitsmodellen und Skizzen) und entwurfsunterstützender Werkzeuge als Plug-ins (Berechnungen, Analysen und Simulationen). Sie fungiert als Hauptstruktur und übernimmt die Verarbeitung aller grundlegenden Funktionen im System. Die so verarbeiteten Informationen werden direkt den anderen Funktionsbereichen (Plug-ins, Ausgabe) zur Verfügung gestellt. Der Middleware-Bereich untergliedert sich hierbei in mehrere Bereiche: Input, Output und Plug-in-Anbindung.

## Plug-ins

Basierend auf einem modularen Baukastensystem können entwurfsunterstützende Werkzeuge direkt an die Middleware angeschlossen werden. Somit ist eine einfache Möglichkeit gegeben, anwendungsspezifische Werkzeuge in C# zu konzipieren und zu

programmieren. Um hierbei eine möglichst einfache Handhabung zu ermöglichen, werden die einzelnen Werkzeuge ähnlich wie Plug-ins über „dll“-Dateien in das Gesamtsystem eingebettet. Der Datenaustausch, die Übernahme der Basisdaten und die Weitergabe der Berechnungsergebnisse für die Anzeige erfolgt über die Middleware. Um eine einheitliche Bedienung und dadurch eine möglichst geringe Ablenkung vom Entwurfsprozess zu erreichen, greifen alle Module auf eine zentrale User-Interface-Bibliothek zu. Eine Besonderheit stellt zudem die Darstellung der Simulationsergebnisse dar. Zu komplexe und informationsüberladene Visualisierungen fordern zu starke Transformationsleistung vom Entwerfer/Nutzer, stören den Denkprozess und lenken von der Entwurfstätigkeit ab. Einfach zu lesende und zu interpretierende Ergebnisse werden hingegen unterbewusst wahrgenommen, sodass der Nutzer sich weiterhin vollkommen auf das Entwerfen konzentrieren kann.

### 3 Forschungsansatz

Der Forschungsansatz des Projektes lag an der Entwicklung von Methoden zur Untersuchung von energetischen Aspekten in der Frühphase städtebaulicher Entwürfe und ihre Implementierung in die bestehende städtebauliche Entwurfsplattform CDP // Collaborative Design Platform in Form von Plug-ins. In Abb. 3.1 sind die im Rahmen des Projektes entwickelten thematischen Plug-ins und ihr Implementierungsgrad dargestellt.

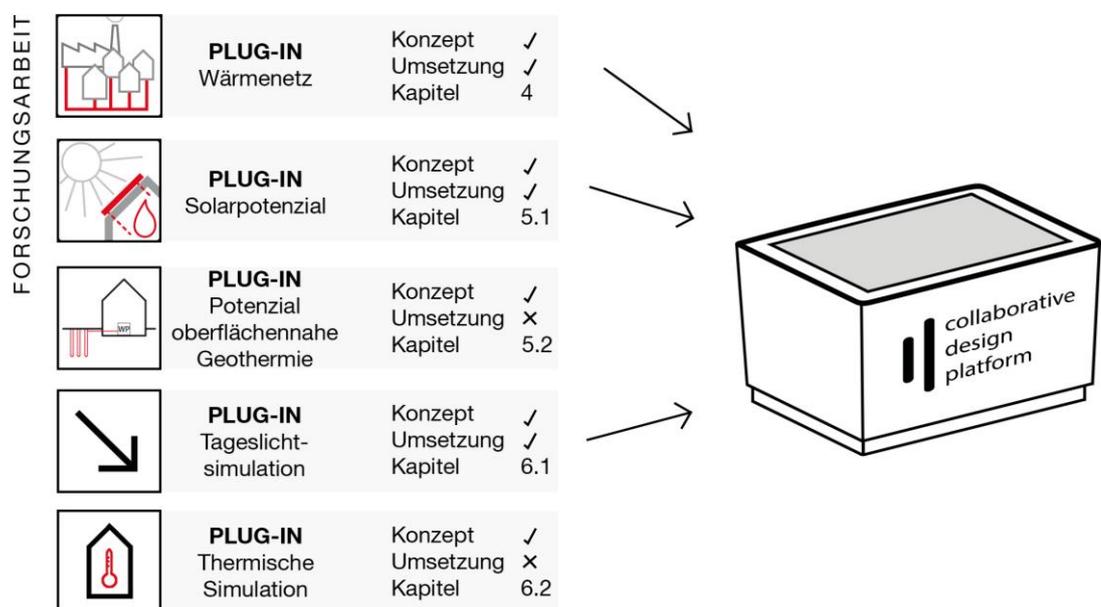


Abb. 3.1 Forschungsansatz: Überblick über die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten Plug-ins

#### 3.1 Wechselwirkungen zwischen Städtebau, Energie und Komfort

Die im städtebaulichen Entwurf definierten Parameter wie Gebäudeorientierung, Baukörperform, Abstand zwischen den Gebäuden und Höhe der Gebäude (*bauliche Kennwerte*) haben einen wesentlichen Einfluss auf die Sonneneinstrahlung auf Fassaden bzw. in den Gebäudeinnenraum und damit auf den Heizwärmebedarf, die Tageslichtverfügbarkeit, den Sommerkomfort und/oder den Kühlbedarf von Gebäuden. Auch die (vorgesehene) Nutzung der einzelnen Gebäude spielt energetisch gesehen eine entscheidende Rolle. Sie definiert Anforderungen und Lasten für das Gebäude, die den Energie-

bedarf und den Komfort beeinflussen. Sowohl die baulichen Kennwerte als auch die Nutzungsstruktur haben außerdem Auswirkungen auf die Energieversorgungsmöglichkeiten im gesamten Areal (z.B. über Wärmenetze) sowie auf die Nutzungsmöglichkeiten lokal verfügbarer Energiepotenziale (insbesondere Solarenergie sowie oberflächennahe Geothermie) (Abb. 3.2).

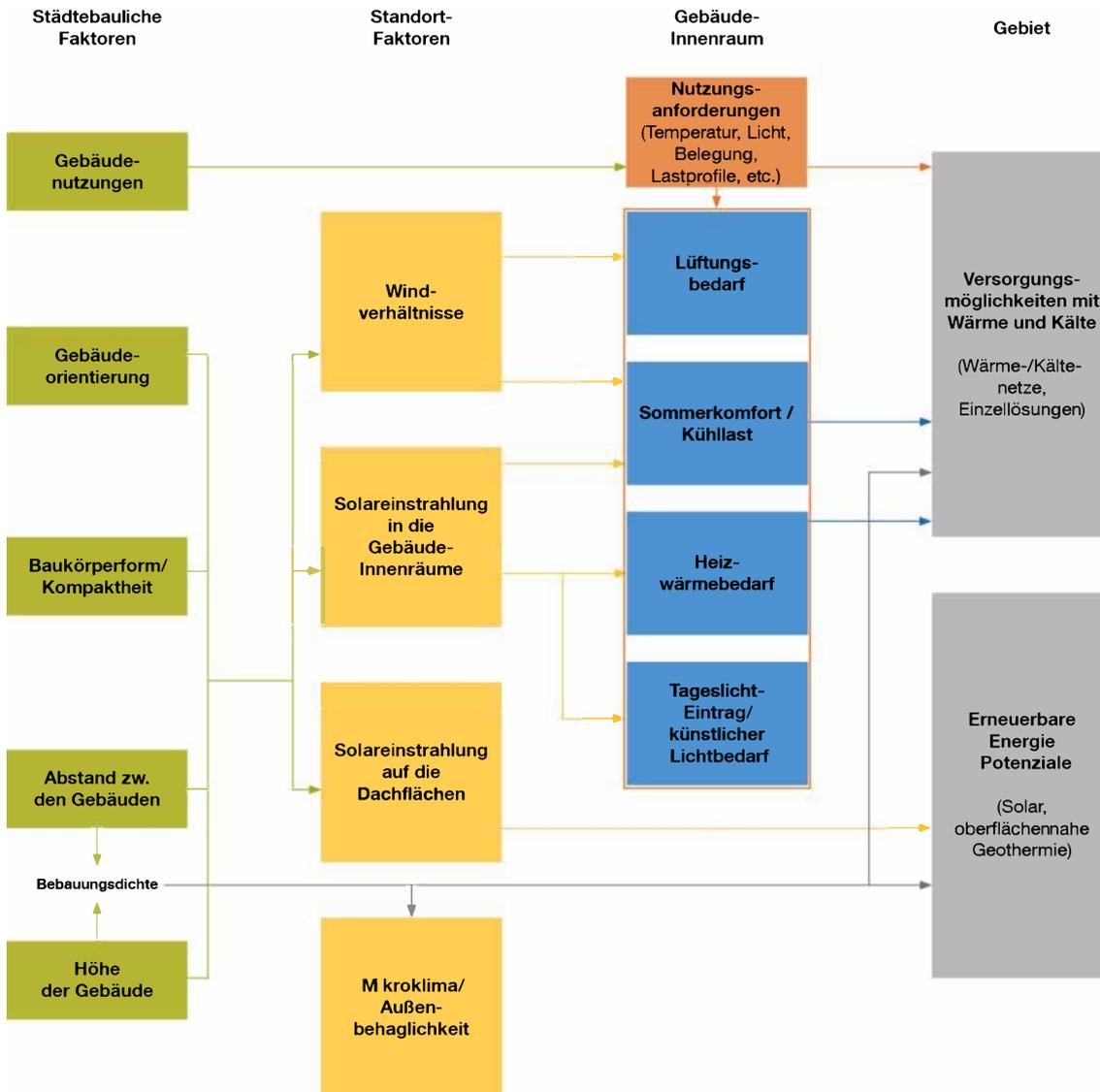


Abb. 3.2 Einfluss der städtebaulichen Parameter auf Energie und Komfort (vereinfachte Darstellung)

## 3.2 Konzeptionelle Anforderungen Energie und Komfort

Auf Grundlage dieser Zusammenhänge wurden folgende Aspekte identifiziert, die im Rahmen des Forschungsvorhabens in die CDP // Collaborative Design Platform integriert werden sollten:

### 1. Plug-in zur Evaluierung der Versorgungsmöglichkeiten durch Wärmenetze:

- grobe Ermittlung des Wärmebedarfs der einzelnen Gebäude im Gebiet
- optimaler Trassenverlauf für das Wärmenetz und Positionierung der Heizzentrale
- Berechnung der Wärmeabnahme pro Trassenmeter und grafische Darstellung nach Trassenabschnitt zur vorläufigen Evaluierung der Wirtschaftlichkeit
- grobe Dimensionierung der Heizzentrale

### 2. Plug-ins zur Evaluierung der verfügbaren erneuerbaren Energiepotenziale im Untersuchungsgebiet:

- Berechnung der auf Dachflächen erschließbaren Solarenergieerträge
- Visualisierung der Nutzungsmöglichkeiten für oberflächennahe Geothermie und Berechnung der daraus erschließbaren Wärmemengen

### 3. Plug-ins zur Simulation des Innenraums (ausgehend von einem frei auswählbaren Analyseraum)

- Tageslichtsimulation
- thermische Simulation (sommerlicher Wärmeschutz, Energiebedarf für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung)

Der Forschungsansatz im Projekt bestand darin, entsprechend neue Plug-ins und somit Methoden zu entwickeln und die CDP // Collaborative Design Platform um die Betrachtungsmöglichkeit von Aspekten zu Komfort und Energie im frühen städtebaulichen Entwurfsprozesses zu erweitern.

### 3.3 Technische Anforderungen an entwurfsunterstützende Systeme

Auf Basis der oben definierten Aspekte zu Energie und Komfort und entsprechend des angestrebten Betrachtungsmaßstabs von 1:500 lassen sich unter Berücksichtigung relevanter Rahmenbedingungen für architektonische Entwurfs- und Planungsverfahren folgende technische Anforderungen an die Umsetzung der entscheidungsunterstützenden Plug-ins definieren:

- **Allgemeingültige Umsetzung der Plug-ins**  
Die Anwendung in beliebigen Stadtszenarien und Situationen muss gewährleistet sein.
- **Native Ausführung der Plug-ins**  
Einbettung der Verfahren direkt in die bestehende Entwurfsplattform. Die Nutzung externer Tools wie z.B. *Grasshopper* (*Grasshopper 2017*) sollte vermieden werden.
- **Durchführung der Berechnungen und Anzeige der Ergebnisse in Echtzeit**  
Bei komplexen Berechnungen werden diese, wenn möglich, in iterative Schritte zerlegt und schrittweise detaillierter angezeigt.

## 4. Plug-in Wärmenetz

Im Fokus dieses Arbeitspaketes stand die Untersuchung von Methoden und die Entwicklung eines Plug-ins zur Analyse von Versorgungsmöglichkeiten eines ausgewählten Untersuchungsgebiets über ein Wärmenetz. Dabei soll berechnet und visualisiert werden, wie Netztrassen optimal verlaufen könnten, welcher Standort für die Heizzentrale optimal nutzbar ist und ob bzw. wo ein Wärmenetz grundsätzlich wirtschaftlich sinnvoll ist.

### 4.1 Energetische Grundlagen und Anforderungen an das Plug-in

Wärmenetze weisen gegenüber individuellen Heizungsanlagen mehrere Vorteile bezüglich Energieeffizienz (hoher Wirkungsgrad der Zentrale, optimale Auslegung nach Grund-, Mittel- und Spitzenlast), erschließbarer Energiepotenziale (z.B. Abwärme, Tiefengeothermie, Hackschnitzel) sowie Flexibilität auf. Allerdings erfordern sie eine ausreichend hohe Wärmeabnahme im Netz, um wirtschaftlich und energieeffizient (Wärmeverluste und Hilfsenergie) zu sein. Je höher die Wärmeabnahme bezogen auf die Netzlänge ist, desto effizienter und wirtschaftlicher kann ein Wärmenetz betrieben werden.

Als Schwellenwert für die Wirtschaftlichkeit wird oft der von der KfW-Förderbank im KfW-Förderprogramm "Erneuerbare Energie Premium" festgelegte Mindestwärmeabsatz von 500 kWh pro Jahr und Meter Trasse [ $\text{kWh}/\text{Trm} \cdot \text{a}$ ] verwendet. Der Grenzwert gilt im Mittel über das gesamte Netz und bezieht sich auf den Wärmebedarf (für Heizen und Trinkwarmwasser) sämtlicher anzuschließender Gebäude, wobei Wärmeverluste unberücksichtigt bleiben. Entsprechend der KfW-Vorgehensweise, wird bei der Ermittlung der Netzlänge nur die Haupttrasse veranschlagt; Hausanschlussstrassen werden nicht mitberechnet.

#### 4.1.1 Berechnung des Wärmebedarfs der Gebäude

Im Hinblick auf die Ermittlung der Wärmeabnahme pro Trassenmeter wird in einem ersten Schritt der Wärmebedarf der einzelnen Gebäude im Untersuchungsgebiet für Heizen und Trinkwarmwasser ermittelt. Dies erfolgt für Wohngebäude auf Basis von statistischen flächenbezogenen Wärmebedarfswerten je nach Gebäudenutzung, Gebäudetyp und Baualter (Gebäudetypologie). Für Nichtwohngebäude werden die spezifischen Werte nur nutzungsabhängig differenziert. Die verwendeten statistischen Werte sind im

Anhang (Tabelle A.1 bis A.5) aufgeführt. Sie wurden aus der „Deutschen Wohngebäudetypologie“ der IWU (Loga 2015) für Wohngebäude und aus dem „Leitfaden Energienutzungsplan“ für Nichtwohngebäude (StMUG 2011) herangezogen.

Bei der hierbei gewählten Methode wird nicht die Gebäudekubatur betrachtet, sondern lediglich die Energiebezugsfläche des Gebäudes. Diese versteht sich als die Gesamtwohnfläche bzw. Gesamtnutzfläche (GHD). Ist sie nicht bekannt, so wird die Energiebezugsfläche aus der Multiplikation von Gebäudegrundfläche und Geschossanzahl und dem Korrekturfaktor von 0,8 (zum Abzug der Konstruktion) bestimmt.

Der Sanierungszustand von älteren Gebäuden wird nicht betrachtet, da dieser in der Regel nicht bekannt ist. Für neuere Gebäude sind die statistischen Werte nach Effizienzklasse und Wärmeversorgung detaillierter angegeben und verwendbar (siehe Tabelle A.4 im Anhang). Sind diese Parameter nicht bekannt, so wird von einer Effizienzklasse entsprechend der gesetzlichen Mindestanforderung (EnEV 2009/2014) und einer Wärmeversorgung mit Gas ausgegangen. Industriegebäude werden aufgrund ihrer sehr individuellen energetischen Charakteristika (Temperaturniveau etc.) aktuell nicht berücksichtigt.

Für die grobe Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzen wird die Genauigkeit dieser Methode als ausreichend betrachtet. Sie erfordert allerdings eine solide, gut gepflegte Datengrundlage mit detaillierten Informationen zum Gebäudebestand (Nutzung, Gebäudetyp, Gebäudealter, Wohn-/Nutzfläche, ggf. Effizienzklasse). Falls diese Informationen in der verwendeten Gebäudedatei nicht vollständig verfügbar sind, können sie für das jeweils betrachtete Untersuchungsgebiet z.B. über eine Begehung abschätzend ermittelt und in die digitale Datenbasis (GIS) eingepflegt werden. Dies ist allerdings mit einem hohen Aufwand und möglicherweise mit einer geringen Genauigkeit verbunden.

#### **4.1.2 Regeln zur Definition des Netzverlaufs**

Um den Verlauf eines möglichen Wärmenetzes automatisch in der CDP // Collaborative Design Platform generieren zu können, mussten bestimmte vereinfachende Regeln definiert werden:

- Es wird von einem sternförmigen Netz mit Kernpunkt auf der Heizzentrale ausgegangen. Ringanschlüsse sind ausgeschlossen.

- Nur Hauptgebäude werden angeschlossen (Nebengebäude weisen grundsätzlich keinen Wärmebedarf auf).
- Hauptleitungen laufen ausschließlich entlang von Straßenzügen.
- Hausanschlussleitungen verbinden die Haupttrasse des Wärmenetzes mit den Gebäuden. Als Anschlussseite wird dabei die Fassade definiert, deren Mittelpunkt am nächsten zu einer Straße liegt. Deren Mittelpunkt wird dann mit der Wärmenetz-Hauptleitung verknüpft. Der Anschluss der Heizzentrale erfolgt über das gleiche Prinzip.
- Ein Grundstück entspricht einem Hausanschluss. Befinden sich mehrere Gebäude auf einem Grundstück, wird nur das Gebäude angeschlossen, das am nächsten an der Straße liegt. Später wird der Wärmebedarf von allen Gebäuden auf dem Grundstück aufaddiert und dem entsprechenden Hausanschluss zugewiesen.

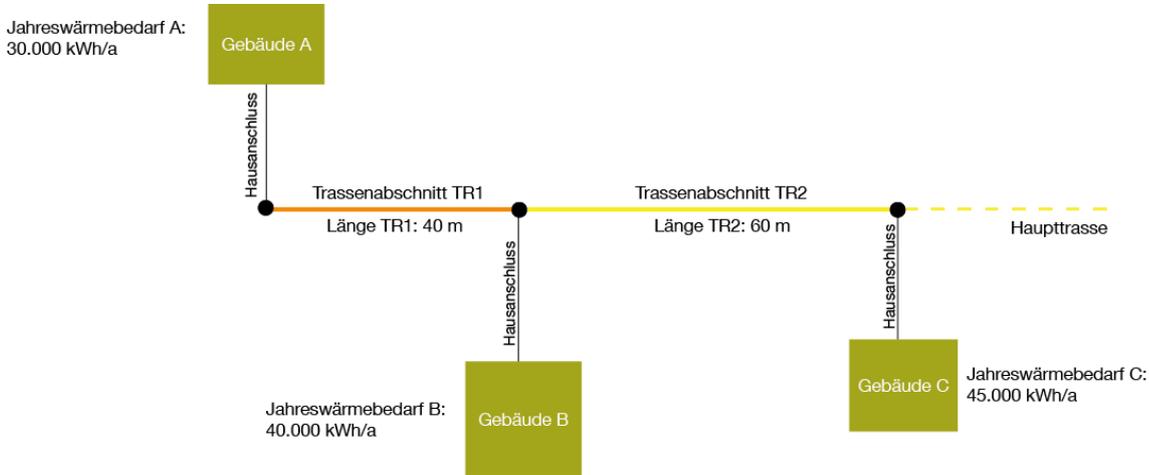
#### 4.1.3 Berechnung der Wärmeabnahme pro Trassenmeter

Die Berechnung der Wärmeabnahme pro Trassenmeter erfolgt ausgehend von den Endpunkten des sternförmigen Netzes hin zur Heizzentrale. Dafür wird die Wärmeabnahme pro Trassenmeter je Trassenabschnitt ermittelt. Ein Trassenabschnitt entspricht dabei einem Netzabschnitt zwischen zwei Gebäudeanschlusspunkten.

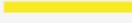
Der Wärmebedarf aller bis zu dem jeweiligen Punkt angeschlossenen Gebäude wird addiert und auf die Länge des Trassenabschnittes bezogen berechnet. Für die Berechnung wird nur die Haupttrasse betrachtet, Hausanschlussstrassen bleiben unberücksichtigt. In Abb. 4.1 ist diese Methodik grafisch veranschaulicht. Die farbliche Darstellung des generierten Netzverlaufs erfolgt gemäß Tabelle 4.1.

$$\text{Wärmeabnahme TR1} = \frac{\text{Jahreswärmebedarf A}}{\text{Länge TR1}} = \frac{30.000}{40} = 750 \frac{\text{kWh}}{\text{Trm} \cdot \text{a}}$$

$$\begin{aligned} \text{Wärmeabnahme TR2} &= \frac{\text{Jahreswärmebedarf A} + \text{Jahreswärmebedarf B}}{\text{Länge TR2}} \\ &= \frac{30.000 + 40.000}{60} = 1.166 \frac{\text{kWh}}{\text{Trm} \cdot \text{a}} \end{aligned}$$



**Abb. 4.1 Berechnung der Wärmeabnahme pro Trassenmeter**

	Jahreswärmebedarf pro Trassenmeter [kWh/(Trm.a)]	RGB-Farbwerte	Kommentar
	< 500	R: 245 // G: 035 // B: 0	niedrige Wärmeabnahme, Netzanschluss nicht empfehlenswert
	500 - 1.000	R: 245 // G: 140 // B: 0	
	1.000 - 2.000	R: 255 // G: 238 // B: 0	
	2.000 - 10.000	R: 162 // G: 188 // B: 0	
	> 10.000	R: 0 // G: 80 // B: 0	hohe Wärmeabnahme, Netzanschluss sehr empfehlenswert

**Tabelle 4.1 Jahreswärmebedarf pro Trassenmeter und zugehörige RGB-Farbwerte**

Durch diese Berechnung und Darstellung können Teilgebiete identifiziert werden, die aufgrund ihrer unzureichenden spezifischen Wärmeabnahme nicht an das vorgesehene Wärmenetz angeschlossen werden sollten. Die betroffenen Gebäude können dann manuell vom Netzanschluss ausgeschlossen werden. Anschließend läuft die Netzberechnung erneut, und die Darstellung wird aktualisiert. Obwohl der oben genannte Grenzwert von 500 kWh/Trm•a als allgemeine Referenz veranschlagt wird, kann es nach individuellen Rahmenbedingungen auch einen anderen Schwellenwert festsetzen werden.

An dem dargestellten Beispiel (Abb. 4.1) wird ersichtlich, dass der Übergang bis zu den letzten Gebäuden des sternförmigen Netzes aufgrund der langen Strecke problematisch/ungünstig ist (hellere Strecke), obwohl ein Anschluss dieser Gebäude grundsätzlich denkbar wäre (dunklere Strecke).

Für das komplette Untersuchungsgebiet wird zusätzlich die Wärmeabnahme pro Trassenmeter als Summe der Wärmebedarfe aller Gebäude über die gesamte Netzlänge ermittelt und mithilfe eines Pfeils neben der zugehörigen Legende dargestellt bzw. markiert.

#### **4.1.4 Dimensionierung der Heizzentrale**

Durch die Berechnung und Darstellung der Wärmeabnahme pro Trassenmeter (Abb. 4.1) können die Gebiete bzw. Straßenabschnitte identifiziert werden, die bevorzugt an das Wärmenetz angeschlossen werden sollen, und solche, die sich dafür eher nicht eignen. Im Hinblick auf die weitere Entwicklung des Energieversorgungskonzeptes erfolgt anschließend eine grobe Dimensionierung der Heizzentrale, die in das Netz einspeisen soll. Dafür müssen auf Basis der ermittelten Jahreswärmebedarfswerte der einzelnen anzuschließenden Gebäude die zu erwartenden maximalen und minimalen Leistungen abgeschätzt werden. Dies erfolgt auf Grundlage von typischen Leistungswerten (Grund- und Höchstlast) bezogen auf den Jahreswärmebedarf (in  $\text{[kW/(MWh/a)]}$ ) je Verbraucherklasse (siehe Werte in Tabelle A.6 im Anhang). Die Richtwerte berücksichtigen bereits die Gleichzeitigkeit, also die Tatsache, dass der Verbrauch an Wärme und Warmwasser nicht gleichzeitig in allen Gebäuden stattfindet. Sie gelten deswegen nur, wenn eine Gruppe von Gebäuden betrachtet wird und nicht für Einzelgebäude.

Mit der Summierung der errechneten maximalen und minimalen Leistungswerte über alle anzuschließenden Gebäude kann eine erste grobe Dimensionierung der Heizzentrale nach Höchstlast und Grundlast erfolgen. Mithilfe dieser können dann mögliche geeignete Energiequellen und Technologien für die Zentrale identifiziert werden.

Die gesamte Methodik zum Plug-in Wärmenetz ist in Abb. 4.2 grafisch veranschaulicht.

### **Anforderungen an das Plug-in Wärmenetz:**

- Berechnung des Wärmebedarfs der Gebäude basierend auf statistischen spezifischen Werten
- automatische Zeichnung eines optimierten Netzes unter Einhaltung vorgegebener Regeln
- Berechnung der Wärmeabnahme pro Trassenmeter je Trassenabschnitt und farbliche Darstellung nach vorgegebener Legende
- grobe Dimensionierung der Heizzentrale (Leistung)

## Ausgangsparameter

## Berechnung

## Ergebnisse

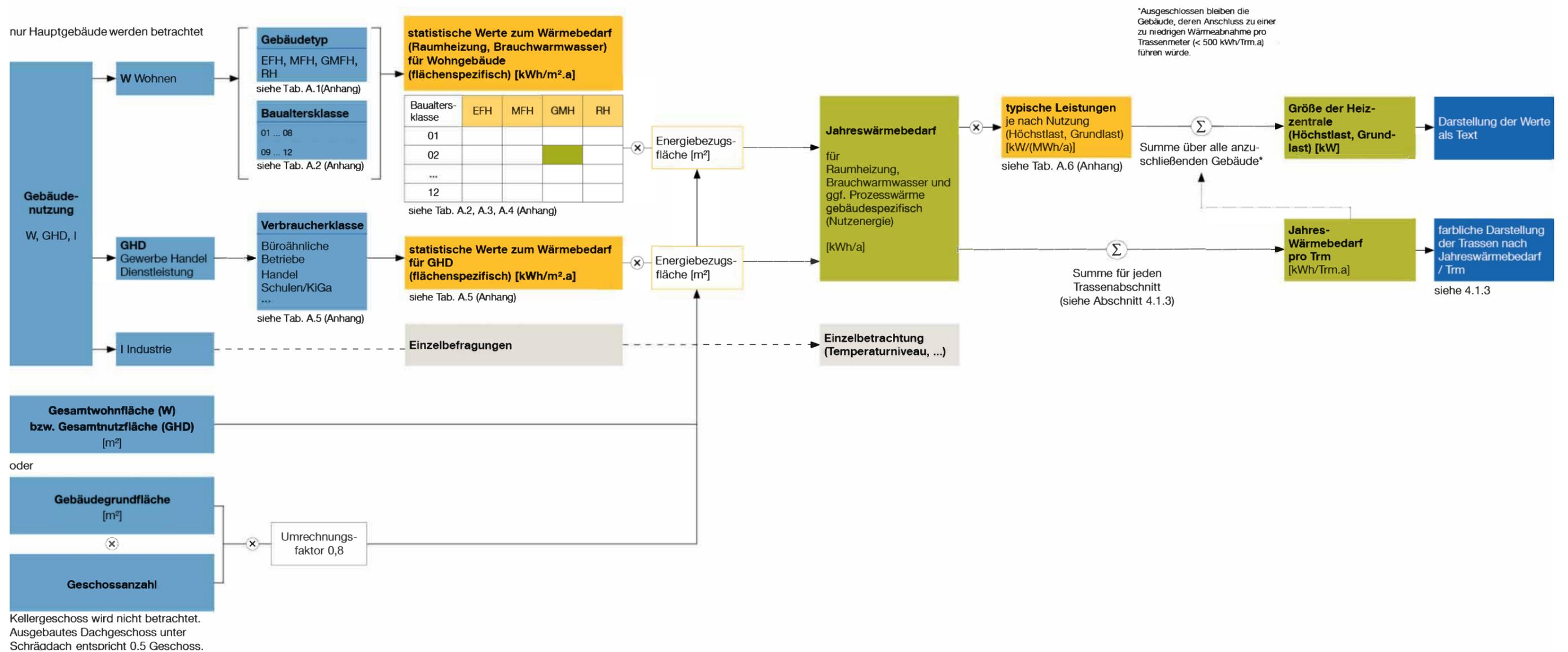


Abb. 4.2 Grafische Darstellung der Methode zur Entwicklung des Plug-ins Wärmenetz (Berechnung des Jahreswärmebedarfs der Gebäude sowie der Wärmeabnahme pro Trassenmeter und Dimensionierung der Heizzentrale)



## 4.2 Implementierung

Ausgehend von den Regeln für den Aufbau eines Wärmenetzes (siehe 4.1.2) wurde ein Kernalgorithmus entwickelt, zur Konstruktion des Netzwerks auf Basis der Position einer Heizzentrale. Dieser Kernalgorithmus wird mit zwei verschiedenen interaktiven Methoden eingesetzt. Die erste Methode bewertet ein Netzwerk, das auf der Basis einer nutzerdefinierten Position der Heizzentrale aufgebaut wurde. Die zweite Methode wertet das Untersuchungsgebiet für die optimale Position einer Wärmeanlage automatisch aus.

### 4.2.1 Berechnung des Wärmebedarfs der Gebäude

Für eine zukünftige Erweiterung wurden hierbei die statischen Datenwerte, die für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden verwendet werden, als Listenstruktur abgespeichert. Die Berechnung des Wärmebedarfs erfolgte entsprechend der Formel:

$$\begin{aligned}
 total = & (HeatingWaterTable[currBuilding.Type] \\
 & + DomesticHotwaterTable[currBuilding.Type] \\
 & + ProcessHeatTable[currBuilding.Type]) * usableSurface
 \end{aligned}$$

Das Bewertungsergebnis wird als direkte Eigenschaft in die vorhandenen Datenstrukturen zu den jeweiligen Gebäuden abgespeichert. Aufgrund der dargelegten Berechnungsmethode und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass für jedes Gebäude individuelle Kennwerte errechnet werden, war eine programmiertechnische Parallelisierung möglich, was die Analysezeit rapide beschleunigt. Als weitere Optimierung erfolgte die Neuberechnung nach einem Update der Szenarien durch den Nutzer nur für die veränderten Objektdaten.

#### 4.2.2 Ermittlung des optimalen Netzverlaufs und Positionierung der Heizzentrale

Anhand der in 4.1.2 beschriebenen Regeln (ausgenommen ist die Regel zu den Grundstücken, die bisher nicht implementiert werden konnte) wurde ein algorithmisches Verfahren zur Ermittlung des optimalen Netzverlaufs definiert (Abb. 4.3).

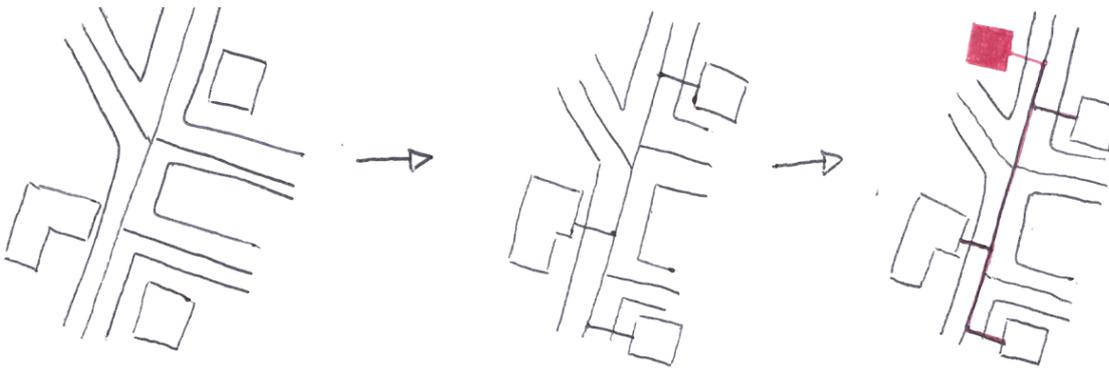


Abb. 4.3 Ermittlung des Netzverlaufs

1. Zunächst wird auf Basis des Straßennetzes ein Graph gebildet.
2. Es erfolgt die Anbindung der Gebäude an den Graphen.
3. Unter Berücksichtigung der platzierten Heizzentrale als Ausgangspunkt erfolgt die Bewertung des Graphen mittels Dijkstra-Verfahren (Dijkstra 1959).
4. Auf diese Weise wird der „Minimum Spanning Tree“ (MST) (Cormen 2001) mit den jeweils kürzesten Distanzen der Gebäude zur Heizzentrale gebildet.
5. Unter Berücksichtigung des gebildeten Baumes erfolgt die Berechnung des Wärmebedarfs ausgehend von allen Gebäuden hin zur platzierten Heizzentrale. Die Berechnung des Wärmebedarfs pro Trassenabschnitt erfolgt analog.

Bei der Umsetzung des beschriebenen Verfahrens wurden zwei unterschiedliche Methoden, basierend auf der Art der Positionierung der Heizzentrale, konzipiert und umgesetzt:

##### **Methode 1 – selektive Positionierung der Heizzentrale durch Nutzereingabe**

Kern der Methode 1 bildet die Überprüfung und Bewertung des Wärmenetzes auf Basis einer vom Nutzer platzierten Heizzentrale. Die Eingabe/Definition der Lage der Zentrale

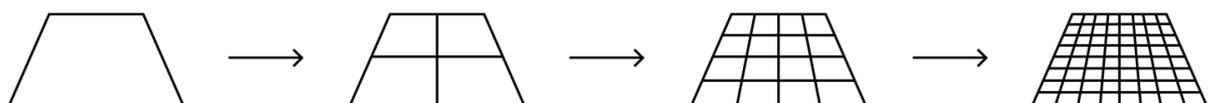
erfolgt durch das Platzieren eines physischen Arbeitsmodells auf der Tischoberfläche. Ausgehend von der so definierten Heizzentrale erfolgt die Analyse des Wärmenetzes in Echtzeit. Das visuelle Feedback wird durch die spezifische Färbung der Trassenverläufe nach Kapitel 4.1.3 dargestellt. Bei einer Neuplatzierung der Zentrale oder Veränderung durch Verschieben oder Rotieren erfolgt eine Neuberechnung.



**Abb. 4.4 Automatische Generierung und Bewertung des Wärmenetzes in Abhängigkeit der Position der Heizzentrale (physisches Objekt auf der Tischoberfläche – rot markiert)**

### Methode 2 – Automatische Positionsbewertung

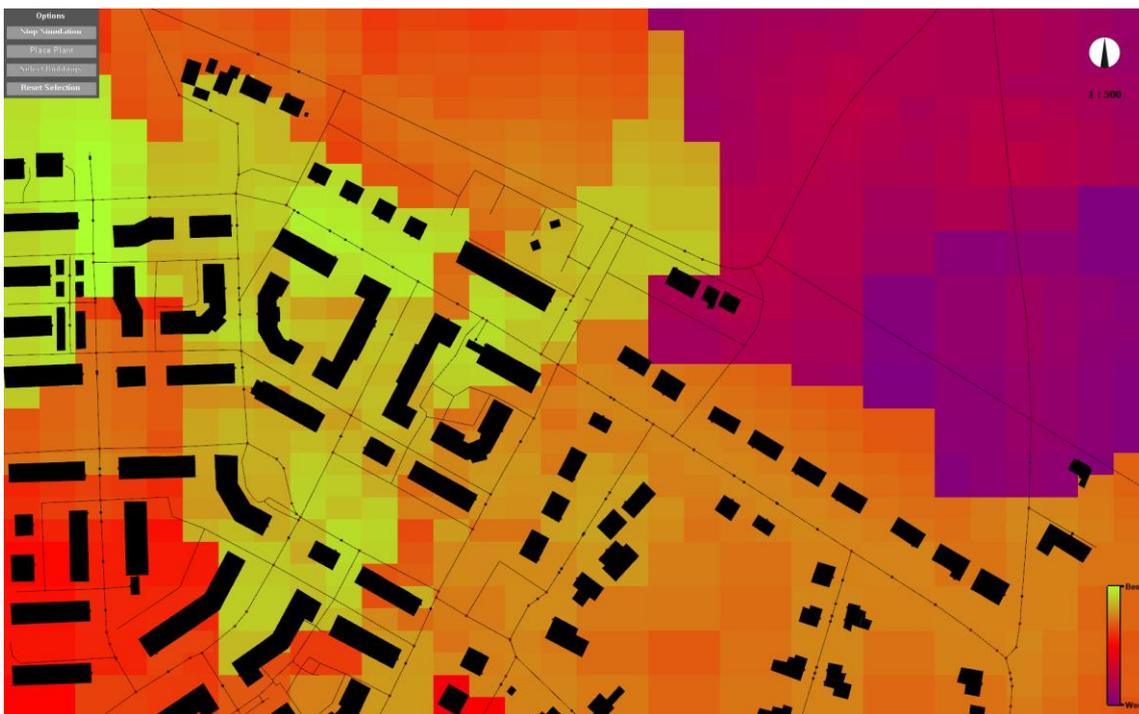
Ziel dieser Methode ist die automatische Ermittlung des optimalen Standorts für die Heizzentrale im Hinblick auf die kürzeste Gesamtnetzlänge.



**Abb. 4.5 Automatische Positionsbewertung – Prinzip vereinfacht**

Auf Basis der geladenen Datengrundlage erfolgt eine Rasterung der Szenerie. Ausgehend von diesem Raster erfolgt die Bewertung der einzelnen Zellen auf Grundlage des beschriebenen Verfahrens zur Generierung und Analyse des Netzverlaufs. Hierzu wird eine fiktive Zentrale in das Zentrum einer jeden Rasterzelle platziert und die entstehende Netzstruktur bewertet. Die Rasterung ist durch eine „Quadtree Struktur“ (Finkel 1974) definiert. Zur Verfeinerung des Ergebnisses erfolgt die Berechnung iterativ in mehreren Zyklen, definiert durch ein feiner werdendes Raster. Auf diese Weise wird direkt ein erstes grobes Ergebnis der Standortqualitäten für die unterschiedlichen Rasterfelder dargestellt, welches anschließend sukzessiv detailliert wird.

Da die Bewertung für jede Variante des Netzes unabhängig erfolgt, kann die Berechnung parallelisiert erfolgen. Das Ergebnis der Simulation wird mittels einer „Heatmap“ visualisiert.



**Abb. 4.6 Analyse zur Identifikation der günstigen Positionen der Heizzentrale**

Um die Simulation zu beschleunigen, wurden Methoden zur Optimierung implementiert, welche die Zwischenergebnisse und die dazugehörigen Netze abspeichert und bei der Neuberechnung zur Bewertung heranziehen:

- Wird eine neue fiktive Heizzentrale platziert, so werden diese Werte nach einem ähnlichen vorhandenen Netz durchsucht. Falls ein vergleichbares Netz vorhanden ist, wird dieses als Basis der Simulation verwendet. Mit der neuen Position der Zentrale und dem dazugehörigen Trassensegment wird die Wärmeabnahme pro Trassenmeter neu berechnet. Gibt es kein vorhandenes relevantes Zwischenergebnis, so wird das Netz neu aufgebaut und abgespeichert.
- Falls ein physisches Arbeitsmodell auf der Tischoberfläche platziert wird, wird dieser als neues Wohngebäude betrachtet. Das Verfahren findet die kürzeste Anbindung an die Straßen. Die weitere iterative Berechnung wird pausiert. Das Verfahren überprüft die vorhandenen, abgespeicherten Ergebnisse und verifiziert, ob das Straßenverbindungssegment im Graph enthalten ist. Falls dies der Fall ist, werden nur Trassensegmente, die das neue Gebäude mit der Heizzentrale verbinden, aktualisiert. Falls es nicht vorhanden ist, muss ein neues Netz berechnet werden und der entsprechende Rasterbereich wird aktualisiert.

### 4.3 Validierung

Die Implementierung der Wärmenetzberechnungsmethode auf Basis der CDP // Collaborative Design Platform wurde am Beispiel eines ausgewählten Stadtteils mit reiner Wohnnutzung validiert. Als Erstes wurde an der CDP // Collaborative Design Platform mithilfe des erstellten Plug-ins der optimale Netzverlauf ermittelt, dargestellt und die Zentrale automatisch platziert. Für das dafür gewählte Gebiet waren Daten zu Baualter und zur Wohnfläche der Gebäude verfügbar. Die Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Reihenhaus etc.) konnten über Luftbilder und Flurstücks-/Gebäudepläne identifiziert werden. Daraus wurden der Jahreswärmebedarf der einzelnen Gebäude und die resultierende Wärmeabnahme pro Trassenmeter an der CDP // Collaborative Design Platform entsprechend der definierten Methode (siehe Kapitel 4.1.1 und 4.1.3) ermittelt und dargestellt (Abb. 4.7). Parallel erfolgten die Berechnungen „manuell“ unter Kenntnis der Länge der Trassensegmente. Durch diesen Vergleich wurde die erfolgreiche Implementierung der Methode als Plug-in für die CDP // Collaborative Design Platform validiert.



**Abb. 4.7 Visualisierung des Untersuchungsgebiets in der CDP // Collaborative Design Platform (links) und der Wärmeabnahme pro Trassenmeter in kWh/Trm\*a (rechts)**

## 5. Plug-ins erneuerbare Energiepotenziale

Als weitere Komponente zur Einbeziehung von energetischen Aspekten in die CDP // Collaborative Design Plattform wurden Plug-ins zur Analyse der erneuerbaren Energieressourcen, deren Vorkommen und Verwendungsmöglichkeiten für die gegebene Stadtstruktur entwickelt.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde nur das Potenzial für Solarenergie auf Dachflächen und das Potenzial für oberflächennahe Geothermie betrachtet. Es wurde davon ausgegangen, dass ein lokal verfügbares Biomassepotenzial in den primär städtisch geprägten Untersuchungsgebieten nicht bzw. nur zu einem vernachlässigbar kleinen Grad vorhanden ist. Abwärme-Potenziale müssen immer individuell ermittelt werden und lassen sich nicht durch einen entsprechenden Algorithmus identifizieren. Potenziale für Wind und Tiefengeothermie spielen grundsätzlich eher eine Rolle im größeren Betrachtungsmaßstab bzw. in einem weniger städtisch geprägten Kontext und wurden daher ebenfalls von einer Betrachtung ausgeschlossen.

### 5.1 Plug-in Solarpotenzial

Ziel dieses Plug-ins ist die gebäudescharfe Evaluation des Potenzials zur Nutzung von Solarenergie auf den Dachflächen des Untersuchungsgebiets.

#### 5.1.1 Energetische Grundlagen und Anforderungen an das Plug-in

Unter Solarpotenzial versteht sich die Energiemenge, die theoretisch innerhalb eines Jahres mithilfe von thermischen Solarkollektoren bzw. Photovoltaik auf den verfügbaren Dachflächen unter Berücksichtigung von Verschattungseffekten gewonnen werden könnte. Dies soll dann im Verhältnis zum bestehenden Wärme- bzw. Strombedarf der einzelnen Gebäude bzw. des gesamten Untersuchungsgebiets mittels einer geeigneten Farbskala dargestellt werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurde nur das Strompotenzial aus Photovoltaik betrachtet. Dafür wurde davon ausgegangen, dass 100 Prozent der geeigneten Dachflächen mit Photovoltaik-Zellen bestückt werden, sodass ein entsprechend maximal möglicher Stromertrag erzielt wird.

Die Nutzung von (einem Teil der) Dachflächen zur Wärmeproduktion (Warmwasserbereitung und/oder Heizungsunterstützung) aus solarthermischen Kollektoren wurde zugunsten einer Vereinfachung nicht betrachtet. Zugunsten einer Vereinfachung wurden ausschließlich Dachflächen betrachtet; die Nutzung von Fassaden zur Stromproduktion aus Photovoltaik wurde nicht berücksichtigt. Die entwickelte Methode setzt voraus, dass Orientierung und Neigung aller betrachteten Dachflächen bekannt sind.

### **Berechnung der Solareinstrahlung**

In einem ersten Schritt wurde die jährlich auftreffende Globalstrahlung für jede einzelne Dachfläche ermittelt. Dabei wurde die Verschattung durch andere Gebäude berücksichtigt. Die Verschattung aufgrund ggf. relevanter Topografie konnte aufgrund von fehlenden Datengrundlagen nicht berücksichtigt werden. Die Berechnung basiert auf der Methodik von Holbert (2007), die im Folgenden zusammengefasst und erläutert wird:

Die Menge der Sonnenstrahlung im Jahr ist unterschiedlich, weil die Entfernung zwischen der Erde und der Sonne über das Jahr variiert. Im ersten Schritt können die scheinbaren Sonnenbestrahlungswerte  $I_0$  [Btu/hr·ft<sup>2</sup>] während des ganzen Jahres angenähert werden (Lunde 1980):

$$I_0 = I_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{N}{365} \times 360^\circ \right) \right]$$

$I_{sc} = 429.5 \text{ Btu/hr}\cdot\text{ft}^2$  (1353 W/m<sup>2</sup>) (Solarkonstante)

$N$  ist die Tagesnummer des Jahres (1. Januar = 1)

Die Deklination ist der Winkelabstand der Sonne nördlich oder südlich des Erdäquators. Der Deklinationwinkel  $\delta$ , für die nördliche Hemisphäre (für die südliche Hemisphäre ist das Deklinationwinkelzeichen umgekehrt) ist (ASHRAE 1995):

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ \frac{N + 284}{365} \times 360^\circ \right]$$

Die globale Gemeinschaft hat 0° als den Nullmeridian definiert, der sich in Greenwich, England, befindet. Die Längengrade beschreiben, wie viel Grad sie östlich der westlich des Nullmeridians liegen.. Ein Tag hat 24 Stunden, also 1440 Minuten. Teilt man diese Summe durch 360°, so dauert es 4 Minuten, um jeden Längengrad zu verschieben. Die

scheinbare Sonnenzeit AST (oder lokale Sonnenzeit) in den westlichen Längengraden berechnet sich aus

$$AST = LST + (4 \text{ min/deg})(LSTM - Long) + ET$$

*LST = lokale Standardzeit oder Uhrzeit für diese Zeitzone (muss ggf. für die Sommerzeit ST angepasst werden:  $LST = ST - 1$  Stunde)*

*Long = lokale Länge in der Position von Interesse*

*LSTM = lokale Länge des Standardzeitmeridians:*

$$LSTM = 15^\circ \times \left[ \frac{Long}{15^\circ} \right]$$

Der Unterschied zwischen der wahren Sonnenzeit und der mittleren Sonnenzeit ändert sich kontinuierlich mit einem jährlichen Zyklus. Diese Menge ist bekannt als die Zeitgleichung ET in Minuten (*Sunangle* 2017):

$$ET = 9.87 \sin(2D) - 7.53 \cos(D) - 1.5 \sin(D)$$

$$D = 360^\circ \frac{(N - 81)}{365}$$

Der Stundenwinkel H ist der Azimutwinkel der Sonnenstrahlen, der durch die Rotation der Erde verursacht wird. H kann aus der folgenden Gleichung berechnet werden (Cupl 1991):

$$H = \frac{(\text{No of minutes past midnight, AST}) - 720 \text{ min}}{4 \text{ min/deg}}$$

*Der Stundenwinkel H ist am Morgen negativ und am Nachmittag positiv ( $H = 0^\circ$  gegen Mittag).*

Der Sonnenhöhenwinkel  $\beta_1$  ist die scheinbare Winkelhöhe der Sonne am Himmel (Abb. 5.1). Der Zenitwinkel  $\theta_z$  und der Höhenwinkel  $\beta_1$  sind gegeben durch:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\beta_1) = \cos(L) \cos(\delta) \cos(H) + \sin(L) \sin(\delta)$$

*L = Breite (positiv in jeder Hemisphäre)  $[0^\circ \text{ bis } +90^\circ]$*

*$\delta$  = Deklinationswinkel (negativ für die südliche Hemisphäre)  $[-23.45^\circ \text{ bis } +23.45^\circ]$*

*H = Stundenwinkel*

Der Stundenwinkel bei Sonnenuntergang oder Sonnenaufgang  $H_s$  kann mit der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$\cos(H_s) = -\tan(L) \tan(\delta)$$

$H_s$  ist negativ für Sonnenaufgang und positiv für Sonnenuntergang.

Der Sonnenazimut  $\alpha_1$  ist der Winkel von Süden (Norden in der südlichen Hemisphäre) (Abb. 5.1):

$$\cos(\alpha_1) = \frac{\sin(\beta_1) \sin(L) - \sin(\delta)}{\cos(\beta_1) \cos(L)}$$

$\alpha_1$  ist positiv nach Westen (Nachmittag) und negativ nach Osten (Morgen).

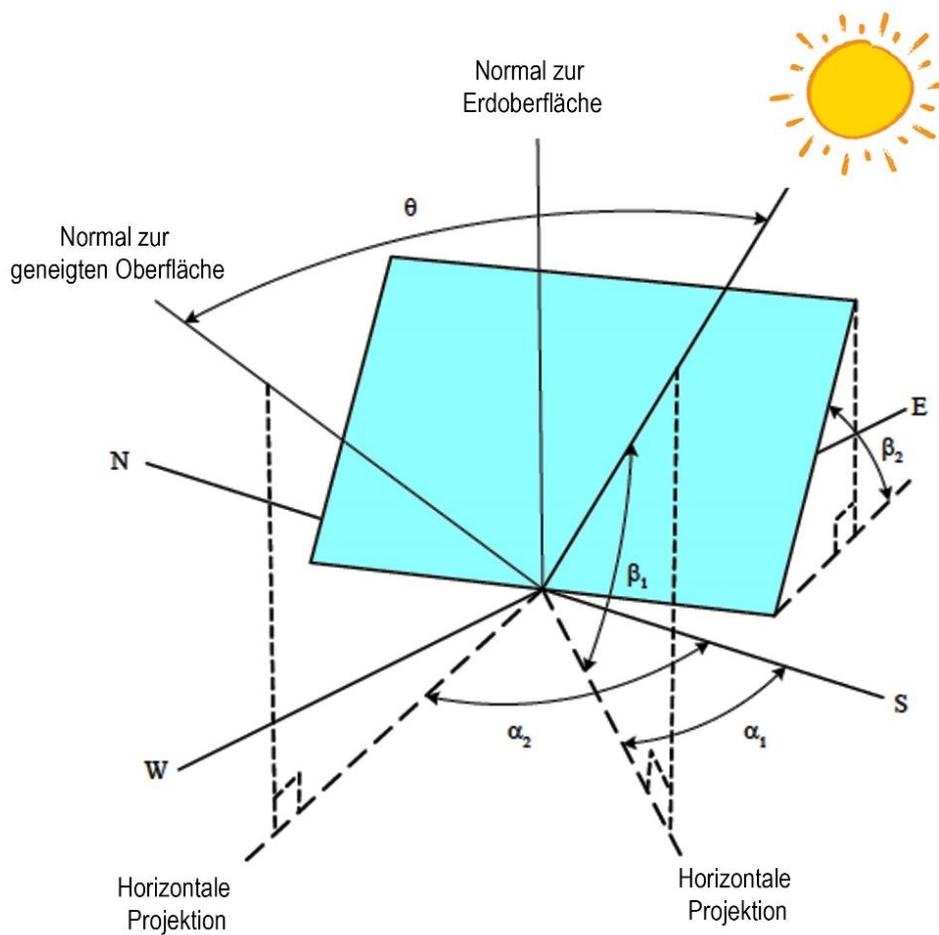


Abb. 5.1 Definition der Sonnenwinkel

Der Kollektorwinkel  $\theta$  zwischen der Sonne und der Normalen zur Oberfläche ist:

$$\cos(\theta) = \sin(\beta_1) \cos(\beta_2) + \cos(\beta_1) \sin(\beta_2) \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

$\alpha_2$  ist der Azimutwinkel senkrecht zur Kollektoroberfläche und  $\beta_2$  ist der Neigungswinkel vom Boden (Abb. 5.1).

Die Sonnenauf- und -untergangsstunden auf dem Kollektor sind unterschiedlich, wenn der Kollektor von sich selbst beschattet wird. Die Sonnenaufgangs-/Sonnenuntergangszeiten des Kollektorfeldes  $H_{SRS}$  können wie folgt berechnet werden (Lunde 1980):

$$H_{SRS} = \pm \min \left[ H_S \cdot \arccos \left( \frac{ab \pm \sqrt{a^2 - b^2 + 1}}{a^2 + 1} \right) \right]$$

$$a = \frac{\cos(L)}{\sin(\alpha_2) \tan(\beta_2)} + \frac{\sin(L)}{\tan(\alpha_2)}$$

$$b = \tan(\delta) \left[ \frac{\cos(L)}{\tan(\alpha_2)} - \frac{\sin(L)}{\sin(\alpha_2) \tan(\beta_2)} \right]$$

Die direkte normale Strahlung  $I_{DN}$  [Btu/hr·ft<sup>2</sup>] auf den Boden ist (Lunde 1980):

$$I_{DN} = A \exp \left[ - \frac{P}{P_0} \frac{B}{\sin(\beta_1)} \right]$$

$A$  ist die scheinbare extraterrestrische Sonnenintensität

$B$  ist der atmosphärische Extinktionskoeffizient (hauptsächlich aufgrund von Änderungen der Luftfeuchtigkeit)

$\frac{P}{P_0}$  ist der Druck an der interessierenden Stelle relativ zu einer Standardatmosphäre

$$\frac{P}{P_0} = \exp(-0.0000361z)$$

$z$  ist die Höhe über dem Meeresspiegel (ft).

Der direkte Strahlungsfluss  $I_D$  [Btu/hr·ft<sup>2</sup>] auf den Kollektor ist:

$$I_D = I_{DN} \cos(\theta)$$

Der diffus-gestreute Strahlungsfluss  $I_{DS}$  [Btu/hr·ft<sup>2</sup>] auf den Kollektor ist:

$$I_{DS} = C I_{DN} \left( \frac{1 + \cos \beta_2}{2} \right)$$

$C$  ist das Verhältnis von diffuser Strahlung auf einer horizontalen Oberfläche zur direkten normalen Bestrahlung.

Der reflektierte Strahlungsfluss  $I_{DR}$  [Btu/hr·ft<sup>2</sup>] für eine nicht-horizontale Oberfläche kann angenähert werden durch:

$$I_{DR} = I_{DN} \rho (C + \sin(\beta_1)) \left( \frac{1 - \cos \beta_2}{2} \right)$$

$\rho$  ist die Vordergrundreflektivität. Sie ist in Tabelle 5.1 für verschiedene umgebende Zustände angegeben.

**Tabelle 5.1 Vordergrundreflektivität für verschiedene umgebende Zustände**

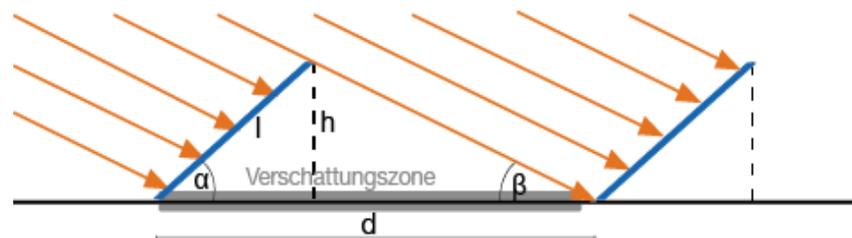
$\rho$	Umgebender Zustand
0.2	Gewöhnlicher Boden oder Vegetation
0.8	Schneedecke
0.15	Kiesdach

Der gesamte Strahlungsfluss  $I_{Tot}$  [Btu/hr·ft<sup>2</sup>] ist dann:

$$I_{Tot} = I_D + I_{DS} + I_{DR}$$

Dachflächen mit Orientierung nach Norden, Nordwesten und Nordosten (Azimut von +135° bis -135°) wurden aufgrund der niedrigen Solareinstrahlung und der entsprechend niedrigen Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung ausgeschlossen. Dachflächen von Nebengebäuden wurden mitbetrachtet und dem zugehörigen Hauptgebäude zugerechnet. Für Flachdächer wurde angenommen, dass Solarzellen mit einer optimalen Orientierung und Neigung zur Ertragsmaximierung sowie mit einem ausreichenden Abstand zueinander zur Vermeidung von gegenseitiger Verschattung gebaut wurden.

Das bedeutet für einen Breitengrad wie München eine Orientierung nach Süden mit einer Neigung von  $35^\circ$ . Aufgrund des benötigten Abstands beträgt die mit Solarzellen belegte Fläche dann 40% der Flachdachfläche (Abb. 5.2).



**Abb. 5.2 Verschattungsbereich bei Flachdächern und resultierender Abstand zwischen den Paneelen (StMUG 2011)**

Weiterhin wurde ein pauschaler Abminderungsfaktor von 40% aufgrund von nicht nutzbaren Dachflächen (Dachfenster, Dachgauben, Schornsteine, Klimaanlage, etc.) angenommen (Müller 2009).

Aus der berechneten gesamten Solareinstrahlung (Globalstrahlung) wurde mittels eines durchschnittlichen Jahresnutzungsgrades (Richtwert) die im Jahr erzeugbare Strommenge auf der Dachfläche jedes einzelnen Gebäudes ermittelt. Für eine bessere Interpretation der Ergebnisse wurde dieser Wert in Bezug zum Strombedarf des jeweiligen Gebäudes dargestellt. Da der reale Stromverbrauch der Gebäude grundsätzlich nicht bekannt ist, wurde der Bedarf auf Grundlage statistischer flächenspezifischer Werte abgeschätzt (Abb. 5.2 und Tabelle A.7 im Anhang).

Die Darstellung an der CDP // Collaborative Design Platform erfolgt gebäudespezifisch mit einer Farbskala von Weiß (0% solar deckbarer Anteil des Stromverbrauchs) bis Dunkelblau (100%). Neben der Legende zeigt zusätzlich ein Pfeil, welcher Anteil des Strombedarfs im gesamten Untersuchungsgebiet mit Solarstrom theoretisch gedeckt werden könnte.

Die gesamte Methode wird in Abb. 5.3 grafisch erläutert.

### **Anforderungen an das Plug-in Solarpotenzial:**

- Berechnung der jährlichen Solareinstrahlung auf jede einzelne Dachfläche
- Berechnung des resultierenden Strompotenzials aus Photovoltaik
- Berechnung des statistischen Stromverbrauchs der einzelnen Gebäude
- Berechnung und farbliche Darstellung des durch Solarenergie gedeckten Anteils des Stromverbrauchs nach vorgegebener Farbskala je Gebäude und als Wert für das Gesamtgebiet

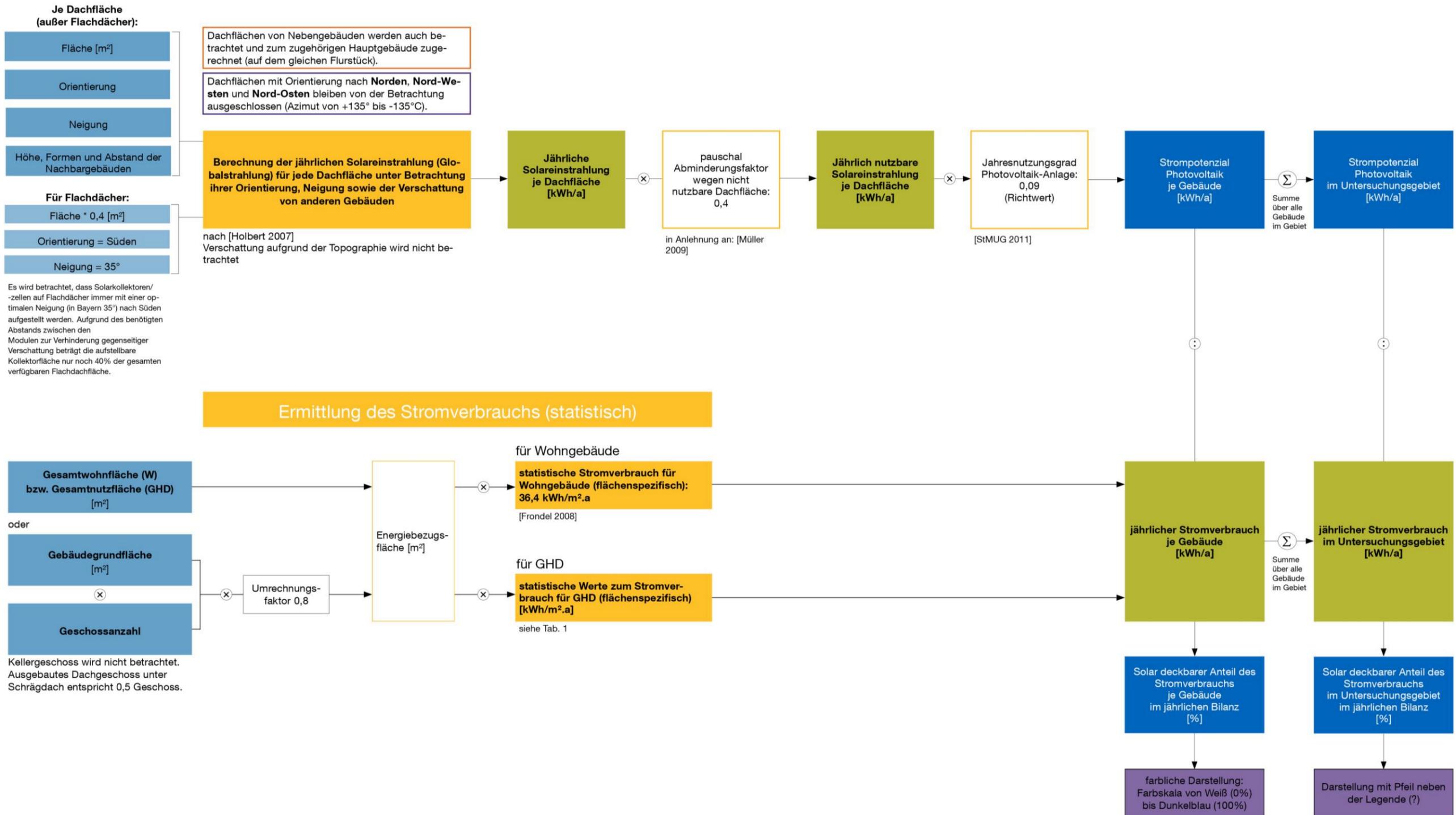


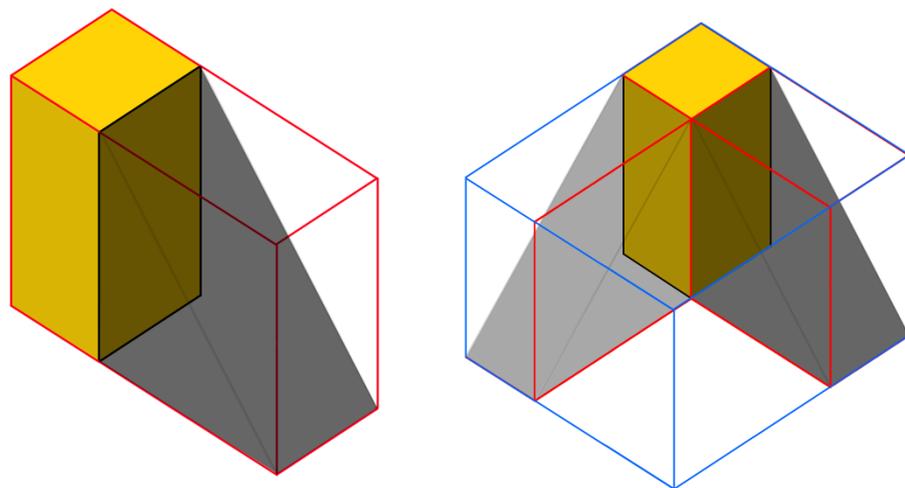
Abb. 5.3 Grafische Darstellung der Methode zur Entwicklung des Plug-ins Solarpotenzial



### 5.1.2 Implementierung

Basierend auf der vorgeschlagenen theoretischen Methode und den beschriebenen Anforderungen lässt sich die Implementierung in zwei Bereiche strukturieren: Unterteilung der rechnerischen Arbeitsbelastung in parallel laufende Komponenten und Reduzierung der Anzahl der tatsächlich durchgeführten Berechnungen durch den Einsatz räumlicher Tests. Das Plug-in wird in zwei eigenständige Schritte aufgeteilt: eine Vorberechnungsphase und eine kontinuierliche Updateschleife.

- Die Vorberechnungsphase berechnet den gebäudespezifischen Stromverbrauch und speichert diesen in derselben Datenstruktur, welche auch vom Wärmenetz-Plug-in verwendet wird. Parallel dazu wird das Untersuchungsgebiet in Längs- und Breitengrade diskretisiert. Daraufhin wird für jeden dieser Grade der Sonneneinstrahlungswinkel für jede Stunde des Jahres entsprechend der Methode nach Holbert (2007) berechnet. Dies ermöglicht es, jeden Gebäudepunkt einem bereits berechneten Wert direkt zuzuweisen. Jedes Dach wird in 1 m<sup>2</sup> große Quadrate eingeteilt, und es werden sogenannte „Bounding Boxes“ (O'Rourke 1985) für die Dächer erstellt, welche in darauffolgenden Schritten schnellere Verschattungsberechnungen ermöglichen. Konkave Gebäude werden aufgeteilt in konvexe Elemente.



**Abb. 5.4 Bounding Box für einzelnes Schattenvolumen (rot, links);  
Bounding Box für alle Schattenvolumina (blau, rechts)**

- Nach dieser Vorberechnungsphase startet die Update-Schleife, welche nochmals in zwei Schritte aufgeteilt ist:

1. **Idealisierte Berechnung:** Zuerst wird eine idealisierte Berechnung des Solarpotenzials durchgeführt, wodurch eine schnelle und einfache Abschätzung des Solarpotenzials entsteht. Bei der Berechnung wird von Flachdächern ausgegangen, die vom Schattenwurf der Nachbarbauten nicht betroffen sind. Dadurch wird der Rechenprozess, die Berechnung der verschatteten Dachflächen, stark vereinfacht.
2. **Präzise Berechnung:** Sie besteht aus zwei parallellaufenden Komponenten:
  - Die erste Komponente berechnet die Schattenvolumina und ihre „Bounding Boxes“ des stündlichen Solarpotenzials.
  - Die zweite Komponente verwendet die vorhandenen Schattenvolumen, um eine präzisere Version der idealisierten Berechnung auszuführen.

Diese Aufteilung ermöglicht eine Erstellung von Volumen, bevor diese in der zweiten Komponente genutzt werden müssen, wodurch der gesamte Prozess, sobald die Volumenberechnung durchgeführt ist, beschleunigt wird.

Die Berechnung der Schattenvolumen für jede einzelne Stunde wird sehr stark durch eine Aufteilung von konkaven Gebäuden in konvexe Elemente vereinfacht. Da ein Schattenvolumen eines konvexen 3-D-Objekts auch eine konvexe Form besitzt, ist es möglich, eine Softwarebibliothek (*MICConvexHull* 2017) zu nutzen, welche automatisch Volumen generiert, die nur auf Objektpunkte und deren Projektion des Sonneneinstrahlungswinkels zurückgreifen. Während dieser Volumenberechnung der Gebäude wird eine Vielzahl von „Bounding Boxes“ generiert. Sie ermöglichen es, eine schnellere Berechnung eines präzisen Solarpotenzials durchzuführen. Diese werden für alle Schattenvolumen erzeugt. Parallel dazu entsteht eine große „Bounding Box“, welche alle kleinen Boxen eines Gebäudes umfasst und diese damit vereinfacht.

Im Gegensatz zur idealisierten Methode werden bei der präzisen Methode auch die gegenseitigen Verschattungen der Gebäude berücksichtigt. Um die Verschattung von einem Dach zu berechnen, wird überprüft, inwieweit die „Bounding Box“ des Daches sich mit den „Bounding Boxes“ der gesamten Schattenvolumen anderer Gebäude überschneidet. Für jeden Test, wo es eine Überlappung gibt, werden die Boxes erneut gegenüber der spezifischen stündlichen „Bounding Boxes“ getestet. Nach diesen Schritten

wird der letzte Test für die diskretisierten Flächen des Daches gegenüber den wirklichen Schattenvolumen der Gebäude wiederholt. Der finale Test ermöglicht es, eine gute Vorhersage zu treffen, welche Dächer im untersuchten Bereich für eine spezifische Stunde von anderen Gebäuden verschattet werden.

Wenn ein Gebäude zum untersuchten Gebiet hinzugefügt wird, wird zuerst ein idealisiertes Szenario nur für die neuen Gebäude berechnet und dieses in Realzeit dargestellt. Danach wird das Schattenvolumen für jede Stunde berechnet, direkt im Anschluss startet die präzise Berechnung. Während dieser wird nur das Solarpotenzial für das neue und alle umliegenden Gebäude, welche vom Schatten betroffen sein könnten, berechnet. Die potenziell betroffenen Gebäude werden durch die „Bounding Boxes“ bestimmt.

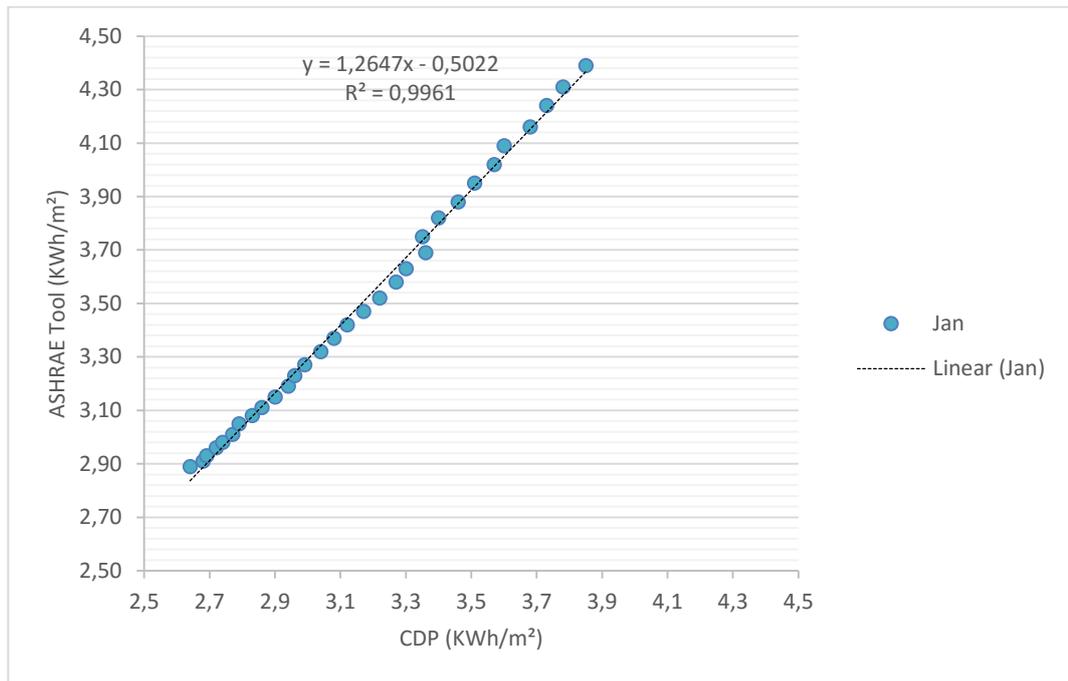


**Abb. 5.5 Darstellung des solar deckbaren Anteils des Stromverbrauchs in Prozent je Gebäude; rot markierte Gebäude sind nicht Teil der Betrachtung. Der Pfeil neben der Legende zeigt den Wert für das gesamte betrachtete Gebiet.**

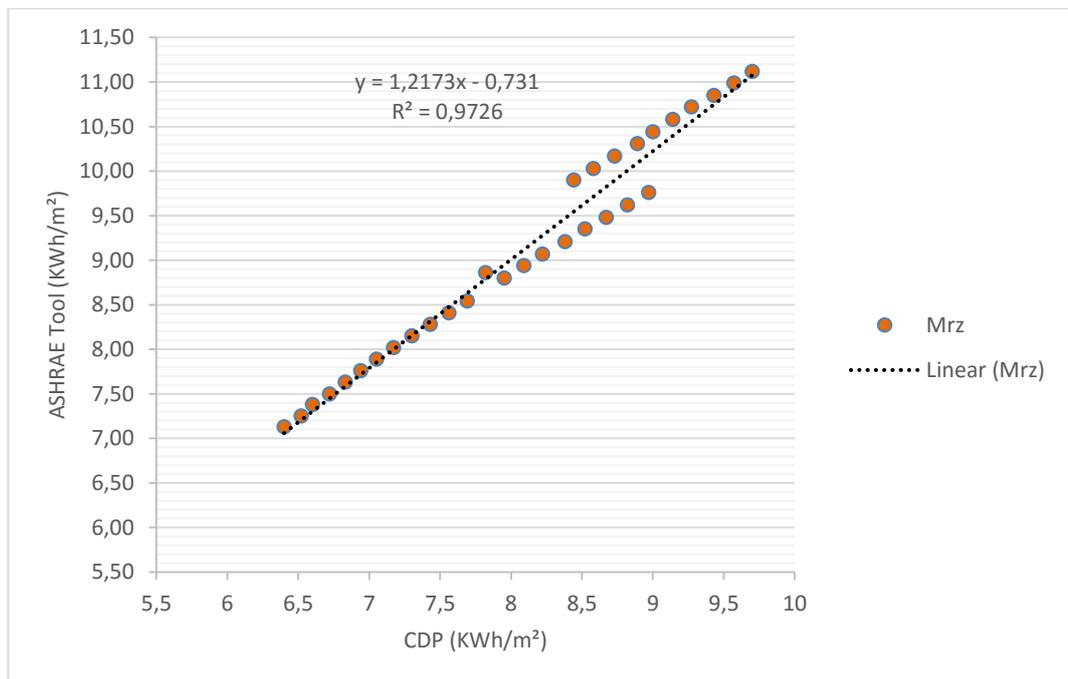
### 5.1.3 Validierung

Die in der CDP // Collaborative Design Platform simulierten Werte zum Solarpotenzial über das Jahr wurden mittels zweier verschiedener Tools validiert. Beispielhaft für eine um 35° Grad geneigte Fläche wurden die in der CDP berechneten Werte extrahiert und dann mit den Ergebnissen für die entsprechend mit einem ASHRAE-Tool und Radiance berechneten Strahlungswerte verglichen.

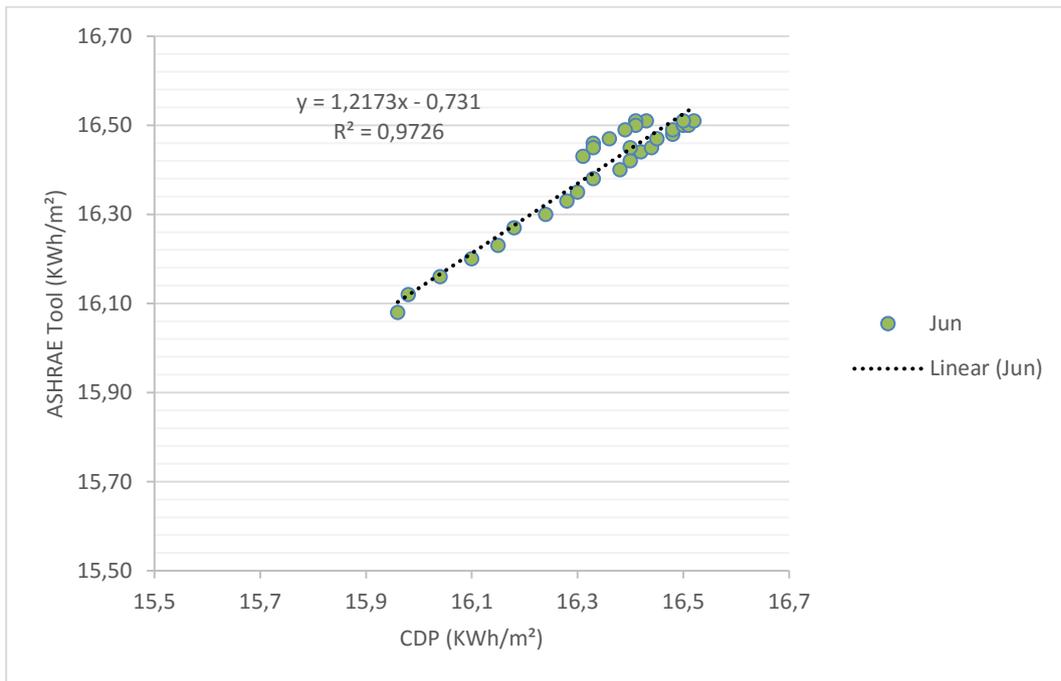
Das erste zur Validierung verwendete Tool „ASHRAE Clear Day Model Solar Calculator“ wurde von der Universität von Minnesota auf der Basis von Berechnungen von Kuen (1998) entwickelt. Dieses Modell verwendet die gleichen Gleichungen, die in die CDP implementiert wurden, wobei ortsbezogene Daten (Breiten- und Längengrad) ohne Berücksichtigung von Wetterdaten und ausschließlich für einen klaren Himmel herangezogen werden. Die in der CDP // Collaborative Design Platform angewendete Methode ermöglicht es, das Solarpotenzial für Referenzpunkte im Echtzeitmodus zu berechnen. Für die Validierung mit dem *ASHRAE*-Tool wurden damit stündliche, direkte und diffuse Solarstrahlungswerte berechnet, um daraus das monatliche Solarpotenzial zu ermitteln. Diese monatlichen Werte wurden dann mit den Werten aus der CDP-Simulation verglichen. Die folgenden Grafiken (Abb. 5.6 – 5.10) zeigen die lineare Regression für die jährliche Solarstrahlung im Vergleich von CDP und *ASHRAE*-Tool für ausgewählte Monate. Die detaillierte Analyse der Ergebnisse ergibt einen „determination coefficient factor“ ( $R^2$ ) von 0,97 bis 0,99, was eine hohe Genauigkeit der implementierten Methode im Vergleich zum *ASHRAE*-Werkzeug bestätigt.



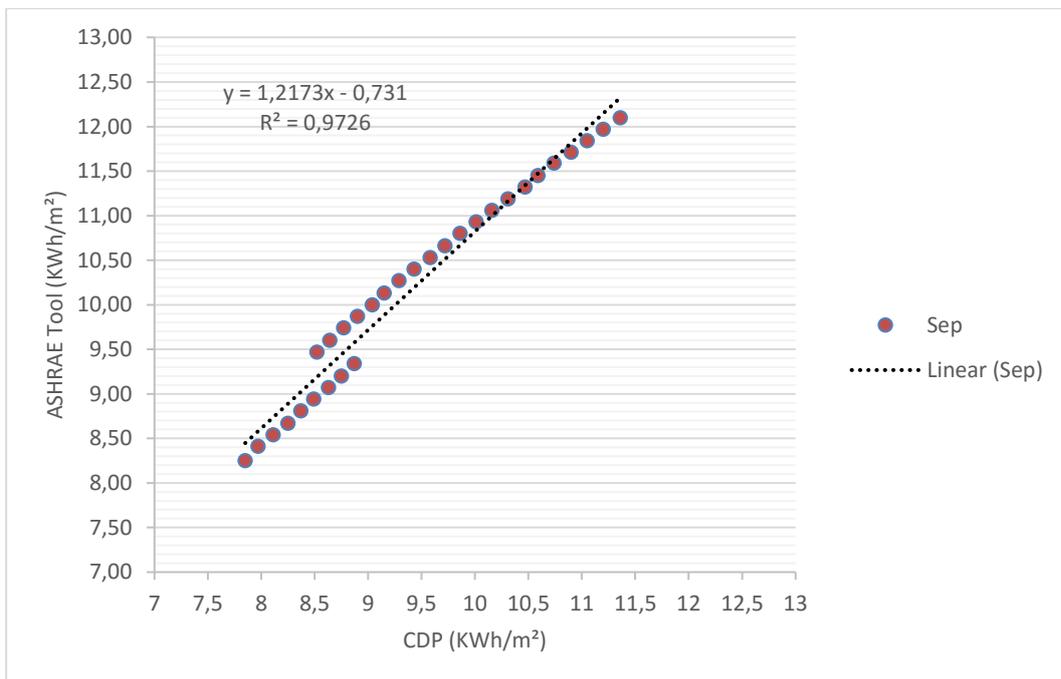
**Abb. 5.6** Monatliche globale Sonnenstrahlung (Januar)



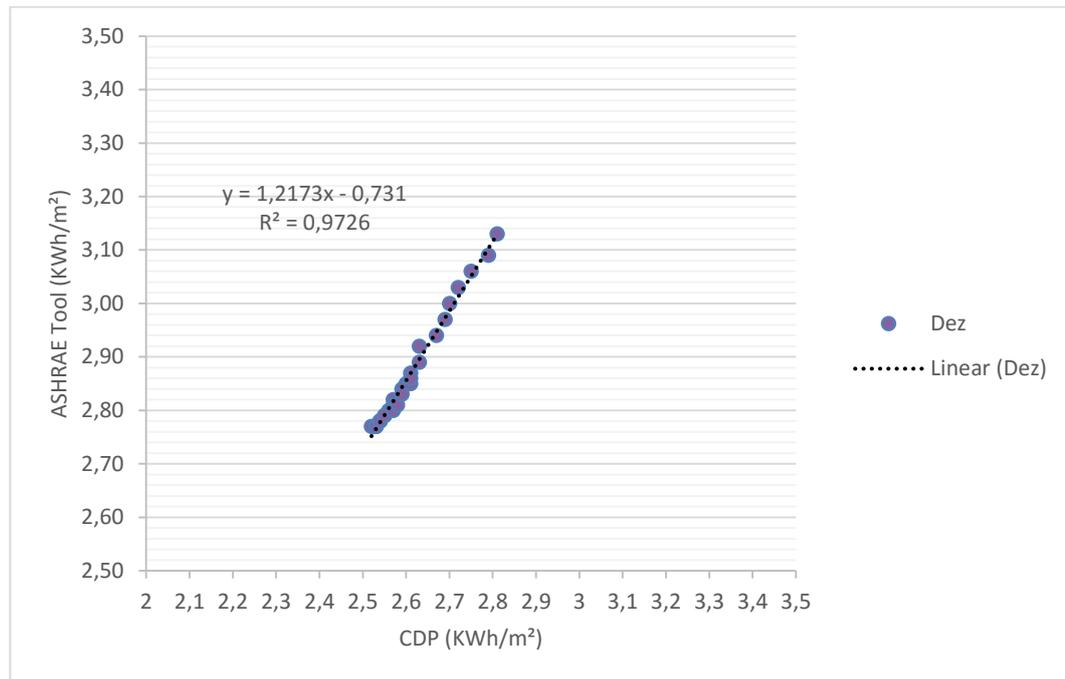
**Abb. 5.7** Monatliche globale Sonnenstrahlung (März)



**Abb. 5.8** Monatliche globale Sonnenstrahlung (Juni)



**Abb. 5.9** Monatliche globale Sonnenstrahlung (September)



**Abb. 5.10 Monatliche globale Sonnenstrahlung (Dezember)**

Das zweite zur Validierung verwendete Tool war *Radiance* (2017), das Wetterdaten für den betrachteten Standort einschließlich direkter und diffuser horizontaler Strahlung und Bewölkung einbezieht. Damit ist dieses Tool zwar für genauere Simulationen geeignet, jedoch würde die erforderliche Simulationszeit keine direkte Einbindung in den Echtzeitprozess der CDP // Collaborative Design Plattform erlauben.

Zur Validierung wurden *Radiance*-Simulationen für die Stadt München auf Basis von standortbezogenen Jahreswetterdaten durchgeführt. Dabei ergaben sich deutlich geringere Werte für die ermittelte Solareinstrahlung (Abb. 5.11). Einer der Hauptgründe für diesen bemerkenswerten Unterschied zwischen den Ergebnissen aus CDP- und *Radiance*-Simulationen liegt in der starken Wolkenüberdeckung am Standort München entsprechend der nun einbezogenen lokalen Wetterdaten.

Das für die CDP entwickelte Plug-in zur Berechnung des Solarenergiepotenzials ist für vergleichende Studien in frühen Stadien der städtebaulichen Planung gedacht, um entsprechende Entwurfsvarianten gegenüberzustellen und zu bewerten. Insofern kann die nachgewiesene Überschätzung des Solarpotenzials aufgrund nicht einbezogener loka-

ler Wetterwerte vernachlässigt werden, solange Ergebnisse ausschließlich dem Variantenvergleich dienen. Für die Ermittlung des deckbaren Energiebedarfs durch Solarenergie sollten diese entweder mit einem Korrekturfaktor angepasst werden oder andere repräsentative standortspezifische Strahlungswerte auf Basis von Wetterdaten (statistische jährliche Strahlungswerte) verwendet werden, um so realitätsnähere Ergebnisse zu erhalten.

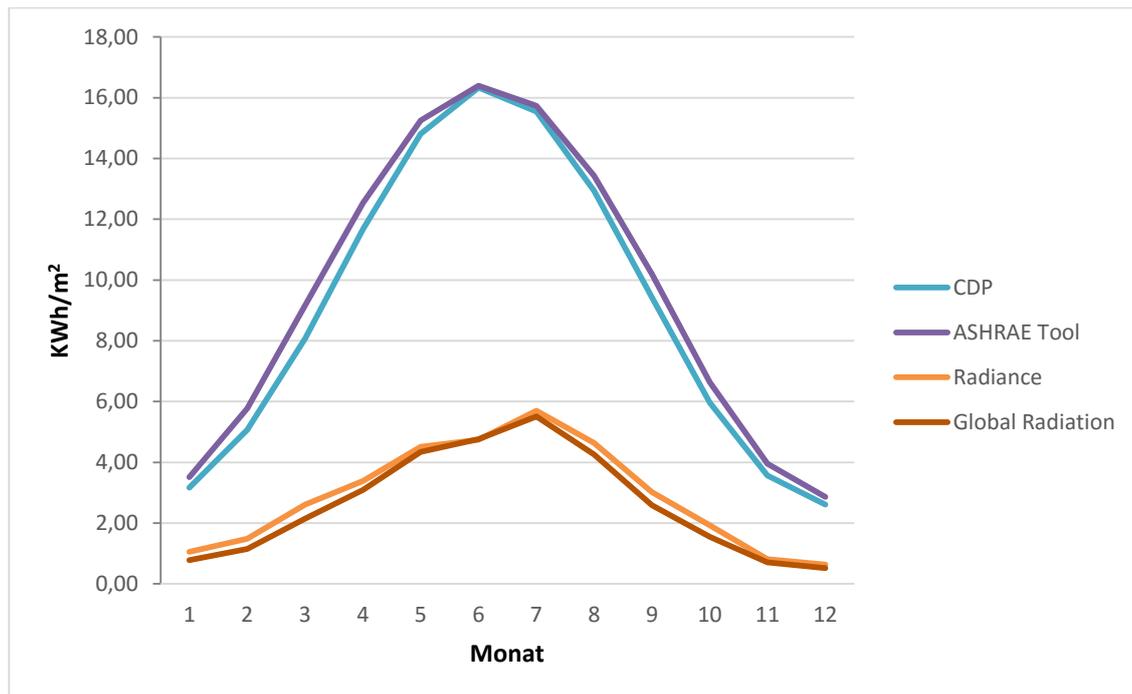


Abb. 5.11 Monatlicher Vergleich der solaren Strahlungswerte für die Stadt München

## 5.2 Plug-in Potenzial Oberflächennahe Geothermie

Mit diesem Plug-in werden sowohl Karten zu Nutzungsmöglichkeiten geothermischer Energie im CDP // Collaborative Design Platform visualisiert als auch ein rechnerisches Potenzial im Untersuchungsgebiet evaluiert.

### 5.2.1 Energetische Grundlagen und Anforderungen an das Plug-in

Das Potenzial zur Nutzung von Wärme aus oberflächennaher Geothermie im Untersuchungsgebiet versteht sich als die Wärmemenge, die theoretisch innerhalb eines Jahres mithilfe von Wärmetauschern und Wärmepumpen aus dem Untergrund der verfügbaren

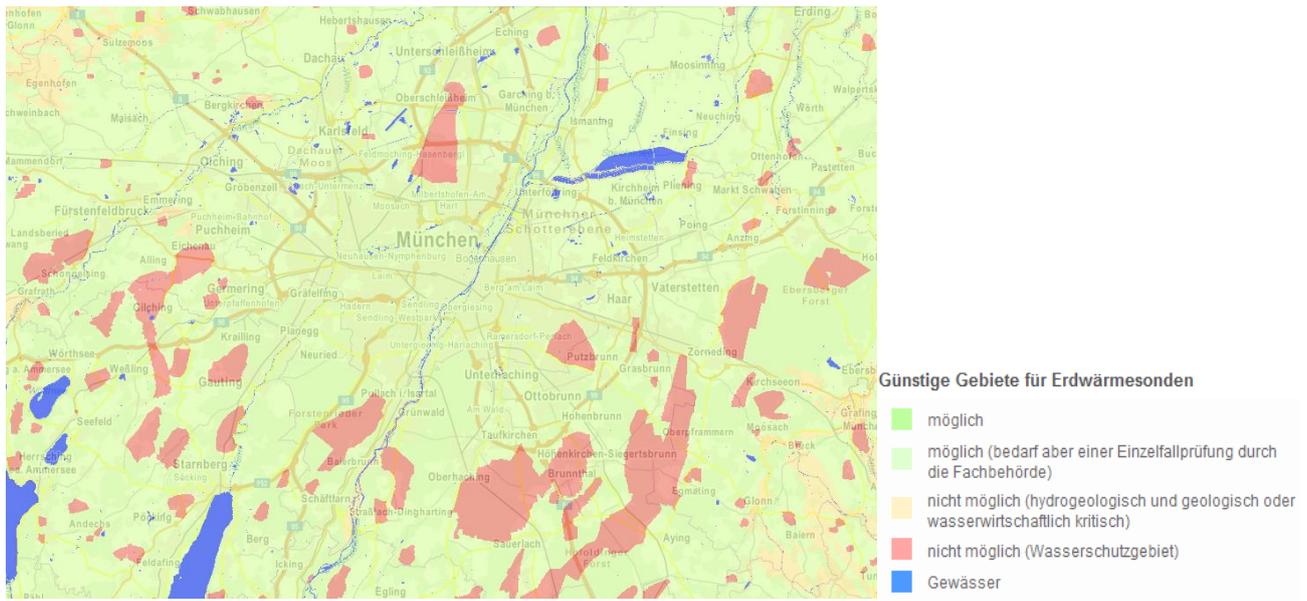
Grundstückflächen unter Zufuhr von elektrischer Energie (zum Betrieb der Wärmepumpen) gewonnen werden kann. Diese wird dann im Verhältnis zum bestehenden Wärmebedarf der einzelnen Gebäude bzw. des gesamten Untersuchungsgebiets mittels einer geeigneten Farbskala dargestellt.

Von den drei grundsätzlich verfügbaren Technologien zur Nutzung oberflächennaher Geothermie werden hier nur Erdsonden betrachtet, da diese die meistverbreitete Nutzungsoption darstellen. Die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen ist im Einzelfall zu prüfen, da sie je nach hydrogeologischen Verhältnissen nur eingeschränkt möglich ist und in der Regel eine wasserrechtliche Erlaubnis erfordert. Dementsprechend ist eine pauschale Ermittlung des damit verbundenen Energiepotenzials für ein ganzes Gebiet praktisch nicht umsetzbar. Erdwärmekollektoren wurden nicht berücksichtigt, weil es sich um eine weniger verbreitete Technologie aufgrund des sehr hohen Flächenbedarfs und der ausgeschlossenen Überbauung/Versiegelung der genutzten Areale handelt. Außerdem weisen Erdwärmekollektoren generell eine niedrigere Energieeffizienz auf als stärker in die Tiefe gehende Wärmetauscher.

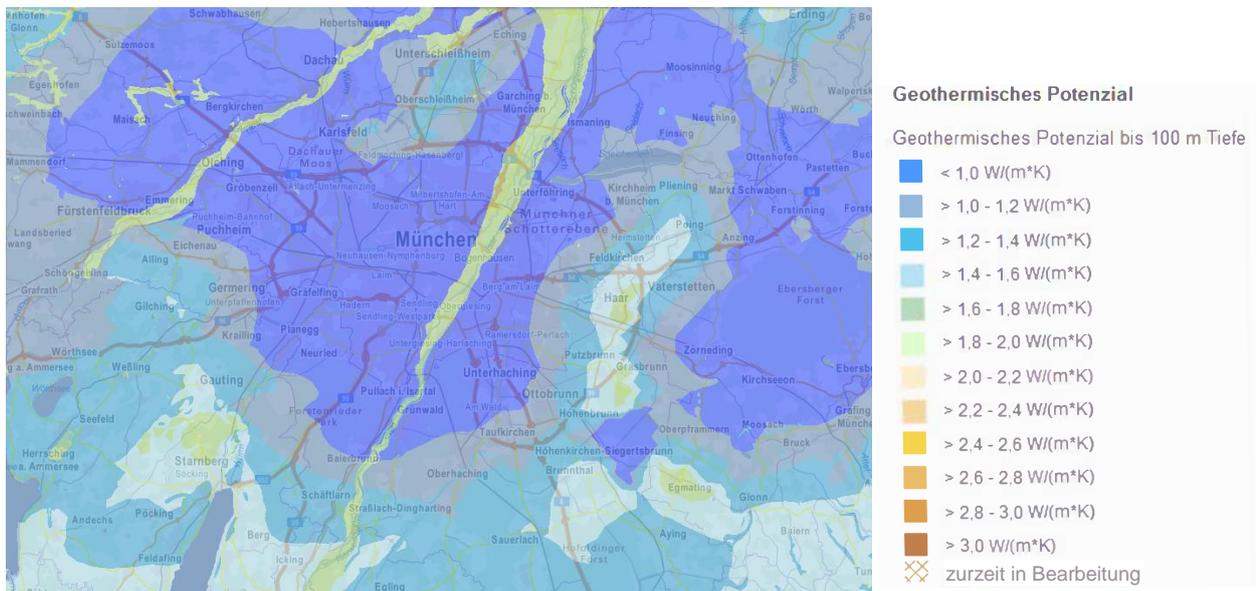
### **Schritt 1: Einbindung der Karten zur oberflächennahen Geothermie in die CDP // Collaborative Design Platform**

Die Nutzbarkeit des thermischen Energiepotenzials aus oberflächennaher Geothermie ist für den Großteil Deutschlands bereits erfasst und in digitalen Karten abrufbar. Die länderspezifischen Karten beinhalten in der Regel Informationen zur Nutzungsmöglichkeit der verschiedenen Technologien, zu Schutzgebieten (hier ist eine Nutzung geothermischer Wärme ausgeschlossen) sowie zur Bodenbeschaffenheit und Bohrrisiken etc.

In den Abb. 5.11 und 5.12 sind beispielhafte Karten aus dem „Energieatlas Bayern“ für die Stadt München und Umgebung dargestellt (StMWi 2017).



**Abb. 5.12 Günstige Gebiete für Erdwärmesonden (Auszug aus (StMWi 2017))**



**Abb. 5.13 Geothermisches Potenzial bis 100 Meter Tiefe (Auszug aus (StMWi 2017))**

Um die Nutzungsmöglichkeiten von Erdsonden für das betrachtete Untersuchungsgebiet abschätzen zu können, muss eine Anbindung von WMS-Serverdiensten mit Informatio-

nen zur oberflächennahen Geothermie direkt an die CDP // Collaborative Design Plattform erfolgen. Der entsprechende WMS-Server des Freistaats Bayern wird im Rahmen des Projektes beispielhaft verwendet (LfU 2017).

## Schritt 2: Ermittlung des thermischen Potenzials für das Untersuchungsgebiet

Auf Grundlage der oben genannten Karten und unter Einbezug der Flurstücks- und Gebäudekarten soll das Potenzial für Erdwärmesonden (in Form einer Energiemenge) ermittelt und dargestellt werden.

Die Ermittlung dieses Potenzials erfolgt grundstücksspezifisch unter Einbezug der tatsächlich verfügbaren Flächen und der erforderlichen Abstände zwischen den Sonden und den Grundstücksgrenzen. Folgende grundsätzliche Annahmen wurden getroffen:

- Erdwärmesonden werden nur im dunkleren grünen Bereich der Geothermiekarte „Günstige Gebiete für Erdwärmesonden“ installiert (Abb. 5.12).
- Erdwärmesonden dürfen nur auf Flurstücken mit Nutzungen entsprechend Tabelle 5.2 installiert werden. Ausgeschlossen werden müssen alle Straßen, Grünanlagen, Wasser etc.

**Tabelle 5.2 Für Erdwärmesonden grundsätzlich geeignete Flurstücknutzungsarten**

GF Wohnen	Kultur
GF Handel, Wirtschaft und Dienstleistung	Kirche
GF Gewerbe und Industrie	Gesundheit
GF Garagen	Soziales
Messe, Ausstellung	Sicherheit/Ordnung
Bauplatz	Verwaltung
unbebaute Fläche Erziehung	Alten-/Pflegeheim
Bildung/Forschung	

- Entsprechend VDI 4640 und LAWA-Empfehlung (VDI 4640) (LAWA 2011) müssen Erdwärmesonden mit einem Mindestabstand von 10 Meter zueinander und mit einem Abstand von 5 Meter zur Grundstücksgrenze gebaut werden.
- Um den Zugang für die Bohrmaschine sicherstellen zu können (Befahrbarkeit), werden pauschal alle Flurstücksteile ausgeschlossen, die nicht direkt an eine Straße angrenzen.

- Auch die Flurstückbereiche mit Bauten im Untergrund (z.B. Tiefgaragen) sind auszuschließen.
- Weiterhin wird ein pauschaler Abschlag von 20% angenommen, um ungünstige Flächen, Bäume, Kabeltrassen sowie Entwässerungstrassen auszuschließen.
- Zur Vereinfachung wird angenommen, dass Erdwärmesonden ausschließlich auf dem eigenen Flurstück gebaut werden. Das bedeutet, dass die erschließbare Wärmemenge nur von den (vorhandenen bzw. zukünftigen) Gebäuden auf dem Flurstück genutzt wird.

Um daraus ein Wärmemengen-Potenzial zu generieren, werden weitere Annahmen getroffen:

- Erdsonden sind 100 Meter tief, entsprechend der maximalen Tiefe ohne Anzeigepflicht nach der bergrechtlichen Regelung § 127 Abs. 1 Nr. 1 BBergG (BBERG 1980).
- Die spezifische jährliche Entzugsarbeit der Erdsonden beträgt 100 kWh/m\*a (StMUG, StMWiVT 2007).
- Die mittlere Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe (JAZ) beträgt 4 (StMUG, StMWiVT 2007).

Aus der ermittelten Anzahl möglicher Erdsonden je Grundstück und auf Basis dieser Standardwerte kann sodann die Wärmemenge berechnet werden, die jährlich unter Zufuhr der entsprechenden Strommenge an das zu versorgende Gebäude geliefert werden könnte.

Durch einen Vergleich mit dem Wärmebedarf des Gebäudes (aus der Berechnung des Wärmebedarfs der einzelnen Gebäude, siehe Kapitel 4.1) kann dessen Anteil, der durch Erdwärmesonden jährlich gedeckt werden kann, bestimmt und dargestellt werden. Das Umsetzungskonzept sieht vor, die Darstellung in der CDP // Collaborative Design Plattform mithilfe einer Farbskala von Weiß (0% des Wärmebedarfs mit Erdwärmesonden deckbar) bis Dunkelgrün (100% des Wärmebedarfs mit Erdwärmesonden deckbar) zu visualisieren. Vergleichbar mit der Umsetzung des Solarpotenzials wäre ein Vergleich zwischen der gesamten aus Erdwärmesonden jährlich produzierbaren Wärmemenge und dem gesamten jährlichen Wärmebedarf für das ganze Betrachtungsgebiet zu erstellen. Die Darstellung des entsprechenden Anteils wäre mit einem Pfeil neben der Legende dargestellt. Zur gesamtenergetischen Bewertung muss außerdem die für den Betrieb der Wärmepumpen erforderliche Strommenge mit angegeben werden.

Die Gesamtmethode wird in Abb. 5.13 grafisch detailliert erläutert. Sie basiert auf geografischen Verschneidungen der verschiedenen Basiskarten sowie Filterungen nach Attributen, Pufferungen, etc. Als Ergebnis wird die Anzahl möglicher Erdsonden je Flurstück sowie die daraus jährlich gewinnbare Wärmemenge in Bezug auf den Wärmebedarf der Gebäude ermittelt.

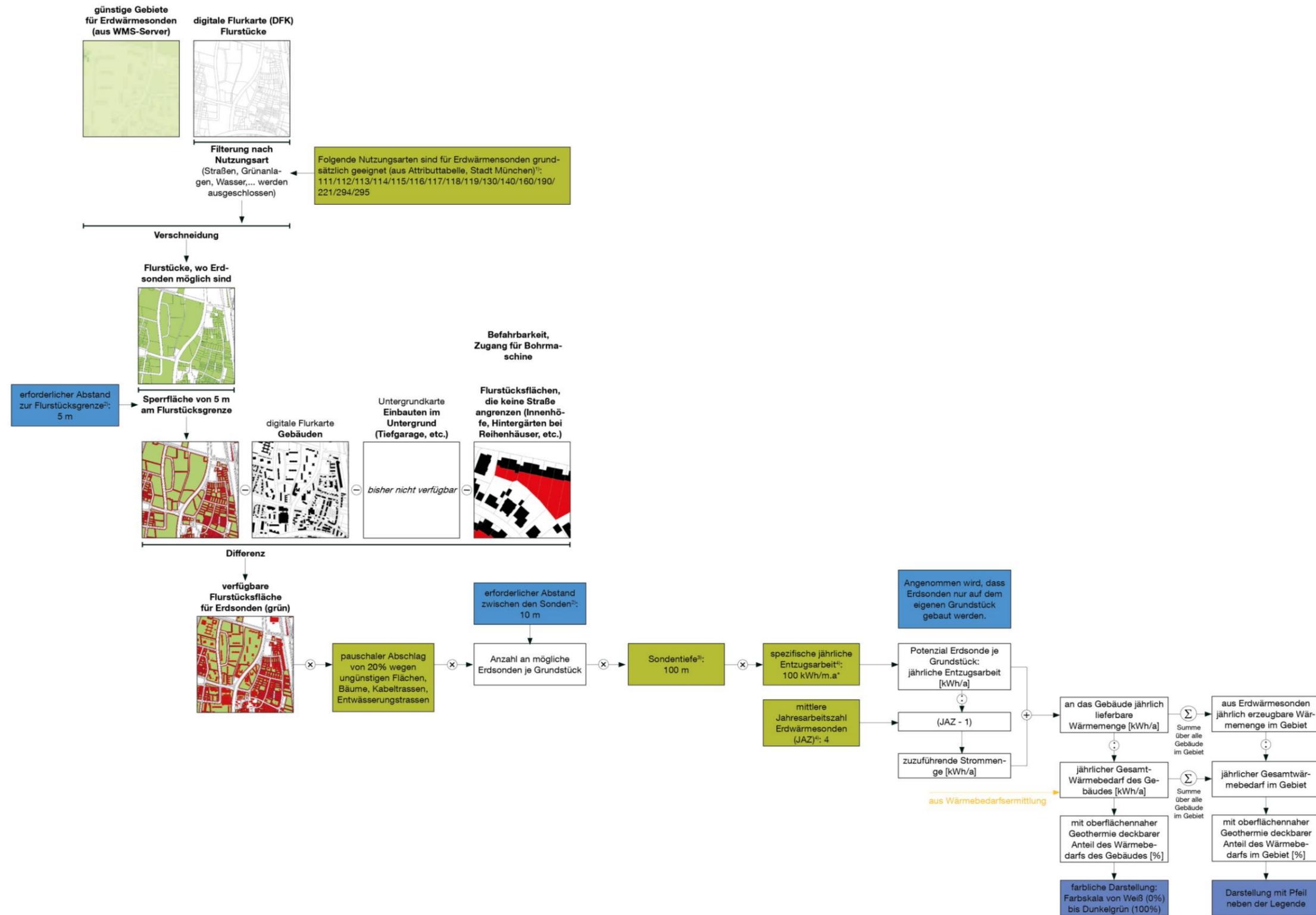


Abb. 5.14 Grafische Darstellung der Methode zur Entwicklung des Plug-ins Potenzial oberflächennahe Geothermie

## 5.2.2 Implementierung

Zur Verarbeitung der notwendigen Zusatzinformationen im Kontext der geothermischen Potenziale wurde das CDP-Framework um die Anbindung zusätzlicher Datenmodelle erweitert. Ein WMS-Server bietet ein standardisiertes Datenmodell zur Übertragung gebietspezifischer Informationen. Da WMS-Serverinformationen oft nur solche gebiets-spezifischen Informationen (Stadt, Land oder Kontinent) beinhalten, kommen meist unterschiedliche, regionale Koordinatensysteme (z.B. 3-degree Gauss-Krüger Zone 4 - Geoportal von Bayern) zur Anwendung.

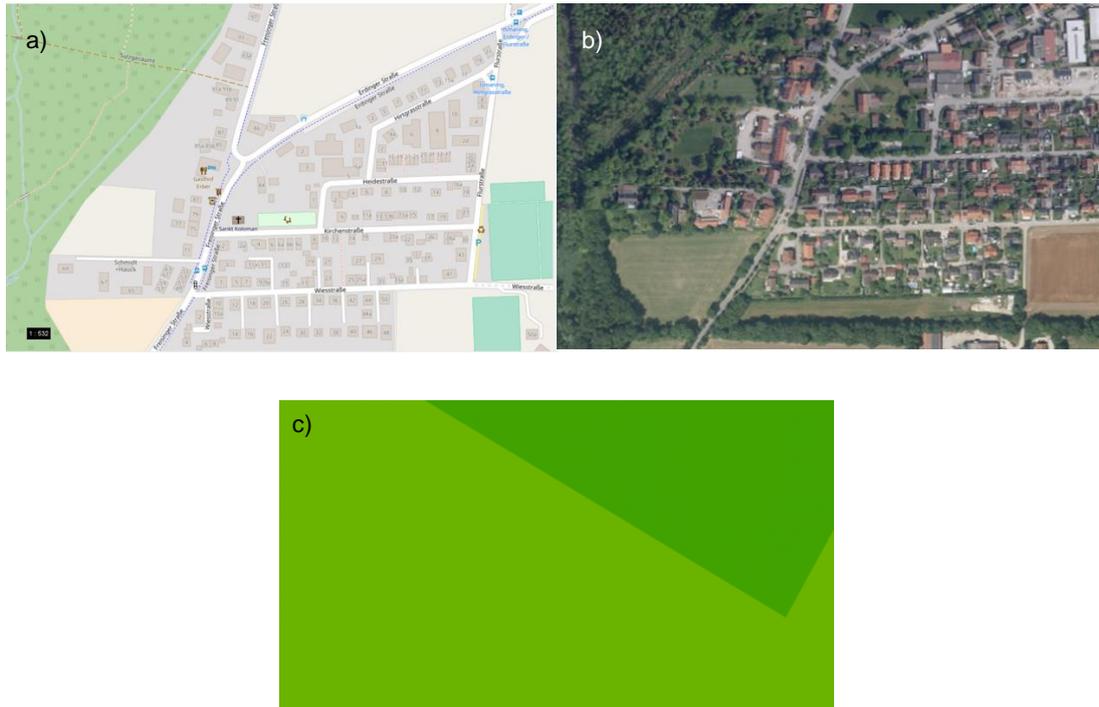
```

"srs": [
  {
    "name": "epsg:31468",
    "proj": "tmerc",
    "central_meridian": 12,
    "scale": 1,
    "false_easting": 4500000,
    "false_northing": 0,
    "ellipse": "bessel"
  }
],
"ellipsoids": {
  "bessel": {
    "f": 0.00334277315366598139650686662614,
    "a": 6377397.155
  }
}

```

**Abb. 5.15 JSON Koordinatensystem und Ellipsen-Beschreibung**

Im CDP-Framework selbst wird das WGS-84-Koordinatensystem verwendet. Aufgrund dieser beiden divergenten Datensysteme wurde eine neue Systemkomponente zur Transformation der Koordinatensysteme implementiert. Um eine einfache Bedienung und eine individuelle Erweiterung zu ermöglichen, erfolgte die Umsetzung der Komponente als spezifisches Software-Interface. Dies ermöglicht auch die Transformation von WGS 84 auf Gauss-Krüger-Koordinaten durch einen „Transverse Mercator Algorithmus“. Spezifische Transformationsparameter wie Ellipsen, zentrale Meridiane etc. werden in einem separaten „JSON-File“ nutzerspezifisch definiert.



**Abb. 5.16 a) Stadtplan als StreetView von OpenStreetMaps (oben links) b) Stadtplan als digitale Orthofotos von WMS (oben rechts) c) oberflächennahe Geothermie von WMS (unten)**

Die Anfrage am WMS-Server erfolgt auf Basis der transformierten Geokoordinaten mittels „HTTP GET request“ unter Angabe der WMS-Spezifikationen (Abb 5.17). Auf diese Weise lassen sich unterschiedliche Informationen abrufen. Darunter bspw. Luftbilder (Abb. 5.16 b), aber auch Flächenkarten mit Angabe des Geothermie-Potenzials (Abb. 5.16 c). Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt mittels Pixeldaten im „.png-“ bzw. „.jpg“-Format.

Für spezifische Fälle farbkodierter Rückgabewerte müssen zum Abruf der zugrundeliegenden Werte je Pixel erneut separate Anfragen an den WMS-Server gesendet werden. Das Mapping zwischen Pixel und dem numerischen Wert wird als „JSON-File“ abgespeichert.

```

"servers": [{
  "version": "1.1.1",
  "format": "image/png",
  "layers": [{
    "name": "EWS_Potential",
    "use_feature_info": true,
    "feature_info_key": "POTENTIAL"
  }, {
    "name": "EWS_Ergebnis",
    "use_feature_info": true,
    "feature_info_key": "EWS_ERGEBN"
  }],
  "srs": "epsg:31468",
  "output_affix": "LfU",
  "server": "http://www.bis.bayern.de/wms/lfu/oberflnaheGeothermie\_wms?"
}, {
  "version": "1.1.1",
  "format": "image/png",
  "layers": [{
    "name": "sd_12",
    "use_feature_info": false,
    "feature_info_key": ""
  }],
  "srs": "epsg:31468",
  "output_affix": "Risby",
  "server": "http://wirtschaft-risby.bayern.de/RisGate/servlet/Sonnenscheindauer?"
}, {
  "version": "1.1.1",
  "format": "image/png",
  "layers": [{
    "name": "adv_dop200c",
    "use_feature_info": false,
    "feature_info_key": ""
  }],
  "srs": "epsg:31468",
  "output_affix": "ogc",
  "server": "http://www.geodaten.bayern.de/ogc/ogc\_dop200\_0a.cgi"
}],

```

**Abb. 5.17 JSON-Server Beschreibung**

Es besteht jedoch die Problematik, dass Server, die Informationen zum Potenzial oberflächennaher Geothermie für verschiedene Regionen bereitstellen, möglicherweise nicht die gleiche Farbgebung, das gleiche Werteschema oder die gleiche Datendarstellung aufweisen, was zu Inkonsistenzen bei der Konvertierung der Bildwerte in tatsächlich nutzbare Werte für das Plug-in führt. Zudem wurde der für das Projekt beispielhaft verwendete WMS-Server (Potenziale oberflächennaher Geothermie im „Energieatlas Bayern“) durch den Herausgeber so verändert, dass nur Informationen im Maßstab 1:500 oder höher bezogen werden können.

Insgesamt bestanden bei der Berechnung des Wärmepotenzials aus oberflächennaher Geothermie einige grundlegende Probleme, aufgrund derer die Implementierung des Plug-ins in die CDP // Collaborative Design Platform im Rahmen des Projekts nicht wie

angestrebt abgeschlossen werden konnte. Neben den bereits erläuterten technischen Hemmnissen im Zusammenhang mit der Einbindung von WMS-Servern lag die größte Hürde in der Gewinnung von Information über die Grundstücksaufteilung. Diese erforderlichen „Flurstückinformationen“ werden von „OpenStreetMaps“, der bisherigen Quelle aller Datenstrukturen für die CDP // Collaborative Design Platform, nicht unterstützt. Im Hinblick auf eine mögliche Lösung für diese Problematik hat die Stadt München im Rahmen des Forschungsprojekts „.shp“-Dateien mit den benötigten Informationen für ausgewählte Teilgebiete als alternative Datenquelle zur Verfügung gestellt. Zur Unterstützung von „.shp“-Dateien durch die CDP // Collaborative Design Platform wurde ein Konverter-Tool entwickelt, das nur die benötigten Informationen extrahiert und diese in ein geeignetes Format überträgt. Da keine direkte Verbindung zwischen „.shp“-Dateien und „OpenStreetMaps“-Daten besteht, ist außerdem ein Algorithmus erforderlich, der die Flurstücke in den „.shp“-Dateien mit den Gebäuden in „OpenStreetMaps“-Daten verknüpft und dabei auch Sonderfälle berücksichtigt, z.B. dass ein Gebäude auf zwei Grundstücken steht. Diese Einbindung von Flurstücken über entsprechende „.shp“-Dateien erfordert somit eine Art Erweiterung bzw. Überarbeitung der für die CDP bestehenden Datenstrukturen, die sich im Rahmen der im Projekt gegebenen Kapazitäten nicht bewerkstelligen ließ.

Eine weitere relevante Datenstruktur zur Abbildung des Energiepotenzials aus oberflächennaher Geothermie, die derzeit weder in „OpenStreetMaps“ noch in den „.shp“-Dateien abbildbar ist, sind Garagen und unterirdische Gebäudeteile, die sich außerhalb der Kontur des oberirdischen Gebäudeteils erstrecken.

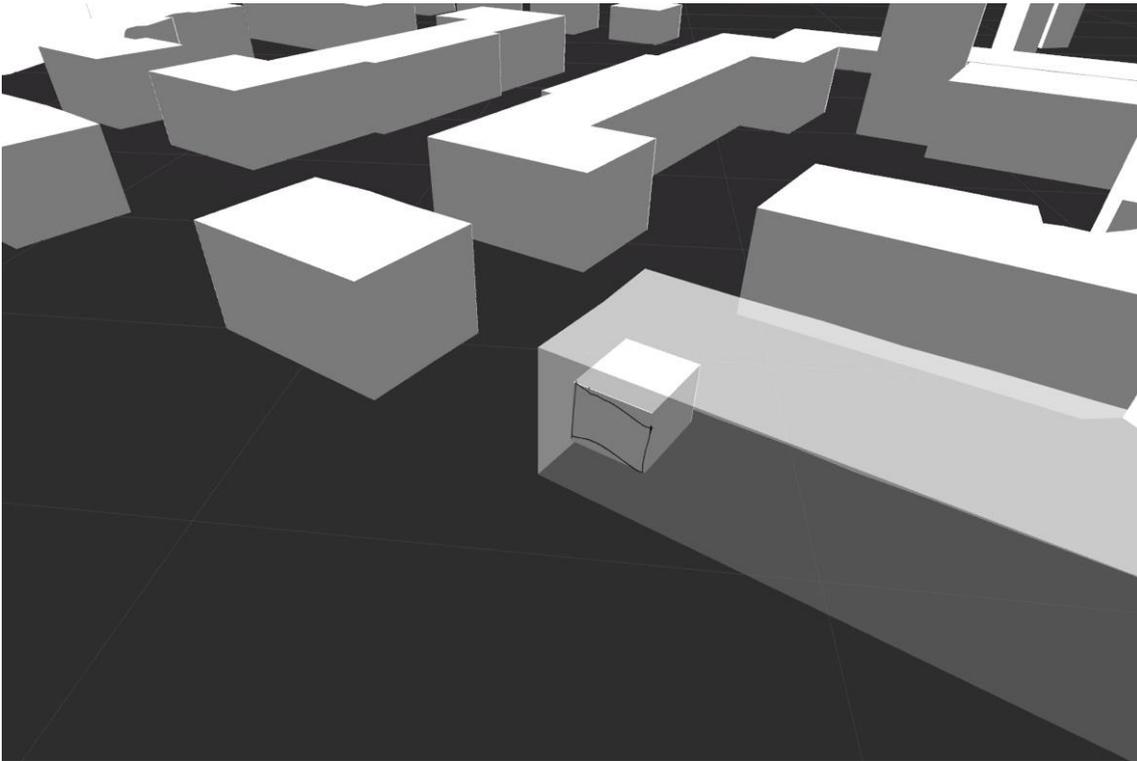
## 6. Plug-ins Simulation Innenraum

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, den Einfluss der städtebaulichen Struktur auf den Energiebedarf und den Innenraumkomfort (thermisch/visuell) der Gebäude zu untersuchen. Diese Untersuchung beschränkt sich jeweils auf einen einzelnen exemplarischen Raum innerhalb eines Gebäudes, um das genaue Verhalten dieser Zone unter konkreten Bedingungen analysieren zu können. Für den ausgewählten Raum werden die Tageslichtverhältnisse, der thermische Komfort sowie der Energiebedarf für Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchtung durch präzise dynamische Simulationen ermittelt. Dabei werden auch die Wechselwirkungen zwischen Tageslichtversorgung und Energiebedarf analysiert.

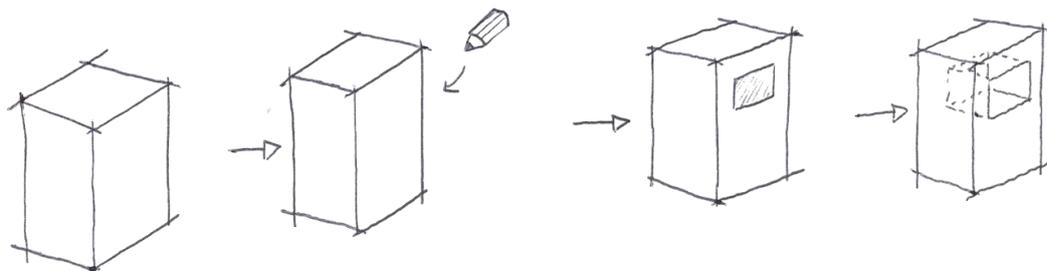
Im Rahmen des Projekts wurde hier die Tageslichtsimulation für die CDP // Collaborative Design Platform implementiert. Zusätzlich wurde die Methodik für das Plug-in „Thermische Simulation“ definiert und die entsprechende technische Umsetzung identifiziert.

### **Interaktive Auswahl des Raumes**

Zur Ausführung der energetisch relevanten Simulationen ist die Angabe eines spezifischen Raumbereiches notwendig. Um den Anforderungen an kreative Prozesse gerecht zu werden, erfolgt die Auswahl dieses Raumbereiches via Handskizze am Infopanel der CDP // Collaborative Design Platform (Abb. 6.1). Das direkte Mapping der Handskizze auf die Gebäudeoberfläche (z.B. Fassade) in Kombination mit der Zuweisung semantischer Elementinformationen (z.B. Typus Raum) inkl. Elementparameter (z.B. Raumtiefe) ermöglicht die automatische Erzeugung eines dreidimensionalen Geometrieobjektes (Analyseraum). Ein Standardwert von 6 Metern (übliche Raumtiefe) wird für die Tiefe des Analyseraums definiert (Abb. 6.2).



**Abb. 6.1 Auswahl des Analyseraums – die Geometrie mit 6 Metern Raumtiefe wird direkt aus der Handskizze konstruiert, dem Gebäude zugeordnet, im 3-D-Modell positioniert und referenziert**



**Abb. 6.2 Erstellung des Analyseraums**

## 6.1 Plug-in Tageslichtsimulation

Mittels des Plug-ins „Tageslicht“ soll ermöglicht werden, eine Tageslichtsimulation für einen ausgewählten Raum durchzuführen und damit den Einfluss des städtebaulichen Entwurfs auf die Tageslichtverhältnisse im Innenraum untersuchen zu können.

### 6.1.1 Tageslicht Grundlagen und Anforderungen an das Plug-in

Das Hauptziel der Tageslichtanalyse ist die zuverlässige Bewertung des Potenzials eines Entwurfs, ein ausreichendes Niveau an natürlicher Innenbeleuchtung gemäß der bestehenden Vorschriften und Codes bereitzustellen. Die Tageslichtsimulation für Innenräume kann dabei in zwei Bewertungsmodi unterteilt werden:

- quantitativ bzw. numerisch
- qualitativ bzw. visuell

Quantitative Daten werden normalerweise in Form von Liniengrafiken, Oberflächendarstellungen oder Falschfarbentafeln, beispielweise von der Verteilung der Beleuchtungsstärke über eine Ebene dargestellt. Man verwendet jedoch Bilder, um einen qualitativen Eindruck davon zu vermitteln, wie das fertige Gebäude aussehen wird - normalerweise aus verschiedenen Blickwinkeln und unter verschiedenen Lichtverhältnissen. Diese beiden Modi sind eher komplementär als exklusiv und überschneiden sich oft.

#### Tageslicht: Himmelsmodell und Tageslichtquotient

Jede dieser Tageslichtanalysemethoden erfordert spezielle und maßgeschneiderte Modellierungen der Himmelsbeleuchtungsstärken und -typen. Die Himmelselligkeit variiert entsprechend einer Reihe von meteorologischen, saisonalen und geometrischen Parametern, die relativ komplex zu spezifizieren sind. Die Charakterisierung der Sonne und des Himmels für die Beleuchtungssimulation entspricht der Lichtquellenphotometrie für elektrische Leuchten. Geometrisch ist der Himmel einfach zu beschreiben: Der Himmel hat immer die gleiche „Form“ und „Position“. Das genaue Helligkeitsmuster des Himmels zu charakterisieren, ist jedoch für alle Bedingungen, außer stark bewölkt, sehr schwierig. Wenn Wolken vorhanden sind, kann sich die Himmelselligkeitsverteilung über sehr kurze Zeitskalen dramatisch ändern. Aus diesen Gründen ist es notwendig, ideale Himmelselligkeitsmuster, die als Himmelsmodelle bekannt sind, abhängig von der Art der jeweiligen Simulation und den Zeitbegrenzungen zu formulieren. Spezielle Generatorprogramme erzeugen solche Himmelsmodelle, indem sie Himmelselligkeitsmuster aus grundlegenden Tageslichtmengen generieren. Die globale horizontale, die diffuse horizontale und die direkte normale Bestrahlungsstärke sind dabei wie folgt miteinander verknüpft (Abb. 6.3):

$$I_{gh} = I_{dh} + I_{dn} \sin \theta$$

$I_{gh}$  ist die globale horizontale Bestrahlungsstärke,  $I_{dh}$  die diffuse horizontale Bestrahlungsstärke,  $I_{dn}$  die direkte normale Bestrahlungsstärke und  $\theta$  die Sonnenhöhe. Die gleiche Beziehung gilt für Beleuchtungsstärken.

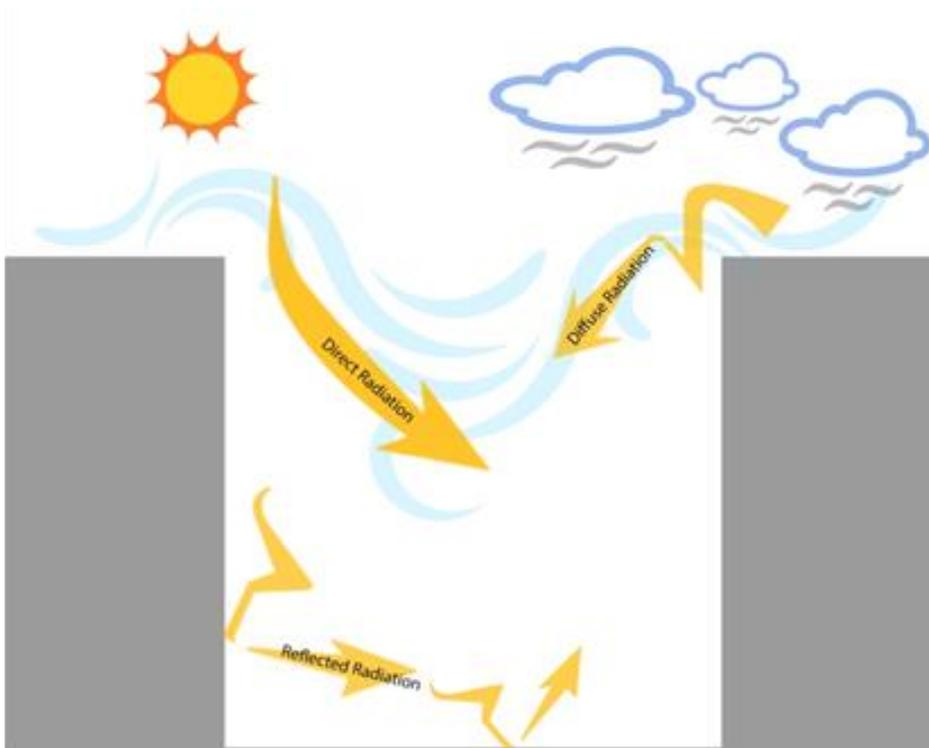
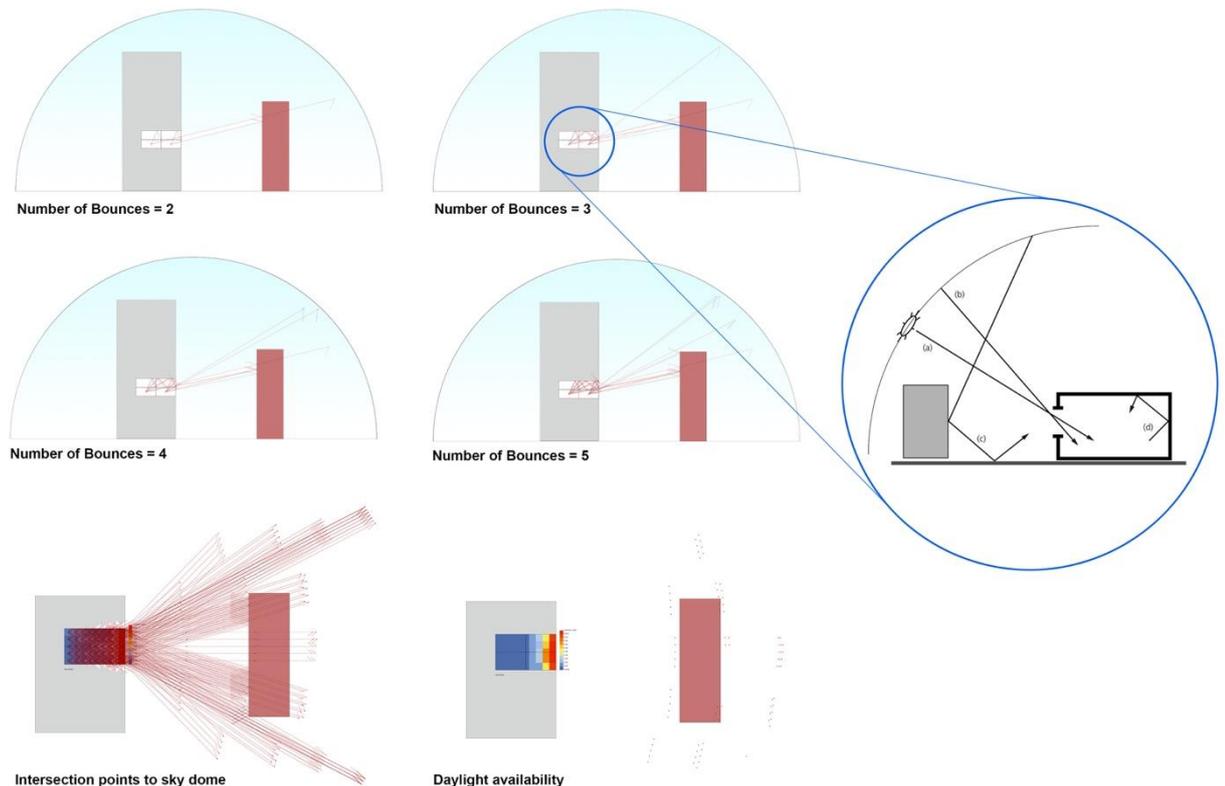


Abb. 6.3 Direkte, diffuse und reflektierte Strahlung

Um die Helligkeitsverteilung für klare Himmelsbedingungen zu beschreiben, ist eine wesentlich komplexere mathematische Darstellung erforderlich. Die Komplexität ergibt sich aus einer Reihe von Effekten, die im Modell berücksichtigt werden müssen. Der Maßstab dieser Effekte bezieht sich auf die Sonnenposition und die relative Stärke der von Sonne und Himmel erzeugten Beleuchtung. Wie der CIE-Bedeckungsstandard wird das CIE-Clear-Sky-Modell auf die Zenit-Luminanz normiert und die Himmelsleuchtdichteverteilung  $L$  wird gegeben durch:

$$L = L_{\zeta} \cdot \frac{(0,91 + 10e^{-3\theta} + 0,45 \cos^2 \theta)(1 - e^{-\frac{0,32}{\sin \gamma}})}{(0,91 + 10e^{-3(\frac{\pi}{2} - \gamma_s)} + 0,45 \sin^2 \gamma_s)(1 - e^{-0,32})}$$

Dabei ist  $\gamma$  die Himmelspunkthöhe,  $\gamma_s$  die Sonnenhöhe und  $\theta$  der Winkel zwischen der Sonne und dem jeweiligen Himmelspunkt. Es ist zu beachten, dass die spektrale Verteilung des Himmelslichts – seine Farbe – von keinem dieser Modelle vorhergesagt wird.



**Abb. 6.4 Bestandteile des Tageslichts: (a) direkte Sonne, (b) direkter Himmel, (c) von außen reflektiert und (d) von innen reflektiert**

Bei numerischen Methoden werden häufig bewölkte Himmelsbedingungen veranschlagt, mit dem Ziel, eindeutige Größen wie den Tageslichtquotienten zu erhalten. Die Bedingungen bei sonnigem Himmel sind individuell sehr spezifisch und deren Analyse entsprechend komplexer und weniger allgemeingültig als beispielsweise die Auswertung des Tageslichtquotienten für bewölkten Himmel. Die Analyse des Tageslichtquotienten unter den erläuterten einheitlichen Himmelsbedingungen erweist sich für folgende Fälle als günstig:

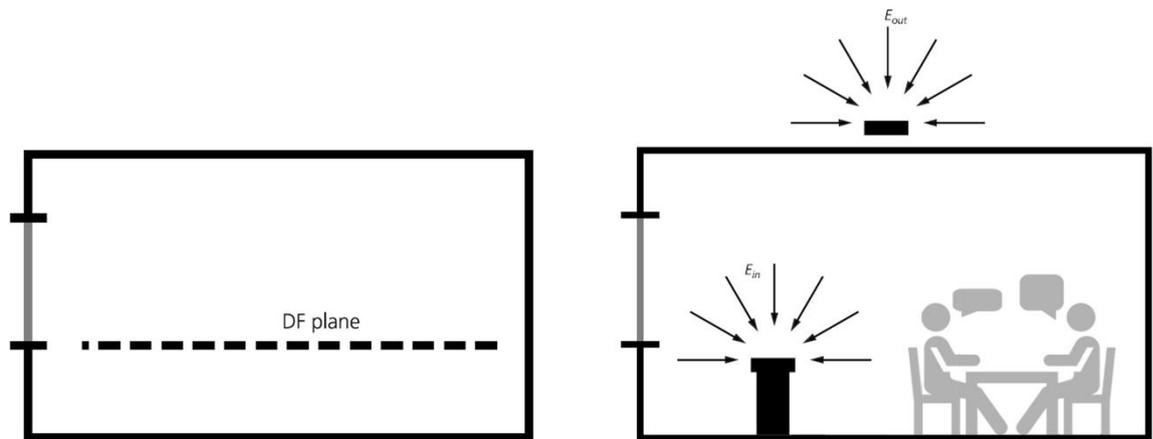
- Analyse eines architektonischen Entwurfs in frühen Planungsphasen, um die Einhaltung der Mindestanforderungen an Tageslicht zu gewährleisten
- vergleichende Bewertung von Gestaltungsmöglichkeiten und Alternativen
- Vorhersage der Reduzierung des Tageslichtquotienten durch die Einführung neuer, externer Hindernisse in die lokale Umgebung, z.B. in Form von Nachbarbebauung.

### Tageslichtquotient

Der Tageslichtquotient beschreibt das Verhältnis der Innenbeleuchtungsstärke an einem Punkt im Raum  $E_{in}$  zur globalen horizontalen Beleuchtungsstärke außen  $E_{out}$  unter CIE-Standardbedingungen für bedeckte Himmel. Der Tageslichtquotient DF wird normalerweise als Prozentsatz ausgedrückt (Mardaljevic 2000):

$$DF = \frac{E_{in}}{E_{out}} \cdot 100$$

Die Innenbeleuchtungsstärke wird normalerweise auf Höhe der Arbeitsebene bewertet (Abb. 6.5). Die direkte Sonneneinstrahlung ist von der Berechnung ausgeschlossen. Da der bewölkte Himmel im Allgemeinen die dunkelste Tageslichtsituation darstellt, ist die Tageslichtfaktormethode als "Worst-Case"-Bewertung zu betrachten, die damit primär für die Berechnung von einzuhaltenden Mindestwerten geeignet ist. Da sich die Himmelselligkeit nicht mit dem Azimut ändert, hat die Ausrichtung der betrachteten Szene um die z-Achse keine Auswirkung auf den Tageslichtquotienten.



**Abb. 6.5 Interne und externe horizontale Beleuchtungsstärke (rechts), Tageslicht-Analysefläche (links)**

Die herkömmliche Methode zur Bewertung des Tageslichtquotienten, die immer noch sehr gebräuchlich ist, beruht auf Beleuchtungsstärkemessungen, die mittels maßstäblicher Modelle unter künstlich erzeugten Himmelsbedingungen durchgeführt werden. Zwar kann solch ein detailliertes realitätsnahes physisches Modell tatsächlich zuverlässige Ergebnisse liefern, jedoch ist dessen Konstruktion sehr teuer und aufwendig, insbesondere wenn mehrere Entwurfsvarianten zu bewerten und zu vergleichen sind. Zunehmend nutzen Architekten und Designberater daher Computersimulation als alternativen Lösungsansatz.

Tageslichtquotienten werden normalerweise nur für geometrisch klar strukturierte, nicht zerklüftete Räume ermittelt. Da der visuelle Eindruck dabei von untergeordnetem Interesse ist, werden dementsprechend nur die wichtigsten strukturellen Merkmale des Raums berücksichtigt. Das heißt, dass Möbel und andere Einrichtungsgegenstände vernachlässigt werden. Beleuchtungsstärke und Tageslichtquotient sind Größen, die von der vom „rtrace“-Programm vorhergesagten Bestrahlungsstärke abgeleitet werden. Die Einstrahlungswerte aus der Standardausgabe von „rtrace“ werden dabei direkt in die Beleuchtungsstärke (oder den Tageslichtquotienten) umgewandelt.

Der folgende Abschnitt beschreibt allgemein die Strahlungs-Tageslichtsimulations-Engine und wie die Art der Analyse die Einstellung der wichtigsten Strahlungsparameter beeinflusst.

## Radiance

*Radiance* ist eine Suite von Programmen zur Analyse und Visualisierung von Beleuchtungsverhältnissen im Entwurf von Gebäuden, einschließlich eines ausgefeilten Beleuchtungsvisualisierungssystems (*Radiance*, 2017). Der Hauptvorteil von *Radiance* gegenüber einfacheren Berechnungs- und Rendering-Tools für Licht besteht darin, dass es nur wenige Einschränkungen hinsichtlich der Geometrie oder der Materialien gibt, die simuliert werden können. *Radiance* wird von Architekten und Ingenieuren verwendet, um Beleuchtung, visuelle Qualität und das Erscheinungsbild innovativ designter Räume vorherzusagen, und von Forschern, um neue Beleuchtungs- und Tageslichttechnologien zu evaluieren.

Das Tool *Radiance* entstand ursprünglich einem Forschungsprojekt der „Lawrence Berkeley Laboratories“ und hat sich dann zu einem extrem leistungsfähigen Softwarepaket entwickelt, das in der Lage ist, physikalisch korrekte Ergebnisse und Bilder zu erzeugen, die von echten Fotos nicht zu unterscheiden sind (Reinhard 2001).

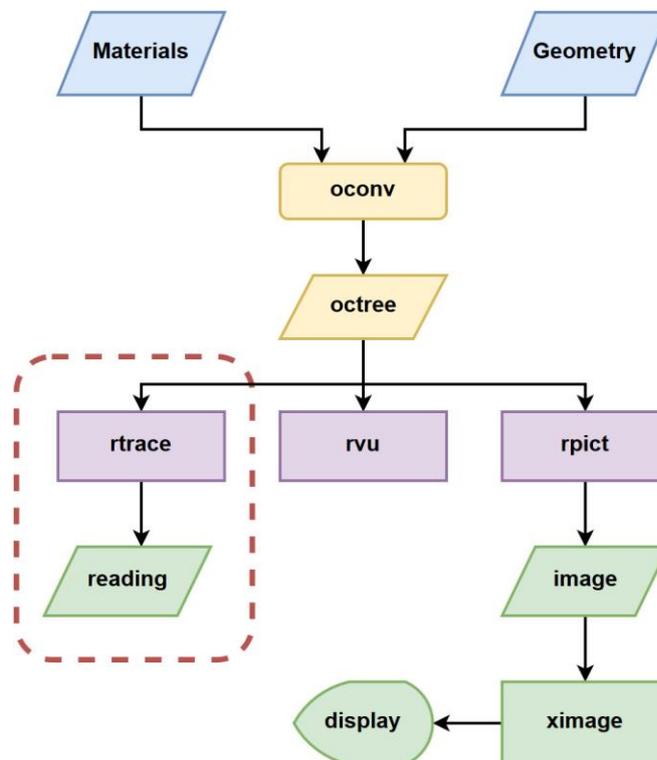


Abb. 6.6 Die Hauptkomponenten des *Radiance*-Renderingsystems (Mardaljevic 2000)

In den Eingabedateien werden die Szenengeometrie, Materialien, Leuchten, Zeit, Datum und Himmelbedingungen (für Tageslichtberechnungen) spezifiziert. Zu den daraus berechneten Werten gehören die spektrale Strahldichte (d.h. Leuchtdichte und Farbe), die Bestrahlungsstärke (Beleuchtungsstärke und Farbe) und die Blendungsindizes. Die Simulationsergebnisse können als Farbbilder, numerische Werte und Konturdiagramme angezeigt werden. Wie in Abb. 6.6 gezeigt, beginnt der Vorbereitungsprozess für die Simulation mit der geometrischen Definition des Raums einschließlich kontextabhängigen Hindernissen für das Licht. Dies schließt die Materialdefinition für jede Oberfläche inkl. Farb-, Absorptions-, „Specularity-“ und Rauheitswerten ein (Abb. 6.7).

```
# start of generic materials definition(s)
void plastic Context_Material
0
0
5 0.350 0.350 0.350 0 0

void plastic Interior_Ceiling
0
0
5 0.800 0.800 0.800 0 0

void plastic Interior_Floor
0
0
5 0.200 0.200 0.200 0 0

void plastic Exterior_Floor
0
0
5 0.200 0.200 0.200 0 0

void glass Exterior_Window
0
0
3 0.654 0.654 0.654
```

**Abb. 6.7** Beispielmaterialedefinition für *Radiance*-Simulationsengine

## Sky Model

*Radiance* ist in der Lage, abhängig von den Simulationsanforderungen eine Vielzahl von Himmelstypen zu erzeugen. Das „gensky“-Programm bereitet die Strahlungsverteilung des Himmels vor und weist ihm die „skyfunc“-Kennung zu. Um einen Himmel zu erzeugen, der eine spezifizierte horizontale Beleuchtungsstärke  $E_h$  in [Lux] liefert, wurde die

Zenit-Strahlung  $R_Z$  explizit mit der Option „-b“ angegeben. Die folgenden Formeln dienen diesem Zweck:

$$CIE\ overcast\ sky: R_Z = \frac{9}{7} \cdot \frac{Eh}{\pi \cdot 179}$$

$$Uniform\ overcast\ sky: R_Z = \frac{Eh}{\pi \cdot 179}$$

### Uniform Sky Component

Die Szenendatei, die als „cdp.rad“ benannt wurde, beschreibt die gesamte betrachtete Szene und ist im Grunde ein halbkugelförmiger Himmel mit einheitlicher Ausstrahlung:

```
# start of sky definition for daylighting studies
# horizontal sky illuminance: 1000 lux
!gensky 12 6 12:00 -u -B 5.587
skyfunc glow sky_mat
0
0
4
1 1 1 0
sky_mat source sky
0
0
4
0 0 1 180
```

**Abb. 6.8** Himmelsdefinition in *Radiance*

### Physik des „backward Raytracing“

*Radiance* verwendet „Backward Raytracing“-Algorithmen. Das bedeutet, dass die Lichtstrahlen vom Mess- bzw. Blickpunkt aus zur Lichtquelle zurückverfolgt werden. Der Prozess beginnt mit dem Auge (dem Blickpunkt) und verfolgt dann die Strahlen bis zu den Lichtquellen, wobei alle physikalischen Interaktionen (Reflexion, Brechung) mit den Oberflächen der Objekte, die die Situation bestimmen, berücksichtigt werden. Es gibt eine Reihe anderer Ray-Tracer auf dem Markt, da das zugrundeliegende Prinzip relativ einfach zu implementieren ist. *Radiance* hebt sich von diesen anderen Tools jedoch insofern ab, als es auch diffuse Interreflexionen zwischen Objekten zu handhaben vermag. Hierfür werden sehr effiziente Algorithmen zusammen mit „Caching“ eingesetzt. Andere

Softwarepakete versuchen normalerweise, indirekte Beiträge durch die Definition des „Umgebungslichts“ zu ersetzen, das keine Quelle hat, und damit alle Objekte in der Szene gleich beleuchtet. *Radiance* verwendet eine geometrische Beschreibung der Szene basierend auf den Grenzen von Objekten (d.h. ihren äußeren Oberflächen). Die von diesen Flächen eingeschlossenen Volumen sind immer leer, Oberflächen hingegen haben eine bestimmte Orientierung (ein Normalvektor für jede Oberfläche angebracht).

Jeder einzelne Strahl „trägt“ eine gewisse Strahldichte (daher der Name der Software), ausgedrückt in  $[W/m^2sr]$ . Die Strahlung ist in drei „Kanäle“ unterteilt, die den roten, grünen und blauen Primärfarben entsprechen (abgekürzt als r, g, b). Die Gesamtstrahldichte „R“ wird als eine gewichtete Summe der Radianten „Rr“, „Rg“ und „Rb“ berechnet, die von den drei Kanälen getragen werden:

$$R = 0,263 \cdot Rr + 0,655 \cdot Rg + 0,082 \cdot Rb \left[ \frac{W}{m^2sr} \right]$$

Da die Berechnungen von der Position des betrachteten Punktes aus gestartet werden, muss für jede einzelne Ansicht eine völlig neue Berechnung durchgeführt werden. Die Erstellung von „Walk-Through“ und von Videos erfordert daher extrem viele Ressourcen und entsprechend leistungsstarke Computer bzw. Zeit.

### **Modellierungsansatz**

Alle *Radiance*-Szenen werden als Plain Text gespeichert. Dies ermöglicht es dem Benutzer, sie mit einem beliebigen Texteditor zu bearbeiten. Es ist somit möglich, ein Modell aufzubauen, indem einfach entschieden wird, welche Geometrieprimitive zu verwenden sind und wie die erforderlichen Koordinaten, Abmessungen usw. geliefert werden. Die meisten CAD-Modellierer exportieren nur Objekte vom Typ Polygon. Polygone sind mit Abstand der am häufigsten verwendete Geometriety. Für die Abbildung von Fenstern und Öffnungen bestehen dabei mehrere Möglichkeiten. Die möglichen Optionen zum „Herausschneiden“ von Fenstern und Öffnungen sind in Abb. 6.9 beschrieben. Es ist normalerweise am besten, das größere Polygon in kleinere aufzuspalten, wobei die Öffnung frei bleibt. In der CDP // Collaborative Design Platform wurde Methode D implementiert, um so kleine Polygone wie möglich zu erhalten.

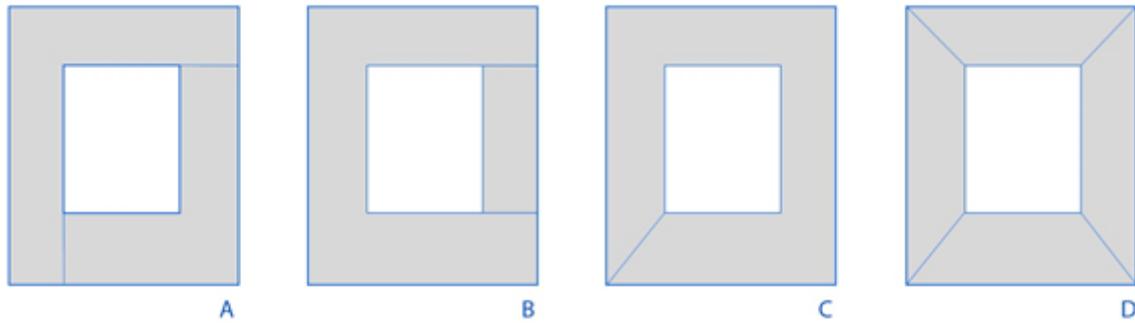


Abb. 6.9 Öffnungs- und Fensterherstellungsmethoden

### **Radiance-Einstellungen**

*Radiance* bietet dem Benutzer eine große Auswahl an Einstellungen in Bezug auf die Simulationsgenauigkeit. Die folgende Tabelle stammt aus den "rpict.options", die mit *Radiance* vertrieben wird. Es werden nur Umgebungsparameter aufgelistet. Um die Simulation in Echtzeit zu gewährleisten, werden in der CDP // Collaborative Design Platform die genauen Spalteneinstellungen („Accur“) implementiert (Abb. 6.10).

Parameter	Description	Min	Fast	Accur	Very Accur	Max
-ab	ambient bounces	0	0	2	5	8
-aa	ambient accuracy	0.5	0.2	0.15	0.08	0
-ar	ambient resolution	8	32	128	512	0
-ad	ambient divisions	0	32	512	2048	4096
-as	ambient super-samples	0	32	256	512	1024

Abb. 6.10 *Radiance*-Einstellungen (Mardaljevic 2000)

Die erste Ausgabe von *Radiance* sind „.rad“-Dateien, bei denen jede Oberfläche durch ihre Koordinaten definiert und den entsprechenden Materialeigenschaften zugeordnet ist. Das Aufbaumuster der „.rad“-Datei ist in Abb. 6.11 dargestellt.

```

Exterior_Wall polygon 1_0
0
0
12
59.0711 469.2413 0.0000
68.5800 462.9703 0.0000
68.5800 462.9703 22.0000
59.0711 469.2413 22.0000

Exterior_Wall polygon 1_1
0
0
12
68.5800 462.9703 0.0000
66.3356 459.6522 0.0000
66.3356 459.6522 22.0000
68.5800 462.9703 22.0000

Exterior_Wall polygon 1_2
0
0
12
66.3356 459.6522 0.0000
56.8831 465.4968 0.0000
56.8831 465.4968 22.0000
66.3356 459.6522 22.0000

Exterior_Wall polygon 1_3
0
0
12
56.8831 465.4968 0.0000
59.0711 469.2413 0.0000
59.0711 469.2413 22.0000
56.8831 465.4968 22.0000

```

**Abb. 6.11 Beispiel einer „rad“-Dateiausgabe von der CDP**

Der Ablauf der Tageslichtsimulation in der CDP // Collaborative Design Platform unter Einbindung von *Radiance* ist im Abb. 6.12 grafisch dargestellt.

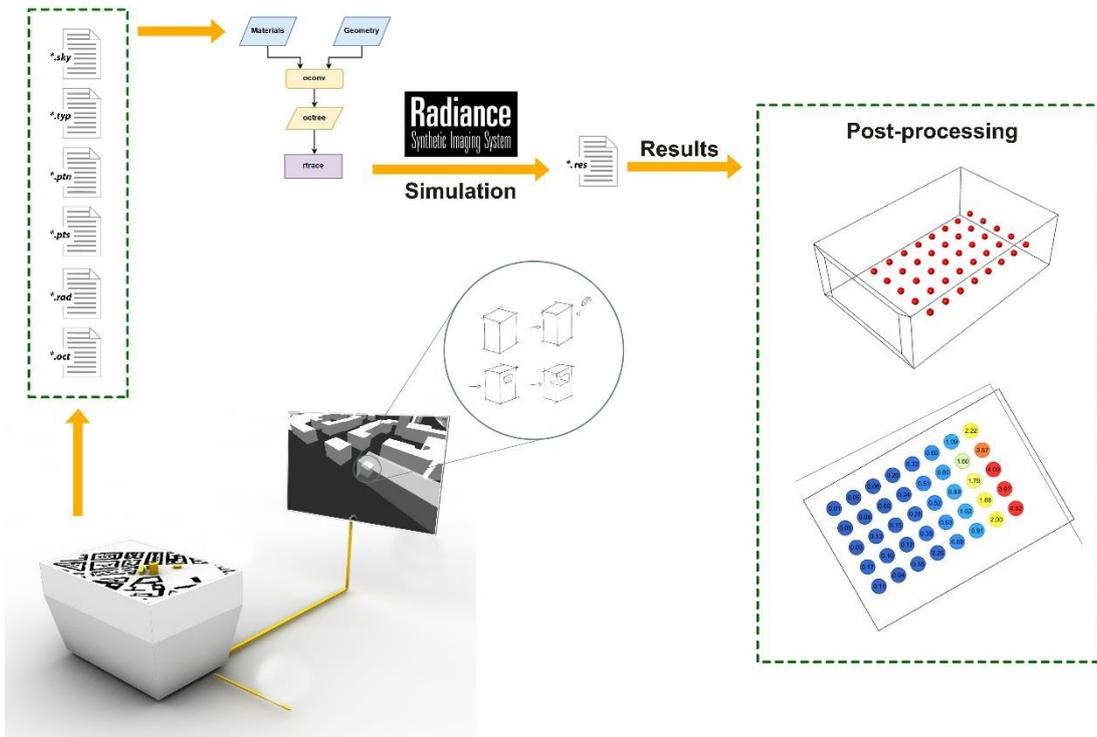


Abb. 6.12: Ablauf der Tageslichtsimulation in der CDP // Collaborative Design Platform unter Einbindung von Radiance

### Anforderungen an das Plug-in Tageslicht-Simulation:

- Erzeugen des Analyse-raums
- Erstellen des Himmelsmodells
- Zuweisen der Innenmaterialien
- Positionieren der Sensorpunkte
- Exportieren der Daten in *Radiance*
- Ausführen der *Radiance*-Simulation
- Einlesen der Tageslichtfaktoren-Ergebnisse in die CDP und Visualisierung

### 6.1.2 Implementierung

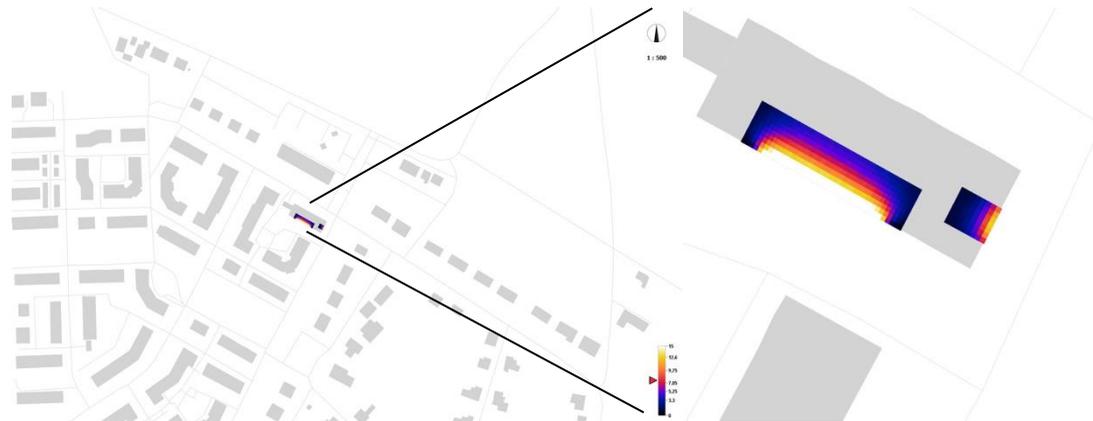
Da es aufgrund eines fehlenden Software-Development-Kit (SDK) von *Radiance* keine Möglichkeit der direkten Anbindung eines Plug-ins gibt, wurde eine alternative Methode implementiert. Hierbei werden einzelne Konsolenapplikationen über direkte Befehle angesprochen und deren „Output“ eingelesen. Formal läuft dieser Prozess über exportierte Einzeldateien und konsolenbasierte Befehle ab.

Der erste Schritt, wenn ein oder mehrere Gebäude hinzugefügt werden, besteht darin, diese in separate Polygone zu dekonstruieren, die die Außenwände, das Dach und den Boden darstellen, und ihnen verschiedene Materialien zuzuweisen. Durch die interaktiven Zeichnungen wird eine Fassade erzeugt, indem eine 2-D-Begrenzungsbox für die Skizze erstellt wird. Die Menüoptionen erlauben dem Benutzer, andere Parameter, wie Tiefe, Fenster-zu-Wand-Verhältnis und Fensterposition, festzulegen. Die Fassade des Testbereichs (die Außenwand) muss in kleinere Teile unterteilt werden, und das Fenster muss erzeugt werden. Um Komplikationen oder unerwartete Ergebnisse zu vermeiden, sind die Wandkomponenten sowie das Fenster konvexe Polygone.

Nachdem die Geometrie des Testbereichs generiert wurde, wird ein Sensoroberflächenobjekt erstellt, das die Sensoren enthält. Sie werden parallel zu den Wänden positioniert, basierend auf einem vordefinierten minimalen Abstand zwischen ihnen.

Nachdem die Ressourcendateien und die erforderlichen Ausführungsdateien exportiert und ausgeführt wurden, erhält das Plug-in eine Benachrichtigung, sobald die Simulation abgeschlossen ist, und lädt die Ergebnisdateien zurück in die Sensoroberfläche. Die Ergebnisse werden unter Verwendung des "Extended Black Body Color Scheme" (Moreland 2015) visualisiert.

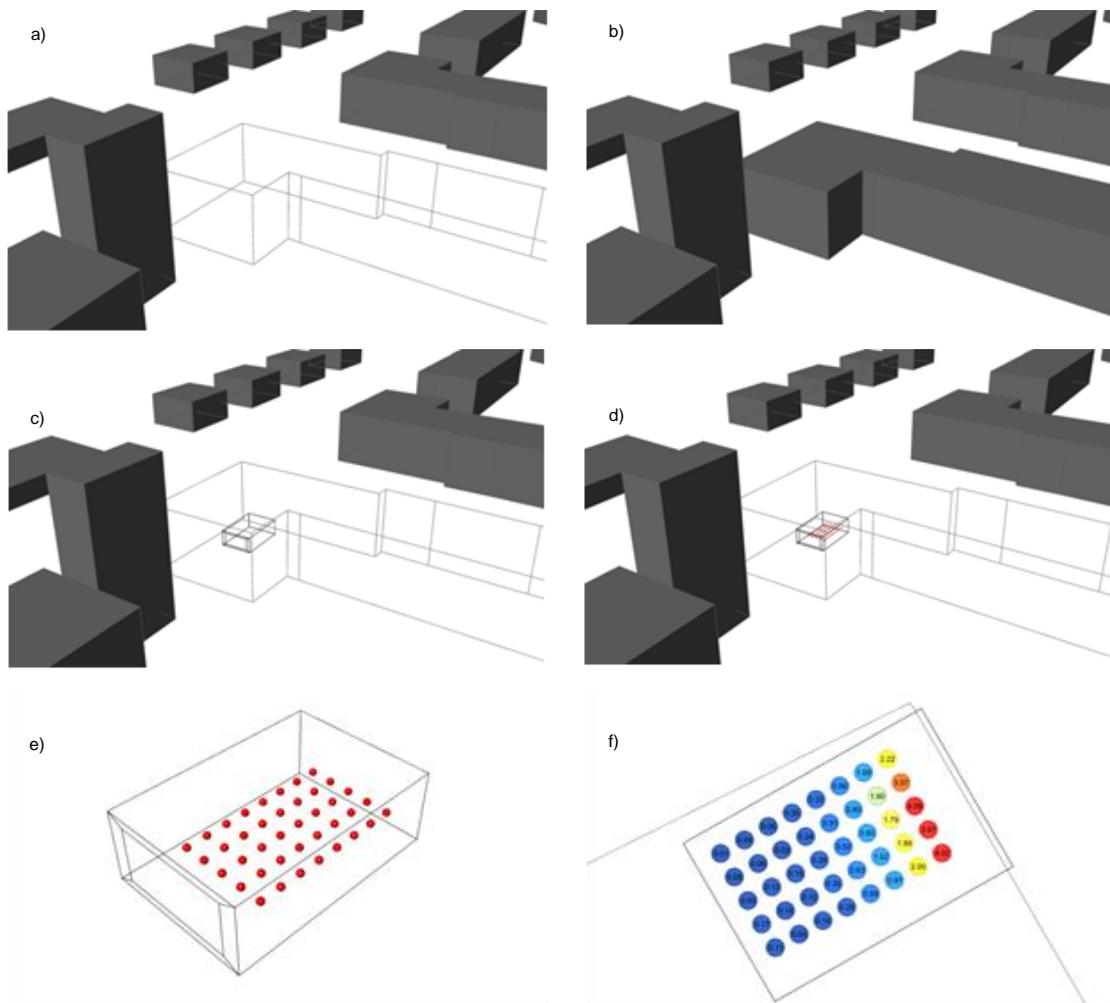
Um die Visualisierung des Testbereichs zu verbessern, wurde eine Zoom-in-Funktion implementiert. Wenn der Testbereich selektiert wird, skaliert der Visualisierungsteil des Plug-ins alle Objekte um die Mitte der Fassade des Testbereichs. Dadurch wird sichergestellt, dass es beim Vergrößern des Testbereichs für den Benutzer sichtbar bleibt.



**Abb. 6.13: Tageslichtverfügbarkeit für einen ausgewählten Analyseraum**

### 6.1.3 Validierung

Da die Implementierung von Radiance in die CDP // Collaborative Design Platform von Grund auf neu durchgeführt wurde, war eine Validierung der Ergebnisse notwendig, um die Genauigkeit der Simulationen zu verifizieren. Aus diesem Grund wurden alle Szenen-Definitionen einschließlich „.rad“-Dateien und „.mat“-Dateien sowie die Sensorpunkte und die geometrischen Eigenschaften in die 3-D-Modellierungsschnittstelle *Rhinoceros* mit dem *Grasshopper*-Plug-in importiert. Nach dem Aufbau der Modellvalidierungsschnittstelle (*Ladybug and Honeybee*) wurde *Radiance* ausgeführt und die Werte für den Tageslichtquotienten berechnet (Roudsari 2013). Die einzelnen Schritte sind in Abb. 6.14 dargestellt. Die Ergebnisse wurden mit den CDP-Ergebnissen verglichen, und es konnte eine Genauigkeit von 99,67% bestätigt werden (Abb. 6.15).



**Abb. 6.14 Schritte bei der Validierung der Tageslichtsimulation mit *Grasshopper*,**

- a) Importieren der Gebäude von der CDP,**
- b) Auswahl des Gebäudes,**
- c) Definition des Analyseraums,**
- d) Positionierung der Sensorpunkte,**
- e) Ausführung der Simulation mit *Radiance*,**
- f) Visualisierung der Ergebnisse**

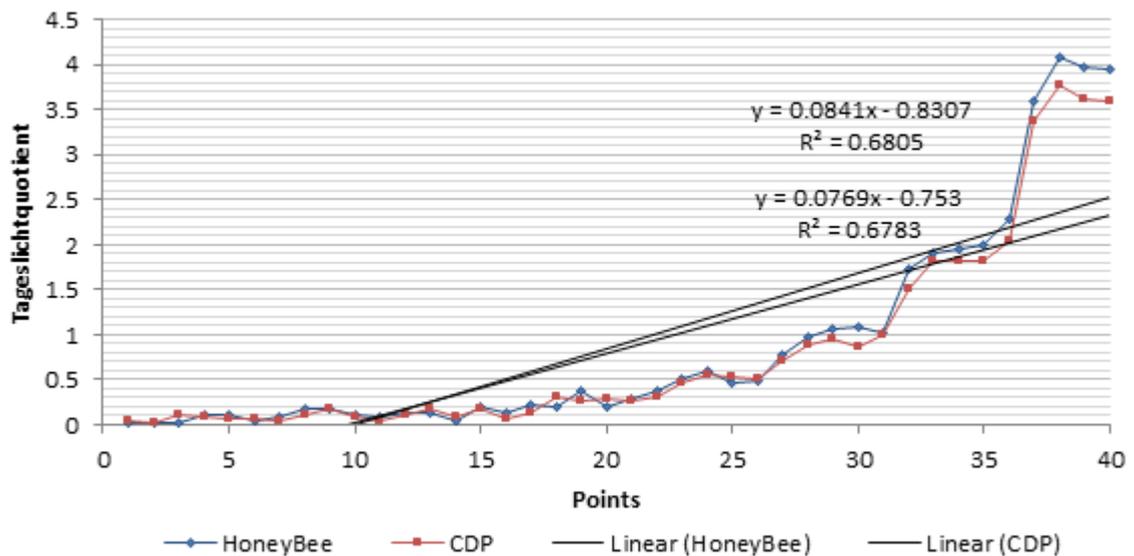


Abb. 6.15 Validierungsdiagramm zum Vergleich des Tageslichtquotienten aus der Simulation mit der CDP und *Honeybee*

## 6.2 Plug-in thermische Simulation

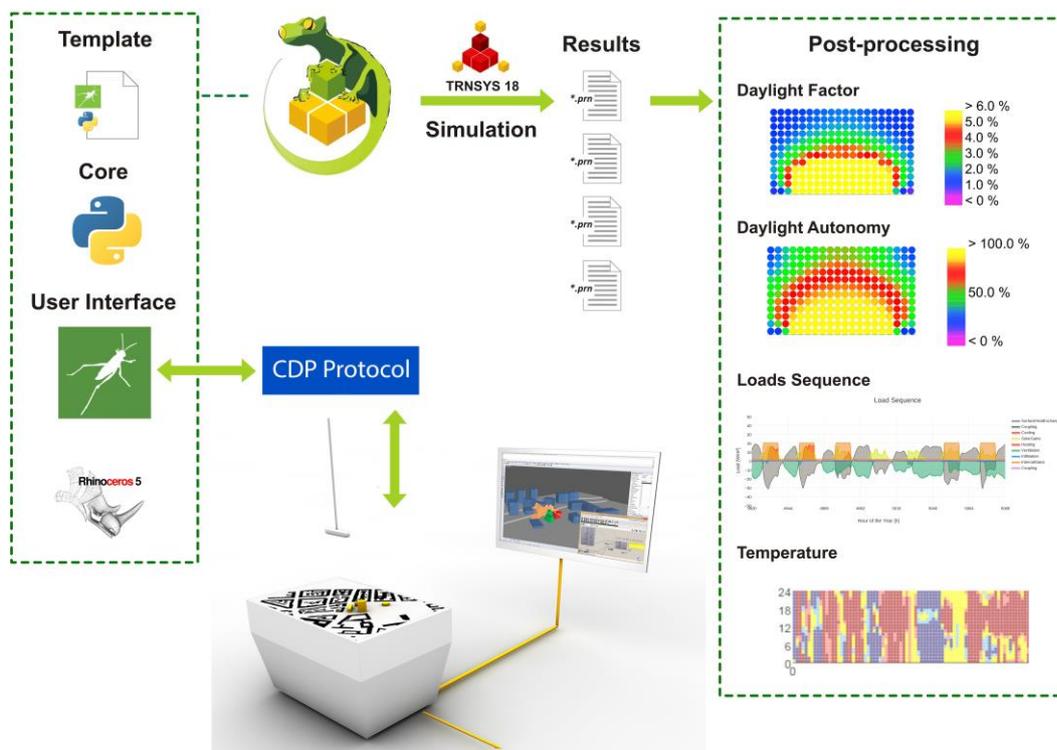
Als letzter Baustein zur Einbeziehung von energetischen Aspekten in der CDP // Collaborative Design Platform wurde ein Plug-in zur Simulation und Analyse des thermischen Verhaltens eines ausgewählten Raumes innerhalb eines Gebäudes (Analyseraum) entwickelt.

### 6.2.1 Energetische Grundlagen und Anforderungen an das Plug-in

Ziel des Plug-ins ist es, für den Analyseraum zum einen das sommerliche Verhalten und zum anderen den Energiebedarf für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung mithilfe einer dynamischen thermischen Simulation zu ermitteln und zu analysieren. Dadurch wird der Einfluss des städtebaulichen Entwurfs auf diese energetischen Parameter analysiert, und in Verbindung mit der implementierten Tageslichtsimulation werden zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen Tageslicht und Energiebedarf aufgezeigt.

Aufgrund der Komplexität von dynamischen thermischen Simulationen wurde die Einbindung eines externen Simulationsprogramms in die CDP // Collaborative Design Platform vorgenommen.

In einem ersten Schritt wurde die Möglichkeit der Einbindung von *TRNSYS* (*TRNSYS* 2017) über *Grasshopper* (*Grasshopper* 2017) untersucht. Das entsprechende Vorgehen ist in Abb. 6.16 beschrieben. Diese Lösung wurde technisch implementiert und bietet eine sehr hohe Genauigkeit und Flexibilität. Sie erweist sich allerdings als unbefriedigend aufgrund der zu langen Simulationszeit (mindestens 30 Sekunden zuzüglich Ergebnisablesung und -darstellung). Dies erfüllt somit nicht die für die CDP // Collaborative Design Platform bestehende Grundanforderung einer Echtzeit-Berechnung und -Darstellung (siehe Kapitel 3.3).



**Abb. 6.16** Ablauf der Einbindung von *TRNSYS* über *Grasshopper* in die CDP // Collaborative Design Platform (*TRNSYS* 2017)

Als geeignete Alternative zu *TRNSYS* konnte das Programm *DALEC* (*DALEC* 2017) identifiziert werden. *DALEC* ist ein online abrufbares Programm zur gekoppelten licht-technischen und thermischen Simulation, das im Rahmen einer Dissertation an der Universität Innsbruck (Werner 2017) entwickelt wurde. Es wurde speziell für die integrale Optimierung von Fassadenlösungen in der frühen Planungsphase entwickelt, indem es ermöglicht, die Wechselwirkungen zwischen Energiebedarf und Komfort (visuell und

thermisch) zu untersuchen. Das Programm ist prinzipiell für die Untersuchung eines Analyseraums (Referenzraum, Abb. 6.17) konzipiert und ermöglicht sehr kurze Simulationszeiten dank Vorberechnungen. Das Programm weist außerdem eine hohe Nutzerfreundlichkeit auf.

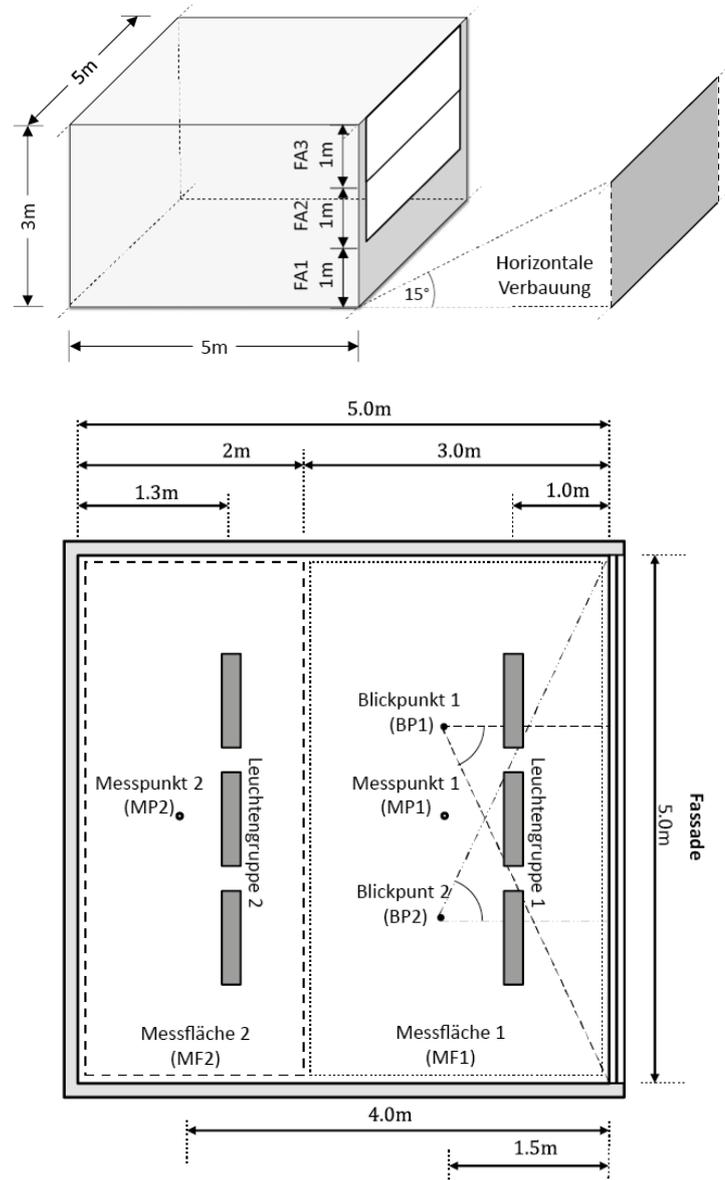


Abb. 6.17 DALEC, Referenzraum Iso-Darstellung und Grundriss (Werner 2017)

Im Rahmen der Dissertation wurden die Programmergebnisse durch Vergleiche mit Messungen an einem Fassadenaußenprüfstand (Tageslichtberechnung) und mit den Ergebnissen von den am Markt verfügbaren genauesten thermischen Simulationswerkzeugen validiert.

DALEC erfordert die Angabe einer Reihe von Simulationsparametern wie Ort, Raumabmessungen und -nutzung, bauphysikalische Kennwerte, Verglasung, Fassadensystem, Sonnenschutz, Lüftung, interne Lasten, Heiz- und Kühlanlage, Kunstlicht etc. Diese sind im linken Bereich des DALEC-Interface „Raumkonfiguration“ manuell anzugeben (Abb. 6.18). Durch ein zu entwickelndes Plug-in wurden diese Angaben aus der Entwurfsplattform automatisch generiert und direkt in DALEC eingelesen (Abb. 6.19).

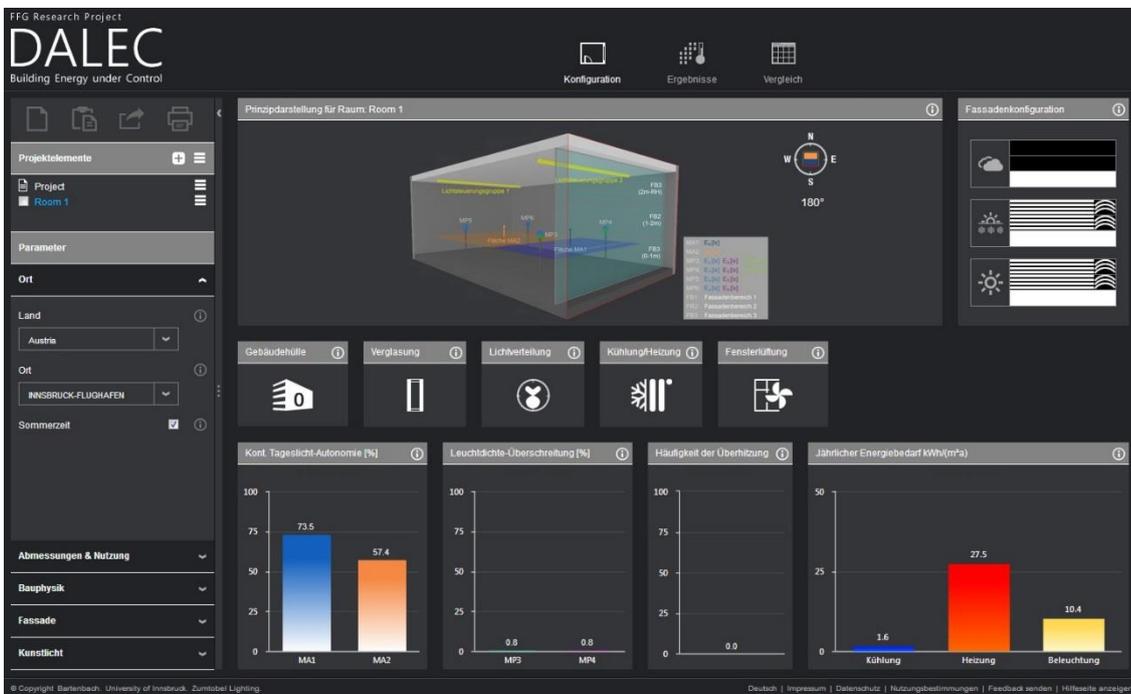


Abb. 6.18 DALEC-Interface (Screenshot), Eingabe der Raumkonfiguration (DALEC 2017)

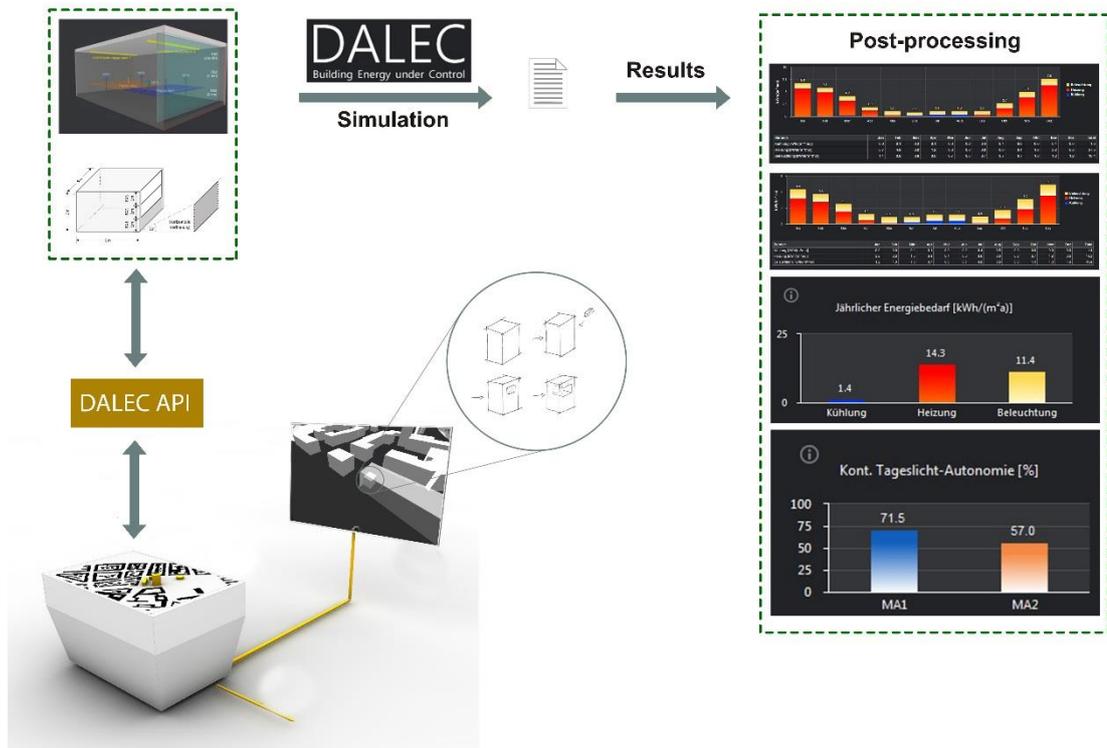


Abb. 6.19 Ablauf der Einbindung von DALEC in die CDP // Collaborative Design Platform

Die Simulationsergebnisse werden dann im Reiter „Ergebnisse“ visualisiert werden. In Abb. 6.20 ist beispielweise der spezifische Energiebedarf pro Monat dargestellt. Weitere Ergebnisgrafiken wie Temperaturverlauf, Nutzenergie für Heizen und Kühlen, Überhitzungsstunden etc. können ebenso anschaulich visualisiert werden.

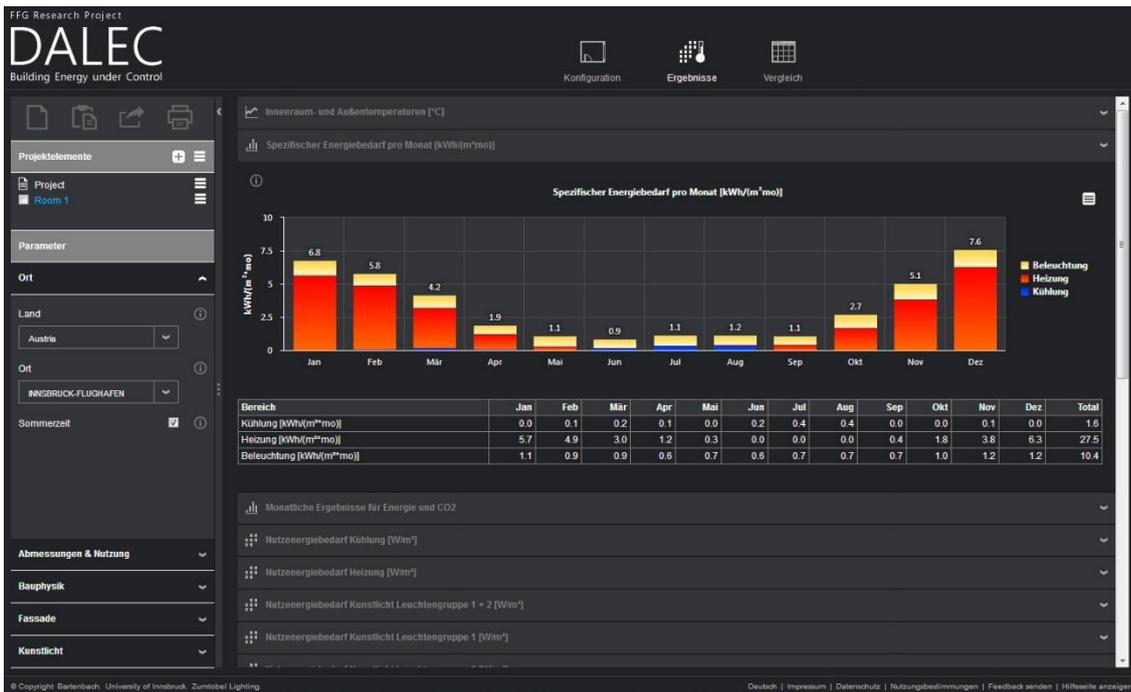


Abb. 6.20 DALEC-Interface (Screenshot), Simulationsergebnisse (hier Energiebedarf) (DALEC 2017)

### Anforderungen an das Plug-in thermische Simulation:

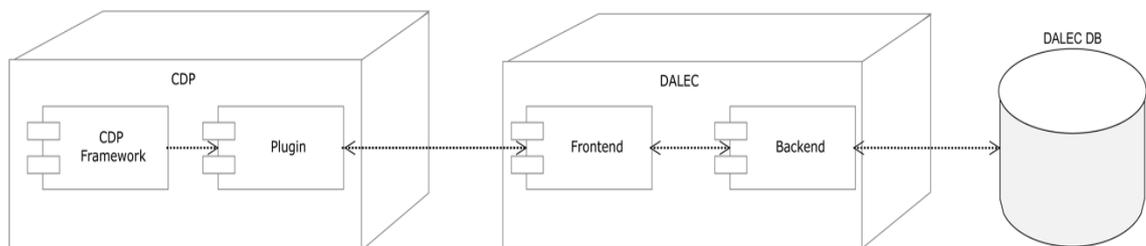
- Einbinden eines externen Programms zur thermischen dynamischen Simulation des ausgewählten Analyseraums zur
  - Ermittlung des Energiebedarfs des ausgewählten Analyseraums für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung
  - Ermittlung der thermischen Komfort-Bedingungen (sommerlicher Wärmeschutz)

### 6.2.2 Implementierung

DALEC eignet sich prinzipiell sehr gut für eine Einbindung in die CDP // Collaborative Design Platform. Das Tool ist, genau wie die CDP // Collaborative Design Platform selbst, für die frühe Planungsphase vorgesehen und liefert Ergebnisse nach sehr kurzen Simulationszeiten (unter eine Sekunde für einen Raum), was den Anforderungen an das

entwurfsunterstützende System entspricht (Durchführung der Berechnungen und Anzeige der Ergebnisse in Echtzeit, siehe Kapitel 3.3).

Es besteht ein großes Interesse des Programmmentwicklungsteams an einer Einbindung von *DALEC* in die CDP // Collaborative Design Platform. Da bisher allerdings keine API zur Verfügung steht, die die Verbindung zwischen der CDP // Collaborative Design Platform und *DALEC* ermöglicht, konnte die Implementierung von *DALEC* nicht abgeschlossen werden. Das *DALEC*-Entwicklungsteam plant, eine geeignete API möglichst zeitnah zu entwickeln und für die CDP // Collaborative Design Platform zur Verfügung zu stellen.



**Abb. 6.21 CDP/DALEC-Kommunikationsschema**

Deswegen wird die thermische Simulation unter Einbindung von *TRNSYS* über *Grasshopper* als „Interimlösung“ beibehalten, solange die Implementierung von *DALEC* nicht abgeschlossen werden kann.



## 7. ANWENDUNGSKONZEPT

Eine direkte Anwendung der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Konzepte sowie der umgesetzten Prototypen findet sich vor allem im Kontext früher Phasen der Ideenfindung und der Planung. Die Möglichkeit einer plausiblen Vermittlung selbst komplexer Zusammenhänge von gebauter Umwelt, Aufenthaltsqualität und energetischen Aspekten – insbesondere für dritte Beteiligte – bildet den Kern dieser Arbeit. Durch die direkte Integration in etablierte Arbeitsweisen werden die Auswirkungen planerischer Entscheidungen schon in frühen, abstrakten Phasen der Planung sichtbar. Trotz ungenauer und vager Ideen können somit valide Aussagen zur möglichen Energieversorgung und zur Aufenthaltsqualität hinsichtlich des Tageslichts getroffen werden.

Ausgehend davon lassen sich als Zielgruppen vor allem Investoren, wie auch Projektsteuerer und Behörden erkennen – jene Beteiligte, die bereits in den strategischen Entwicklungsphasen aktiv mitwirken und auf zielführende Informationen zu planerischen Entscheidungen angewiesen sind. Die Anwendungsfelder sind hierbei vielfältig darzustellen: Sei es zur Entwicklung erster Konzepte für eine geplante Baumaßnahme des Investors oder zur Eruierung möglicher Bebauungsformen durch die verantwortlichen Behörden. Durch die direkte Integration der Analysen und Simulationen werden die Auswirkungen von Entscheidungen bzw. Maßnahmen direkt sichtbar und können so beurteilt und frühzeitig beeinflusst werden.

Die Weichenstellung für die effiziente Nutzung erneuerbarer Energien und für die Machbarkeit bestimmter Energieversorgungskonzepte erfolgt bereits auf städtebaulicher Ebene. In solchermaßen frühen bzw. großmaßstäblichen Planungsphasen ist eine Betrachtung energetischer Aspekte bisher jedoch nicht systematisch verankert und aufgrund noch relativ vager Rahmenbedingungen nicht immer fundiert möglich. Dennoch und gerade deswegen ist es umso erstrebenswerter, Parameter wie zu erwartender Energiebedarf und verfügbare Energiepotenziale so weit wie möglich zu quantifizieren. Je früher dies erfolgt, umso größer ist das Potenzial einer ganzheitlichen Optimierung von Städtebau, Energie und Aufenthaltsqualität, da sich auf Maßstabsebene der Gebäudeplanung bestimmte Parameter wie etwa die am Gebäude verfügbare Solarstrahlung und damit zusammenhängend die Tageslichtversorgung nicht mehr oder nur bedingt beeinflussen lassen.

In der konkreten Anwendung lassen sich hierbei folgende Einsatzfelder erkennen:

- Workshops: zur Integration mehrere Beteiligter (fachkundig/Laien) zur Ideenfindung und -Generierung bei Planungsvorhaben
- Single/Mehrpersonen: Eruiierung der Rahmenbedingungen zur Entwicklung möglicher Bebauungsszenarien wie z.B. Bebauungspläne

Die Vorteile für den Anwender liegen hierbei auf der Hand: So ermöglicht das Set-up, schon in frühen Phasen Aspekte zur Energie wie auch zur Aufenthaltsqualität intuitiv und einfach zu berücksichtigen und diese bei Entscheidungen zur zukünftigen Planung einzubeziehen.

## 7.1 BENUTZERSZENARIO

Ausgehend von dem Lösungsansatz wird im Folgenden ein beispielhaftes Szenario für die Anwendung des Konzeptes bzw. der umgesetzten Prototypen dargestellt.

Eine Stadt oder eine Gemeinde möchte einen Bebauungsplan für ein Neubaugebiet aufstellen. Im Hinblick auf die Energieversorgung wird in diesem Gebiet die Nutzung erneuerbarer Energien in Kombination mit dem Aufbau eines Wärmenetzes priorisiert. Zugleich soll im Sinne einer angestrebten Mustersiedlung mit hoher Flächeneffizienz von bestehenden Richtlinien hinsichtlich der Abstandsflächen Abstand genommen werden und dennoch eine gute Tageslichtversorgung gewährleistet sein.

Daraus ergeben sich bestimmte, teils gegenläufige Zusammenhänge, die zu bewerten und abzuwägen sind. So hat die städtebauliche Dichte einen unmittelbaren Einfluss auf die resultierende Wärmenachfrage und damit auf die Machbarkeit des Wärmenetzes. Dieses kann in der Regel nur dann energieeffizient und wirtschaftlich betrieben werden, wenn eine ausreichend hohe Wärmeabnahme im zu versorgenden Gebiet gegeben ist. Andererseits wirkt sich ein Entwurf mit höherer städtebaulicher Dichte tendenziell negativ auf die Tageslichtversorgung der Innenräume in den geplanten Baukörpern aus. Diese Wechselwirkungen könnten auf Basis einer grob-quantitativen Bewertung mittels der CDP abgewogen werden und müssten nicht, wie in solch frühen bzw. großmaßstäblichen Planungsphasen meist üblich, rein qualitativ diskutiert werden.

Die am Planungs- und Entscheidungsprozess Beteiligten (Stadtrat, Projektsteuerung und Planungsbüro) treffen sich also zu einem gemeinsamen Meeting. Das Ziel des Treffens liegt darin, sich auf eine städtebauliche Typologie festzulegen, und dabei sowohl optimale Rahmenbedingungen für ein effizientes Wärmeversorgungskonzept als auch für eine gute Tageslichtversorgung im Sinne einer hohen Aufenthaltsqualität zu schaffen. Insbesondere steht dabei die Entscheidung zwischen einer Reihenhaussiedlung und einer dichteren Mehrfamilienhausstruktur zur Debatte. Im Rahmen eines moderierten Workshops beginnt das Planungsbüro, an der Collaborative Design Platform eine erste Idee zu skizzieren. Dazu schneiden die Beteiligten Styrodur-Klötzchen zurecht und platzieren diese auf dem Touchscreen, um so eine Reihenhaus-Variante abzubilden. Zur Untersuchung der Versorgung dieser Bebauung mittels Fernwärme aktiviert ein Beteiligter das entsprechende Plug-in. Es folgt die automatische Verlegung möglicher Versorgungstrassen anhand des Straßennetzes sowie das Aufzeigen eines möglichen Standorts für die Heizzentrale in Form einer „heatmap“. Ein Teilnehmer nutzt die Gelegenheit und platziert ein Klötzchen als Heizzentrale. Darauf aufbauend wird farblich differenziert die sich ergebende Wärmeabnahme pro Meter Trasse im möglichen Wärmenetz aufgezeigt. Ein anderer Teilnehmer verändert die Position der Heizzentrale, worauf sich das mögliche Wärmenetz sofort dem neuen Standort anpasst und die einzelnen Stränge entsprechend neu berechnet und dargestellt werden. Zur Betrachtung des Einflusses der Bebauungsstruktur auf das Wärmenetz positionieren die Planer nun die Klötzchen so, dass eine dichte Mehrfamilienhaussiedlung entsteht. Aus der Neuberechnung und -darstellung des Wärmenetzes geht unmittelbar hervor, dass sich die veränderte städtebauliche Struktur positiv auf die zu erwartende Wärmeabnahmedichte auswirkt und ein Wärmenetz somit einfacher umgesetzt werden könnte.

Ein Beteiligter der Stadt meldet sich zu Wort und weist die Gruppe auf mögliche Probleme hinsichtlich der Belichtung aufgrund der nun höheren Gebäude und der relativ geringen Abstandsflächen hin. In der CDP wird daraufhin das Plug-in gewechselt und die virtuelle Kamera auf eine erwartungsgemäß kritische Stelle gesteuert. Mit dem Zeichenstift markiert einer der Planer die relevanten Bereiche der Fassade in der perspektivischen Darstellung auf dem Anzeigebildschirm. Nach einem kurzen Moment erscheint das Berechnungsergebnis für den Tageslichtquotienten in der Planansicht für diesen Bereich, und es wird direkt deutlich, dass die dortige Belichtungssituation durch die zu enge Bebauung nicht tragbar ist.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis kann eine Bewertung der Wohnqualität anhand der realen Lichtsituation (nachgewiesen durch Simulationen) erfolgen.

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Simulationsgestützte Entwurfsplanung im städtebaulichen Kontext unter Berücksichtigung energetischer und raumklimatischer Aspekte" konnte die städtebauliche computergestützte Entwurfsplattform CDP // Collaborative Design Platform um neue Komponenten zur Analyse von energetischen und komfortbezogenen Aspekten erweitert werden.

Insgesamt ist es gelungen, fünf neue Aspekte für die CDP // Collaborative Design Platform zu entwickeln, die die Analyse der Effekte der städtebaulichen Struktur auf die energetischen Versorgungsmöglichkeiten und Potenziale sowie auf das Tageslicht im Innenraum (visueller Komfort) ermöglichen. Diese sind:

1. Plug-in zur Evaluierung der Versorgungsmöglichkeiten des Untersuchungsgebiets mittels eines Wärmenetzes inkl. grober Wärmebedarfsermittlung für die betrachteten Gebäude, automatisierter Netzzeichnung, automatisierter Positionierung der Heizzentrale, abschnittweiser Berechnung der Wärmeabnahme pro Trassenmeter sowie grober Dimensionierung der Heizzentrale. Die Validierung des Plug-ins erfolgte anhand eines ausgewählten Gebiets in der Stadt München.
2. Plug-in zur Ermittlung des energetischen Potenzials aus Solarenergie (ausschließlich Strompotenzial aus Photovoltaik) inkl. Berechnung der Solareinstrahlung je Dachfläche unter Berücksichtigung der Verschattung und Vergleich mit dem abgeschätzten Strombedarf je Gebäude und für das gesamte Untersuchungsgebiet.
3. Plug-in zur Tageslichtsimulation eines ausgewählten Analyseraums durch Einbindung des externen Programms *Radiance*. Eine Validierung des Plug-ins wurde durchgeführt.
4. Einbindung von externen Datenquellen (WMS-Server, Shapefiles).
5. Auswahl eines Analyseraumes innerhalb eines Gebäudes im Hinblick auf die detaillierte Analyse der Tageslichtverhältnisse in diesem Raum sowie des thermischen Komforts und des Energiebedarfs für Heizen, Kühlen, Licht und Lüftung.

Zusätzlich wurde die Vorarbeit (Grundkonzept, Methodik und ggf. erste Ansätze der Implementierung) für zwei weitere mögliche Plug-ins erarbeitet. Deren vollständige Integration in die CDP // Collaborative Design Platform war aus technischen bzw. zeitlichen Gründen bis zur Abgabe des Endberichts aus nachfolgend genannten Gründen nicht möglich:

1. Plug-in zur Ermittlung des energetischen Potenzials aus oberflächennaher Geothermie (Erdsonden) unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Bodeneignung, der Flurstücknutzung, der Untergrundbelegung, der Befahrbarkeit sowie des erforderlichen Abstands zur Grundstücksgrenze und zwischen den Sonden.
2. Plug-in zur thermischen Simulation eines ausgewählten Analyseraums durch Einbindung des externen Programms. Die Einbindung des *TRNSYS*-Programms über *Grasshopper* wurde implementiert, wird allerdings aufgrund der langen Simulationszeit für die CDP nur als Interimplösung betrachtet. Die Implementierung einer performanten Alternative erfordert ein API-Interface (*DALEC*), welches derzeit noch nicht zur Verfügung steht.

Mögliche weitere Schritte bzw. Fragestellungen bei der Weiterentwicklung der CDP // Collaborative Design Platform in Bezug auf Energie sind:

- Erweiterung des Wärmenetz-Plug-ins hinsichtlich des Einflusses der Gebäudesanierung auf die Versorgungsmöglichkeiten mittels eines Wärmenetzes (Was passiert, wenn ausgewählte Gebäude saniert werden? Wie entwickelt sich die Eignung eines Gebietes für Wärmenetze im Zuge von Sanierungen?)
- Verfeinerung der bereits entwickelten Plug-ins, z.B. Erweiterung des Solarpotenzial-Plug-ins um die Analyse verschiedener Szenarien zur Nutzung der Solarenergie (Solarthermie/Photovoltaik/Kombination) sowie um die Ermittlung des Solarpotenzials auf Fassaden.
- Wie können zukünftig zusätzliche Datenquellen einbezogen werden, um bestimmte Analysen zu vereinfachen bzw. überhaupt erst zu ermöglichen?

## Abkürzungen

A	Total area of the room surfaces
A <sub>w</sub>	Net glazed area of the window (m <sup>2</sup> )
CPU	Central Processing Unit
FTIR	Frustrated Total Internal Reflection
kWh	Kilowattstunden
MST	Minimum Spanning Tree
Q	Angle of visible sky in degrees
R	Average reflectance of the room surfaces
RAM	Random-access Memory
SDK	Software Development Kit
T	Diffuse visible transmittance of the glazing
T <sub>rm</sub>	Trassenmeter
TUI	Tangible User Interface
WMS	Web Map Service



# Quellen- und Literaturverzeichnis

ASHRAE Handbook, 1995. Applications, Chapter 30, "Solar Energy Utilization"

Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl I, 1980, Nr. 48, S. 1310–1363), zuletzt geändert am 31.07.2009 (BGBl I, 2009, Nr. 51, S. 2585–2621).

BROTAS, L., & Wilson, M., 2008. The average total daylight factor. *Light & Engineering*, 16(2), pp. 52-57.

CORMEN, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C., 2001. Chapter 23: Minimum Spanning Trees. Introduction to Algorithms, Second Edition. MIT Press & McGraw-Hill, 2001. ISBN 0-262-03293-7., pp.561–579.

CULP, A.W., 1991. Principles of Energy Conversion, 2nd ed., McGraw-Hill, pp. 98-107.

DALEC, 2017. <http://www.dalec.net/> [Stand: 14.11.2017].

DIJKSTRA, E. W., 1959. A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1, pp. 269-271.

FINKEL, R. A., Bentley J. L., 1974. Quad trees a data structure for retrieval on composite keys, *Acta Informatica*, Volume 4, Issue 1, pp 1-9.

FRONDEL, M. et al., 2008. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI Essen) / forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Auftraggeber): Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für das Jahr 2005, Essen URL: <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/endbericht-erhebung-des-energieverbrauchs-private-haushalte-2005,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>.

GRASSHOPPER, 2017. <http://www.grasshopper3d.com/> [Stand: 26.06.2017]

HOLBERT, K. E. 2007. Solar Calculations, 2007, Handbook of Renewable Energy Technology, pp. 189-204

KUEN, T. H., J. W. Ramsey, and J. L. Threlkeld, 1998, Thermal Environmental Engineering, 3rd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

LAWA, 2011. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Empfehlungen der LAWA für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren, Dresden.

LFU, 2017. WMS-Dienst Oberflächennahe Geothermie – WMS des LfU, [https://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/geodatendienste/index\\_de-tail.htm?id=a44f6991-6c64-42a4-aba3-50585a5c4552&profil=WMS](https://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/geodatendienste/index_de-tail.htm?id=a44f6991-6c64-42a4-aba3-50585a5c4552&profil=WMS) [Stand: 20.6.2017]

LOGA, T., Stein, B., Diefenbach, N., Born, R., 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden – zweite erweiterte Auflage –, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA und EPISCOPE, Darmstadt

LUNDE, P. J., 1980. Solar Thermal Engineering: Space Heating and Hot Water Systems, John Wiley & Sons, pp. 62-100.

MARDALJEVIC, J., 2000. Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients, Doctoral dissertation, John Mardaljevic.

MORELAND, K., 2015. Why We Use Bad Color Maps and What You Can Do About It, <http://www.kennethmoreland.com/color-advice/BadColorMaps.pdf> [Stand: 17.11.2017]

MÜLLER, A., 2009. Entwicklung von Methoden zur Ermittlung des Solarpotentials auf kommunaler Ebene, Master Thesis, München

NAEEM, M., & Wilson, M., 2007. A study of the application of the BRE Average Daylight Factor formula to rooms with window areas below the working plane. *Proc. PALENC*, 2, 682-6.

NG, E., 2001. A simplified daylighting design tool for high-density urban residential buildings. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 33(4), pp. 259-269.

PAGANI Guazzugli Bonaiuti, S., & Wilson, M., 2007. An analysis of the (BRE) average daylight factor and limiting depth guidelines as design criteria. *Proc. PALENC*, 2, pp. 682-6.

RADIANCE, 2017. <http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/rc97tut.pdf> [Stand: 15.11.2017].

REINHART, C. F., & Walkenhorst, O., 2001. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33(7), pp. 683-697.

ROUNDSARI, M. S., Pak, M., & Smith, A., 2013. Ladybug: a parametric environmental plug-in for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon, France Aug.

SCHUBERT, G., E. Artinger, V. Yanev, F. Petzold, G. Klinker., 2012. 3D Virtuality Sketching - Interactive 3D-sketching based on real models in a virtual scene, ACADIA / San Francisco, California

SCHUBERT, G., 2014. Interaktionsformen für das digitale Entwerfen: Konzeption und Umsetzung einer rechnergestützten Entwurfsplattform für die städtebaulichen Phasen in der Architektur; Doktorarbeit. Technische Universität München.

STMUG, 2011. Leitfaden Energienutzungsplan, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (Hrsg.), Verfasser: Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, München

STMUG, STMWIVT, 2007. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUG) / Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) (Hg.): Oberflächennahe Geothermie, Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund, Ein Überblick für Bauherren, Planer und Fachhandwerker in Bayern, München, URL: <http://www.stmwivt.bayern.de/fileadmin/Web-Dateien/Dokumente/energie-und-rohstoffe/Geothermie.pdf> [Stand 30.05.2017]

STMWI, 2017, Energie-Atlas Bayern, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, <http://geoportal.bayern.de/energieatlas-karten/> [Stand: 20.6.2017]

SUNANGLE, 2017: <http://www.susdesign.com/sunangle/> [Stand 1.12.2017]

TRNSYS. 2017.: <http://www.trnsys.com/> [Stand: 15.11.2017].

VDI 4640, 2010. Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 4640, Blatt 1, Thermische Nutzung des Untergrunds, Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, Düsseldorf.

WERNER, M., 2017. Gekoppelte lichttechnische und thermische Methoden zur Ganzjahresbewertung von Fassadensystemen für die Planungspraxis, Dissertation an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für technische Wissenschaften, Innsbruck.

*MICONVEXHULL*, 2017: <https://designengrhub.github.io/MICConvexHull/> [Stand 20.11.2017]

O'ROURKE, J, 1985 Finding minimal enclosing boxes, Parallel Programming, Springer Netherlands.

# Abbildungen und Tabellenverzeichnis

## Abbildungen

Abb. 1.1 Forschungsrahmen. Erweiterung der bestehenden Entwurfsplattform CDP um zusätzliche Analyse- und Simulationsmethoden zum Thema Energie .....	4
Abb. 2.1 CDP // Collaborative Design Platform – etablierte Entwurfswerkzeuge und digitale Analyse nahtlos (z.B. Schattenanalyse im Jahresverlauf) verbunden.....	5
Abb. 2.2 CDP Hardware: (A) Planview, (B) Infopanel, (C) flexible Erweiterung.....	7
Abb. 2.3 Hardwarekonzept: Multitouchtisch im Eigenbau kombiniert mit 3-D-Tiefenkamera und zusätzlicher perspektivischer Anzeige.....	8
Abb. 2.4 Infopanel als perspektivische Erweiterung der Entwurfsszenerie.....	9
Abb. 2.5 Interaktive Skizze und physikalisches Modell sind direkt miteinander gekoppelt – Verschieben und Rotation der Volumen berücksichtigt auch die Skizze .....	10
Abb. 2.6 Softwarekonzept: Plug-in-Architektur ermöglicht ein individuelles Erweitern des Systems und somit einfaches Reagieren auf Entwurfsaufgaben .....	11
Abb. 3.1 Forschungsansatz: Überblick über die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten Plug-ins.....	13
Abb. 3.2 Einfluss der städtebaulichen Parameter auf Energie und Komfort (vereinfachte Darstellung).....	14
Abb. 4.1 Berechnung der Wärmeabnahme pro Trassenmeter .....	20
Abb. 4.2 Grafische Darstellung der Methode zur Entwicklung des Plug-ins Wärmenetz (Berechnung des Jahreswärmebedarfs der Gebäude sowie der Wärmeabnahme pro Trassenmeter und Dimensionierung der Heizzentrale).....	23
Abb. 4.3 Ermittlung des Netzverlaufs .....	26
Abb. 4.4 Automatische Generierung und Bewertung des Wärmenetzes in Abhängigkeit der Position der Heizzentrale (physisches Objekt auf der Tischoberfläche – rot markiert).....	27

Abb. 4.5 Automatische Positionsbewertung – Prinzip vereinfacht .....	27
Abb. 4.6 Analyse zur Identifikation der günstigen Positionen der Heizzentrale.....	28
Abb. 4.7 Visualisierung des Untersuchungsgebiets in der CDP // Collaborative Design Platform (links) und der Wärmeabnahme pro Trassenmeter in kWh/Trm*a (rechts) .....	30
Abb. 5.1 Definition der Sonnenwinkel.....	34
Abb. 5.2 Verschattungsbereich bei Flachdächern und resultierender Abstand zwischen den Paneelen (StMUG 2011) .....	37
Abb. 5.3 Grafische Darstellung der Methode zur Entwicklung des Plug-ins Solarpotenzial .....	39
Abb. 5.4 Bounding Box für einzelnes Schattenvolumen (rot, links); Bounding Box für alle Schattenvolumina (blau, rechts) .....	41
Abb. 5.5 Darstellung des solar deckbaren Anteils des Stromverbrauchs in Prozent je Gebäude; rot markierte Gebäude sind nicht Teil der Betrachtung. Der Pfeil neben der Legende zeigt den Wert für das gesamte betrachtete Gebiet. ....	43
Abb. 5.6 Monatliche globale Sonnenstrahlung (Januar) .....	45
Abb. 5.7 Monatliche globale Sonnenstrahlung (März) .....	45
Abb. 5.8 Monatliche globale Sonnenstrahlung (Juni) .....	46
Abb. 5.9 Monatliche globale Sonnenstrahlung (September).....	46
Abb. 5.10 Monatliche globale Sonnenstrahlung (Dezember).....	47
Abb. 5.11 Monatlicher Vergleich der solaren Strahlungswerte für die Stadt München.	48
Abb. 5.12 Günstige Gebiete für Erdwärmesonden (Auszug aus (StMWi 2017)) .....	50
Abb. 5.13 Geothermisches Potenzial bis 100 Meter Tiefe (Auszug aus (StMWi 2017)) .....	50
Abb. 5.14 Grafische Darstellung der Methode zur Entwicklung des Plug-ins Potenzial oberflächennahe Geothermie .....	54

Abb. 5.15 JSON Koordinatensystem und Ellipsen-Beschreibung.....	55
Abb. 5.16 a) Stadtplan als StreetView von OpenStreetMaps (oben links) b) Stadtplan als digitale Orthofotos von WMS (oben rechts) c) oberflächennahe Geothermie von WMS (unten) .....	56
Abb. 5.17 JSON-Server Beschreibung.....	57
Abb. 6.1 Auswahl des Analyseraums – die Geometrie mit 6 Metern Raumtiefe wird direkt aus der Handskizze konstruiert, dem Gebäude zugeordnet, im 3-D-Modell positioniert und referenziert .....	60
Abb. 6.2 Erstellung des Analyseraums .....	60
Abb. 6.3 Direkte, diffuse und reflektierte Strahlung .....	62
Abb. 6.4 Bestandteile des Tageslichts: (a) direkte Sonne, (b) direkter Himmel, (c) von außen reflektiert und (d) von innen reflektiert .....	63
Abb. 6.5 Interne und externe horizontale Beleuchtungsstärke (rechts), Tageslicht-Analysefläche (links) .....	65
Abb. 6.6 Die Hauptkomponenten des <i>Radiance</i> -Renderingsystems (Mardaljevic 2000) .....	66
Abb. 6.7 Beispielmaterialedefinition für <i>Radiance</i> -Simulationsengine .....	67
Abb. 6.8 Himmelsdefinition in <i>Radiance</i> .....	68
Abb. 6.9 Öffnungs- und Fensterherstellungsmethoden .....	70
Abb. 6.10 <i>Radiance</i> -Einstellungen (Mardaljevic 2000) .....	70
Abb. 6.11 Beispiel einer „rad“-Dateiausgabe von der CDP .....	71
Abb. 6.12: Ablauf der Tageslichtsimulation in der CDP // Collaborative Design Platform unter Einbindung von <i>Radiance</i> .....	72
Abb. 6.13: Tageslichtverfügbarkeit für einen ausgewählten Analyseraum.....	75
Abb. 6.14 Schritte bei der Validierung der Tageslichtsimulation mit <i>Grasshopper</i> , a) Importieren der Gebäude von der CDP, b) Auswahl des Gebäudes, c) Definition des	

Analyserraums, d) Positionierung der Sensorpunkte, e) Ausführung der Simulation mit <i>Radiance</i> , f) Visualisierung der Ergebnisse.....	76
Abb. 6.15 Validierungsdiagramm zum Vergleich des Tageslichtquotienten aus der Simulation mit der CDP und <i>Honeybee</i> .....	77
Abb. 6.16 Ablauf der Einbindung von <i>TRNSYS</i> über <i>Grasshopper</i> in die CDP // Collaborative Design Platform .....	78
Abb. 6.17 <i>DALEC</i> , Referenzraum Iso-Darstellung und Grundriss (Werner 2017).....	79
Abb. 6.18 <i>DALEC</i> -Interface (Screenshot), Eingabe der Raumkonfiguration ( <i>DALEC</i> 2017) .....	80
Abb. 6.19 Ablauf der Einbindung von <i>DALEC</i> in die CDP // Collaborative Design Platform .....	81
Abb. 6.20 <i>DALEC</i> -Interface (Screenshot), Simulationsergebnisse (hier Energiebedarf) ( <i>DALEC</i> 2017) .....	82
Abb. 6.21 CDP/ <i>DALEC</i> -Kommunikationsschema.....	83

## Tabellen

Tabelle 4.1 Jahreswärmebedarf pro Trassenmeter und zugehörige RGB-Farbwerte..	20
Tabelle 5.1 Vordergrundreflektivität für verschiedene umgebende Zustände .....	36
Tabelle 5.2 Für Erdwärmesonden grundsätzlich geeignete Flurstücknutzungsarten ...	51
Tabelle A. 1 Gebäudetypen (Wohngebäude) (Loga 2015).....	103
Tabelle A. 2 Spezifische Heizwärmebedarfswerte (Nutzenergie) für Wohngebäude [kWh/m <sup>2</sup> a] (Loga 2015).....	103
Tabelle A. 3 Spezifische Brauchwarmwasserbedarfswerte (Nutzenergie) für Wohngebäude [kWh/m <sup>2</sup> a] (Loga 2015).....	104
Tabelle A. 4 Spezifische Heizwärmebedarfswerte (Nutzenergie) für Wohngebäude der Baualtersklassen 11 und 12 [kWh/m <sup>2</sup> a] (Loga 2015) .....	104
Tabelle A. 5 Spezifische Wärmebedarfswerte (Nutzenergie) für den Sektor GHD (StMUG 2011).....	105
Tabelle A. 6 Typische Leistungen für Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude (StMUG 2011).....	105
Tabelle A. 7 Statistischer flächenspezifischer Stromverbrauch für den Sektor GHD (StMUG 2011).....	106



# Anhang

**Tabelle A. 1 Gebäudetypen (Wohngebäude) (Loga 2015)**

Einfamilienhaus	EFH
Mehrfamilienhaus	MFH
Großes Mehrfamilienhaus	GMFH
Reihenhaus	RH

**Tabelle A. 2 Spezifische Heizwärmebedarfswerte (Nutzenergie) für Wohngebäude [kWh/m²a] (Loga 2015)**

Baualter- klasse	Baujahr	Spez. Heizwärmebedarf (Nutzenergie)			
		EFH	RH	MFH	GMFH
		[kWh/(m²a)]			
01	... 1859	323,7		326,1	
02	1860 ... 1918	308,6	228,2	196,8	153,3
03	1919 ... 1948	250,2	178,6	250,2	191,1
04	1949 ... 1957	312,5	221,3	221,3	187,3
05	1958 ... 1968	303,2	122,5	160,5	163,4
06	1969 ... 1978	223,6	156,7	168,6	138,8
07	1979 ... 1983	149,3	157,6	139,8	
08	1984 ... 1994	173,7	108,7	146,1	
09	1995 ... 2001	134,9	89,1	105,4	
10	2002 ... 2009	89	78,1	63,2	
11*	2010 ... 2015	99,6	84,7	80,3	
12*	2016 ...	84,2	71,3	48,4	

\* Für die Baualterklassen 11 und 12 sind die spezifischen Werte im TABULA-Projekt differenzierter ermittelt worden (nach Effizienzklasse und Wärmeversorgungsoption). Hier sind die Werte für die Effizienzklasse gesetzliche Mindestanforderung (EnEV 2009/2014) und eine Wärmeversorgung mit Gas angegeben. Falls diese Angaben genauer bekannt sind, sollen die entsprechenden spezifischen Heizwärmebedarfswerte aus Tabelle 7 entzogen werden.

**Tabelle A. 3 Spezifische Brauchwarmwasserbedarfswerte (Nutzenergie) für Wohngebäude [kWh/m²a] (Loga 2015)**

Baualter- klasse	Baujahr	Spez. Brauchwarmwasser- bedarf (Nutzenergie)			
		EFH	RH	MFH	GMFH
		[kWh/(m²a)]			
01	... 1859	11		16,5	
02	1860 ... 1918	11	11	16,5	16,5
03	1919 ... 1948	11	11	16,5	16,5
04	1949 ... 1957	11	11	16,5	16,5
05	1958 ... 1968	11	11	16,5	16,5
06	1969 ... 1978	11	11	16,5	16,5
07	1979 ... 1983	11	11	16,5	
08	1984 ... 1994	11	11	16,5	
09	1995 ... 2001	11	11	16,5	
10	2002 ... 2009	11	11	16,5	
11	2010 ... 2015	11,6	11,7	16,1	
12	2016 ...	11,6	11,7	16,1	

**Tabelle A. 4 Spezifische Heizwärmebedarfswerte (Nutzenergie) für Wohngebäude der Baualter-  
klassen 11 und 12 [kWh/m²a] (Loga 2015)**

Baualter- klasse	Baujahr	Effizienzklasse	Wärme- versorgung	Spez. Heizwärmebedarfswerte (Nutzenergie)			
				EFH	RH	MFH	GMFH
				[kWh/(m²a)]			
11	2010 ... 2015	gesetzliche Minde- stanforderung (EnEV 2009/2014)	Gas	99,6	84,7	80,3	
			Biomasse	104,0	95,8	86	
			Strom	94,3	79,9	77,5	
		verbesserter Standard (KfW 70)	Gas	55,4	41,5	49,1	
			Biomasse	81,7	69,3	61,3	
			Strom	81,7	68	61,3	
		zukunftsweisender Standard (KfW 40)	Gas	26,5	19,9	16,5	
			Biomasse	26,5	19,9	16,5	
			Strom	25,5	18,7	16,5	
12	2016 ...	gesetzliche Min- destanforderung (EnEV 2016)	Gas	84,2	71,3	48,4	
			Biomasse	99,6	84,9	80,3	
			Strom	102,3	86,3	82,1	
		verbesserter Standard (KfW 70)	Gas	47	34,7	28,4	
			Biomasse	73,9	62,7	57,3	
			Strom	73,9	62,7	57,3	
		zukunftsweisender Standard (KfW 40)	Gas	26,5	19,9	16,5	
			Biomasse	26,5	19,9	16,5	
			Strom	25,5	18,7	16,5	

**Tabelle A. 5 Spezifische Wärmebedarfswerte (Nutzenergie) für den Sektor GHD (StMUG 2011)**

Verbraucher- klassen	Spez. Wärmebedarf (Nutzenergie)			
	flächen- bezogener Kennwert	Anteil Raum- heizung	Anteil Warm- wasser	Anteil Prozess- wärme
	[kWh/(m²a)]	[%]	[%]	[%]
büroähnliche Betriebe	116	95	5	-
		95	5	-
		92	8	-
		90	10	-
Herstellungsbetriebe	59	76	15	9
Handel	66	95	5	-
		95	5	-
Beherbergung, Heime	128	68	22	10
Gaststätten	177	68	22	10
Nahrungsmittelgewerbe	196	27	20	53
		64	32	4
		68	26	6
Wäschereien	212	12	53	35
Krankenhäuser	146	75	15	10
		75	15	10
		75	15	10
Schulen, Kindergärten	56	95	5	-
Bäder	2100*	keine Unterscheidung möglich, da Prozesse miteinander verkettet		

Die Werte beziehen sich auf die Energiebezugsfläche ( $\approx$  Gebäudenutzfläche) außer bei Bädern, wo sie sich auf die beheizte Beckenfläche beziehen

**Tabelle A. 6 Typische Leistungen für Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude (StMUG 2011)**

Verbraucherklassen	spez. Höchstlast [kW/(MWh/a)]	spez. Grundlast [kW/(MWh/a)]	Benutzungsdauer [h/a]
büroähnliche Betriebe	0,44	0,02	2.270
Herstellungsbetriebe	0,44	0,01	2.270
Handel	0,54	0,01	1.850
Beherbergung, Heime	0,32	0,04	3.120
Gaststätten	0,32	0,04	3.120
Nahrungsmittelgewerbe	0,41	0,05	2.440
Wäschereien	0,62	0,11	1.610
Krankenhäuser	0,37	0,03	2.700
Schulen, Kindergärten	0,44	0,02	2.270
EFH	0,45	0,01	2.220
MFH	0,36	0,02	2.800

Die angegebenen Werte berücksichtigen die Gleichzeitigkeit.

**Tabelle A. 7 Statistischer flächenspezifischer Stromverbrauch für den Sektor GHD (StMUG 2011)**

<b>Verbraucherklassen</b>	<b>Statistischer Stromverbrauch (flächenspezifisch) [kWh/m<sup>2</sup>.a]</b>
büroähnliche Betriebe	52
Herstellungsbetriebe	46
Einzelhandel	61
Großhandel	51
Beherbergung, Heime	73
Gaststätten	113
Backgewerbe	190
Fleischerei / Metzgerei	226
restliche Lebensmittel	35
Wäscherein	233
Krankenhäuser	99
Schulen, Kindergärten	14