

**Konstruktion eines geo-semantischen
3D-Datenmodells zur Ermittlung der Einflussgrößen
auf die PV-Dachpotentiale in NRW unter
Verwendung von open-source Daten**

von der
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dortmund

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Caner Yaldiz, M.Sc.
aus Oberhausen

Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz, Technische Universität Dortmund
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Doetsch, Ruhr-Universität Bochum

Tag der mündlichen Prüfung: 19.05.2022

Abstract

This research project focuses on the analysis of solar roof cadastre and forecasts/scenarios of the upcoming and future energy supply to the Federal Republic of Germany. The analysis is generally focused on the technical feasibility of the energy transition and on the more specific level on the determination of realistic potentials, with using open-source data, for photovoltaic systems in North Rhine-Westphalia, which are mounted on roof surfaces. The goal is the development of a software, which analyzes with 3D building reconstructions regional hurdles to installing photovoltaic systems and evaluates specific potentials. The installation of photovoltaic systems on roof surfaces is impacted by several, mostly regional, obstacles. Based on this fact a more specific analysis in terms of obstacles caused by shading effects on roof surfaces will be applied. The irradiation surface can be reduced by shading caused by buildings or trees, or also objects on the surface, such as smokestacks, dormers and satellites. Even slight shadows may reduce the overall generation output of a photovoltaic system. Additionally, integrated rooftop windows may reduce the available irradiation surface. This analysis level and the comparative results within a region in North Rhine-Westphalia enable the critical review of energy transition targets in regard to their regional feasibility in several cities and municipalities.

Kurzfassung

Thematischer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Untersuchung von Solardachkatastern und Prognosen/Szenarien im Kontext der zukünftigen Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland. Im Allgemeinen fokussiert die Untersuchung die technische Umsetzbarkeit der Energiewende. Detailliert analysiert werden die realistischen Potentiale für die Dachflächen-Photovoltaik in Nordrhein-Westfalen unter Verwendung öffentlich zugänglicher Daten. Das Ziel ist die Entwicklung eines Algorithmus, welcher mit 3D-Gebäuderekonstruktionen regionale Hinderungsgründe für die Anbringung von Photovoltaik-Anlagen auf Dachflächen analysiert und konkrete Potentiale auswertet. Die Installation solcher Anlagen ist durch eine Vielzahl diverser, oftmals regionaler Hinderungsgründe geprägt. In diesem Kontext liegt der Fokus der Analyse im Besonderen auf Verschattungseffekten auf Dachflächen. Umliegende Objekte wie Gebäude und Bäume, oder auch Objekte auf einer Dachfläche wie beispielsweise Schornsteine, Dachgauben und Satellitenanlagen, können die nutzbare Einstrahlfläche durch Verschattung signifikant verringern. Dahingehend sind bereits geringe Schattenwürfe für eine Verringerung ausreichend. Zudem reduzieren integrierte Dachfenster die effektive Nutzfläche. Diese Analyseebene sowie die daraus resultierenden Vergleichsergebnisse innerhalb der Bezirke in Nordrhein-Westfalen können die Energiewende auf regionale Umsetzbarkeit hin in diversen Städten und Gemeinden überprüfen und kritisch hinterfragen.

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Christian Rehtanz für die Ermöglichung dieses Promotionsprojektes und die Betreuung bedanken. Ohne die aktive Unterstützung für eine externe Promotion wäre dieses Forschungsvorhaben nicht möglich gewesen. Besonders dankbar bin ich für die gute Zusammenarbeit und die großzügige Freiheit in meinem Forschungsfeld. Herr Professor Dr.-Ing. Christian Rehtanz hatte stets Zeit für etwaige Hilfestellungen und Beratungen und unterstützte mich in jeglicher Hinsicht auf dem Weg zur Finalisierung dieses Forschungsvorhabens. Die Gespräche mit ihm haben nicht nur zu meiner wissenschaftlichen, sondern ebenfalls zu meiner persönlichen und beruflichen Entwicklung beitragen. Für diese Inspiration bedanke ich mich ganz besonders.

Mein besonderer Dank gilt der Hans-Böckler-Stiftung. Diese hat mir durch das dreijährige Promotionsstipendium eine vollständige Fokussierung auf das Forschungsvorhaben ermöglicht. Die finanzielle und immaterielle Förderung, der Austausch mit fächerübergreifenden Doktorandinnen und Doktoranden und die Unterstützung durch die Mitarbeiter haben dieses Dissertationsprojekt positiv beeinflusst und nachhaltig geprägt.

Zudem bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Institute of Energy Systems, Energy Efficiency and Energy Economics, welche stets bei Fragen zu Inhalten und technischen Schwierigkeiten behilflich waren. Der freundschaftliche Umgangston, der Austausch und die Selbstverständlichkeit der Hilfsbereitschaft haben mich als Teammitglied des Lehrstuhls überaus motiviert.

Des Weiteren danke ich Adriana Frijó für die informationstechnische Umsetzung. Für die professionelle Kommunikation und Zusammenarbeit bedanke ich mich insbesondere.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und Freunden bedanken, für den Zusammenhalt und die Ermutigung zur Durchführung dieses Forschungsvorhabens.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen	5
1.4 Methodik und Aufbau der Arbeit	6
2 Dachflächen-Photovoltaik im Kontext der Energiewende	11
2.1 Studien zur Erreichung der Klimaschutzziele	12
2.1.1 Potentialbegriffe und ihre Definition	13
2.1.2 Potentiale in Deutschland	16
2.2 Ist-Zustand und Potentiale in NRW	20
3 Technische Hinderungsgründe für PV-Dachanlagen	25
3.1 Gebäudeattribute	26
3.1.1 Dachfläche	26
3.1.2 Dachneigung	27
3.1.3 Gebäudestatik und Dachlastreserven	28
3.2 Denkmalschutz	34
3.3 Brandschutz	35
3.4 Verschattung	35
4 Schattenentstehung in der Theorie und Praxis	39
4.1 Physikalische Parameter von Verschattung	40
4.2 Grundlagen der (sub-)urbanen und ruralen Verschattungseffekte	49
4.3 Modellierung der Verschattung und ihrer Ursachen	51
4.3.1 Klassifizierung der Verschattungsarten	51
4.3.2 Mathematische Definitionen	53
4.3.3 Einordnung in den aktuellen Forschungsstand	58
4.4 Solares Einstrahlungspotential	62
5 Datenverfügbarkeit und Beschaffung	65
5.1 3D-Messdaten Laserscanning	66
5.1.1 LiDAR-Technologie und Anwendungsmöglichkeiten	75
5.1.2 Digitales Gelände- und Oberflächenmodell und normalisiertes Oberflächenmodell	77
5.2 3D-Gebäudemodell	78
5.3 Denkmalschutz	82
5.4 Solare Einstrahlungsreihen	83

5.5	Weitere Daten	84
6	Algorithmus und Beschreibung der Prozessschritte	87
6.1	Datenverarbeitung und Vorbereitung der Infrastruktur	88
6.1.1	Auswahl der Datensätze und Datenkonvertierung	89
6.1.2	Datenbank und Datenbankschema	91
6.1.3	Filterung der Gebädepunkte und Metadaten	92
6.1.4	Denkmalschutz-Koordinaten und Reverse Geocoding	94
6.2	Erweitertes Gebäudemodell und Modellierungsprozess	95
6.2.1	Zufallspunktgenerierung an fehlenden Mauern	99
6.2.2	Berechnung der Normalen für Gebädepunktwolken	100
6.2.3	Rekonstruktion	103
6.2.4	Verminderung der Dachflächen durch Dachfenster	105
6.3	Vegetationsmodellierung	107
6.3.1	Parameter der Vegetation	108
6.3.2	Filterung über LiDAR-Kategorien	109
6.3.3	Filterung über TU Delft Algorithmus	111
6.4	Implementierungsdetails des Verschattungsprozesses	113
6.4.1	Sonnenposition	114
6.4.2	Schattenpolygone und ihre Verschneidung mit den Gebäuden	114
7	Ausführung der Schattenanalyse und Einstrahlungssimulation	119
7.1	Schattenanalyse	119
7.1.1	Phase 1: Schatten durch benachbarte Gebäude und Objekte/Bäume	122
7.1.2	Phase 2: Schatten durch Objekte auf dem Dach	125
7.1.3	Überschneidung und Vereinigung der Schattenpolygone	126
7.2	Analyse des Solarpotentials	129
7.2.1	Modulbelegung der verfügbaren Flächen	130
7.2.2	Berechnung der Einstrahlungsenergie	133
8	Ergebnisse	139
8.1	Ergebnisse der Schattenanalyse	141
8.1.1	Top-5 Kreise in NRW	141
8.1.2	Flop-5 Kreise in NRW	145
8.2	Ergebnisse der Einstrahlungsanalyse	149
9	Kontextuelle Interpretation der Ergebnisse	155
9.1	LANUV-Studien aus den Jahren 2013 und 2018	155
9.2	Fath 2018	157
9.3	Vergleich mit Eggers et al. 2020 [221]	160
9.4	Einfluss der Methodik auf die Ergebnisse	161
10	Fazit und Ausblick	163

Literaturverzeichnis	169
Abkürzungsverzeichnis	189
Abbildungsverzeichnis	191
Tabellenverzeichnis	195
Anhänge	197
A Algorithmen	197
A.1 DIN 5034, Teil 2	197
B Implementierungen und Pseudocode	199
B.1 Pseudocode zum Winding Number Algorithmus	199
C Rohdaten und Spezifikationen	200
C.1 LAS 1.2 Punktspezifikation	200
C.2 LAS 1.2 Punktklassen	202
C.3 Ergebnisse der Analyse	202
C.4 Gebäudeverteilung für alle Kreise NRWs	208
D Kategorisierung der Gebäude-Funktionscodes	210

1 Einführung

1.1 Motivation

Die Veränderung des Klimas, sowie die Herausforderung diese möglichst zu minimieren, stellt eine der größten und bedeutendsten Aufgaben der Menschheit im 21. Jahrhundert dar. Im öffentlichen Diskurs ist vor diesem Hintergrund eine erhöhte gesellschaftliche und politische Auseinandersetzung mit umweltspezifischen Aspekten zu verzeichnen, die ausgehend von dem erhöhten CO₂-Ausstoß und der damit verbundenen Erderwärmung in den Vordergrund rückt. Das klimapolitische Ziel der Bundesregierung fokussiert vor diesem Hintergrund eine Minderung der CO₂-Emissionen um 65% bis zum Jahre 2030 und die Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045[1]. Als Referenz dienen dabei die Emissionen des Jahres 1990. Für die praktische Umsetzung dieses Ziels sind sowohl die Diversität als auch das Zusammenspiel verschiedener Faktoren und Maßnahmen bedeutend. Insbesondere der Umbau der Energieversorgung ist dabei maßgebend. Die drei Endenergiesektoren Strom, Verkehr und Wärme gehören zu den größten CO₂-Emittenten. Gemeinsam haben sie einen Anteil von insgesamt 83%. Ganze 43% sind dabei auf den Stromsektor und jeweils 20% auf den Verkehrs- und Wärmesektor zurückzuführen [2].

In den vergangenen Jahren bestimmte die Verfehlung der gesetzten Klimaschutzziele den öffentlichen Diskurs. Insbesondere die *Fridays for Future*-Bewegung rückte die aktuelle Dringlichkeit einer nachhaltigen Klimapolitik ins öffentliche Bewusstsein. Für das Jahr 2019 wurde ein Rückgang der CO₂-Emissionen um 6,3% im Vergleich zum Jahr 2018 verzeichnet[3]. Das festgelegte Ziel einer Minderung der CO₂-Emissionen um 40% bis zum Jahr 2020 wurde übertroffen (40,8% Minderung) [4]. Nichtsdestotrotz wird mit hoher Wahrscheinlichkeit das Ziel von 65% für das Jahr 2030 verfehlt und es wird eine Minderung von 49%, im Vergleich zum Referenzjahr 1990, erwartet [5].

Im Kontext der Prognosen und Szenarien ist die Umsetzbarkeit der Zielvorgaben ein essentieller Analyseparameter. Die Motivation dieses Forschungsvorhabens liegt darin begründet, die ausgeführten Zahlen und Zielvorgaben kritisch zu analysieren und daraus reale Potentiale und Prognosen zur Dachflächen-Photovoltaik abzuleiten.

Prognosen und Szenarien

Prognosen und Szenarien sind elementar voneinander zu unterscheiden. Eine Prognose stellt die Fortführung von Parametern einer Zeitreihe dar, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit eintreten wird. Davon abgrenzend kann ein Szenario, unabhängig von vorherigen Zeitreihen und der Eintrittswahrscheinlichkeit, beliebige Entwicklungen in der Zukunft skizzieren. Szenarien haben für die Energiewende die Funktion einer Benchmark, welche die Erreichung diverser Ziele mit different skizzierten Wegen ermöglichen soll. Dadurch sollen für die Politik Handlungsempfehlungen aufgezeigt und die Umsetzung bestimmter

Maßnahmen in den Vordergrund gerückt werden [6]. Folglich entspricht eine Prognose einem Szenario, allerdings entspricht ein Szenario nicht einer Prognose.

Dahingehend liegt der Fokus dieser Arbeit u.a. auf der Einordnung von gängigen Prognosen und Szenarien im Hinblick auf realistisch umsetzbaren Dachflächen-Photovoltaik-Potentialen. Die zentrale Fragestellung ist, inwiefern Verschattungseffekte die Potentiale der Dachflächen-Photovoltaik beeinträchtigen und wie sich diese Verschattungseffekte mit einem Algorithmus unter Verwendung öffentlich-zugänglicher Daten bestimmen lassen. Daraus resultierend wird untersucht, ob sich die Benchmark in Bezug auf die Dachflächen-Photovoltaik als fehlerhaft erweist und somit zu Verfehlungen bei den Zielen führt.

1.2 Problemstellung

Analysetools der Geoinformationsverarbeitung (wie beispielsweise ArcGIS Pro oder GRASS GIS) werden von privaten und institutionellen Anbietern als kommerzielle und nicht-kommerzielle Angebote zur Verfügung gestellt. Diese ermöglichen eine gegenwärtige Einschätzung der Energiewende. Sie unterscheiden sich in ihrer Funktionsweise voneinander und darin, welche unterschiedlichen Datenformate verwendet und eingespeist werden können. Im Fokus der Anwendungen stehen die Raster- und Vektor-basierten Daten. Die Rasterdaten stellen eine 2D-Darstellung und die Vektor-basierten Daten eine 3D-Darstellung der Erdoberfläche und aller auf ihr befindlichen Strukturen dar. Beide Formate verfügen über spezifische Einsatzzwecke mit den damit verbundenen Vor- und Nachteilen.

Ein namhafter kommerzieller Softwareentwickler ist die Firma ESRI, welche mit ihrem Geoinformationssystem (GIS) ArcGIS Pro [7] und den dazugehörigen Lizenzen für zahlreiche Module einen großen Marktanteil besitzt. In ESRIs Softwaregerüst rund um ArcGIS Pro kommen dabei im Zuge von Schatten- und Einstrahlungsanalysen Module wie *Solar Analyst* zum Einsatz, welche die Einstrahlungspotentiale ermitteln. Im Kontext der Analyse von Verschattungseffekten sind Module verfügbar, die im Bereich der *Development Impact Analysis* [8] genutzt werden können und eine visuelle Lösung bieten, wobei auch einige quantitative Parameter in vorab bestimmten Gebieten ermittelt werden können. Hierbei besteht die Problematik darin, dass einige Lizenzen für die Öffentlichkeit oder Forschung nicht verfügbar sind, da sie nur mit einer Regierungslizenz bezogen werden können. Diverse nützliche Funktionalitäten können jedoch mit dem Tool *Sun Shadow Volume* [9] aus der 3D-Analyse-Toolbox verwendet werden. Ein Nachteil besteht allerdings bei großflächigen Analysen, da der Prozess überaus rechenintensiv ist und das komplette Schattenvolumen generiert wird, statt nur eine Schattenfläche auf eine Referenzfläche zu projizieren (z. B. auf das Dach oder die Gebäudefassade).

Weitere Programme und Softwarelösungen, die darauf abzielen Schattenberechnung oder Energiepotentiale für Gebäude zu berechnen, sind u. a. als open-source Lösungen vorhanden, wie beispielsweise EnergyPlus [10], SURSUN3D [11, 12], alternative GIS wie GRASS GIS [13] und QGIS [14] oder frei verfügbare Softwarepakete wie das R Package *shadow*

[15] oder `rayshader` [16]. Letzteres wird hauptsächlich für die Visualisierung verwendet und ermöglicht keine quantitative Analyse. Zudem ist anzumerken, dass der Großteil aller Softwarelösungen keine direkte Verschattung berechnen, sondern primär für die Ermittlung des Solarpotentials von Gebäuden im Kontext ganzer Städte eingesetzt werden. Eine Lösung, die speziell für die Quantifikation der Verschattungseffekte verwendet werden kann, stellt das R Package `shadow` dar.

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) bietet mit dem Energieatlas NRW Zugang zu energietechnischen Daten und Informationen für das Bundesland Nordrhein-Westfalen. Die Potentialstudien, welche von Seiten des LANUV erstellt worden sind, wurden im Vorfeld dieser Arbeit analysiert. Hierbei ist die *Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 2 – Solarenergie* von besonderer Relevanz, da sich diese mit dem Hauptparameter der Untersuchung dieser Arbeit beschäftigt und eine flächendeckende Analyse des Solarpotentials in NRW beschreibt [17].

Der Begriff flächendeckend ist an dieser Stelle zu relativieren, da die Hochskalierung auf das Landesgebiet NRW von 24 Modellgebieten vorgenommen worden ist [17]. Die angewandte Methodik lässt offenen Raum für eine tiefergehende Detailebene, um reale Verhältnisse besser abzubilden. Ein beispielhafter Verbesserungsvorschlag wäre die Potentialstrahlung nicht auf die gemittelten empirisch erfassten Daten von 1980–2000 zu basieren, sondern moderne Strahlungsreihen zu verwenden. Seit den 1980er Jahren hat sich die jährliche Sonneneinstrahlung in Deutschland um 5-10%, aufgrund vermindeter Luftverschmutzung, erhöht. Wenn empirische Strahlungsdaten verwendet werden sollen, sollten bestenfalls nur aktuelle Daten verwendet werden [18]. Hinzu kommt, dass das digitale Oberflächenmodell gerastert eine maximale Auflösung von 50×50 cm aufweist. Antennen und kleinere Strukturen auf Dächern können dadurch auch schnell aus dem Raster fallen und unberücksichtigt bleiben. Weitere Aspekte der Potentialstudie, die verbessert werden können oder zu vereinfacht analysiert worden sind, werden im Laufe dieser Forschungsarbeit ausführlich geschildert. In diversen Hinsichten sind vereinfachende Annahmen nachvollziehbar, um den Grad der Komplexität der Berechnungen niedrig zu halten. Daraus resultierend ergibt sich die Notwendigkeit einer wissenschaftlich fundierten Analyse um die Detailebene der Potentialstudie bzgl. der Dachflächen-Photovoltaik zu vertiefen.

In der Potentialstudie des LANUVs wird aufgrund der Empfindlichkeit von PV-Anlagen gegenüber Verschattung und der damit einhergehenden Minderung der direkten Einstrahlung pauschal jede bei der Berechnung einfließende Rechenzelle ausgeschlossen, wenn sie eine Minderung der direkten Sonneneinstrahlung von 10% oder mehr aufweist. Die Werte wurden einheitlich auf der Grundlage der Strahlungsreihe für die Gemeinde Titz in NRW ermittelt, welche ein weiteres Argument aufführt, eine anderweitige Analyse durchzuführen. Die Vermutung liegt nahe, dass die Hochskalierung auf das Landesgebiet NRW für fundamentale Ungenauigkeiten sorgt.

Ungenauere Methodiken und die damit verbundenen ungenauen Induktionen bzgl. der Potentiale, können zu verzerrten Prognosen und Szenarien führen. In Anbetracht der Analy-

sen und Ergebnisse vom LANUV konkretisiert sich der Fokus dieser Arbeit auf den Hinderungsgrund der Verschattung. Im Speziellen wird die Fragestellung in den Vordergrund gerückt: **Wie können Verschattungseffekte auf Dachflächen unter Berücksichtigung regionsspezifischer Topografien und Strukturen mathematisch-analytisch erfasst und in einem Modell ausgewertet werden?**

PV-Potentiale

Es fehlen realistische und vor allem auch akkurate Analyseverfahren zur Ermittlung der PV-Potentiale. Zumeist werden beispielsweise für die PV-Dachflächen Schätzwerte verwendet, indem die Hausgrundrisse als Grundlage in die Berechnung einfließen [19]. Das LANUV ist diesbezüglich bereits präziser vorgegangen, da deren Analyse Rechenzellen (50x50 cm Fläche) ausschließen, wenn die Begründung vorliegt, dass von der maximalen direkten Strahlungsenergie mindestens 10% wegfallen. Obwohl es bei diesem Ansatz eine klare Begründung für den Ausschluss von Flächen gibt, liegen einige Schwachstellen in der Vereinfachung vor. Beispielsweise wird von der maximal möglichen Strahlung ausgegangen, die in einer anderen Gemeinde erreicht werden kann. Eine individuelle Berücksichtigung aller Gemeinden wird nicht durchgeführt. Auf der anderen Seite werden allerdings auch Standorte, welche aufgrund ihrer Lage in einem Gebiet mit geringerer maximal möglicher Strahlung (im Vergleich zu Titz), wesentlich seltener als geeignet eingestuft, obwohl sie unter Umständen bei genauerer Analyse höhere Potentiale vorweisen. Der Ansatz vom LANUV ist hier nicht pauschal zu negieren. Er bietet einen guten Kompromiss zwischen robusten Annahmen und Nutzbarkeit der vorliegenden Daten. Das Analyseverfahren gewährleistet einen relativ genauen Überblick im Vergleich zur eingesetzten Rechenleistung. Zusätzlich gilt zu berücksichtigen, dass diverse Hinderungsgründe bei der Anbringung von PV-Anlagen eine Rolle spielen, welche nicht näher betrachtet werden. Als Beispiel kann der Denkmalschutz hervorgehoben werden. Auch eine verminderte Tragfähigkeit vom Dach stellt einen Hinderungsgrund dar. Ein Einfluss, der im Zweifelsfall immer durch ein Fachunternehmen festgestellt werden muss. Auch Brandschutzbestimmungen und andere Bauverordnungen können eine Hinderung darstellen. Als weiterer Faktor ist bei Privatpersonen der sozio-ökonomische Status ebenfalls nicht außer Acht zu lassen. Eine Ausdehnung der EEG-Umlage und weitere staatliche Förderungen stellen zudem einen zentralen Anreiz für die Inbetriebnahme von PV-Anlagen auf Ein- und Zweifamilienhäusern dar.

Schattenwürfe als zentrale Größe der Hinderung

Schattenwurf als Modellierungsparameter für die Einschätzung der Leistungsfähigkeit einer PV-Dachanlage weist eine immense Aussagekraft und Relevanz auf [19, 20]. Der Verschattungsfaktor eines Daches ist dahingehend ein entscheidender Faktor in Bezug auf die potentielle Anbringung einer PV-Anlage auf einer Dach- oder Freifläche. Schattenfreie Dachflächen sind nicht zwangsläufig als Potentialflächen zu bewerten. Neben besonders detaillierter und realistischer Simulation und Schätzung müssen auch ande-

re Modellierungsparameter einbezogen werden, beispielsweise geltender Denkmalschutz, Brandschutz-Verordnungen oder bautechnische Statik-Anforderungen.

Eine Reihe von Verfahren sind gegenwärtig nutzbar, um Schattenwürfe zu berechnen. Diese liefern mehr oder weniger akkurate Ergebnisse. Die beiden Verfahren, welche übergeordnet kategorisiert werden können heißen *Pixel Counting* und *Polygon Clipping*, wobei Rocha et al. zeigt, dass in komplexen Situationen mit sehr aufwendigen Formen die Pixel Counting Technik überlegen ist [21]. Für einfache geometrische Darstellungen liefern beide Methoden, Pixel Counting und Polygon Clipping, ähnlich akkurate Ergebnisse [21].

In einem Großteil der Fälle wird von einer räumlichen Schattenanalyse abgesehen. Stattdessen werden Vereinfachungen vorgenommen. Hauptsächlich wird auf direkte Einstrahlungsanalysen zurückgegriffen, welche auf Raster-Daten angewandt werden. Hierbei wird der Schatten zwar teilweise mit berücksichtigt (teilweise sogar indem Raytracing angewandt wird), aber oftmals geht mit der Rasterisierung des digitalen Oberflächenmodells ein Verlust des Detailgrads einher, da Rasterdaten Pixel nutzen und diesen zusätzlich einen Höhenwert zuweisen.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen

Der Gebäudesektor ist für etwa 33% des nationalen Energieverbrauchs verantwortlich [22]. Demnach liegt es in der Verantwortung der Beteiligten dieses Sektors den Energieverbrauch über möglichst klimaneutrale Energiegewinnung zu decken. Eine unmittelbare Lösung stellt die Anbringung von Photovoltaik-Modulen auf Dachflächen dar, da diese keinen zusätzlichen Platz in Anspruch nehmen und gegenwärtig relativ kostengünstig angebracht werden können. Die Energiegewinnung aus PV-Anlagen kann für den Eigenverbrauch der Gebäude und ebenso für die Netzeinspeisung verwendet werden. Insbesondere die Nutzung von Wärmepumpen, unter Verwendung der erzeugten und unter Umständen gespeicherten solaren Energie, führt zu einer Autarkie von fossilen Energieträgern.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, durch die Analyse von geografischen und gebäudespezifischen Daten den Einfluss der Verschattung auf Dachflächen zu bestimmen. Damit soll ein Beitrag zur Entscheidungsfähigkeit der Bundesregierung, Länder und Gemeinden/Kommunen geleistet werden, um Vereinfachungen bezüglich der Planung und Förderung von Photovoltaik-Anlagen zu ermöglichen. Im Analysespektrum liegt das gesamte Landesgebiet von Nordrhein-Westfalen. Durch die detaillierte Analyse aller Gebäude in NRW wird eine möglichst große und vielfältige Fläche abgedeckt. Über die Analyse der Verschattungseffekte auf den Dachflächen in Abhängigkeit der umliegenden Gebäude, Bäume und Dachaufbauten (inkl. Antennen, Schornsteine etc.) ist die Absicht spezifische Multiplikationsfaktoren zu extrahieren, die es ermöglichen, auf numerische Art die Ergebnisse auf jedes beliebige Gebiet zu beziehen und die Faktoren zur Berechnung der geeigneten Flächen zu verwenden. Diese Analyseebene soll durch plausible Abschätzungen und Klassifizierungen eine vollwertige Auswertung für jedes weitere Gebiet ermöglichen.

Des Weiteren sollen die ermittelten Ergebnisse im Kontext der Potentialstudien zur Photovoltaik in NRW betrachtet werden und aufzeigen, welche Unterschiede und Gemeinsamkeiten, über das in dieser Arbeit gewählte Verfahren, bestimmt werden können.

Ziel ist die Beantwortung folgender Fragestellung: **Führt die Auswertung der Verschattungseffekte und weiterer möglicher Hinderungsgründe zu Potentialeinschränkungen, und können schlussfolgernd die gegenwärtigen Prognosen eingehalten werden oder müssen erhebliche Abweichungen für die Umsetzung der Energiewende berücksichtigt werden?**

Andere untergeordnete Fragestellungen, welche bei der Beantwortung der primären Forschungsfrage helfen und im Laufe der Forschungsarbeit mit ins Analysespektrum einbezogen werden, sind folgende:

1. Welche PV-Potentialstudien gibt es bereits im deutschsprachigen Raum und im Besonderen für das Land NRW? Welche Techniken werden für die Ermittlung genutzt und welche Potentiale postuliert?
2. Wie können standardisierte, vorhandene Daten effizient genutzt werden, um ein verwendbares Gebäudemodell mit möglichst zahlreichen relevanten Details zu generieren?
3. Welche Parameter sind auf Basis aktueller Datenbestände sinnvoll in die Kalkulation einzubeziehen?
4. Welche Kreise ¹ weisen den besten Wert hinsichtlich von tatsächlich nutzbaren Dachflächen auf?
5. Welche Kreise weisen den schlechtesten Wert hinsichtlich von tatsächlich nutzbaren Dachflächen auf?
6. Wie hoch ist das realisierbare Potential in NRW in Anbetracht der extrahierten Untersuchungsparameter aus der zweiten Forschungsfrage und wie stark wirken sich diese jeweils auf die Reduktion des Dachflächenpotentials aus?
7. Welche zukünftigen Forschungsfragen ergeben sich aus dieser Arbeit und welche Methodiken und Daten könnten zu genaueren Ergebnissen beitragen?

1.4 Methodik und Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird die Vorbereitung der Daten und der eigentliche Prozess zur Bestimmung der verschatteten und schattenfreien Fläche näher betrachtet. Im zweiten Teil wird auf Basis der Ergebnisse eine Einstrahlungsanalyse durchgeführt. Dabei werden die besonderen Eigenschaften unterschiedlicher Städtetopografien ebenfalls mit berücksichtigt. Genauer bedeutet dies, dass in der Auswertung/Dis-

¹NRW ist in 31 Kreise und 22 kreisfreie Städte unterteilt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden diese unter dem Begriff *Kreise* zusammengefasst

kussion berücksichtigt wird, dass beispielsweise Gebiete, in welchen vorwiegend Einfamilienhäuser vorhanden sind, einen besseren Koeffizienten für die potentielle Dachflächen-PV vorweisen, da diese Häuser in der Regel einen ausreichenden Abstand zueinander aufweisen. Daraus bedingt ist der Verschattungseffekt durch benachbarte Gebäude geringer als in dicht besiedelten urbanen Gebieten. Der größtenteils ähnliche Bau und die Ausrichtung der Dachflächen kann weitere Rückschlüsse bzgl. der Potentiale erlauben.

Sowohl die Bestimmung der Verschattung als auch die Einstrahlungsanalyse finden auf Basis aller zur Verfügung stehenden Daten von dem Landesgebiet NRW statt. Dies erübrigt die Frage um die Signifikanz der Ergebnisse in Bezug auf landestopografische Merkmale. Für die Bestimmung der Verschattungsfläche zu einer gegebenen Zeit wird eine direkte Berechnung im dreidimensionalen Vektorraum durchgeführt, abgrenzend zu einem rein statistischen Verfahren oder einer Methode basierend auf zweidimensionalen Raster-Karten. In Abbildung 1.1 findet sich die Übersicht der einzelnen Schritte der Forschungsarbeit. Der gesamte Prozess unterteilt sich in vier Blöcke: Die Festlegung der Untersuchungsparameter, Implementierung des Modells, die experimentelle Datengenerierung sowie Auswertung der Ergebnisse.

Limitierende Annahmen

Aus der Untersuchung explizit ausgenommen wurden Gebäudefassaden. Trotz der Tatsache, dass diese vielversprechend für die Zukunft sein könnten und potentielle Flächen darstellen, liegt in dieser Arbeit der Fokus besonders auf der Erzielung einer hohen Detailtreue der Dachflächen. In einigen Ansätzen wurde ebenfalls versucht die Potentiale für gebäudeintegrierte PV-Anlagen zu bestimmen. Die Einbeziehung hätte allerdings den zeittechnischen und inhaltlichen Rahmen dieser Dissertation deutlich überschritten. Die teils mangelnde Auflösung der Daten wären in diesem Kontext ein erschwerender Faktor. Zudem können bei Airborne Laserscans maximal nur zwei Richtungen bzw. Seiten der Gebäude signifikant gescannt werden, somit muss bei einer Rekonstruktion der Gebäude aus den Punktwolken dieser Umstand einbezogen und ein adäquater Algorithmus angewandt werden. Auch dieser Umstand erwiese sich für die Analyse als durchaus problematisch. Abgrenzend davon ist zu erwarten, dass die Dachflächen im Durchschnitt gut gescannt werden können. Die Abbildung 1.2 verdeutlicht dabei, wie eine derartige Situation aussieht und wie es vorzustellen ist, wenn die Punktwolken dann die Szenerie darstellen. Sichtbar ist, dass die Wände eine absolut unbrauchbare Auflösung bieten und nicht einfach ersichtlich ist, an welchen Stellen Fenster vorliegen. Besonders die Seiten der Gebäude, welche gänzlich aufgrund des Aufnahmewinkels fehlen, enthalten gar keine brauchbaren Informationen für eine Rekonstruktion des Gebäudemodells. Dementsprechend kann zum aktuellen Zeitpunkt keine akkurate und realistische Einschätzung dafür vorgenommen werden.

Neben den gebäudeintegrierten PV-Anlagen an Fassaden werden weitere integrierte PV-Anlagen nicht betrachtet. Diese beinhalten u. a. schwimmende Anlagen auf Seen oder

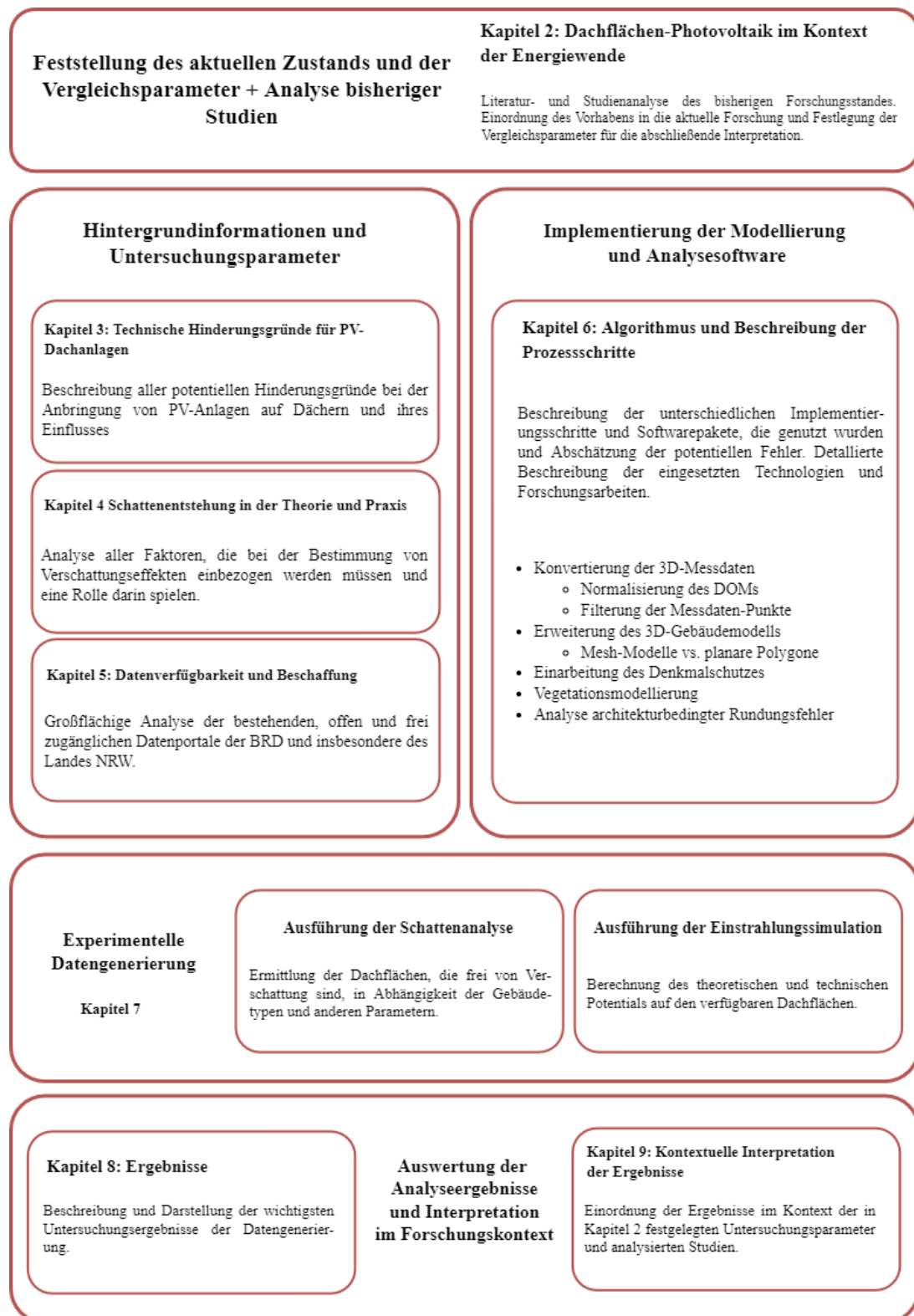


Abbildung 1.1: Übersicht der Komponenten der Forschungsarbeit und ihres Aufbaus.

auf Fahrzeugdächern integrierte Anlagen. In Zukunft können diese Anwendungen von hoher Relevanz sein, konnten aufgrund von Datenmangel und fehlender Standardisierungen jedoch nicht beachtet werden. Eine weitere interessante Anwendung für die Zukunft wären PV-Anlagen in schattenspendenden Gerüsten oder Aufbauten zu integrieren. Somit wäre für Menschen in Städten und Parks eine schattenspendende Struktur vorhanden, beispielsweise in Form von überdachten Parkbänken. Zudem könnte dies zur Nutzung der Sonnenenergie verwendet werden, um Strom zu erzeugen.²

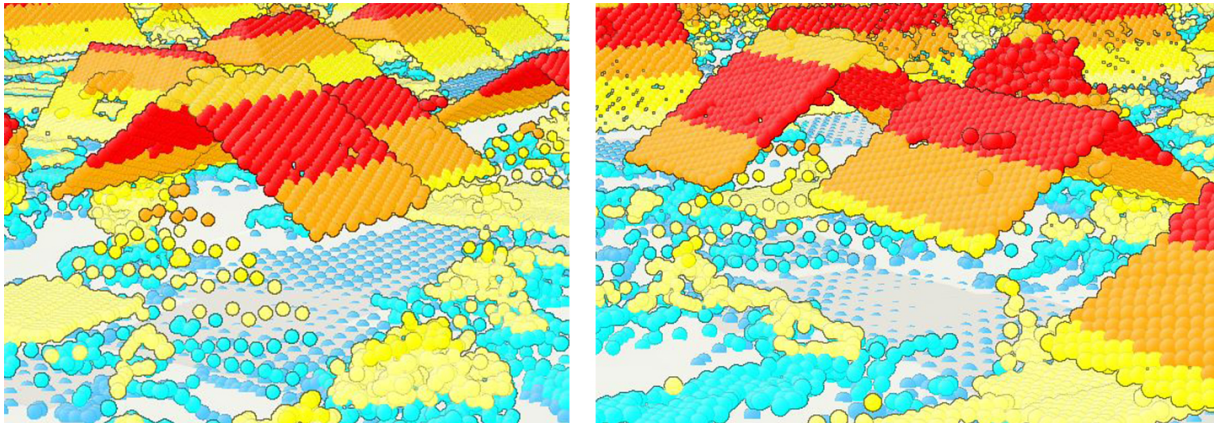


Abbildung 1.2: Punktwolken von mehreren gescannten Häusern. Sichtbar sind die fehlenden Hausseiten aufgrund des Winkels der Laserscanner an dem Flugzeug.

Der Hauptfokus liegt auf urbanen Topografien mit Fokus auf Verschattungseffekten und anderen Faktoren, die eine Anbringung von PV-Anlagen quantifizierbar verhindern. Anlagen auf Freiflächen unterliegen dabei der Verantwortung der Länder und Kommunen. Sie sind langfristig als suboptimal zu bewerten im Vergleich zu Anlagen auf Dachflächen, da große und leistungsstärkere Anlagen mit mehr Auflagen und Regelungen geplant werden müssen und zusätzlich an die Ausschreibungspflicht gekoppelt sind. Aus diesem Grund werden Freiflächen PV-Anlagen nicht mit in die Analyse einbezogen.

In einem kleinen Rahmen würde sich folgendes anbieten: Gebäude sollen in all ihren Details in einem 3D-Modell innerhalb eines CAD Programms, wie beispielsweise SketchUp [24], repliziert werden. Dort lässt sich anschließend eine Verschattungsanalyse durchführen, welche jedes Detail des Gebäudemodells mit in die Berechnung einfließen lässt. Dieser Ansatz offeriert den genauesten Ansatz und insbesondere die beste visuelle Repräsentation. Allerdings ist dieser Weg durch die große Anzahl der Gebäude und die fehlende Automatisierung sowie mangelnde Auflösung der verfügbaren Daten bisher versperrt, da dies eine sehr individuelle Betrachtung eines jeden Gebäudes nach sich zieht. Aus diesen Gründen wird innerhalb dieser Forschungsarbeit ein eigenes Gebäudemodell erstellt, welches den bestmöglichen Nutzen aus den verfügbaren Daten zieht und automatisiert erstellt werden kann. In diesem Zusammenhang werden erst die vorhandenen Punktwolken mit

²Die Möglichkeiten und einige theoretische Ideen dazu wurden durch das Fraunhofer Institut aufgezeigt, siehe [23].

Hilfe der Grundrisse der Gebäude gefiltert. Diese werden anschließend unter Zuhilfenahme der detailarmen 3D Gebäudemodelle aufbereitet und unter Umständen mit zusätzlichen Punkten an den Wänden ergänzt, damit im weiteren Verlauf eine auflösungsspezifische Rekonstruktion der Gebäude stattfinden kann. Diese schließt auch, sofern durch das Laserscanning ermittelt, Dachaufbauten und Dachfenster mit ein. Die rekonstruierten Gebäude werden mittels planarer Polygone repräsentiert und werden in der anschließenden Schattenanalyse und Einstrahlungssimulation hinsichtlich ihrer Potentiale für eine Anbringung von PV-Dachanlagen ausgewertet. Beim LANUV wurde beispielsweise aus Gründen der Effizienz mit einer rasterisierten Oberfläche gearbeitet, was ebenfalls von sämtlichen weiteren Solarkatastern angewandt wird. Dies bietet allerdings jene Nachteile, welche bereits kurz in einem vorangegangenen Abschnitt diskutiert wurden und in Kapitel 5 und 6 zunehmend vertieft werden.

Für die Modellierung der Vegetation und insbesondere der Bäume wurden ebenfalls vereinfachende Annahmen getroffen. Anstelle einer detaillierten, rechenintensiven Rekonstruktion, was bedingt durch die Auflösung nicht einheitlich durchführbar ist, wurde auf eine simplifizierte Modellierung zurückgegriffen. Dahingehend wurden die Position, Höhe und der Durchmesser der Bäume ermittelt und daraus schlussfolgernd ein standardisiertes Baum-Modell erstellt, welches aus primitiven geometrischen Objekten gebaut und anschließend zur Schattenberechnung verwendet wird.

2 Dachflächen-Photovoltaik im Kontext der Energiewende

Im Kontext der Energiewende gewinnt die Photovoltaik-Technologie in Deutschland eine zunehmend größere Bedeutung. Als zweitgrößter Energieerzeuger im Sektor der erneuerbaren Energien nach der Windenergie (im Durchschnitt auf das bundesdeutsche Gebiet betrachtet), weist die PV bereits heute einen wichtigen Anteil an der Stromerzeugung aus, mit weiterhin hohem Ausbaupotential. Wie der Bericht vom Fraunhofer ISE *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland* zeigt, betrug der Anteil der Photovoltaik am Bruttostromverbrauch im Jahr 2021 lediglich 9,1% (50,6 TWh) [25]. Dabei betrug die insgesamt installierte Leistung aller PV-Anlagen in Deutschland im Jahr 2020 fast 54 GW_p.³

Um die CO₂-Reduktion bis zum Jahre 2045 zu gewährleisten, hat die Bundesregierung am 12.05.2021 ihre Klimaziele aktualisiert [25]. Ein enormer Ausbau der Photovoltaik ist unumgänglich, um eine Energieversorgung aus erneuerbaren Energien sicherzustellen. Für eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes um 90% (zum Referenzjahr 1990) bedarf es -laut modellbasierter Szenarien- eines Ausbaus der PV-Leistung um 130-650 GW_p [25]. Laut [27] erscheint ein Umfang von 400-500 GW_p als realistische, installierbare PV-Leistung.

Folgende Modellrechnung soll die Schwierigkeit der Umsetzung des Zielwertes von 500 GW_p aufzeigen: Wenn bis zum Jahr 2050 500 GW_p installierte Leistung erreicht werden soll, bedeutet dies ein jährliches Wachstum von mindestens 17 GW_p Leistung. Unter Einberechnung der bereits installierten 54 GW_p, gilt es mindestens 15 GW_p pro Jahr zu installieren. Das EEG2017 definierte allerdings nur 2,5 GW_p Zubau pro Jahr. Der Durchschnitt in den Jahren 2013-2018 lag sogar nur bei 1,9 GW_p/a. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz in der Fassung von 2021 [28] setzt einen Anteil von 65% der erneuerbaren Energien an der Brutto-Stromversorgung Deutschlands (als ein Zwischenziel für das Jahr 2030) fest. Abhängig von der Entwicklung der weiteren Säulen der EE (Windkraft Off-Shore und On-Shore) ändert sich dementsprechend die Erwartung an den PV-Ausbau. Hierbei betrachten die Szenarien aus [29] und [30] einen PV-Ausbau von mindestens 5-20 GW_p/a als notwendig. Die Agora Studie [29] postuliert dabei mindestens 5 GW_p/a Zubau für PV-Anlagen bis 2030, 4 GW_p/a On-Shore Windkraft und 20 GW_p/a statt 15 GW_p/a für Off-Shore Windkraft. Der Bundesverband Erneuerbare Energie e.v (BEE) hingegen sieht sogar vor, dass bis zum Jahr 2025 die durchschnittliche installierte Leistung pro Jahr von 5 GW_p auf 16 GW_p angehoben wird [30], um in den darauffolgenden fünf Jahren eine Erhöhung auf 20 GW_p pro Jahr bis 2030 vorzunehmen und damit einen Gesamtzubau von 205 GW_p zu erreichen [30].

Besondere Beachtung erhält die Fragestellung, wie viel Geld als Investitionen in die Errichtung und Instandhaltung von PV-Anlagen fließt. Seit dem Jahr 2000 ist die Arbeitsgruppe

³Daten des BMWi auf Basis der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) [26].

Erneuerbare Energien (AGEE) für das Monitoring der jährlichen Investitionen zuständig. Unverkennbar ist das hohe Investitionsvolumen von 96 Milliarden Euro und damit verbunden der hohe Stellenwert der PV-Technologie seit dem Beginn des Monitorings [31].

Im folgenden Kapitel liegt der Fokus hauptsächlich auf der gegenwärtigen Entwicklung der Photovoltaik, besonders der Dachflächen-PV. Die Bestandsaufnahme der Entwicklung und Trends soll das Fundament für die weitere Analyse und die abschließende Bewertung der Ergebnisse liefern. Besondere Aufmerksamkeit erhält die Situation in Deutschland im Allgemeinen und im Speziellen die aktuelle Lage in Nordrhein-Westfalen. In diesem Kontext spielen besonders die Ergebnisse des LANUVs eine wichtige Rolle, da diese einen zentralen Pfeiler und eine Vergleichsmetrik darstellen. In Kapitel 7 und 8 werden diese Ergebnisse erneut aufgegriffen und mit den eigenen Analyseergebnissen verglichen.

2.1 Studien zur Erreichung der Klimaschutzziele

Durch die hohe Relevanz, die das Thema Klimawandel in den letzten Jahrzehnten erreicht hat, wurden vermehrt Studien und Forschungsarbeiten -u.a. durch die Bundesregierung- in Auftrag gegeben. In diesem Kontext ist der Analysehorizont der Forschung, die aktuellen Trends und Entwicklungen in Deutschland auf dem Weg zur CO₂-Neutralität zu bewerten und einen Pfad zur Energiewende aufzuzeigen. Dahingehend sind die jährlichen Berichte über den gegenwärtigen Stand zur Integration der erneuerbaren Energien in Deutschland von großer Bedeutung. Diesbezüglich veröffentlicht die Bundesnetzagentur in einem nahezu jährlichen Turnus alle Zahlen und Daten mit detaillierten Informationen zum Thema Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)⁴. Die Abbildung 2.1 verdeutlicht den Verlauf der Entwicklung von Windenergie auf See, Biomasse, Wasserkraft, Solarenergie und Windenergie an Land in den letzten zwei Jahrzehnten vom Jahr 2003 bis zum Jahr 2020. Besonders die Windenergie an Land und die Solarenergie weisen eine starke Position mit hohen Anteilen an der installierten Leistung im Bereich der erneuerbaren Energien auf. Verfügbar sind zudem zahlreiche Studien, welche ständig neue Modelle und überarbeitete Szenarien verwenden. Diesen liegt das Ziel zugrunde, dass die Bundesregierung ausreichende Informationen zur Verfügung hat, um die notwendigen Gesetze zu etablieren (z. B. [33–37]).

Die Photovoltaik hat das Potential, langfristig und ökologisch sauberen Strom zu produzieren und stellt damit eine Schlüsseltechnologie der Energiewende dar. Insbesondere die Dachflächen-PV unterliegt diversen objektiven und subjektiven Hinderungsgründen, welche einem Zu- und Ausbau im Weg stehen. Beispiele können unter anderem fehlende finanzielle Mittel, ungünstige Dachausrichtung- und -neigung oder eine zu geringe Dachfläche darstellen.

Hervorzuheben ist, dass ab dem Jahr 2000 zunächst der Zubau von PV-Anlagen in Deutschland intensiviert wurde. Ab dem Jahr 2011 bis 2016 wurde ein stetiger Rückgang

⁴Die aktuellsten Daten, die auch als Basis für die folgenden Abbildungen dienen, finden sich in [32].

Entwicklung der installierten Leistung nach erneuerbaren Energieträgern 2003-2020

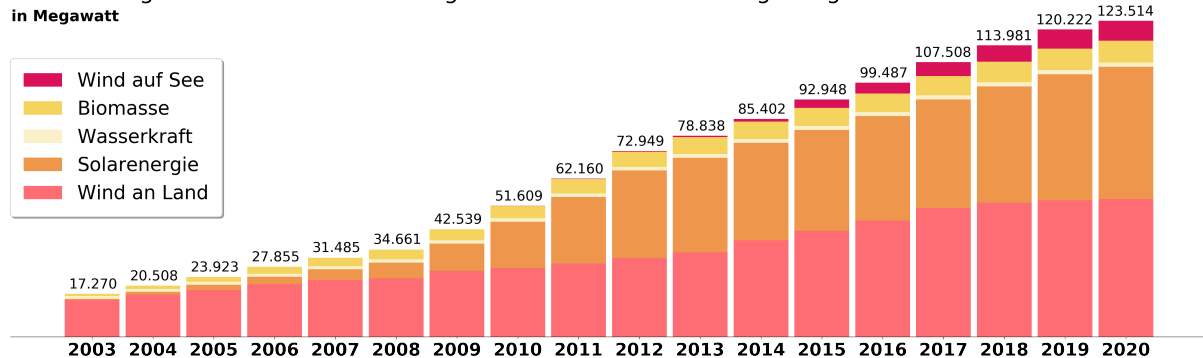


Abbildung 2.1: Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland von 2003 bis 2020. Eigene Abbildung aus den Daten der Bundesnetzagentur.

verzeichnet [38]. Seit 2016 steigen die Neuinstallationen wieder merklich an, woraus ein positiver Trend abzuleiten ist. Dem Bericht aus [38] zufolge ist ein bedeutender Anteil der Neuanlagen den Dachanlagen zuzuschreiben. Die Freiflächenanlagen verzeichneten ebenfalls einen Zuwachs, bedingt durch die Aufhebung der Ausschreibungspflicht für Anlagen unter 750 kW.

Während der Zubau von PV-Anlagen sich im Durchschnitt seit Anfang des Jahres 2000 positiv entwickelt hat, muss verzeichnet werden, dass die Einspeisevergütung, einer der essentiellen Anreize zur Anbringung von PV-Anlagen, stetig reduziert wurde und um einen erheblichen Anteil gesunken ist (vgl. Abbildung 2.2). Die EEG-Vergütung betrug im Jahr 2004 noch 57,4 ct/kWh für kleine Anlagen im Maximum und 45,7 ct/kWh im Minimum, beispielsweise für Freiflächen-Anlagen. Bis zum Jahr 2019 ist die EEG-Vergütung auf 11,11 ct/kWh für Dachanlagen im Maximum und auf 8,08 ct/kWh Minimum für Freiflächen-Anlagen gesunken [32, 39, 40].

Durch das Gesetz zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und weitere Änderungen der Rechtslage wird ein jährlicher Brutto-Zubau von 2,5 GW_p definiert [40]. Dieser Wert wurde im Jahr 2020 überschritten, was den steigenden Trend unterstreicht.

2.1.1 Potentialbegriffe und ihre Definition

Eine exakte Berechnung der zukünftigen Potentiale für jegliche Energieressourcen, ist nahezu unmöglich. Aus diesem Grund werden mit unterschiedlichen Konzepten Versuche fokussiert, realistische Potentiale zu ermitteln. In diesem Kontext gilt es das theoretische Potential und das technische Potential voneinander abzugrenzen [36]. Wirtschaftliches Potential und nicht zuletzt das realitätsnahe Erwartungspotential sind ebenso von Relevanz [41]. Die Differenzierung der unterschiedlichen Potentialbegriffe ist bedeutend für die Ermittlung der entsprechenden Werte, da die Betrachtung im Kontext einer bestimmten

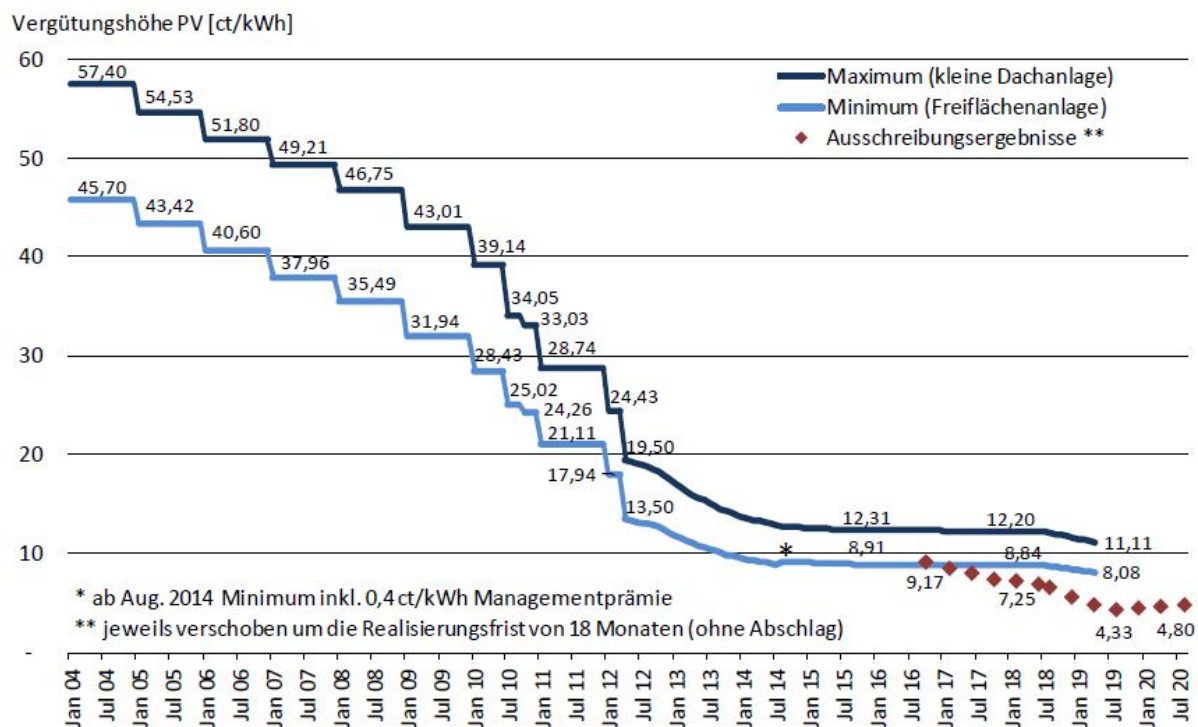


Abbildung 2.2: Entwicklung der EEG-Vergütung bis 2020 aus [25].

Potentialkategorie zu stetig genaueren Aussagen führt, jedoch gleichzeitig Unschärfe bei den interagierenden Analyseparametern erzeugt [36]. Alle Cluster von Potentialbegriffen mit ihren Verschachtelungen und Abhängigkeiten sind in Abbildung 2.3 visualisiert.

Theoretisches Potential Das theoretische Potenzial umfasst die in der Theorie, physikalisch zur Verfügung stehende gesamte Energiemenge. Dafür wird im Falle der PV beispielsweise die gesamte Fläche Deutschlands in Quadratkilometern mit der Energie der solaren Einstrahlung, welche auf die Erdoberfläche im Durchschnitt auftrifft, multipliziert [41].

Technisches Potential Das technische Potential, beispielsweise von PV-Anlagen, setzt sich aus deren Rahmenbedingungen für die technische Nutzung zusammen. Speziell für PV-Anlagen sind dies die verfügbare Fläche und der Wirkungsgrad der Module bzw. die verwendete Technologie (z. B. monokristalline oder amorphe Zellen). Die vorhandene Gesamtfläche liefert das Standortpotential. In Kombination mit dem Wirkungsgrad lässt sich das Stromerzeugungspotential berechnen [41]. Bei der Ermittlung der verfügbaren Dachfläche für PV-Dachanlagen können ebenso Faktoren, welche die Fläche vermindern könnten, berücksichtigt werden. Mit unterschiedlichen Bedingungen bzw. Berechnungs- und Datengrundlagen werden diesbezüglich unterschiedlich akkurate Ergebnisse ermittelt.



Abbildung 2.3: Verschachtelung der unterschiedlichen Potentialbegriffe und ihrer Relationen zueinander, i.A.a. [41].

Wirtschaftliches Potential Das wirtschaftliche Potential versucht jenen Anteil des technischen Potentials zu quantifizieren, welcher sich aus einer wirtschaftlichen Perspektive als nutzbar erweist. Die Ausschöpfung des kompletten technischen Potentials ist nicht in jedem Fall auch wirtschaftlich sinnvoll. So führen beispielsweise die Autoren von Agora 2016 [33] aus, dass trotz eines Potentials von bis zu 38,6 TWh/a für PV-Anlagen, unter Ausschluss von Batterie-Speicher-Nutzung und bei ausschließlicher Installation von kleinen Anlagen, ein wirtschaftliches Potential von 14,5 TWh/a erschließbar wäre [33].

Erwartungspotential Mit dem Erwartungspotential wird der Versuch unternommen, das Potential zu quantifizieren, welches die (im Falle der PV) tatsächlich zu erwartende Leistung oder Energieproduktion umfasst. Oftmals liegt dieses Potential unter dem wirtschaftlichen Potential. Dem sind keine technischen Gründe übergeordnet, sondern Probleme oder Hindernisse bei der Markteinführung der Technologie [33, 37, 41]. Das Problem liegt u.a. darin begründet, dass die Anbringung von PV-Anlagen nicht nur technische Faktoren einbezieht, sondern auch komplexe sozio-ökonomische Hintergründe hat. Fördermaßnahmen, wie beispielsweise die Einspeisevergütung, können hierbei das Erwartungspotential ansteigen lassen [41]. Erwartungspotentiale unterliegen derselben Problematik wie weitere Potentiale, welche auf Basis komplexer Zusammenhänge prognostiziert werden: Selbst für kurze Intervalle ist die Ermittlung genauer Prognosen aufwendig, da mit zunehmender Anzahl einzubeziehender Parameter und deren Interaktion miteinander die Effekte der einzelnen Parameter weniger scharf differenziert werden können [36].

2.1.2 Potentiale in Deutschland

Wie bereits in der Einführung erläutert, ist einer der Hauptgründe für den Bedarf an PV-Dachanlagen die Tatsache, dass diese eine potentielle Energiequelle darstellen, welche sich integrativ in bestehende Strukturen einbinden lassen. Der Vorteil diesbezüglich ist, dass in urbanen Bereichen mit einer hohen Gebäudedichte das Potential höchstwahrscheinlich am größten ist, vorausgesetzt die Gebäude weisen eine minimale gegenseitige Verschattung auf. Auf eine theoretisch rechnerische Annahme hin, ließe sich ein Großteil des Energiebedarfs durch die Anbringung von PV-Anlagen decken. Im Zusammenspiel mit der Windkraft könnte eine vollständige Deckung des Energiebedarfs gewährleistet werden [23]. In den vergangenen Jahrzehnten wurden diesbezüglich im deutschsprachigen Raum bereits einige Potentialanalysen in Auftrag gegeben und ausgeführt (beispielsweise Kaltschmitt [34, 35, 42, 43], Quaschnig [37, 41], IWES [44], FfE [45], BMVI [46], Fath [36], Graz [47], Sonnendach.ch [48] und weitere).

Als wesentlichen Vorteil gegenüber der Windenergie weisen PV-Dachanlagen eine relative Nähe zum Verbrauchsort des Stroms auf. Gewöhnlich verwenden Personen oder Unternehmen, welche eine PV-Dachanlage installieren, diese zur Deckung des Eigenbedarfs. Basierend darauf, dass dabei lediglich ein recht kurzer Weg zurückgelegt werden muss, sind die Übertragungsverluste gering. Bei Windkraftanlagen, insbesondere bei Offshore-Anlagen, sind die Übertragungsverluste, bedingt durch die langen Transportwege, hingegen hoch [35].

In der extensiven Meta-Analyse aus dem Abschlussbericht des Zentrums für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg lässt sich entnehmen, dass scheinbar sehr viele ungenutzte Flächen mit nutzbarem Potential für PV-Anlagen in Deutschland bestehen [38]. Für diese Aussage wurden acht große Studien der vergangenen 20 Jahre ausgewertet, deren Betrachtungsjahr teilweise bis zum Jahr 1994 zurückreicht. Seit diesem Zeitpunkt fand – primär im Bereich der Wohnhäuser – ein Transformationsprozess, sowie ein signifikanter Zubau statt. Für das bundesdeutsche Gebiet bedeutet dies in diesem Segment die Errichtung von 3,4 Millionen neuen Gebäuden seit dem Jahr 1994.⁵ Dieser Wert bezieht nicht alle Nicht-Wohngebäude ein, welche beispielsweise im Bereich der Industrie im Durchschnitt sehr große Dachflächen aufweisen.

Im Betrachtungshorizont dieser Forschungsarbeit liegen die Ergebnisse der Meta-Studie aus [38], welche sich mit den Potentialstudien in Deutschland für PV auseinandergesetzt hat. Die Tabelle 2.1 stellt dabei die Ergebnisse der Meta-Analyse bezüglich der aufgeführten Potentiale für Deutschland dar. Die Autoren haben an einigen Stellen eigene Berechnungen durchgeführt und die Annahmen gekennzeichnet.

Bezüglich der verfügbaren Dachflächenpotentiale sind insbesondere die deutlichen Diskrepanzen zwischen den einzelnen Analysen hervorzuheben. Diese bewegen sich für ganz Deutschland zwischen 742 km^2 und 11.426 km^2 bzw. 1.516 km^2 . Die überaus hohe Zahl von 11.426 km^2 resultiert vorrangig daraus, dass dieser Zahl eine eigene Berechnung auf

⁵Daten basieren auf den Zählungen des Statistischen Bundesamts [49].

Tabelle 2.1: Überblick der PV-Potentiale in Deutschland, i.A.a. [38].

Potentialstudie	Betrachtungsjahr	Dachflächen-Potential (km ²)	Potentielle Leistung (GW _p)	Potentielle Stromerzeugung (TWh/a)
Quaschning	1994	864	121 - 173	94 - 151
Quaschning	1994	1.304	(182 - 261) ^a	(142 - 228) ^a
IWES ^b	2009	965	77 - 193	–
IWES ^c	2009	1.516	121 - 303	–
Kaltschmitt	2010	742	52-119	47,5 - 108,7
Ffe	2015	–	206	–
BMVI	2015	1.050	150	142
Fath ^d	2015	(11.426) ^e	(1.713) ^e	1.627

^a Berechnung der Autoren basierend auf den Annahmen von Quaschning [37] ^b Hochrechnung von Kaltschmitt 1993 ^c Hochrechnung von Quaschning 2000 ^d bauliche Beschränkungen werden nicht berücksichtigt ^e Berechnung der Autoren. Annahmen: 950 Volllaststunden, Wirkungsgrad 15%

Basis der ermittelten potentiellen Stromerzeugung aus der Studie von Fath [36] zugrunde liegt. Der Wert für die potentielle Modulfläche erscheint nicht sonderlich realistisch, besonders in Anbetracht der Tatsache, dass die weiteren Schätzungen deutlich von diesem Wert abweichen.

Kaltschmitt 2013 [34] Angesichts der Ergebnisse von Kaltschmitt [34] basiert die Ermittlung der Flächenpotentiale auf Daten des Statistischen Bundesamts und bezieht sich auf die erfassten Wohn- und Nichtwohngebäude. Zudem werden bautechnische Einschränkungen, wie Dachaufbauten und solartechnische Eignung (wie Neigung und Ausrichtung) einbezogen, was nicht bei jeder Potentialstudie der Fall ist. Die bautechnischen Einschränkungen basieren wiederum auf einer Arbeit aus dem Jahr 2010 [50], welche Annahmen aus der Dissertation von Jörg Scheffler [51] übernimmt. Dieser ermittelte seinerseits auf Basis der statistischen Auswertungen [52], Erhebungen aus Bebauungs- und Katasterplänen [53, 54] sowie der Auswertung von städtebaulichen Entwurfsgrundlagen [55, 56], durchschnittliche Grundflächen je Wohneinheit und Dachform der Gebäude. Berücksichtigt werden muss, dass es sich um Analysen kleinerer, spezifischer Gebiete handelt, welche auf das bundesdeutsche Gebiet hochgerechnet werden. Fokussiert wird die Betrachtung diverser Parameter, wie beispielsweise die Unterscheidung zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden oder die Einstufung bezüglich einer landwirtschaftlichen Siedlung. Insgesamt erhält Kaltschmitt [34] mit seiner Analyse eine theoretisch zur Verfügung stehende Dachfläche von 4.075 km². Davon befinden sich 3.037 km² auf Wohngebäuden und 1.038 km² auf Nichtwohngebäuden. Durch bautechnische Hinderungen auf den Dächern und unter Berücksichtigung der geeigneten Ausrichtung und Neigung des Daches stehen laut Kaltschmitt noch 742 km² zur Verfügung. Davon entfallen 193 km² auf Flachdächer und 549 km² auf Schrägdächer.

Kaltschmitt 2020 [35] Die Arbeit von Reichmuth [38] hat die Ergebnisse aus Kaltschmitt 2013 [34] genutzt. Es gab allerdings im Jahr 2020 noch eine Überarbeitung der Ergebnisse, welche in [35] zu finden ist. Die Anpassungen in Relation zu [34] sind allerdings für den Bereich der PV-Erträge auf Dachflächen nur gering. Sie unterscheiden sich hauptsächlich bei den Angaben zur Gesamtfläche Deutschlands in Bezug auf das theoretische Potential und bei den Angaben zu Flächenpotentialen. In der Arbeit von Kaltschmitt aus dem Jahr 2005 wurde die Gesamtfläche Deutschlands mit 357.121 km^2 angegeben [34], wohingegen bei der Arbeit von Kaltschmitt aus dem Jahr 2020 357.582 km^2 angegeben werden [35]. Weiterhin wird eine durchschnittliche Globalstrahlung von $1.055 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ für die gesamte Region verwendet, weshalb der Unterschied im festgestellten theoretischen Energiepotential nur auf der unterschiedlichen Gesamtfläche basiert. Weitere Unterschiede lassen sich zudem beim technischen Modulflächenpotential erkennen. Dies lässt sich damit begründen, dass unterdessen in der gesamten Bundesrepublik zunehmend gebaut wurde, wodurch sich ein höherer Bestand an Wohn- und Nichtwohngebäuden erzielen ließ, welche potentielle Modulflächen darstellen könnten. In der Arbeit von Kaltschmitt aus dem Jahr 2020 [35] wird nach Auswertung der Daten vom statistischen Bundesamt angegeben, dass insgesamt 4.232 km^2 an Dachflächen in ganz Deutschland verfügbar sind. Davon entfallen 3.154 km^2 auf Wohngebäude und 1.078 km^2 auf Nichtwohngebäude. Nach Abzug solcher Flächen, welche sich aufgrund bau- oder solartechnischer Hinderungen als irrelevant erweisen, erhält Kaltschmitt im Jahr 2020 eine potentielle Modulfläche von 800 km^2 . Wie zuvor bereits erwähnt, lag der Wert 2013 noch bei insgesamt 4.075 km^2 mit einer potentiellen Modulfläche von 742 km^2 . Das Verhältnis von nutzbaren Dachflächen zu der gesamten Dachfläche ist dabei in beiden Arbeiten sehr ähnlich, wobei Kaltschmitt 2020 [35] positive Tendenzen aufzeigt.

Quaschning 2000 [41] Quaschning weist in [41] Berechnungsgrundlagen für das theoretische und das technische Potential in Deutschland aus. Als Basis für das theoretische Potential benennt er eine Flächengröße von 357.100 km^2 und eine durchschnittliche solare Einstrahlung für Deutschland von $1.064 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$. Des Weiteren werden unterschiedliche Werte beschrieben, die in der Literatur von Kleemann [57] ($1.165 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$), Staiß [58] ($1.000 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$) und Pontenagel [59] ($1.130 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$) ermittelt werden. Diese Werte stehen im Einklang mit dem von Quaschning verwendeten Wert, welcher den Durchschnitt von 80 Messstationen in Deutschland widerspiegelt [41]. Da die Diskrepanz zwischen theoretischen und realistischen Potentialen hoch ist, wird im Folgenden eine Aufschlüsselung der technischen Potentiale erfolgen, welche vor allem die verfügbaren Dachflächen fokussieren. Neben Dachflächenpotentialen analysiert Quaschning zudem weitere potentielle Flächen, da er zusätzlich Fassaden, Freiflächen und Flächen entlang von Verkehrswegen in seine technische Potentialgröße einschließt. In Anbetracht der Fokussierung dieser Dissertation auf Dachflächenpotentiale, wird lediglich dieser Aspekt der Arbeit betrachtet. Vor dem Hintergrund, dass 3D-Gebäudedaten zu dieser Zeit nicht zugänglich waren, basieren die präsentierten Ergebnisse hierbei auf statistischen Abschät-

zungen. Demnach dienen die Daten des statistischen Bundesamtes als Grundlage. Bei der Unterscheidung zwischen Schräg- und Flachdächern der angegebenen Dachflächen, verwendet Quaschnig [41] die Ermittlung von Kaltschmitt 1993 [42]. Diese Angaben bauen auf Schätzungen auf, da keine Daten zu diesen Parametern verfügbar waren. Dahingehend ist dieser Teil kritisch zu betrachten. Quaschnig erweitert jedoch die Betrachtung Kaltschmitts [42] auf die Daten des Statistischen Bundesamts von 1994. Zum Vergleich: Die Arbeit von Kaltschmitt aus dem Jahr 1993 bezieht Daten bis zum Jahr 1991 ein und weist zusätzliche Komplexität durch den Mangel einer einheitlichen Datenbasis zu dieser Zeit auf. Insgesamt ermittelt Quaschnig somit die Referenz einer insgesamt zur Verfügung stehenden Dachfläche auf Wohngebäuden von 2.345 km² (2.181 km² für Schrägdächer und 164 km² auf Flachdächern). Aufgrund von Datenmangel wurden für Nichtwohngebäude die Daten von Kaltschmitt [42] aus dem Jahr 1991 auf das Jahr 1994 hochgerechnet. Aus dieser Hochrechnung folgt, dass Nichtwohngebäude eine gesamte Dachfläche von 2.000 km² aufweisen (800 km² und Schrägdächer 1.200 km² Flachdächer).

Fraunhofer IWES Im Rahmen der Studie des Fraunhofer IWES aus dem Jahr 2012 werden zwei unterschiedliche Szenarien beleuchtet. Zunächst werden die Daten von Quaschnig [41] extrapoliert, was über eine Hochrechnung zu einem Flächenpotential von 1.516 km² führt. Das zweite Szenario beinhaltet die Verwendung der Ergebnisse von Kaltschmitt aus dem Jahr 1993 [42] zuzüglich der Ermittlung des Gebäudebestands des Jahres 2009 mittels Hochrechnung. Für diesen Fall wird ein Flächenpotential von 965 km² ausgeführt. Je nach Annahme über den durchschnittlichen Wirkungsgrad (hier zwischen 8 und 20%) der installierbaren PV-Anlagen auf diesen Flächen, wird ein Wert zwischen 77-304 GW_p an potentieller Leistung bestimmt.

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) Im Zuge der Potentialstudie [45] der FfE wird zwischen Wohngebäuden, gewerblichen Gebäuden und landwirtschaftlichen Gebäuden unterschieden. Für Analyse und Schätzung des Potentials auf Wohngebäuden wurde eine eigene Datenbank angelegt, welche auf amtlichen Statistiken basiert und Gebäudedatenbanken ausgewählter Kommunen integriert. Zusätzlich wurde eine eigene Analyse zur Ermittlung von Dachaufbauten und Dachflächenfenstern ausgeführt, welche die Selektion potentieller Dachflächen weiter verfeinern konnte. Leider finden sich keine Informationen bezüglich des Prozesses dieser Analyse bzw. der angewandten Filterung. Aufgrund der Tatsache, dass die Gebäudedaten ausgewählter Kommunen integriert wurden, liegt die Vermutung nahe, dass eine repräsentative Stichprobe ausgewählt wurde. Auf dieser Basis ließ sich das Potential für ganz Deutschland (und für jedes einzelne Bundesland) berechnen. Insgesamt kommen die Autoren somit auf 206,2 GW_p PV-Potential für ganz Deutschland in den Gebäudekategorien Wohngebäude, gewerbliche Gebäude, Industrie und landwirtschaftliche Gebäude. Das größte Potential findet sich hierbei im Rahmen der Wohngebäude. Diese bieten etwa 112,8 GW_p installierbare Leistung. Für die gewerblichen Gebäude liegt mit etwa 61,2 GW_p nur etwa die Hälfte des Potentials der

Wohngebäude vor. Bei den landwirtschaftlichen Gebäuden liegt das geschätzte Potential für PV-Anlagen bei 32,2 GW_p.

Tabelle 2.2: Dachflächenpotentiale nach [34–36, 41, 42, 46, 50]

Potentialstudie	Gesamte Dachfläche (km ²)		Wohngebäude (km ²)		Nichtwohngebäude (km ²)	
	Schrägdach	Flachdach	Schrägdach	Flachdach	Schrägdach	Flachdach
Kaltschmitt 1993 [42]	800		384		416	
	–	–	–	–	–	–
Kaltschmitt 2013 [34]	4.115		3.037		1.078	
	3.218	857	2.815	222	403	635
Kaltschmitt 2020 [35]	4.232		3.154		1.078	
	3.340	892	2.922	232	418	660
Quaschning 2000 [41]	4.345		2.345		2.000	
	2.981	1.364	2.181	164	800	1.200
PV Symposium [50]	27.634		–		–	
	–	–	–	–	–	–
BMVI [46]	1.045		–		–	
	–	–	–	–	–	–
Fath 2018 [36]	11.426 ^a		–		–	
	–	–	–	–	–	–

^a Berechnung aus [38]

Wie der Tabelle 2.2 zu entnehmen ist, variieren die ermittelten Dachflächen für Deutschland erheblich in den unterschiedlichen Potentialstudien. Dies liegt partiell an unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung, wie bereits teilweise in vorangegangenen Abschnitten aufgezeigt wurde. Als weitere Begründung dienen die differierenden Datenbasen, welche in den Arbeiten genutzt wurden. In einem Großteil der Fälle musste, aufgrund der Rechenkomplexität von Teilflächen, auf das bundesdeutsche Gebiet hochgerechnet werden. Unterschiedliche Annahmen, die für die Hochskalierung verwendet werden, können zu einer Variation der Ergebnisse führen.

2.2 Ist-Zustand und Potentiale in NRW

Die Daten zur Beschreibung des gegenwärtigen Zustands der Solarenergie in NRW wurden vorrangig der LANUV Potentialstudie aus dem Jahr 2013 und den bereitgestellten Daten auf der Internetpräsenz des LANUV [60] aus dem Jahr 2018 entnommen. Der Potentialstudie des Jahres 2013, welche eigens vom LANUV angefertigt wurde, lässt sich entnehmen, dass etwa 259,19 km² Modulfläche für PV-Anlagen auf Dachflächen zur Verfügung stehen. Davon sind 111,72 km² laut [17] in der Kategorie *sehr gut geeignet* klassifiziert, 55,2

km² in der Kategorie *gut geeignet* und 92,27 km² als *bedingt geeignet* kategorisiert. Bei den in Excel-Tabellen vorliegenden Daten zu den erneuerbaren Energien in NRW werden Unterkategorien jedoch nicht differenziert betrachtet. Somit ist lediglich bekannt, dass im Jahr 2018 ein PV-Dachflächen-Potential von 481,772 km² Modulfläche vorlag. Die vorliegende Diskrepanz von 259,19 km² Potentialfläche im Jahr 2013 und 481,772 km² im Jahr 2018 ist für einen fünfjährigen Zeitraum sehr hoch. Schlussfolgernd müssten über 200 km² Dachflächen zusätzlich errichtet worden sein. Die Ursache für diese Diskrepanz ist nicht ersichtlich. Die Vermutung liegt nahe, dass ein Teil der Unterschiede der Methodik geschuldet ist, mit welcher die Potentialstudie 2013 durchgeführt worden ist. Diesbezüglich wurde für das Landesgebiet NRW eine Unterteilung in 24 Modellgebiete vorgenommen, in welchen detaillierte Strahlungsanalysen durchgeführt wurden. Die resultierenden Potentiale wurden auf Basis des solaren Einstrahlungspotentials der Gemeinde Titz ermittelt, welche den höchsten Anteil an Einstrahlung in NRW aufweist. Die Durchführung diente der Feststellung einer maximalen oberen Schranke für die ermittelten Werte. Anschließend wurden die Ergebnisse auf ganz NRW hochgerechnet. Für die Studie aus dem Jahr 2018, welche auch als Basis für das Solarkataster NRW dient, wurde dahingegen eine gebäudeauflösende Analyse durchgeführt.

Tabelle 2.3: Übersicht der ermittelten Potentiale für die Jahre 2013 und 2018 auf Bezirksregierungsebene (zum Aufzeigen der Unterschiede, die innerhalb von fünf Jahren auftreten). Daten für das Jahr 2013 basieren auf eigenen Berechnungen auf Basis der Kreisdaten.

Region	Installierbare Modulfläche (km ²)		Installierbare Leistung (GW _p)		Möglicher Stromertrag (TWh)	
	2013	2018	2013	2018	2013	2018
Arnsberg	23,73	38	4,27	6,4	3,48	5,1
Detmold	32,17	69	5,78	11,7	4,76	9,6
Düsseldorf	45,39	99	8,17	16,7	6,84	14,4
Köln	57,35	118	10,32	19,9	8,65	17,0
Münster	33,52	60	6,03	10,1	5,00	8,3
Regionalverband Ruhr	59,96	99	10,79	16,7	8,88	13,9
Summe	252,12	482	45,36	81,4	37,61	68,4

Für den Ist-Zustand in NRW erscheint lediglich der Fachbericht vom LANUV aus dem Jahr 2013 als einzige und aktuelle Quelle in Bezug auf die Potentialauswertung als relevant. Laut [17] hat sich die Anzahl der Anlagen von 3.000 am Ende des Jahres 1999 auf über 160.000 Anlagen im Jahr 2011 erhöht. Der Bericht zeigt, dass diese Zahl lediglich 3% des eigentlichen Ausbau-Potentials widerspiegelt. Aktuelle Daten des LANUV heben für das Jahr 2020 eine Anzahl von mittlerweile 315.062 PV-Dachanlagen in NRW hervor.⁶

Die Primärenergiegewinnung in NRW der Jahre 2011 bis 2018; 2018 ist der aktuellste im LANUV verfügbare Datensatz; verzeichnet einen konstanten Anstieg der erneuerbaren Energien in NRW. Von 10,9% im Jahr 2011 auf insgesamt 17,2% im Jahr 2018. Von den 192.523 Terajoule Energie, die generiert wurden, hatte die Solarenergie einen Anteil

⁶Daten basieren auf Energiestatistik NRW [61].

von 17.743 Terajoule. Damit liegt die Solarenergie in NRW hinter den Energieträgern Windkraft und Biomasse (inklusive biogener Gase). Lediglich die Wasserkraft erzeugte weniger erneuerbare Energie in NRW.⁷

Tabelle 2.4: Entwicklung der Dachflächen-PV in NRW seit 2010 (Daten des LANUV [61]).

Jahr	Anlagen Anzahl	instal. Leistung (MW _p)	Stromertrag (GWh)	Anteil Brutto- stromer- zeugung %	Anteil Brutto- stromver- brauch %	Anteil Netto- stromver- brauch %
2010	122.392	1.995	1.771	0,9	1,2	1,5
2011	163.852	2.845	2.526	1,4	1,7	2,1
2012	193.319	3.473	3.084	1,7	2,1	2,5
2013	214.197	3.780	3.356	1,9	2,3	2,8
2014	224.889	3.933	3.492	2,0	2,3	2,8
2015	232.459	4.053	3.599	2,2	2,5	3,0
2016	240.988	4.188	3.719	2,2	2,6	3,1
2017	252.027	4.376	3.886	2,5	2,7	3,2
2018	263.598	4.651	4.130	2,7	2,9	3,4
2019	282.386	5.105	4.533	3,0	3,1	3,7
2020	315.062	5.654	5.020	3,3	3,5	4,1

Die Tabelle 2.4 zeigt einen aktuellen Anteil der durch Dachanlagen-PV generierten Energie am Bruttostromverbrauch von lediglich 3,5%, obwohl die Anzahl der Anlagen in den vergangenen 10 Jahren sich fast verdreifacht hat. Weiterführende Informationen über den genauen Ort der Installation und die jeweilige Leistung der Anlagen sind nicht vorhanden. Datenschutzbestimmungen und ein damit verbundener enormer Aufwand sind die Hindernisse bei der Datenerhebung.

Über die Analyse des LANUV hinaus liegt eine Analyse der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) [45] vor, welche eine Auswertung der PV Potentiale für ganz Deutschland durchführt und spezifisch für jedes Bundesland den entsprechenden Wert der installierbaren Leistung angibt. Somit liegt für NRW eine Aufteilung in den Kategorien *Wohnen*, *Gewerbe und Industrie* und *Landwirtschaft* vor. In dieser Analyse wurden Angaben zur potentiellen Leistung in allen Bundesländern erhoben. Die Autoren der FfE haben eine grundlegend detaillierte Analyse durchgeführt, welche alle möglichen Gebäudetypen mit einbezieht und ihre Potentiale auswertet. Diese Analyse bezieht sich allerdings auf den statistischen Gebäudebestand und rechnet keine individuellen Gebäudeformen oder andere Gegebenheiten mit ein. Für NRW wird dabei als komplettes PV-Potential

⁷Daten aus der offiziellen Statistik vom LANUV [61], aktuellster Stand 14.04.2021.

Tabelle 2.5: PV-Potentiale nach Gebäudetyp und Sektor für NRW in GW_p , i.A.a. [45].

	GW_p
Nordrhein-Westfalen	39,4
Wohnen	24
EFH	10,5
ZFH	5,3
MFH	7
Garagen	1,2
Gewerbe und Industrie	11,3
Büro & Verwaltung	3,2
Gewerbegebiete	6,6
sonstige Gebäude	1,5
Landwirtschaft	4,1
Tierhaltung	2,6
Lagerhallen	0,3
Maschinenhallen	1,2

39,4 GW_p angegeben. Damit liegt das Bundesland an der Spitze, gefolgt von Bayern mit einem Potential von 35,7 GW_p [45].

In NRW stehen dabei Wohnhäuser im Fokus, welche mit einer Leistung von 24 GW_p bereits mehr als 50% des postulierten Potentials ausmachen. Für den Sektor *Gewerbe und Industrie* wird eine potentielle Leistung von 11,3 GW_p deklariert und für den landwirtschaftlichen Sektor werden weitere 4,1 GW_p geschätzt [45]. Eine ausführliche Auflistung aller Gebäudekategorien und der übergeordneten Sektoren inklusive der dazugehörigen potentiellen Leistungen für NRW kann der Tabelle 2.5 entnommen werden.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Kapitels ließen sich die Entwicklung der Energiewende sowie die Potentiale der Photovoltaik-Technologie hervorheben und wurden detailliert diskutiert. Mit der gegenwärtigen Geschwindigkeit des Ausbaus der Photovoltaik werden die Klimaschutzziele mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erreicht werden. Zudem sind sehr unterschiedliche Angaben hinsichtlich der Potentialflächen zu verzeichnen. Daraus schlussfolgernd ist die Identifikation einer eindeutigen Prognose überaus schwierig zu realisieren. Abschließend wurde der gegenwärtige Status in NRW analysiert, indem die Ergebnisse der Potentialstudie vom LANUV (2013) diskutiert und mit aktuelleren Ergebnissen des LANUV (2018) verglichen wurden. Des Weiteren wurden zusätzlich Ergebnisse aus der Potentialanalyse

vom FfE [45] einbezogen, die zwar ihre Studie für das bundesdeutsche Gebiet ausgeführt hat, jedoch spezifisch für jedes Bundesland Werte ermittelt hat.

3 Technische Hinderungsgründe für PV-Dachanlagen

Die Anbringung von PV-Anlagen in Deutschland unterliegt neben den allgemeinen Bau-normen und dem Baurecht keinerlei gesonderten Regelungen. Auch eine spezielle Baugenehmigung bei Eigenheimen ist nicht erforderlich [62]. Die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU) hat im April 2015 einen Leitfaden zur Montage und Instandhaltung von Photovoltaikanlagen erstellt. Dieser regelt und definiert die allgemeinen Verpflichtungen des Auftraggebers (z.B. Eigenheimbesitzer) und der unterschiedlichen Auftragnehmer. Die Vielzahl der Verpflichtungen kann sich daraus ergeben, dass mehrere Unternehmen simultan an einem Dach arbeiten können. Unter anderem werden darin die Anforderungen bezüglich der Schutzmaßnahmen bei der Anbringung und Montage ausgeführt. Wird diesen Anforderungen keine Folge geleistet, so ist das Bauvorhaben nicht umsetzbar [63]. Bautechnische Aspekte sowie die individuellen Eigenschaften der Häuser nehmen eine wichtige Rolle bei der potentiellen Anbringung einer PV-Anlage ein. Sie beeinflussen maßgeblich den Erfolg oder Misserfolg des Bauvorhabens.

Im folgenden Kapitel werden die zentralen Aspekte analysiert und herausgehoben, welche im Rahmen der Anbringung von PV-Anlagen relevant sind. Im Rahmen dessen wird zunächst ermittelt, welche dieser Parameter sich für die Modellierung in der Forschungsarbeit anwenden lassen. Im Hinblick auf die Relevanz der Daten wird analysiert, welche sich verwenden bzw. ableiten lassen, um zu ermitteln welches Potential für die Anbringung von PV-Anlagen auf ein gegebenes Gebäude vorliegt. Zunächst werden die Gebäudeattribute ermittelt, welche konkrete Hindernisse bei der Anbringung darstellen können. In diesem Kontext sind insbesondere die insgesamt vorhandene Dachfläche, sowie die Dachneigung und die maximal tragbare Last des Daches von wesentlicher Bedeutung. Darüber hinaus wird zudem der Denkmalschutz der Gebäude einbezogen, da dieser die Anbringung von PV-Dachanlagen erschwert und in einem Großteil der Fälle sogar gänzlich verhindert. Als besonders relevant erweist sich hierbei, dass die Erfassung von denkmalgeschützten Gebäuden und Grundstücken (Bodendenkmäler) von jeder Kommune einzeln geregelt wird, was insbesondere für die potentielle Datenbeschaffung von Bedeutung ist. Anschließend erfolgt die Betrachtung der Brandschutz-Verordnungen in Bezug auf PV-Anlagen, sowie der damit verbundenen Regeln, welche einzuhalten sind. Es wird analysiert, welche Gesetze und Verordnungen einer Anbringung im Weg stehen. Zusätzlich wird die Frage aufgeworfen, ob es möglich ist diese Restriktion mit vorzugsweise open-source Daten analytisch zu erfassen. Schlussendlich wird die potentielle Verschattung auf den Dachflächen für diese Arbeit als wichtigster Parameter bestimmt. Folgender Abschnitt dient als einführender Überblick in die Problematik, woraufhin die detaillierte Erfassung im folgenden Kapitel vertieft besprochen wird.

3.1 Gebäudeattribute

Während sich die zentrale Fragestellung dieser Forschungsarbeit aus den Verschattungseffekten auf den Gebäudedächern ergibt, ist zudem die Analyse weiterer Faktoren von Bedeutung, welche eine Anbringung von PV-Anlagen verhindern oder erschweren. In diesem Abschnitt werden dahingehend die Faktoren rund um die Gebäudeattribute näher betrachtet und im Forschungskontext auf ihre Datenlage hin zur Anbringung von PV-Anlagen untersucht. Zudem wird der Versuch unternommen, ebenfalls die Rechtslage im Sinne des Baurechts in die Analyse zu inkludieren.

Im Rahmen der Fragestellung, wie unterschiedliche Forschungsarbeiten und Projekte eine sinnvolle Mindestgröße für ein potentiell Dach definieren, welches mit einer PV-Anlage ausgestattet werden soll, wird primär die Größe der Dachflächen fokussiert analysiert. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ebenso die Gebäudestatik in die Betrachtung einbezogen. Zusätzlich werden Aspekte um Wind- und Schneelast ebenfalls aufgezeigt und wie diese unter Umständen berücksichtigt werden können.

3.1.1 Dachfläche

Die effektiv zur Verfügung stehende Fläche kann teilweise erheblich von der theoretischen Fläche abweichen. Zudem ist von Relevanz, dass der Effekt der Verschattung nicht unterschätzt werden soll. Beobachtbar ist beispielsweise, dass in den frühen Morgenstunden ein erheblicher Verschattungseffekt auftreten kann, bedingt durch den Einfallswinkel der Sonne (vgl. Abbildung 3.1). Hierbei ist es wichtig hervorzuheben, dass Flächen anfangs nicht pauschal ausgeschlossen werden.

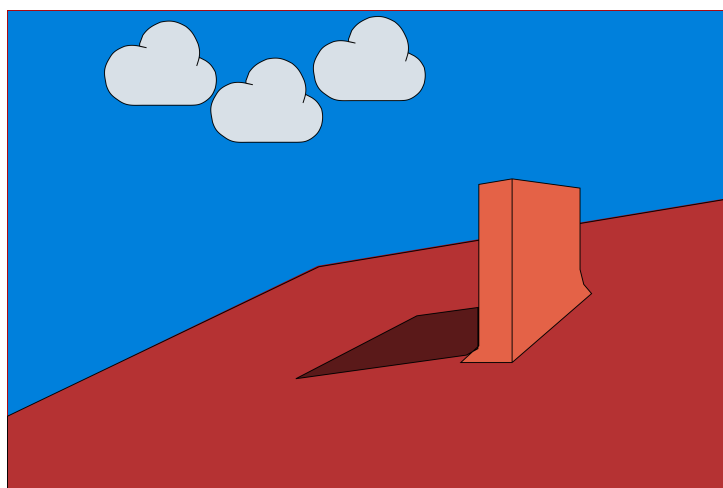


Abbildung 3.1: Verminderte, effektiv nutzbare Dachfläche durch schornsteinbedingte Verschattung auf dem Dach. Dies muss bei der Planung einer PV-Dachanlage mit berücksichtigt werden.

Berücksichtigt wird in dieser Forschungsarbeit, dass dieser Umstand zu keinem direktem Ausschluss der Fläche führt, sondern eine differenzierte, tiefergehende Analyse ansetzt. Begründet wird dies durch die Annahmen, dass

1. der Verschattungseffekt unter Umständen nur von kurzer Dauer ist und die Fläche beispielsweise lediglich für 30 Minuten verschattet vorliegt, oder
2. die Situation der erheblichen Verschattung ohnehin in einem ungünstigen Zeitraum vorliegt, wie beispielsweise in den Wintermonaten, welche für die PV nicht von Relevanz sind.

Als weiterer zentraler Faktor erweist sich die absolute Verfügbarkeit der reinen Dachfläche. In bestimmten Gebäudemodellen, und zur Reduktion der Komplexität eines Stadt-Modells, wird auch von reinen Dachflächen ausgegangen, ohne dabei die Strukturen, die sich auf den Dächern befinden, mit einzubeziehen [64]. Diese Strukturen können u.a. Antennen, Dachgauben, Schornsteine oder andere Objekte sein, welche die effektive Dachfläche reduzieren. Zumeist sind diese Strukturen zu kleinteilig, um im Rahmen von allgemeinen Laserscans erfasst werden zu können, welche für NRW beispielsweise maximal im Durchschnitt 10 Punkte pro Quadratmeter Auflösung vorweisen [65, 66]. Im Rahmen der verfügbaren Daten sind dennoch einige Strukturen durchaus erkennbar. Nichtsdestotrotz lässt sich nicht garantieren, dass alle kleinteiligen Strukturen von einem automatisierten Algorithmus zu erfassen sind. Daher ist es von besonderer Relevanz, ggf. einen Korrekturfaktor zu bestimmen oder eine Abschätzung durchzuführen, wie groß die Konfidenz für die Ermittlung der Dachaufbauten ist.

Es gilt die Frage zu klären, welche Mindestgröße einer Dachfläche vorliegen muss, damit eine Installation und somit die Einbeziehung als Potential durchgeführt werden kann. Das LANUV nimmt eine Mindestgröße von 7 m^2 pro kW_p für einen wirtschaftlichen Betrieb an. Im Grazer Solardachkataster liegt der Wert bei mindestens 15 m^2 für Flachdächer und mindestens 20 m^2 zur Eignung von geneigten Dachflächen [47]. Ein weiterer Bericht des Grazer Solardachkatasters spezifiziert hingegen eine Mindestgröße von $8\text{-}12 \text{ m}^2$, wobei für eine bessere Praxistauglichkeit Flächen unter 12 m^2 aus der Potentialanalyse ausgeschlossen wurden. Wiederum andere Potentialstudien rechnen mit den vorhandenen Flächen und nehmen abhängig von der installierten PV-Technologie einen Wert zwischen $3,6 \text{ m}^2$ und $16,7 \text{ m}^2$ pro kW_p an [37].

Bei den Annahmen in Bezug auf den Wirkungsgrad, ist die jeweils eingesetzte Technologie, amorphe oder polykristalline PV-Module, von hoher Relevanz. Bezüglich der Reduktion der Komplexität wird ein Wirkungsgrad zwischen 17-19% angenommen.

3.1.2 Dachneigung

Das Grazer Solardachkataster spezifiziert, dass sich sämtliche Flächen zwischen 80 und 90 Grad zum Boden als ausnahmslos ungeeignet erweisen. Unabhängig davon, in welcher Richtung die Neigung auftritt [47]. Dem liegt zugrunde, dass Fassadenflächen aus

der Betrachtung, von dem Großteil der Solardachkataster, ausgenommen werden. Eine Dachneigung von 80 oder 90 Grad würde unter diese Werte fallen. Neigungen zwischen 70 und 80 Grad sind wiederum nur verwendbar, wenn das Dach eine vollständige Südausrichtung vorweist. Fast universell geeignet sind Neigungen zwischen 10 und 20 Grad. Hierbei sind Dachflächen nur dann als vollständig ungeeignet zu deklarieren, wenn diese eine West- oder Ostausrichtung aufweisen. Nach Norden ausgerichtete Flächen werden im Grazer Solardachkataster ebenfalls vollständig ausgeschlossen, wohingegen das LANUV diese Flächen ebenfalls nicht pauschal ausschließt (zumindest nicht in der Analyse von 2018). Hierbei werden Flächen, die eine Mindestleistung von 650 kW_p erreichen, dennoch in die Berechnung und in die Visualisierung auf der Internetpräsenz eingeschlossen [17, 47]. Flachdächer weisen eine hohe Eignung auf, da die PV-Module in der Regel optimal ausgerichtet werden können.

3.1.3 Gebäudestatik und Dachlastreserven

Als Dachlast wird die maximale Widerstandskraft eines Daches bezeichnet [67]. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass ein Dach neben dem Eigengewicht zusätzliche Lasten wie Wind, Regen und ggf. Schnee stand halten muss. Das Forschungsprojekt PV2City aus Berlin hat im Rahmen der Forschungsarbeit für die Hauptstadt alle möglichen Hinderungsgründe bezogen auf den Ausbau von PV-Dachanlagen untersucht und in Abhängigkeit vom Schweregrad der Hinderung in drei Kategorien unterteilt [68]. Dabei stellt laut [68] die Kategorie *Hemmnis* das größte Problem für die Anbringung dar und die *Stufe* das kleinste, bzw. am einfachsten zu lösende Problem. Für das Untersuchungsgebiet Berlin wurde ermittelt, dass die Dachstatik das größte Problem, also ein Hemnis, darstellt. Aufgrund mangelnder Datengrundlage kann kein fundiertes Urteil getroffen werden. Es wird allerdings angenommen, dass insbesondere Industriehallen Probleme mit diesem Faktor haben könnten, da diese kostenoptimiert geplant und gebaut werden, wobei oftmals keine zusätzlichen Dachlastreserven eingerechnet werden [68].

Regional sind Schnee- und Windlasttabellen mit Traglastangaben in kg vorhanden. Eine grobe Schätzung vom Solaranlagenportal suggeriert, dass 20 kg/m^2 an Last berücksichtigt werden müssen, die ein Dach noch zusätzlich zu seinem Eigengewicht halten können muss [67]. Bei der Installation von PV-Anlagen muss das Gewicht der Module und der gesamten Konstruktion mit einbezogen und bedacht werden. Eine mittelgroße Anlage mit 20-30 Modulen, die jeweils ein Gewicht von ca. 15 kg haben – inklusive dem Montagegestell – kann ein Gesamtgewicht von bis zu einer halben Tonne erreichen. Während Dächer bei der Konstruktion des Gebäudes durch den Bauingenieur hinsichtlich ihrer Statik überprüft werden, wird eine zusätzliche Prüfung hinsichtlich externer Aufbauten nicht zwangsläufig durchgeführt. Das Anbringen einer PV-Anlage stellt für das Dach und insbesondere für die Unterkonstruktion eine nicht zu vernachlässigende Belastung dar [69]. Eine mangelnde Berücksichtigung bezüglich der Anforderungen an die Gebäudestatik, kann im worst-case

Szenario einen Einsturz verursachen. Dies sorgt für nicht zu unterschätzende Instandhaltungskosten und zusätzliche Kosten bei der Inbetriebnahme

Zumeist sind je nach Region Schnee- und Windlasttabellen mit Angaben dazu auffindbar, wie viel Kilogramm Gewicht mindestens als Kapazität haltbar sein müssen. Eine grobe Schätzung erlaubt die Annahme, dass 20 kg/m^2 an Last berücksichtigt werden müssen, die ein Dach noch zusätzlich zu seinem Eigengewicht halten können muss [67].

Schneelast und Schneelastzonen

Die Schneelast ist ein Faktor, der auf die Dächer wirkt, welcher klimatisch bedingt und im Normalfall nicht konstant ist. Schneefall unterliegt nur bedingt einem Zyklus. Für die Berechnung der Schneelast existieren unterschiedliche Funktionen, welche in Abhängigkeit zur geografischen Lage des betrachteten Ortes und seiner Höhe über dem Meeresspiegel stehen. Es gibt drei bis fünf Gruppen für die Einteilung in Schneelastzonen. Dahingehend zählen Orte, welche in die Gruppe eins fallen, zu denen mit der geringsten Schneelast [70].

Aus [71] und [72] geht hervor, dass die genaue Ermittlung der Schnee- und Windlast aktuell in Deutschland auf Grundlage der DIN 1055-5 erfolgt (bis zum europaweit geltenden Eurocode [70]). Dabei sieht die Spezifikation vor, dass zunächst die Grundsneelast bestimmt wird. Bei der Grundsneelast handelt es sich um jene Last, die durch den Schnee auf dem Boden erzeugt wird. Diese hängt von dem betrachteten geografischen Standort und der Höhe über dem Meeresspiegel jenes Standorts ab [72]. Um die Schneelast s auf dem Dach, welche in kN/m^2 angegeben wird, zu berechnen, wird die im vorangegangenen Schritt ermittelte Grundsneelast mit unterschiedlichen Parametern multipliziert. Diese Parameter setzen sich wie folgt zusammen:

- μ : Dieser Parameter modelliert den Einfluss der Dachgeometrie und dessen Form sowie die Effekte durch abrutschenden Schnee. Er hat zudem eine Abhängigkeit von Dachform und -neigung.
- Beiwert C_m : Dieser Parameter repräsentiert die Rauigkeit der Dachoberfläche. Er kann auch als Materialkoeffizient betrachtet werden, der vom verwendeten Material des Daches abhängt.
- Windeinfluss C_e : Dieser Parameter stellt den Einfluss des Windes auf das Wegwehen des Schnees dar. An anderen Stellen wird dieser ebenfalls als Umgebungskoeffizient bezeichnet.
- Thermischer Beiwert C_t : Dieser Parameter dient der Berücksichtigung der thermischen Verhältnisse am Standort.

Zusammenfassend lässt sich die Schneelast auf dem Dach als folgende Funktion mit den oben genannten Parametern darstellen.

$$s = \mu \cdot C_m \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_0 \quad (3.1.1)$$

Alle Parameter, bis auf s_0 , wurden bereits oben erläutert. Die Variable s_0 stellt die Schneelast auf dem Boden in kN/m^2 dar. Diesbezüglich muss erwähnt werden, dass sich die Berechnung der Schneelast s auf dem Dach und auf dem Boden s_0 auf eine horizontale Projektionsfläche beziehen [72]. Für eine korrekte Berechnung der Schneelast auf ein geneigtes Dach, mit einer Neigung von α , muss die Berechnung wie folgt erweitert werden:

$$s_{\text{Schrägdach}} = s \cdot \cos \alpha \quad (3.1.2)$$

Für die Bedeutung des Formbeiwertes muss erläutert werden, dass dieser das Verhältnis zwischen der Schneelast auf dem Dach und dem nicht bewegten Schnee auf dem Boden widerspiegelt. Die Umgebungsbedingungen und Temperatureinflüsse werden explizit ausgelagert und in separate Koeffizienten eingeteilt. Der Parameter μ steht in Abhängigkeit zur Dachform und der Dachneigung α aus der Formel 3.1.2. Konkrete Werte für den Koeffizienten μ werden dabei z.B. im Eurocode oder für Deutschland mit der ISO 4355 definiert.

Der Umgebungskoeffizient C_e modelliert Einflüsse, die durch die Umgebung auf die Dachschneelast wirken. Hervorzuheben ist hierbei, dass es sich bei diesem Koeffizienten nicht explizit um die Windeffekte handelt, sondern um die Umgebungsbeschaffung und ob diese beispielsweise eine mögliche Abschirmung gegen Windeffekte bietet. Dieser Koeffizient impliziert insbesondere Windeffekte, welche den Schnee auf dem Dach verschieben können [72]. Das kann im worst-case für eine punktuelle Vergrößerung der Schneelast auf dem Dach sorgen. Eine Illustration der Bedeutung des Umgebungskoeffizienten findet sich in Abbildung 3.2.

Die Spezifikation im Eurocode gibt für den Koeffizienten C_e einen Bereich zwischen 0,8 und 1,2 in Europa an, wobei für Deutschland der Wert 1,0 anzunehmen ist [70, 72]. In der ISO 4355 finden sich weitere Details zum Umgebungskoeffizienten und seinen möglichen Werten [72]. In dieser Norm wird auch der Einfluss der Dachgröße berücksichtigt, da beispielsweise größere Dächer die Wahrscheinlichkeit für einen Schneezutrag erhöhen.

Der Temperaturkoeffizient C_t ist relevant für die Ermittlung der effektiven Schneelast, da dieser die Verminderung der Dachlast durch die Umgebungstemperatur oder die thermischen Effekte des Gebäudes berücksichtigt. Dächer, die beispielsweise keine Dämmung vorweisen oder eine Glasdeckung besitzen, haben dadurch eine größere Verminderung. Der Eurocode [70] liefert hier ebenso einige Richtlinien, wobei für Deutschland gemäß ISO 4355 ebenfalls ein Temperaturkoeffizient von 1,0 anzunehmen ist.

Für den Materialkoeffizienten gibt es ebenfalls einige Angaben aus der ISO 4355 [72]. Dieser Parameter stellt eine Modellierung der Dachoberfläche, die eine entscheidende Rolle beim Abrutschen des Schnees hat, dar. Das bessere Abrutschen des Schnees vermindert die Last auf dem Dach wiederum. Der Eurocode schließt den Einfluss der Materialstruktur

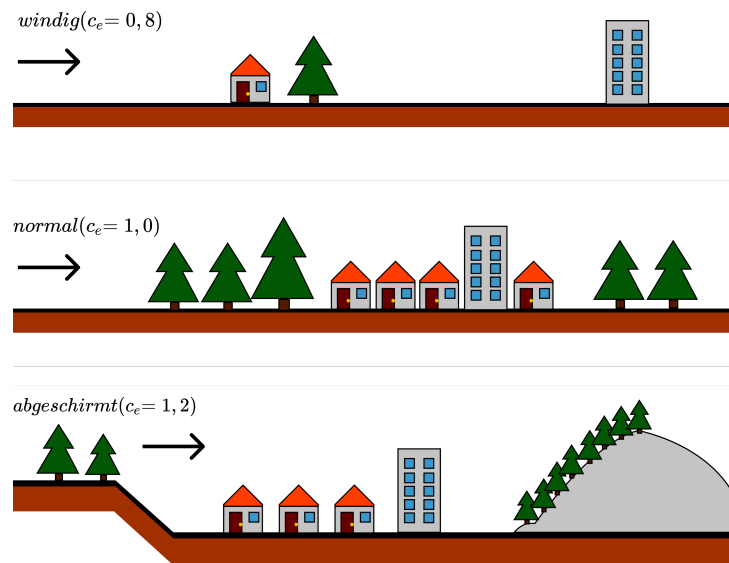


Abbildung 3.2: Bedeutung des Umgebungskoeffizienten C_e für verschiedene Geländesituationen, i.A.a. [72].

auf dem Dach im Gegensatz zu der ISO 4355 nicht mit in die Berechnung ein. In der ISO 4355 werden dafür variable Angaben zwischen 1,0 und 1,33 gemacht [72]. Dabei gelten die folgenden Regeln:

- Eine glatte Oberfläche wie beispielsweise Glas, bei welcher der Schnee sehr leicht abrutschen kann, und die einen Temperaturkoeffizienten von $C_t < 0,9$ hat, erhält einen Koeffizienten $C_m = 1,333$
- Dächer mit einer glatten Oberfläche, z.B. Glas, jedoch mit einem Temperaturkoeffizienten $C_t \geq 0,9$, erhält einen Materialkoeffizienten von $C_m = 1,2$
- Alle anderen Fälle, unabhängig vom Temperaturkoeffizienten, erhalten $C_m = 1,0$

Ein Modellierungsvorteil der ISO 4355 besteht darin, dass diese den Einfluss der Oberflächenstruktur vom Dach bereits bei der Ermittlung des Formbeiwertes μ mit berücksichtigt [72]. Dem liegt zugrunde, dass beispielsweise bei glatten Oberflächen bereits ein niedriger Neigungswinkel für das Abrutschen des Schnees ausreichend ist.

Bei der Bestimmung der Schneelast auf dem Boden, für den Parameter s_0 , wird auf die DIN EN 1991-1-3 [72], welche Deutschland in bis zu fünf Schneelastzonen unterteilt, zurückgegriffen. Eine visuelle Darstellung der Zonen in Deutschland findet sich in Abbildung 3.3. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Region NRW hauptsächlich in die Zonen 1, 2 und 2a fällt. Es gelten für die Berechnung der unterschiedlichen Zonen die Funktionen aus der Definition 3.1.3 [72].

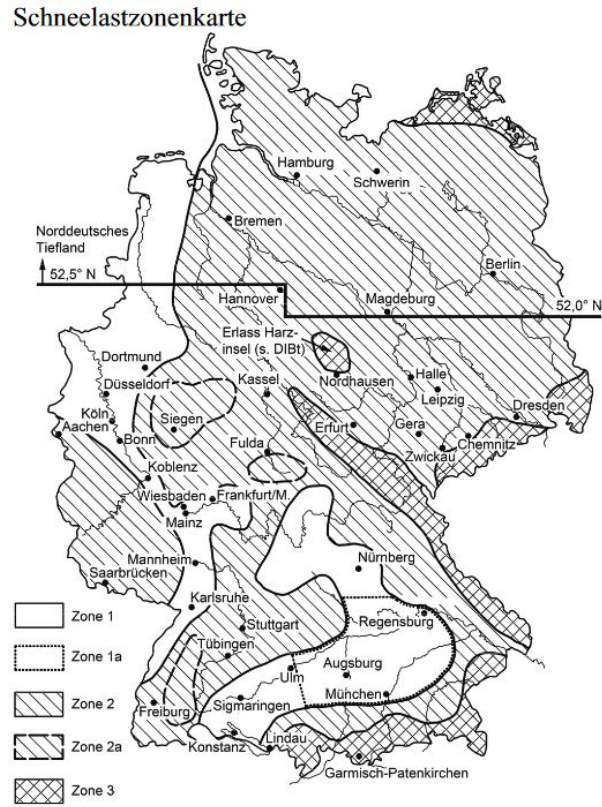


Abbildung 3.3: Karte mit Übersicht der Schneelastzonen Deutschlands, gemäß DIN 1055-3 Norm. Abbildung aus [72].

$$\begin{aligned}
 \text{Zone 1} \quad s_0 &= 0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \\
 \text{Zone 1a} \quad s_0 &= 1,25 \cdot \left(0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \right) \\
 \text{Zone 2} \quad s_0 &= 0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \\
 \text{Zone 2a} \quad s_0 &= 1,25 \cdot \left(0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \right) \\
 \text{Zone 3} \quad s_0 &= 0,31 + 2,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2
 \end{aligned} \tag{3.1.3}$$

Die Schneelast auf dem Dach (s) wird, wie bereits in Gleichung 3.1.1 dargestellt, aus der Schneelast am Boden (s_0) berechnet, indem der Schneelastwert vom Boden mit den Koef-

fizienten für die Umgebung, das Dachflächenmaterial, die Temperatur und die Dachform multipliziert wird.

Windlastzonen

Äquivalent zu den Schneelastzonen gibt es auch definierte Windlastzonen. In der Vergangenheit wurde die Windlast über die eigens in Deutschland geltende Norm *DIN 1055, Teil 4: Windlasten* [73] geregelt, ist aber mittlerweile durch die europäische Norm der Eurocodes abgelöst, welche über nationale Anhänge die spezifische Situation eines jeden EU-Landes regelt. Demnach gilt in Deutschland mittlerweile der Eurocode 1 als DIN EN 1991-1-4:2010-12 sowie DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 als nationaler Anhang [74]. Analog zur Schneelast ist Deutschland in vier Windlastzonen unterteilt, welche dazu dienen die Windgeschwindigkeiten anhand der regionalen Differenzen zu modellieren. Das Bundesland Nordrhein-Westfalen fällt dabei in Teilen in die Windzone 1 und 2 (vgl. Abbildung 3.4 und Tabelle 3.1).

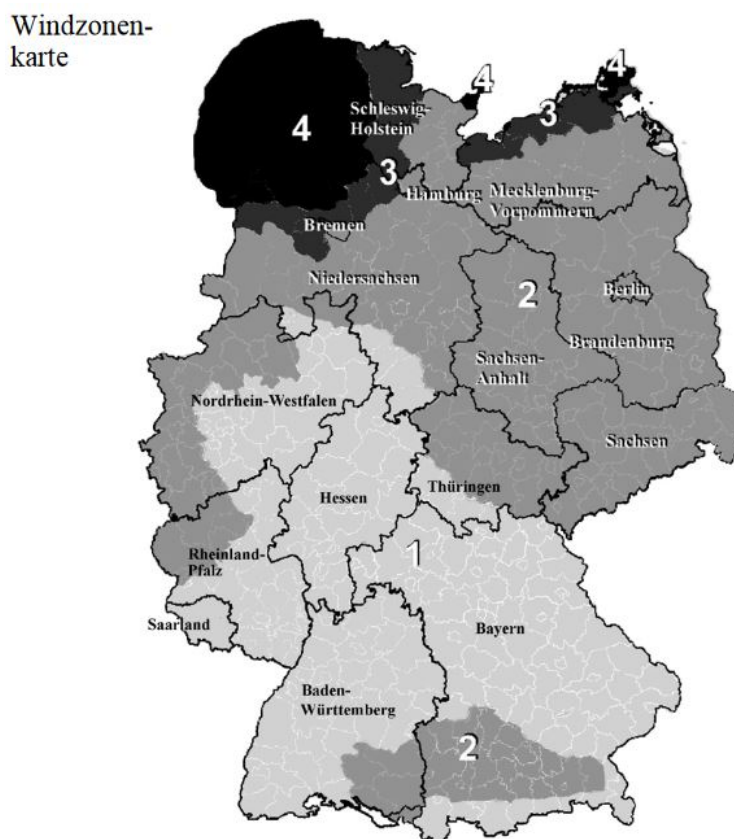


Abbildung 3.4: Deutschlandkarte mit Markierungen der Windlastzonen. Abbildung aus [74].

Für die Ermittlung der Windlast auf eine Dachfläche müsste gemäß Definition in [74] der **globale Druckbeiwert** ermittelt werden, welcher die Belastung durch Windeinwir-

Tabelle 3.1: Definitionen der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ und des Basisgeschwindigkeitsdrucks $q_{b,0}$ nach Windlastzone. Werte aus [74].

Windzone	$v_{b,0}$ in m/s	$q_{b,0}$ in kN/m ²
1	22,5	0,32
2	25,0	0,39
3	27,5	0,47
4	30,0	0,56

kung auf eine Fläche von mehr als 10 m² definiert. Dieser ist abhängig von der konkreten Flächengröße sowie der Gebäudeform, der Windlastzone, der Basisgeschwindigkeit v_b (siehe Gleichung 3.1.4), des Basisgeschwindigkeitsdrucks q_b (siehe Gleichung 3.1.5) und der Windgeschwindigkeit in einer Windbö (hierbei werden Mittelwerte gebildet bei Böen von zwei bis vier Sekunden).

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (3.1.4)$$

wobei

$v_{b,0}$	Basisgeschwindigkeit nach Windlastzonen (siehe Abbildung 3.4 und Tabelle 3.1)
c_{dir}	Richtungsfaktor, gemäß nationalem Anhang für Deutschland beträgt der Wert 1,0
c_{season}	Jahreszeitenbeiwert, gemäß nationalem Anhang für Deutschland beträgt der Wert 1,0

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot 10^{-3} \quad (3.1.5)$$

wobei

v_b	Basisgeschwindigkeit in m/s (nach Gleichung 3.1.4)
ρ	Dichte der Luft in kg/m ³
q_b	Basisgeschwindigkeitsdruck in kN/m ²

3.2 Denkmalschutz

Denkmalschutz stellt einen besonderen Hinderungsgrund für die Anbringung von PV-Dachanlagen dar. Bei vorliegendem Denkmalschutz können geeignete Gebäude oder ganze Stadtbereiche aufgrund der rechtlichen Lage von der potentiellen Anbringung einer PV-Dachanlage ausgeschlossen werden. In NRW gibt es derzeit rund 82.000 Gebäude [75], die unter Denkmalschutz nach § 2 Abs. 1 DSchG NRW stehen [75]. Bei einer gesamten Gebäudedanzahl von über 10,02 Millionen, beträgt der Anteil aller denkmalgeschützten Gebäude

ca. 0,82%. Im gesamten Analysespektrum fällt der Denkmalschutz quantitativ, was die konkrete Anzahl an betroffenen Gebäuden angeht, nicht signifikant ins Gewicht. Nichtsdestotrotz stellt dieser einen Faktor dar, welcher bei der Planung involviert werden sollte. Dahingehend wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit der Faktor, unter Verwendung von open-source Daten, grundlegend in die Analyse integriert.

Durch die umfangreiche Vorarbeit von `denkmal.nrw` konnten die Koordinaten und teilweise sogar die Adressen der gemeldeten Baudenkmäler gesichert werden. Insgesamt waren somit über 28.000 Datenpunkte (ca. 0,28% aller Gebäude) vorhanden. Zukünftige Analysen können mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine höhere Anzahl an Datenpunkten zurückgreifen. Vorausgesetzt die Meldeschnittstelle wird universell sein und über das INSPIRE [76] Portal für NRW zur Verfügung stehen.

3.3 Brandschutz

Eine Annahme ist, dass PV-Anlagen auf Dächern zu einem erhöhten Brandrisiko führen könnten [77]. Dahingehend ist es von Relevanz den Faktor Brandschutz und Brandschutzsicherheit bei der Planung zur Installation von PV-Dachanlagen zu beachten. PV-Anlagen stellen bei Bränden eine ernsthafte Gefährdung für die Eigentümer dar. Sollte die Brandursache auf eine PV-Anlage zurückzuführen sein, sind besonders die Einsatzkräfte gefährdet, die für die Löschung des Brandes zuständig sind. Denn selbst bei geringer solarer Einstrahlung weist eine Anlage Spannung auf, welche Einsatzkräfte tödlich verletzen kann [78].

Eine umfassende Studie des Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Kooperation mit dem TÜV hat ergeben, dass bei ca. der Hälfte der Brände in Zusammenhang mit den PV-Anlagen, die Anlagen die Brandursache darstellen. In diesem Kontext waren aller Voraussicht nach in zwei Drittel der Fälle Fehler bei der Planung und Installation die Hauptursache [79].

Ein weiterer Hinderungsgrund aus Brandschutz-Gründen ist in der Landesbauordnung von NRW vorzufinden. Diese regelt einen Mindestabstand von 1,25 Metern der PV-Module zum Dach des Nachbargebäudes [80]. Dies ist bei der Installation auf den Dächern von Reihenhäusern von besonderer Relevanz, da die ohnehin schmalen Dächer dadurch in Ihrer möglichen Fläche zusätzlich eingeschränkt werden. Dieser Aspekt wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht berücksichtigt, da vor der aktuellen Dringlichkeit der Energiewende eine zeitnahe Aktualisierung der Landesbauordnung angenommen wird.

3.4 Verschattung

Die Frage nach dem Einfluss der Verschattung als Parameter für die Hinderung der Anbringung von PV-Anlagen auf Dachflächen spielt eine zentrale Rolle in dieser Forschungs-

arbeit. In diesem Abschnitt folgt eine kurze Erläuterung der Faktoren, welche in Kapitel 4 einer tiefergehenden Analyse unterliegen. Hintergrund ist die Erklärung aller theoretischen und praktischen Verschattungsgrundlagen. In frei zugänglichen Solardachkatastern, insbesondere in dem vom LANUV, wurde die Verschattung über Sonnenbahndiagramme und teilweise mittels Raytracing in besonderen Situationen ermittelt. Besonders das Raytracing ist rechnerisch sehr kosten- und zeitintensiv [81].

Der Versuch die Frage zu beantworten, wie viele Flächen aufgrund von Verschattungseffekten aus dem Raster fallen, endet darin, dass keine quantitative Aussage darüber getroffen werden kann. In der Potentialstudie vom LANUV [17] wird keine fundierte Aussage darüber getroffen, welcher absolute Anteil an Dachflächen durch den Umstand der Verschattung nicht verwendbar ist. Der Studie ist in diesem Kontext lediglich die Information zu entnehmen, dass Flächen, die mehr als 20% verschattet sind, ausgeschlossen werden. Unglücklicherweise können daraus keine zentralen Informationen abgeleitet werden, ob beispielsweise bei einem Ausschluss die gesamte Fläche als unbrauchbar eingestuft wird oder ob eine Dachfläche, welche dennoch groß genug ist, weiterhin in die Kalkulation einfließt.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das Grazer Solardachkataster. Die Verschattung wird zu bestimmten Uhrzeiten an bestimmten Tagen ermittelt. Darauf aufbauend werden Dachflächen, welche eine zu kleine Fläche bieten, ausgeschlossen. Der Prozess läuft wie folgt ab: die Verschattung wird jeweils um die Uhrzeiten 10:00 Uhr, 12:00 Uhr, und 14:00 Uhr für die Tage des 1. März berechnet. Wenn die untersuchte Dachfläche zu einem genannten Zeitpunkt einen (Teil)Schatten aufweist, wird dieser Teil von der Dachfläche subtrahiert. Eine visuelle Darstellung ist der Abbildung 3.5 zu entnehmen. Das erste Bild zeigt den Schatten am 1. März um 10:00 Uhr, das zweite Bild um 12:00 Uhr und das dritte Bild um 14:00 Uhr. Das letzte Bild repräsentiert die resultierenden schattenfreien Flächen in hellgrün.

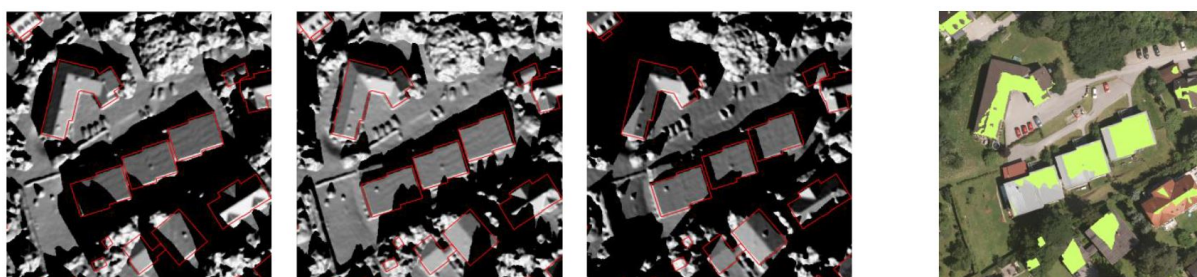


Abbildung 3.5: Prozess der Schattenanalyse des Solardachkatasters in Graz. Abbildung aus [47].

Bei dem dritten Solardachkataster, dem der Steiermark [82], welches hier kurz betrachtet wird, ist eine vergleichbare Vorgehensweise zu erkennen. Ebenfalls wird die Verschattung, wie beim Grazer Solardachkataster, zu den drei Kern-Uhrzeiten berechnet und nur schattenfreie Flächen in die weitere Verarbeitung eingebunden. Eine quantitative Auswertung

ist auch diesem Solardachkataster nicht zu entnehmen, wie genau die Zusammenhänge hergestellt und welche Faktoren den Schatten explizit verursachen. Dies kann allerdings auch eine Konsequenz aus dem gewählten Verfahren sein und der Arbeit mit Rasterdaten resultieren.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Betrachtung auf diverse technische Hinderungsgründe für die Anbringung von PV-Dachanlagen fokussiert und diskutiert. In diesem Kontext wurden die relevanten Datensätze und Möglichkeiten zur Einbindung in ein Prediktionsmodell aufgeführt. Neben den elementaren Hinderungsgründen Ausrichtung und Neigung der Dachflächen ist ein weiterer fundamentaler Faktor die Verschattung ebendieser Flächen. Verschattungseffekte wurden von den gängigen Solarkatastern nicht fundiert untersucht. Dahingehend wird im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit der Fokus auf die detailgetreue Analyse von Verschattungseffekten gelegt. Zudem stellt der Denkmalschutz ebenfalls einen Faktor dar, welcher in die Planung einbezogen werden kann. Für diesen Faktor liegen ebenso öffentlich zugängliche Daten vor.

4 Schattenentstehung in der Theorie und Praxis

Die Schattenentstehung hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Diese haben eine unterschiedlich gewichtete Relevanz und beeinflussen in ungleichem Ausmaß die Intensität und Position des Schattens. Dabei spielen Grundparameter wie die geografische Lage des zu untersuchenden Standortes, das Datum sowie die Uhrzeit die entscheidende Rolle. Aus diesen drei Variablen lassen sich alle weiteren Parameter ableiten. Im Fokus stehen demnach in diesem Kapitel zunächst die theoretischen Aspekte sowie die mathematischen Grundlagen der geometrischen Berechnung von Schattenpolygonen. Im Anschluss werden unterschiedliche Methoden und durchgeführte Forschungsprojekte benannt und erläutert, in denen die Verschattung von Dachflächen untersucht wird. Darauf folgend wird der Zusammenhang mit der solaren Einstrahlungsenergie ausgeführt und ein Bezug zu verschattungsbedingten Strahlungseinbußen hergestellt.

Der Schattenentstehung können diverse natürliche Gründe zugrunde liegen. Wolken können bestimmte Areale für einen Zeitraum verdecken und die Strahlungsintensität der Sonne reduzieren. An dieser Stelle soll hervorgehoben werden, dass im Rahmen dieser Forschungsarbeit komplexe und unvorhersehbare Verschattungsereignisse nicht in den Algorithmus eingearbeitet werden, da diese schwierig bis unmöglich zu quantifizieren sind. Für die Ermittlung der realistischen PV-Leistung sind die Ereignisse jedoch von hoher Relevanz. Aufgrund dessen findet zumindest eine theoretische Betrachtung in diesem Kapitel statt. Es werden zudem grundlegende Zusammenhänge der gegenwärtig etablierten komplexen Bebauungsstruktur in urbanen Gebieten des Bundeslandes NRW und damit repräsentativ für die Bundesrepublik Deutschland analysiert, wodurch sich aufzeigen lässt, dass mit einer erhöhten Verfügbarkeit von Dachflächen keine zwangsläufige Erhöhung von geeigneten Flächen für PV-Module einhergeht.

Durch gegenseitige Verschattung und Dachaufbauten entstehen diverse Verschattungsarten. Diese werden eigenen Kategorien zugeordnet um eine Integration in die Analyse zu vereinfachen. Von zentraler Bedeutung ist der jeweilige Einfluss auf die Flächenverminderung, sowie die daraus ableitbaren Lösungsansätze, mit dem Ziel bestimmte Flächen dennoch als nutzbar einstufen zu können.

Der letzte Teil beinhaltet das Einstrahlungspotential. Hierbei werden Grundlagen der unterschiedlichen Modelle dargelegt. Dieser Abschnitt wurde integriert, da die Strahlung auf verschatteten Flächen eine verminderte Intensität aufweist und die (in Reihe) geschalteten Module der Solaranlagen durch die Spannungsminderung ineffizient arbeiten lässt [20]. Dies geht mit einem verminderten Energieertrag durch Verschattung auf den Solarmodulen einher. Des Weiteren bedarf es bei der solaren Einstrahlungsenergie der Unterscheidung zwischen diffuser und direkter Strahlung, welche zusammen die Gesamtheit der auftreffenden Einstrahlungsenergie (auch Globalstrahlung genannt) ergeben [83]. Für die globale Strahlung werden empirische Messwerte verwendet, welche für Deutschland

vom Deutschen Wetterdienst ermittelt und als öffentlich zugängliche Datensätze verwaltet werden. Von besonderer Relevanz ist die Höhe des Anteils diffuser Strahlung an der Globalstrahlung, da die Messwerte für horizontal liegende Flächen ermittelt werden und für geneigte Flächen eine verminderte Strahlung vorliegt [20] und nachträglich berechnet werden muss [84]. Die diffuse Strahlung ist der Anteil auftreffender Strahlung, welche aufgrund von Reflektion auf der Erdoberfläche oder beispielsweise Diffusion der direkten Strahlung durch Wolken oder Nebel auftritt [20, 35]. In Deutschland macht die diffuse Strahlung einen großen Anteil aus, weshalb sie bei der Berechnung der Einstrahlungsenergie auf geneigte Flächen einbezogen werden [17, 20, 85].

Der Literatur sind Modelle zu entnehmen, welche den Anteil der diffusen Strahlung berechnen und die Neigung der Referenzfläche dabei mit einbeziehen. In Kombination mit den standortabhängigen gemessenen Strahlungswerten kann somit eine realitätsnahe Ermittlung für die auftreffende Strahlung auf den geneigten Modulen durchgeführt werden. Unter allen existierenden Modellen für die Umrechnung der Strahlung auf geneigte Flächen weist das anisotrope Perez-Modell die höchste Genauigkeit auf [17, 20], weshalb dieses ebenfalls im Rahmen dieser Forschungsarbeit verwendet wird. Durch den hohen Anteil diffuser Strahlung in Deutschland ist es essentiell ein anisotropes Strahlungsmodell zu verwenden.

4.1 Physikalische Parameter von Verschattung

Verschattungen können in eine von zwei Kategorien fallen. Im ersten Fall bezeichnet der Schatten die unbeleuchtete Seite eines Objektes. Dieser wird als Eigenschatten oder Körperschatten bezeichnet. Der zweite Fall bezeichnet die mittels einer Lichtquelle erzeugte Projektion eines Gegenstands auf weitere Gegenstände oder Ebenen [86]. Die Anzahl und Ausdehnung der Lichtquellen erzeugen dabei entweder einen Kernschatten oder einen Halbschatten (vgl. Abbildung 4.1). In diversen Quellen ist der Ausdruck Mischschatten aufzufinden, wobei dieser wesentlich seltener unterschieden wird [87]. Hauptsächlich findet eine Unterscheidung zwischen Kern- und Halbschatten statt. Der Kernschatten ist komplett unbeleuchtet und Halbschatten treten nur dann auf, wenn mindestens zwei (punktförmige) Lichtquellen auf ein Objekt scheinen. Der Halbschatten ist im Vergleich zum Kernschatten weniger dunkel, da er von einem Teil der Lichtquellen beleuchtet wird (siehe Abbildung 4.1).

Ebenfalls gibt es für den unbeleuchteten Rand des Schattens eine Bezeichnung, welcher als Hell-Dunkel-Grenze oder Schattengrenze bezeichnet wird. In der Astronomie und Meteorologie benennt man diesen Teil, beispielsweise in Bezug auf die Erde, Terminator oder Tag-Nacht-Grenze [86]. Es besteht durchaus die Möglichkeit, dass auf das Untersuchungsobjekt dieser Arbeit, die Dachfläche, auch Kern- und Halbschatten geworfen werden. Die Unterscheidung wird allerdings nicht in die Ermittlung der Dachflächenpotentiale einkalkuliert, da der Rechenaufwand unproportional hoch wäre und höchstwahrscheinlich keinen

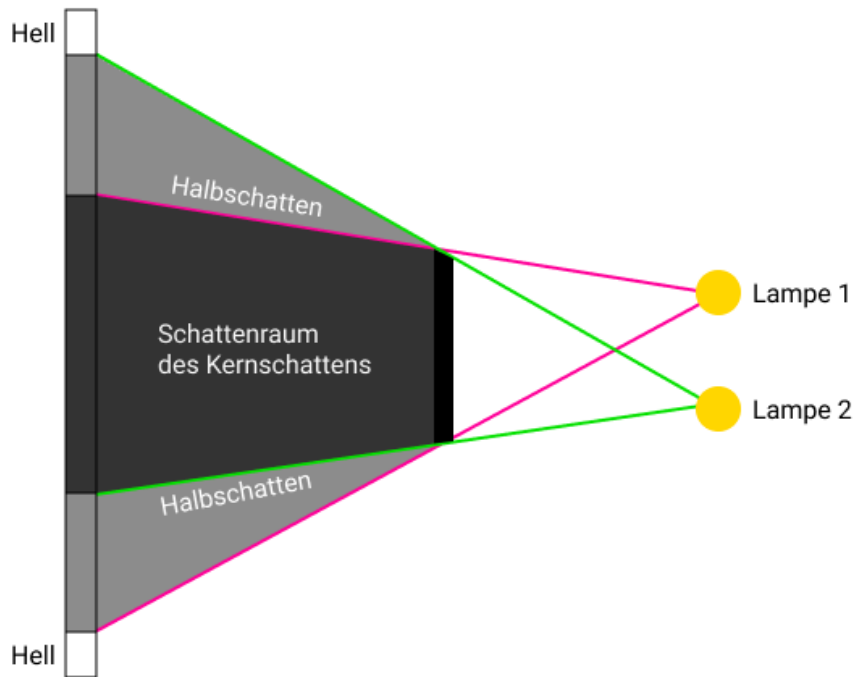


Abbildung 4.1: Darstellung von Kernschatten und Halbschatten, erzeugt durch zwei punktförmige Lichtquellen und ein rechteckiges Hindernis, i.A.a. [88].

Mehrwert für die Ergebnisse liefern würde. Die Behauptung wird dadurch gestützt, dass Halbschatten durch den Einfall von Licht auf die Schattenfläche aus einer anderen Richtung gebildet werden und somit nicht trivial zu quantifizieren sind. Es kommt dabei die Frage auf, wie die Intensität von Verschattung in diesem Kontext gemessen und numerisch dargestellt werden soll und inwiefern diese Werte korrekt sind. Die Einbettung der Unterscheidung zwischen Halbschatten und Kernschatten führt somit einen Aspekt ein, welcher eine hohe Unschärfe beinhaltet und potentiell keinen nennenswerten Mehrwert liefert. Zudem würde die Unterscheidung von Kern- und Halbschatten den Grad der Komplexität erhöhen, aufgrund der Fragestellung inwiefern ein weniger intensiver Schatten den Output der Solarmodule vermindert und wie dies automatisiert berücksichtigt werden kann, ohne eine eigene Versuchsreihe durchzuführen [20]. Dahingehend wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit die Annahme getroffen, dass jegliche auf Dachflächen anfallende Schatten, Kernschatten sind. Wenn eine Lichtquelle, wie beispielsweise die Sonne, sehr ausgedehnt ist, dann tritt ein unscharfer Übergangsschatten auf (siehe Abbildung 4.2). Eine Erklärung liefert die Veranschaulichung, dass die ausgedehnte Lichtquelle aus unendlich vielen einzelnen Lichtquellen besteht, die dicht beieinander stehen. Daraus folgend entsteht der nahtlose Übergang zwischen dem dunklen Kernschatten und dem helleren Halbschatten. Der Bereich des fließenden Übergangs wird dahingehend als Übergangsschatten bezeichnet [89]. Dieser findet bei der Analyse ebenfalls keine Berücksichtigung, da die Sonne als

eine punktförmige Lichtquelle modelliert wird, um ausschließlich Polygone in Kernschattenform zu erzeugen.

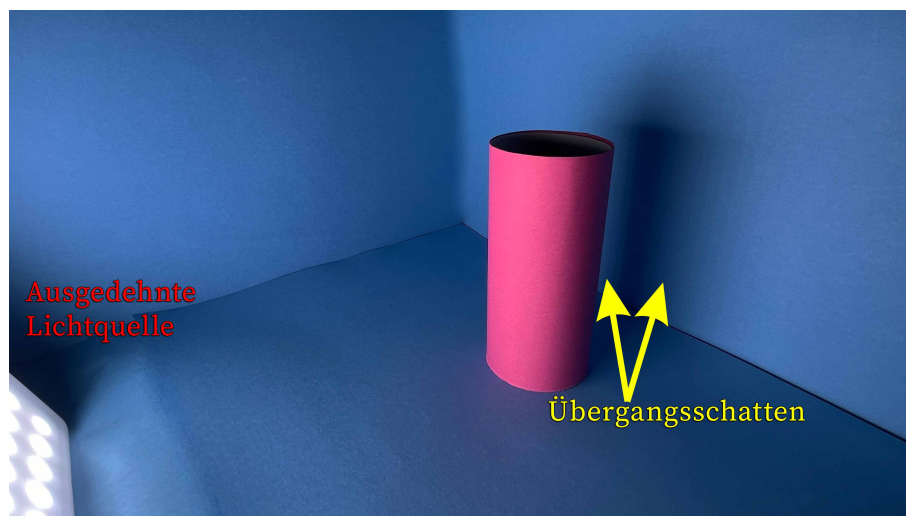


Abbildung 4.2: Fließender Übergang von Halbschatten zu Kernschatten, i.A.a. [88].

Der Eigenschatten eines Gebäudes, ist jener Schatten, welcher das Gebäude auf sich selbst und durch sich selbst verursacht. Demzufolge stellt beispielsweise die verschattete Seitenfläche eines Gebäudes einen Eigenschatten dar. Dies würde der Kategorie “Fassadenverschattung” zugeordnet werden, welche ebenfalls nicht im Betrachtungshorizont dieser Arbeit liegt. Wichtig ist hervorzuheben, dass dieser Schatten nicht durch ein anderes Gebäude oder Vegetation entsteht, sondern der “natürliche” Eigenschatten des Gebäudes ist. Zusätzlich kann dennoch ein Schatten auf dieselbe Seitenfläche durch ein anderes Gebäude oder einen Baum geworfen werden.

Die Gesetze der geometrischen Optik spielen eine entscheidende Rolle. In diesem Kontext werden Lichtstrahlen vereinfacht dargestellt und als geradlinig verlaufende Strahlen betrachtet, ohne die komplexen Zusammenhänge, die beispielsweise durch quantenphysikalische Effekte erzeugt werden, einzubeziehen [86]. Daraus entwickelte sich beispielsweise die Raytracing Technik aus der Computergrafik, welche ebenfalls in Kapitel 6 detailliert behandelt wird.

Als Schattenraum wird der Raum zwischen Eigenschatten des Körpers und des geworfenen Schattens bezeichnet. Durch den konischen Verlauf von der Lichtquelle aus betrachtet, ist die Projektion des Schattens je nach Entfernung der Lichtquelle deutlich größer als das Schatten werfende Objekt. Der geworfene Schatten wird größer, wenn er näher an der Lichtquelle ist und kleiner, je weiter er von dieser entfernt ist. Die konische Form des Schattens ändert sich nur bei einer Lichtquelle, welche unendlich weit entfernt ist. In diesem Fall werden die Schattenlinien parallel. Da im Rahmen der hier vorliegenden Analyse Berechnungen mit Bezugspunkt auf der Erdoberfläche durchgeführt werden, kann die Sonne als Lichtquelle für die Verschattungsberechnung als eine unendlich weit entfernte Lichtquelle angenommen werden.

In der darstellenden Geometrie werden Schatten von räumlichen Objekten (Haus, Turm, Brücke usw.) verwendet, um Bilder attraktiver zu gestalten, oder um Beleuchtungs- und Belichtungsprobleme in der Planungsphase zu erkennen. Das Licht für eine Schattenkonstruktion kann entweder parallel fallen, wie beispielsweise beim Sonnenlicht, oder zentral vorliegen, wie bei einer gewöhnlichen Lampe, welche direkt auf ein bestimmtes Objekt gerichtet ist. In diesen Fällen gibt es Szenarien, für welche mit relativ wenig Aufwand eine Schattenkonstruktion generiert werden kann. Komplizierte Fälle werden mit Hilfe der Computertechnik analysiert, da moderne Bildsynthese (Rendering) ohnehin auf Strahlenverfolgung (Raytracing) beruht.

Als Kernschatten, auch *Umbra* genannt, wird der Bereich hinter einem angestrahlten Objekt bezeichnet, welcher unbeleuchtet ist. Die Silhouette eines Schattens ist im Normalfall nicht deutlich abgegrenzt, da reale Lichtquellen für gewöhnlich nicht punktförmig sind und eine bestimmte räumliche Ausdehnung aufweisen. Dem liegt zugrunde, dass am Rande des Schattens Teile der Lichtquelle zwar verdeckt, andere Bereiche der Lichtquelle jedoch noch sichtbar sind (Halbschatten). Bei einer kleinen Lichtquelle, welche hinreichend weit entfernt positioniert ist, entsteht innerhalb des Schattens ein Bereich, welcher die Lichtquelle gänzlich verdeckt. Dieser Teil ist der Bereich des Kernschattens. Dessen Projektionslinien erstrecken sich konisch aufeinander zu, wenn die Lichtquelle größer ist als das Schatten werfende Objekt. Im Falle eines Runden Objekts, welches den Schatten wirft, entsteht aus den Projektionslinien ein Kegel.

Der Halbschatten, auch Penumbra genannt, beschreibt das Areal hinter einem angeleuchteten Objekt, welcher von mindestens einer Lichtquelle aus dem Umfeld bestrahlt wird. Mit lediglich einer einzigen Punktlichtquelle hinter einem schattenwerfenden Objekt ist somit kein hinreichendes Kriterium geschaffen, um einen Halbschatten hervorzurufen. Erst das Vorhandensein von mindestens zwei Punktlichtquellen kann einen Kernschatten erzeugen. Zeitgleich werden um diesen herum eine maximale Anzahl von Halbschatten erzeugt, wie Lichtquellen vorhanden sind. Der häufigste Entstehungsgrund für Halbschattenflächen sind allerdings große, ausgedehnte Lichtquellen.

Abweichend vom oben benannten gibt es zudem, durch diverse optische Effekte, im Falle einer Lichtquelle einen Halbschatten. Brechungen und Reflexionen spielen eine erhebliche Rolle dabei, dass der Schatten auf der Erde nie völlig „lichtlos“ ist. Je diffuser die Beleuchtung durch die Umgebung, desto „weicher“ der Schatten. Dahingehend liegt bei einer diffus-wolkigen Wetterlage nahezu kein Schlagschatten vor.

Sonnenposition und ihre Berechnung

Die Richtung der Sonnenstrahlen wird durch die Sonnenhöhe γ (auch Elevation genannt) und den Azimutwinkel α definiert [20, 90] (vgl. Abbildung 4.3). Die Sonnenhöhe ist für die Verschattung von Relevanz, bspw. hat ein kleiner Winkel einen großen Einfluss darauf welche Länge der Schatten aufweist und wie viele Gebäude dementsprechend von einem Schatten betroffen sind. Vorausgesetzt ist, dass das Gebäude, welches den Schatten wirft,

eine ausreichende Höhe vorweist, um einen Schatten auf die Dachfläche umstehender Gebäude zu werfen. In der Literatur werden unterschiedliche Algorithmen benannt, welche zur Ermittlung der Sonnenposition verwendet werden. Im Normalfall werden dabei durch eine totale Funktion die Parameter geografische Lage, Tageszeit und Datum zu den entsprechenden Winkeln für Azimut und Sonnenhöhe transformiert, welche wiederum die Position der Sonne im Himmel widerspiegeln.

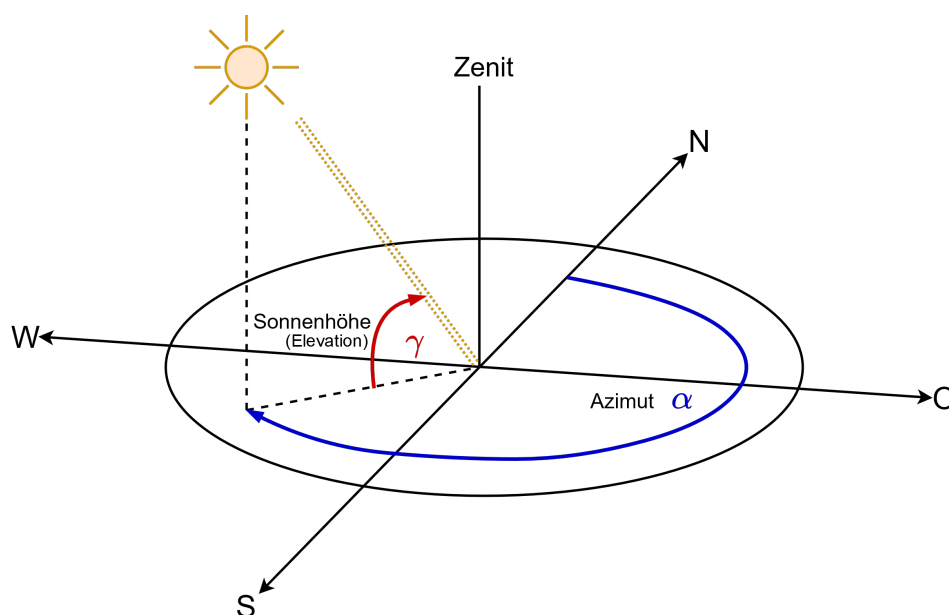


Abbildung 4.3: Abbildung zeigt Azimut und Höhenwinkel und ihre Beziehung untereinander, i.A.a. [20].

Beispiele, welche in [20] besprochen werden schließen die Bestimmung nach *DIN 5034, Teil 2* [91] und den SUNAE Algorithmus nach Walraven [92] aus dem Jahr 1978 ein. Dieser wurde im Jahr 1988 durch J.J. Michalsky weiterentwickelt, welcher in [93] veröffentlicht wurde. Der Algorithmus wird ebenso von Esri in ihrem GIS ArcGIS Pro verwendet [94]. Dieser sollte bei Verwendung jedoch besonderer Vorsicht unterliegen, da er einige Schwachstellen aufweist und Fehler inkorporiert, wie beispielsweise falsche Azimutwerte oder Höhenwinkel, wenn die zu betrachtende Lokation in Äquaturnähe liegt [95].

Ein weiterer Algorithmus, welcher sich speziell in den letzten zwei Jahrzehnten zunehmend als Standard durchgesetzt hat ist der Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications (SPA) von Ibrahim Reda und Afshin Andreas [96]. Diese Spezifikation ist eigentlich auf Jean Meeus zurückzuführen, welcher in *Astronomical Algorithms* [90] den Algorithmus als Erster beschrieb. Allerdings war die Version aus [90] auf die Bewegungen aller Planeten mit Bezug zur Erde fokussiert und beinhaltete viele komplexe Erklärungen sowie Berechnungen, welche den Grad der Komplexität zur Betrachtung der Sonne und Erde unnötigerweise erhöht. Daher haben Reda und Andreas in [96] die Gelegenheit ergriffen den Algorithmus zu vereinfachen und auf die Anwendung für Solarenergie zu spezialisieren, sowie dahingehend zu optimieren. Der SPA wird unter anderem vom

National Renewable Energy Laboratory (NREL) publiziert und mitunter am häufigsten in Solarenergie Applikationen und GIS verwendet [97, 98]. Dieser Algorithmus erweist sich insbesondere im Kontext der Ermittlung der Sonnenposition in Kugelkoordinaten als Standard. Als wesentlicher Nachteil gilt die Komplexität und die damit verbunden hohe Rechenzeit, bedingt durch die vielen Konversionen und Umrechnungen der trigonometrischen Funktionen. Es werden etwa 2300 Gleitkomma-Operationen und mehr als 300 direkte und inverse trigonometrische Funktionen für die Berechnung eines einzigen Punktes angewandt [99]. Trotz der Tatsache, dass in Einzelfällen die Berechnung mit moderner Hardware gegenwärtig schnell durchführbar ist, kann sich die Rechenzeit in eingeschränkten Systemen oder in zeitkritischen Anwendungen als zu lange erweisen.

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, ist der SPA sehr akkurat, jedoch langsam bei der Berechnung der Sonnenposition relativ zu einem „Beobachter“ auf der Erdoberfläche [99]. Den Beobachter stellt dabei beispielsweise das Gebäude dar, für welches der Schatten zu berechnen ist. Eine Alternative für den SPA stellt der SG2-Algorithmus dar, welcher von Philippe Blanc und Lucien Wald entwickelt wurde [99]. Die gute Performance dieses Algorithmus resultiert aus der Tatsache, dass einige Gleichungen aus dem SPA mit effizienten Annäherungen gebunden wurden und folglich die Präzision in einem kontrollierten Intervall gehalten werden kann [99]. Der Algorithmus wird auch in seiner ursprünglichen Form, dem *Solar Geometry* Algorithmus, vom European Solar Radiation Atlas verwendet. Er verwendet lediglich 60 Gleitkomma-Operationen und 25 Aufrufe von trigonometrischen Funktionen und bildet somit einen erheblichen Unterschied zum SPA.

Der SG2-Algorithmus [99] stellt einen alternativen Ansatz dar, welcher signifikant schneller abläuft, jedoch eine höhere Ungenauigkeit von $\pm 0,005^\circ$ aufweist im Vergleich zum SPA mit Ungenauigkeiten von $\pm 0,0003^\circ$. Zudem ist nur der Zeitraum zwischen 1980 und 2030 mit dieser Genauigkeit ermittelbar [99].

Die Spezifikation aus der DIN 5034, Teil 2 wird der Vollständigkeit halber aufgeführt. In der Forschungspraxis spielt sie jedoch keine wesentliche Rolle, da in den meisten Fällen Algorithmen wie der SPA Algorithmus oder die aktualisierte Variante des Malraven Algorithmus von Michalsky verwendet werden. Auch in der Forschungsarbeit [100], welche sich mit Verschattungsprognosen im Umfeld komplexer Bebauung beschäftigt, findet der Algorithmus nach DIN 5034 lediglich Erwähnung, verwendet wird jedoch das Berechnungsverfahren des SPA-Algorithmus. Allerdings muss als Vorteil des DIN 5034 Berechnungsmodells erwähnt werden, dass dieses als Referenzverfahren verwendet werden kann [100]. Im Anhang A.1 ist eine ausführliche Beschreibung des Algorithmus und dessen Berechnungsgrundlage zu finden.

Anzumerken ist, dass Algorithmen zur Bestimmung der Sonnenposition in einem Großteil der Fälle lediglich in einem bestimmten Zeitraum Gültigkeit besitzen und Grenzen in ihrer Genauigkeit aufweisen. Dahingehend ist es wichtig hervorzuheben, für welche Zeit die Berechnungen angesetzt sind und für welche Anwendung die Sonnenposition berechnet werden soll. Unter Umständen kann der Fall auftreten, dass mehr Parameter berücksichtigt werden müssen, als nur die reine Richtung, aus welcher die Sonne zu scheinen

scheint. Für die Strahlungsenergie müssen beispielsweise ebenfalls atmosphärische Einflüsse einkalkuliert werden, da die Sonnenstrahlen durch die Erdatmosphäre gebrochen werden [101]. Dies war unter anderem eine der Erweiterungen des Algorithmus aus [90], die im SPA Algorithmus [96] Anwendung gefunden hat. Dadurch ist dieser Algorithmus für Anwendungen der Solarenergie besonders geeignet. Der SPA-Algorithmus ist für den Zeitraum der Jahre -2000 bis 6000 anwendbar, da dieser für diesen Zeitraum eine genaue Berechnung erlaubt mit einem Fehler von $\pm 0,0003^\circ$ [96]. Der SG2-Algorithmus hat für einen Referenzzeitraum von 1980 bis 2030 eine Genauigkeit von $\pm 0,0015^\circ$ [99]. Der SUNAE-Algorithmus von Walraven hatte vor seinen Anpassungen eine voraussichtliche Genauigkeit von $\pm 0,01^\circ$ [92]. Jedoch wurde vermerkt [20], dass die Genauigkeit unter Umständen abweichen kann, da der Algorithmus um einige Komponenten erweitert und verändert wurde. Für den DIN Algorithmus liegen leider keine Genauigkeitsabschätzungen [20] vor. Die folgenden Abschnitte erläutern, welche Parameter den Verlauf des Azimuts und des Zenits beeinflussen und welche Relevanz in diesem Kontext die geografische Position hat [20].

Jahres- und Tageszeiten Die Sonnenposition ändert ihren Verlauf innerhalb eines Tageszyklus (Mikrozyklus) und innerhalb der unterschiedlichen Jahreszeiten (Makrozyklus). Der Sonnenauf- und untergang ist jeweils am Morgen und Abend eines Tages zu beobachten und die Höhenwinkel verlaufen je nach geografischer Region unterschiedlich. Das größte Intervall für die relative Differenz zwischen Azimut- und Zenitwinkel wird im Makrozyklus erreicht. Implikationen diesbezüglich beziehen sich nicht nur auf die vier Jahreszeiten sondern ebenfalls auf den Verlauf über den Zeitraum eines gesamten Jahres, über welchen die Erde sich einmal um die Sonne dreht. Die zusätzliche Rotation um die eigene Achse, und die ellipsenförmige Laufbahn um die Sonne, resultieren in einer Winkelfunktion welche einer verzerrten “acht” ähnelt, wie der Abbildung 4.4 zu entnehmen ist. In dieser ist der Verlauf des Sonnenstands über drei Beispieltage aufgezeigt, grob zwischen 6 und 21 Uhr. Der 21.06. und 21.12. markieren dabei die beiden äußeren Grenzen mit den jeweils längsten und kürzesten Tagen. Dahingehend weist die Sonne am 21.06. das größte und am 21.12. das entsprechend kleinste Bewegungsintervall auf.

Sichtbar ist in Abbildung 4.4 ebenfalls der Verlauf der Sonnenstände innerhalb der beiden Extrema vom 21.06. und 21.12. zu jeder Stunde mit einer verzerrten Schleife. So ist beispielsweise erkennbar, dass am 21.06. für den Standort Köln-Mitte die Sonne bereits um 6:00 Uhr über dem Horizont erscheint, wohingegen am 21.12. dies erst nach 9:00 Uhr der Fall ist. Dies erlaubt Rückschlüsse darüber, welche Zeitintervalle für die einheitliche Betrachtung und Ermittlung von Solarenergie sinnvoll zu nutzen sind. Es würde sich beispielsweise anbieten tägliche Werte nur im Zeitraum zwischen 11:00 Uhr und 16:00 Uhr zu betrachten, da in diesem Fall davon ausgegangen werden kann, dass die Sonne über das gesamte Jahr über dem Horizont liegt.

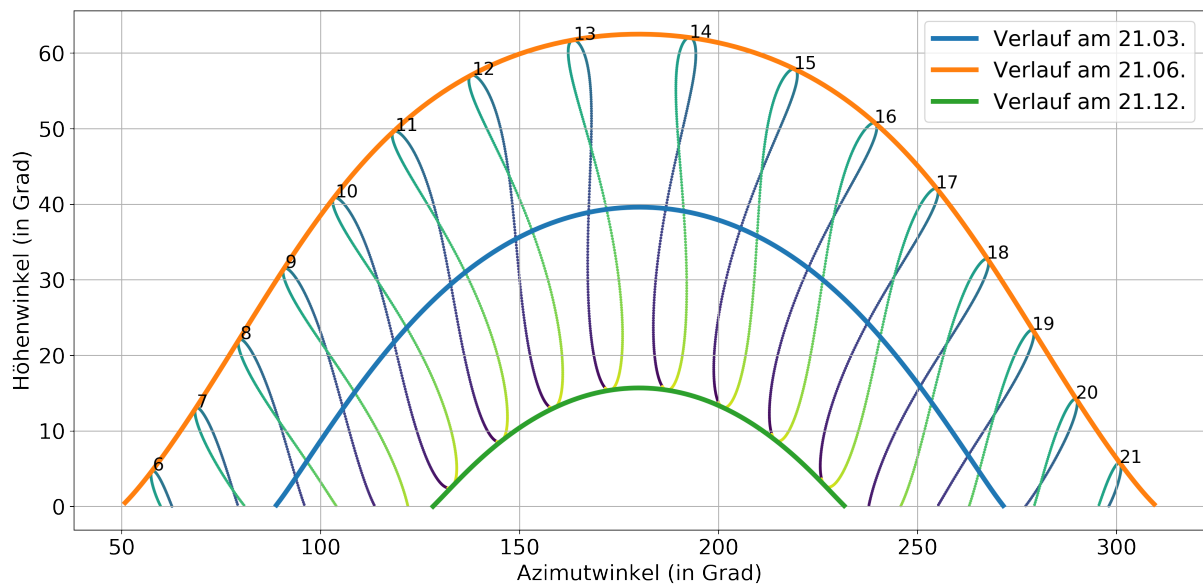


Abbildung 4.4: Verlauf des Sonnenstandes in Köln am 21.03., 21.06. und 21.12.2020.

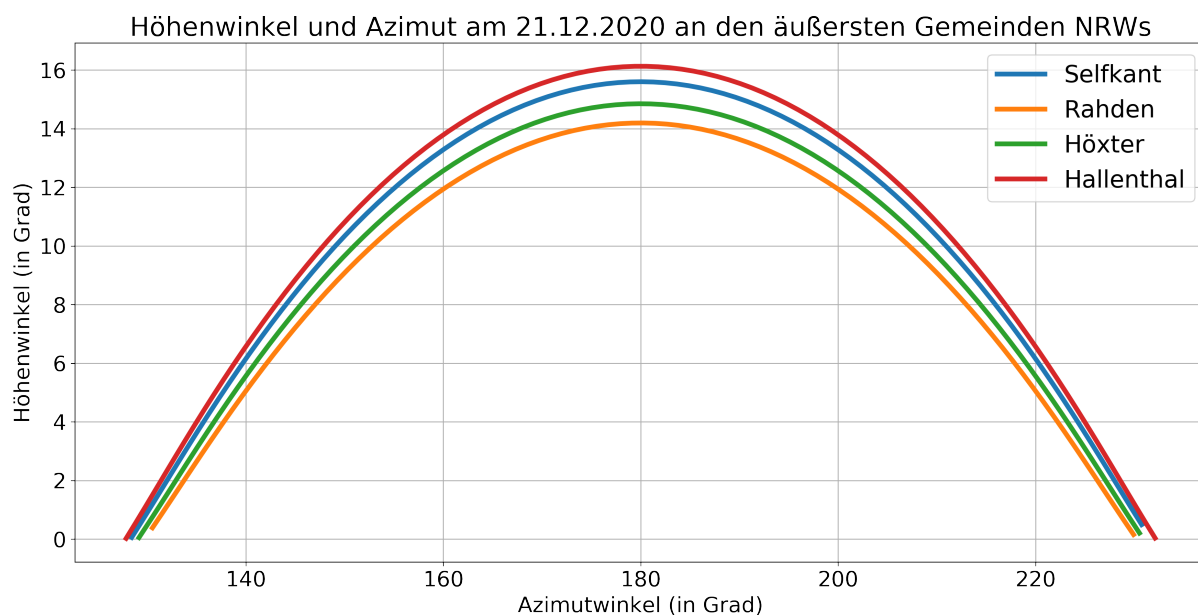
Geografische Lage Bei dem Faktor der geografischen Klassifizierung geht es primär darum, dass auf diversen Regionen der Erde die Sonnenwinkel jeweils in einem anderen Intervall liegen und sich bewegen. In diesem Kontext ist es interessant sich das Intervall der Sonnenstandswinkel anzuschauen, welches durch die Regionen an den Grenzen NRWs verläuft. Die Vermutung liegt nahe, dass keine nennenswerten Unterschiede vorliegen werden, da das Landesgebiet NRW keine multiplen Zeitzonen umfasst. Nichtsdestotrotz wird dieser Faktor beachtet und sein Einfluss untersucht werden.

Die äußersten Grenzen NRWs liegen

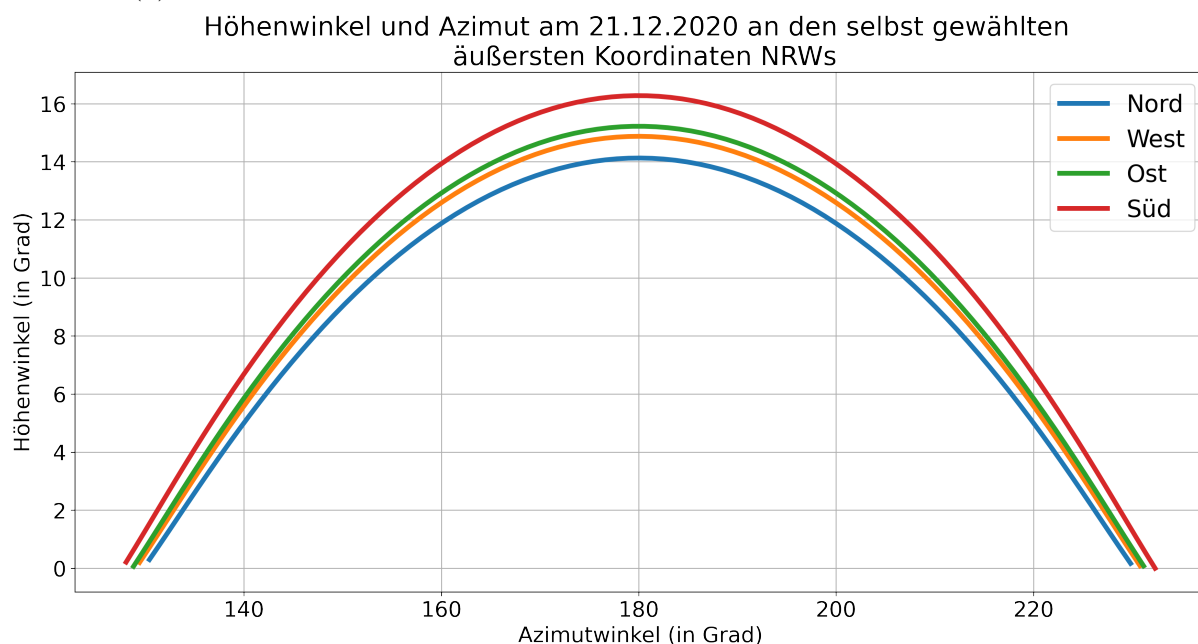
- im Westen bei der Gemeinde Selfkant (Breite/Längengrad: 51.0206899/ 5.9217595),
- im Osten bei Höxter (Breite/Längengrad: 51.7747369/ 9.3816877),
- im Norden bei Rahden (Breite/Längengrad: 52.4333/ 8.61667),
- im Süden bei der Gemeinde Hellenthal (Breite/Längengrad: 50.490997/ 6.435434).

In Abbildung 4.5 ist skizziert, wie der Verlauf der Sonnenwinkel in allen vier Grenzregionen jeweils aussieht. Die obere Grafik beinhaltet die Sonnenbahnen für die offiziellen Grenzregionen Selfkant, Höxter, Rahden und Hellenthal.

Die südlichste Region weist, wie erwartet, den längsten und breitesten Verlauf aus. Dagegen hat die nördlichste Region den kürzesten und schmalsten Verlauf. Insgesamt wird festgehalten, dass (in absoluten Zahlen) die Unterschiede nicht maßgeblich sind und die Regionen eine hohe Ähnlichkeit vorweisen. Anzumerken ist zudem, dass die offizielle südlichste, nördlichste, westlichste und östlichste Gemeinde NRWs teilweise ein verzerrtes Bild beim Vergleich der Sonnenbahnen ergeben, da beispielsweise die westlichste und südlichste Gemeinde geografisch relativ nah beieinander liegen. Dies ist auch in Abbildung



(a) Verlauf des Sonnenstandes in Selfkant, Rahden, Höxter und Hallenthal.



(b) Verlauf des Sonnenstandes in selbst gewählten äußersten Grenzen NRW.

Abbildung 4.5: Verlauf des Sonnenstandes in den äußersten Regionen NRW am 21.12.2020 von 9.00 Uhr bis 16.00 Uhr. Die obere Grafik beinhaltet die Sonnenbahnen für die offiziellen Grenzregionen NRW, die untere Grafik hingegen stellt den Verlauf an selbst gewählten Koordinaten dar.

4.6 ersichtlich. Aus diesem Grund wurde eine zweite Übersicht angefertigt, welche eigens ausgewählte Koordinaten für die äußersten Regionen auf der Fläche NRW auswählt, wie

in der rechten Grafik von Abbildung 4.6 zu sehen ist. Die Koordinaten dafür wurden wie folgt ausgewählt:

- Norden
- Süden
- Westen
- Osten

Im Westen und Norden liegen somit abweichende Koordinaten vor (vgl. Abbildung 4.6). Links kennzeichnet die eigens gewählten Referenzpunkte und rechts die offiziellen äußersten Grenzen, wie in [17]. Der Verlauf über den Beispieltag vom 21.12.2020, für die vier Regionen, bekommt dahingehend ebenfalls andere Ausmaße. Allerdings ist hervorzuheben, dass der Grad an Unterschiedlichkeiten in absoluten Zahlen relativ gering ist.

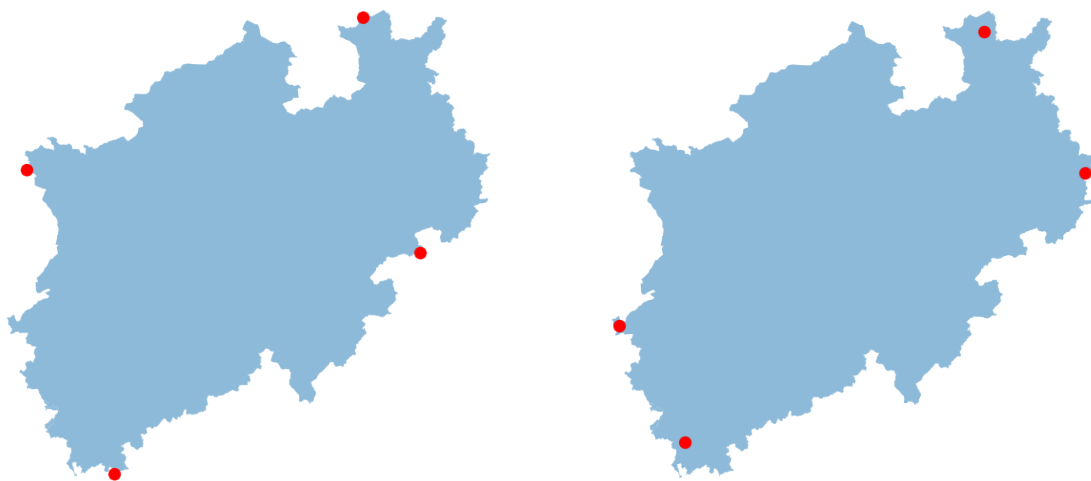


Abbildung 4.6: Ansichten NRWs mit eingezeichneten äußersten Referenzpunkten. Links kennzeichnet die eigens gewählten Referenzpunkte und rechts die offiziellen äußersten Grenzen. (Grenzdaten von OpenNRW [102])

4.2 Grundlagen der (sub-)urbanen und ruralen Verschattungseffekte

Im Zuge der Analyse der Region NRW auf die Eignung von Dachflächen für PV-Dachanlagen ist es wichtig die typischen und spezifischen Topografien der Region zu beachten und in die Auswertung der Analyse aufzunehmen. In diesem Kapitel werden die grundlegenden Eigenschaften der diversen Strukturen näher erläutert. Dabei gilt es zu beachten, dass sich städtische Gebiete von landwirtschaftlichen und industriellen Gebieten unterscheiden

[46]. Diese Unterschiede zeigen sich in der durchschnittlichen Gebäudehöhe, jedoch ebenso in der Bebauungsdichte und der durchschnittlichen Dachflächengröße [46]. Zudem ist hierbei hervorzuheben, dass bestimmte Ereignisse eine Verschattung verursachen können, welche im Vorfeld nicht einkalkulierbar sind. Schneefall zählt beispielsweise zu solch einem Ereignis.

Aufgrund der zunehmend wachsenden Städte entstehen stetig mehr Gebäude [103]. Ein Trend, welcher mit hoher Wahrscheinlichkeit die nächsten Jahre anhalten wird. Dahingehend ist es von besonderer Relevanz den Zusammenhang zwischen stetig komplexer und größer werdenden Städten und der daraus resultierenden Verschattung von Dachflächen zu prognostizieren. Mit einer hohen Wahrscheinlichkeit weisen Städte, in Relation zu weniger dicht bebauten Regionen, ein (wesentlich) schlechteres Verhältnis zwischen totaler Dachfläche und für PV-Anlagen geeigneter Dachflächen auf.

Deshalb fokussiert dieser Abschnitt den Effekt städtischer Bebauung und die Vegetation rund um nutzbare Dachflächen, wie beispielsweise angrenzende Bäume. Es wird analysiert, inwiefern Zusammenhänge in diesem Bereich bereits bekannt sind und wie diese in die Analyse und Simulation eingearbeitet werden können. Von besonderer Relevanz ist in diesem Kontext, inwiefern sich die Gebäudedichte und das Siedlungsgebiet der Region auf die nutzbaren Dachflächen auswirken. Ebenso sind diverse Städtetopografien und deren Auswirkungen auf die gegenseitige Gebäudeverschattung von Bedeutung.

Komplexe innerstädtische Bebauung

Die Topologie von Städten und urbanen Strukturen hat im Laufe der vergangenen Jahre eine deutliche Veränderung erfahren. Die Dichte der Bebauung nimmt stetig zu, da der Zuzug von Menschen in die Ballungsräume weiterhin einen steigenden Trend vorweist [104]. Dies stellt einen wesentlichen Faktor für die Entstehung der Schattenflächen in urbanen Gebieten dar. Bei zunehmender Gebäudedichte steigt die Wahrscheinlichkeit einer geringen Anzahl unverschatteter Dachflächen, da mit hohen Gebäuden lange Schattenwürfe einhergehen [100].

In der Regel wird die Verschattungszeit ab jenem Zeitpunkt verzeichnet, ab welchem der Höhenwinkel einen Wert größer Null vorweist, da damit gewährleistet ist, dass die Sonne über dem Horizont erscheint. In urbanen, dicht bebauten Gebieten bedarf es der Relativierung bzw. Erweiterung dieser Annahme. In diesem Kontext ist mit einer erhöhten Horizontallinie zu rechnen, da aufgrund der Gebäude, (künstlichen) Erhebungen und Bäume der geografische Horizont oft nicht den adäquaten Schwellenwert darstellt [100]. Diese Tatsache wird ebenfalls als Horizonteinengung [100] bezeichnet. Die *DIN 5034, Teil 1* [105] definiert für Schattenprognosen einen Höhenwinkel von mindestens 6 Grad als Schwellenwert über dem geografischen Horizont, um die durch Baustrukturen entstehende Höhe zu kompensieren. Konkret bedeutet dies, dass erst ab einem Höhenwinkel von 6 Grad eine potentielle Verschattung ermittelt wird. Schlussfolgernd vermindern sich die Verschattungstunden pro Jahr, je höher der Schwellenwert für den Höhenwinkel gewählt

wird. Dies liegt darin begründet, dass die Zeit erst verzeichnet wird, sobald die Sonne einen höheren Stand vorweist und somit weniger lange Schatten fallen.

Nicht-gebäudespezifische Verschattungsursachen

Bei den nicht-gebäudespezifischen Objekten, die Schatten auf eine Dachfläche werfen, handelt es sich hauptsächlich um Objekte wie Laternen, Masten, Bäume, Lampen, Ampeln oder Schnee und Verschmutzungen. Diese können entweder standortabhängig und vorhersehbar oder auch unvorhersehbar sein. Eine intuitive Schlussfolgerung ist beispielsweise die Tatsache, dass einige Bäume aufgrund ihrer Blätter im Winter wesentlich weniger Schatten auf eine Dachfläche werfen als in den Frühlings- und Sommermonaten. Dies stellt eine vorhersehbare, standortabhängige Verschattung dar. Dahingegen ist es teilweise unvorhersehbar, ob in den Wintermonaten an bestimmten Standorten Schneefall stattfindet oder inwiefern Solarzellen durch Verschmutzungen unmittelbar verschattet werden.

Als weiterer Faktor dienen die Wolken, welche ebenfalls eine unvorhersehbare Ursache der Verschattung darstellen [20]. Vereinfacht lässt sich dieser Faktor einbeziehen, indem im Durchschnitt die Tage pro Jahr oder Monat gezählt werden, in denen eine einschränkende Wolkenbedeckung beobachtet werden konnte. Dieser Wert kann im Anschluss für etwaige Prognosen extrapoliert werden. Dasselbe Verfahren ließe sich auch für die Bedeckung der Solarmodule mit Schnee verwenden. Die Problematik ist allerdings, dass es nicht immer zielführend oder akkurat ist, die in der Vergangenheit liegenden Werte auf die kommenden Jahre anzuwenden. Nichtsdestotrotz würde es einen validen Modellierungsansatz darstellen, wenn ein Mangel an akkuraten Modellen für die Vorhersage herrscht.

4.3 Modellierung der Verschattung und ihrer Ursachen

Die geometrische Modellierung der Verschattungseffekte bedient sich einfacher linearer Gleichungen aus der analytischen Geometrie. Diese werden im Kontext der dynamischen Modellierung von der Simulation und großflächigen Bestimmung von Verschattungen auf urbaner Ebene um ausgedehnte Filterungen und zusätzliche Berechnungsbedingungen erweitert. An dieser Stelle werden Eigenheiten der unterschiedlichen Verschattungsarten beleuchtet, sowie deren Entstehung im urbanen Kontext.

4.3.1 Klassifizierung der Verschattungsarten

Die Entstehung von Schatten und die damit einhergehenden Verschattungseffekte können diverse Ausgangssituationen zur Ursache haben. Dieser Abschnitt erläutert mögliche Hintergründe und die Ursachen der Verschattungen auf Dachflächen. Verschattungen lassen

sich im Rahmen dieser Arbeit grundsätzlich in drei unterschiedliche Kategorien unterteilen.

Die erste Kategorie erfasst diejenigen Schatten, welche durch ein umliegendes Gebäude die Dachflächen bedecken. Bezeichnet wird diese Kategorie als *Fremdverschattung durch Gebäude* bzw. im Rahmen dieser Arbeit als Gebäude-zu-Gebäude (G2G) Verschattung. Als entscheidende Parameter in diesem Kontext dienen die Entfernung und die absolute Höhendifferenz zwischen den Gebäuden.

Kategorie zwei der Verschattungen erhält in dieser Arbeit eine gesonderte Betrachtung und wird ebenfalls durch externe Objekte klassifiziert. Zu diesen Objekten gehören nicht explizit Gebäude, sondern Bäume, Ampeln und Lichtmasten. Diese zweite Kategorie erhält die Bezeichnung *Fremdverschattung durch Nicht-Gebäude* bzw. im Rahmen dieser Arbeit Baum-zu-Gebäude (B2G) Verschattung. Bedingt durch die technische Umsetzbarkeit wird die Analyse auf die Verschattung durch Bäume fokussiert, da aktuell noch keine flächendeckenden 3D-Messdaten existieren, welche ausreichende Details beinhalten.

Eigenverschattungen auf Dachflächen, verursacht durch Objekte auf dem Dach, lassen sich der dritten Kategorie zuordnen. Diese erhält die Bezeichnung Eigenverschattung (E2G). Die Eigenverschattung ist auf einer Vielzahl von Dachflächen, allen voran in urbanen Siedlungsgebieten, vorzufinden. Beispiele für solche Objekte sind u.a. Dachgauben, Schornsteine und Antennen. Diese können, je nach Sonnenstand, zu erheblichen Verschattungen führen. Dahingehend ist eine tiefergehende Analyse, insbesondere für Eigenheime, von höchster Relevanz.

Gebäude zu Gebäude (G2G) Diese Kategorie widmet sich ausschließlich der Verschattung, welche durch benachbarte Gebäude entsteht. Dem liegt zugrunde, dass sich ein benachbartes Gebäude in unmittelbarer Nähe befindet und eine entsprechende Höhe vorweist, so dass es in der Lage ist die Verschattung der benachbarten Dachfläche zu verursachen. Nachbargebäude mit einer geringeren Höhe als das zu untersuchende Gebäude, können dahingegen keine Verschattung auf der Dachfläche verursachen. Dies wird ebenfalls in der Beschreibung des Algorithmus in Kapitel 6 erneut aufgegriffen, da sie Teil des Modells ist.

Bäume zu Gebäude (B2G) Diese Kategorie legt den Fokus, wie in der Einleitung dieses Abschnitts erläutert, hauptsächlich auf Objekte der Städtetopologie, die keinen urbanen Ursprung haben und somit nicht als Gebäude im Sinne der Baugesetze klassifiziert werden. Diese werden gemäß der Landesbauordnung der einzelnen Länder definiert und somit gilt für Gebäude der vorliegenden Studie die Bauordnung des Landes NRW [106]. Licht- und Telefonmasten, Laternen, Ampeln und Bäume gehören zu dieser Kategorie. Aufgrund der technischen Hürden bei der Identifizierung dieser Objekte, wurde lediglich die Verschattung durch Bäume in den Betrachtungshorizont dieser Arbeit aufgenommen. Die darin begründete Problematik liegt im Wesentlichen an den Formen der

Laternen, Ampeln und ähnlichen Objekten, welche mit den zur Verfügung stehenden Daten von OpenNRW [102] schwierig zu rekonstruieren sind. Die Durchmesser von Lampen und Laternen und die übliche mittlere Punktdichte in den Laserscans der Punktwolken sind oftmals zu niedrig [107–109]. Daraus resultierend werden beim Aufnehmen der Laserscans der Erdoberfläche nicht genügend Punkte ermittelt, um eine dreidimensionale Rekonstruktion der Laternen und Telefonmasten zu realisieren.

Eigenverschattung (E2G) Die Eigenverschattung beschreibt diejenige Verschattung, welche entsteht sofern gebäudeeigene bzw. auf dem Dach installierte Objekte einen Schatten auf der Dachfläche verursachen. Solche Objekte können vielfältige Ausprägungen haben und sind nicht zwangsläufig fest mit der Dachfläche verbunden bzw. montiert. Antennen stellen ein Beispiel für solch ein Objekt dar, da diese in der Regel wieder abmontiert und an anderer Stelle reinstalliert werden können. Dachgauben und Schornsteine fallen unter jene Objekte, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht versetzt werden können. Zudem gehören ebenfalls Schatten in diese Kategorie, welche auf die seitliche Gebäudefassade fallen [100]. Diese Schatten werden, wie bereits erläutert, in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

In Siedlungen mit einem hohen Anteil an Einfamilienhäusern wird angenommen, dass die Eigenverschattung den größten Einfluss auf die Nutzbarkeit von Dachflächen für PV-Anlagen aufweist. Dies liegt darin begründet, dass Einfamilienhäuser in der Regel nicht von hohen Mehrfamilienhäusern umgeben sind, sondern ebenfalls von Einfamilienhäusern, welche zudem eine größere Distanz zueinander aufweisen. Dahingehend ist die externe Verschattung durch benachbarte Gebäude mit hoher Wahrscheinlichkeit seltener als in dicht besiedelten urbanen Gegenden. Jedoch besitzt ein Großteil der Einfamilienhäuser Dachgauben und Schornsteine, während Flachdächer dabei die Ausnahme darstellen. Bei entsprechender Neigung und Ausrichtung der Dachfläche kann daraus eine erhebliche Verschattung resultieren. Ausgenommen von dieser Betrachtung sind die engen (kleinen) Winkel, welche im Rahmen des Sonnenauf- bzw. -untergangs entstehen.

4.3.2 Mathematische Definitionen

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die Ermittlung der Sonnenposition behandelt wurde, dient dieser Teil der Forschungsarbeit der Erläuterung der mathematischen Definitionen. Die Grundprinzipien der Berechnung basieren vorwiegend auf simplen Gleichungen der linearen Algebra, in welchen Geradengleichungen und Schnittpunkte mit Ebenen bestimmt werden. Die schiere Menge und Koordination des Prozesses stellt dennoch in der Gesamtheit ein größeres und komplexes Problem dar. Zusätzlich gilt zu beachten, dass zunächst die Grundlagen für ein nutzbares 3D-Modell der Gebäude geschaffen werden müssen.

Im Folgenden erhalten lediglich jene Schritte Beachtung, welche benötigt werden, um den Schatten von einem bereits bestehenden und korrekt spezifizierten Gebäudemodell zu

berechnen. Dabei wird für diese Beispiel-Anwendung von einer vereinfachten Gebäudegeometrie ausgegangen. In den weiter folgenden Kapiteln wird der Prozess für die Haupt-Anwendung definiert und aufgezeigt. Für diesen Abschnitt wird angenommen, dass ein Gebäude G als eine Menge von Polygonen P_i definiert ist, folglich gilt $G = \{P_1, \dots, P_n\}$, wobei $n \in \mathbb{N}$ ist und die Anzahl der auf der Oberfläche des Gebäudes liegenden Flächen darstellt. Diese Oberfläche muss die Voraussetzung erfüllen wasserdicht (engl. *watertight*) bzw. lückenlos zu sein.

Zunächst erfolgt die Umrechnung der Kugelkoordinaten der Sonne in kartesische Koordinaten, welche mit dem Triplet (x_s, y_s, z_s) definiert werden. Die Berechnung könnte ebenfalls nur mit den Kugelkoordinaten durchgeführt werden. Nichtsdestotrotz wird der kartesische Koordinatenraum verwendet, da die Gleichungen im kartesischen Vektorraum nativer nachzuvollziehen sind und es einen erhöhten rechnerischen Aufwand nach sich ziehen würde, die Messwerte der Laserscans zu konvertieren. Dabei gelten die allgemein bekannten Gleichungen für die Konversion von Kugelkoordinaten zu kartesischen Koordinaten. Der Gleichung 4.3.1 ist folgender Zusammenhang zu entnehmen:

$$\vec{v}_{\text{Sun}} : \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \cos \gamma \cdot \cos \alpha \\ r \cdot \cos \gamma \cdot \sin \alpha \\ r \cdot \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (4.3.1)$$

Der Radius wird durch r dargestellt (vgl. Abbildung 4.7), welcher sich in der Praxis entweder gleich dem Wert 1 setzen lässt, um Einheitswerte für die Sonnenrichtung zu generieren, oder auf die durchschnittliche Entfernung der Sonne von der Erde skalieren lässt. Dieser Abstand beträgt durchschnittlich 149.596 km [110].

Dahingehend würde der Standort der Sonne als Referenzpunkt für die Berechnung dienen, anstatt lediglich die Richtung vorzugeben. Für die Ergebnisse ist es nicht von Relevanz, welcher Ansatz verfolgt wird. Um die Komplexität zu reduzieren wurde im Rahmen dieser Analyse auf die dimensionslose Berechnung zurückgegriffen. Der Radius r erhält somit den Wert 1 und fällt bei der weiteren Berechnung aus der Gleichung.

Für die Berechnung des Schattenpolygons auf der Ebene des Bodens, muss von jedem Punkt, in allen Polygonen des Gebäudes G , die entsprechende Projektion berechnet werden. Die Ebene E_B definiert dabei den Erdboden, welcher durch eine Vereinfachung aus dem digitalen Geländemodell abgeleitet wird. Details zur Verarbeitung des digitalen Geländemodells finden sich in Kapitel 5. Allgemein gilt für die Berechnung der Schattenprojektion auf dem Boden die lineare Gleichung zur Schnittpunktberechnung zwischen einer Geraden und einer Ebene, welche der Gleichung 4.3.2 entnommen werden kann.

$$\lambda = \frac{(\vec{p}_0 - \vec{P}_1) \cdot \vec{n}}{\vec{v}_{\text{Sun}} \cdot \vec{n}} \quad (4.3.2)$$

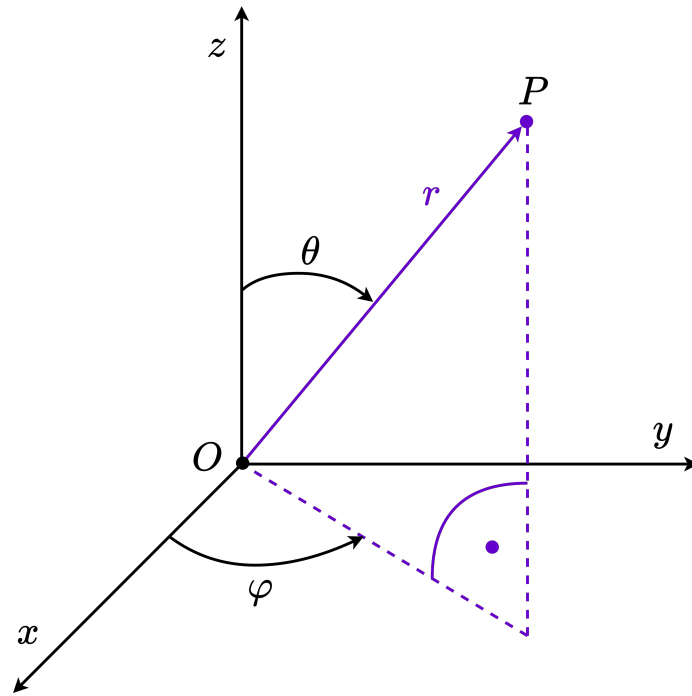


Abbildung 4.7: Polarkoordinaten im dreidimensionalen Raum.

Die Ebene liegt dabei in Parameterform vor und hat die allgemein bekannte Form:

$$E_B : (\vec{p} - \vec{p}_0) \cdot \vec{n} = 0$$

Wobei $\vec{n}$ den Normalenvektor der Ebene und $\vec{p}_0$ einen Punkt in der Ebene darstellt. Die Gerade wird in Parameterform genutzt und verwendet als Richtungsvektor in ihrer Definition die Richtung, aus welcher die Sonneneinstrahlung erfolgt, welche dem Vektor $\vec{v}_{\text{Sun}} = (x_s, y_s, z_s)$ entspricht. Dieser Vektor variiert je nach geografischer Lage, Datum und Uhrzeit. Die Gerade für die Schattenprojektion hängt zusätzlich von den Koordinaten der Gebäudepolygone ab. Die Punkte der Polygone werden als Ortsvektoren eingesetzt. Die Zusammenhänge des Prozesses sind in Abbildung 4.8 zu sehen.

Dabei gilt die allgemeine Form für die Geradengleichung g wie folgt:

$$g : \vec{x} = \vec{p} + \lambda \cdot \vec{u}, \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

Der Ortsvektor $\vec{p}$ stellt dabei immer einen Punkt (Stützvektor) der Gebäudepolygone (beispielsweise P_1) dar und der Richtungsvektor $\vec{u}$ ergibt sich aus dem Einheitsvektor des Sonnenstandes ($\vec{v}_{\text{Sun}}$) aus den Gleichungen 4.3.1 mit dem Radius $r = 1$.

Beim Einsetzen der Geraden- in die Ebenengleichung entsteht die Erweiterung und Berechnungsgrundlage für den Schnittpunkt, welche der Gleichung 4.3.4 zu entnehmen ist.

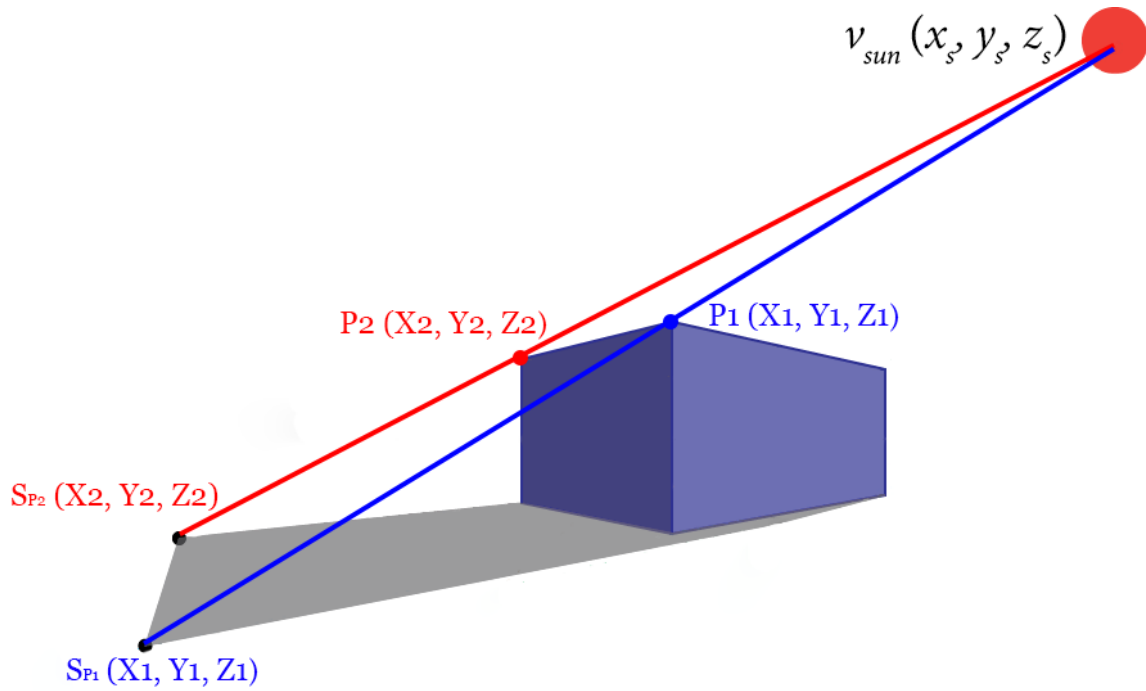


Abbildung 4.8: Geometrische Berechnung des auf den Boden projizierten Schattens. Gebäudemodell ist der Einfachheit halber simplifiziert als Quader definiert.

Es wurden in Anlehnung an die eigentliche Bedeutung der Variablen die Definitionen aus der Abbildung 4.8 verwendet.

$$((\vec{P}_1 + \lambda \cdot \vec{v}_{\text{Sun}}) - \vec{p}_0) \cdot \vec{n} = 0 \quad (4.3.3)$$

$$\Leftrightarrow (\vec{v}_{\text{Sun}} \cdot \vec{n}) \cdot \lambda + (\vec{P}_1 - \vec{p}_0) \cdot \vec{n} = 0 \quad (4.3.4)$$

Um die konkreten Koordinaten des Schnittpunktes berechnen zu können, muss die oben stehende Gleichung nach dem Parameter λ umgestellt werden. Dieser Wert kann anschließend in die Geradengleichung eingesetzt werden um den Schattenpunkt $S_{P_1} = \vec{P}_1 + \lambda \cdot \vec{v}_{\text{Sun}}$ zu ermitteln.

Ein weiteres Szenario, welches einer mathematischen Definition bedarf, ist das Eintreffen der Sonnenstrahlung auf eine geneigte Fläche. Dies ist insbesondere dann von Relevanz, wenn die Berechnung der Strahlung auf ein geneigtes Modul ansteht. Zudem sind in diesem Kontext ebenso die Energieverluste von Relevanz, die durch einen zunehmenden Einfallswinkel zustande kommen [20, 37]. Detaillierte Betrachtung finden diese in der Einstrahlungssimulation in Kapitel 7.2. Eine grafische Darstellung davon, wie die Berechnung des Einfallswinkels aussieht und welche Parameter dabei im Fokus stehen, findet sich in Abbildung 4.9.

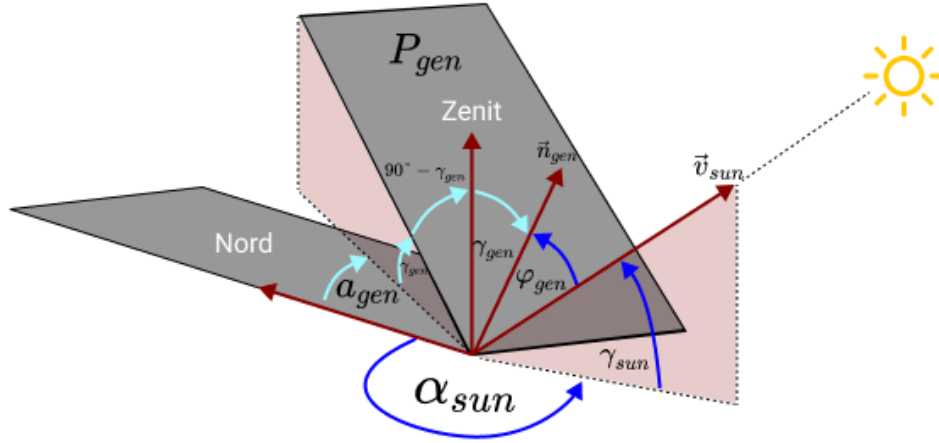


Abbildung 4.9: Berechnung des Einfallswinkels der Sonnenstrahlung auf geneigte Flächen, i.A.a. [20].

Der Einfallswinkel der Sonne auf eine geneigte Fläche P_{gen} (P für Polygon, gen für geneigt), die um den Winkel α_{gen} gedreht und um den Winkel γ_{gen} geneigt ist, berechnet sich durch den Vektor für die Sonnenrichtung $\vec{v}_{sun}$ und dem Normalenvektor $\vec{n}_{gen}$ der geneigten Fläche P_{gen} . Wie ebenfalls der Abbildung 4.9 zu entnehmen ist, liegt der Einfallswinkel φ_{gen} exakt zwischen dem Normalenvektor $\vec{n}_{gen}$ und dem Sonnenrichtungsvektor $\vec{v}_{sun}$. Diese Situation tritt beispielsweise bei der Berechnung der Einstrahlungsenergie auf die Solarmodule ein, welche ebenfalls eine Neigung vorweisen. Entweder weil sie auf geneigten Dächern oder mit entsprechender Neigung auf Flachdächern installiert werden. Die Vektoren $\vec{n}_{gen}$ und $\vec{v}_{sun}$ liegen dabei im Normalfall in Kugelkoordinaten vor. Die Konvertierung in kartesische Koordinaten für $\vec{v}_{sun}$ wurde bereits in Gleichung 4.3.1 beschrieben. Die Formel zur Konvertierung des Normalenvektors der geneigten Fläche kann der Gleichung 4.3.5 entnommen werden.

$$\vec{n}_{gen} : \begin{bmatrix} \cos(\pi + \alpha_{gen}) \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \gamma_{gen}) \\ \sin(\pi + \alpha_{gen}) \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \gamma_{gen}) \\ \sin(\frac{\pi}{2} - \gamma_{gen}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha_{gen}) \cdot \sin(\gamma_{gen}) \\ -\sin(\alpha_{gen}) \cdot \sin(\gamma_{gen}) \\ \cos(\alpha_{gen}) \end{bmatrix} \quad (4.3.5)$$

Da sowohl der Sonnenrichtungsvektor (wenn $r=1$) als auch der Normalenvektor der Ebene normiert sind, lässt sich der Einfallswinkel φ_{gen} , wie in Gleichung 4.3.6 dargestellt, als Skalarprodukt der beiden Vektoren berechnen.

$$\begin{aligned}
\varphi_{gen} &= \arccos (\vec{v}_{sun} \cdot \vec{n}_{gen}) \\
&= \arccos (-\cos (\alpha_{sun}) \cdot \cos (\gamma_{sun}) \cdot \cos (\alpha_{gen}) \cdot \sin (\gamma_{gen}) \\
&\quad - \sin (\alpha_{sun}) \cdot \cos (\gamma_{sun}) \cdot \sin (\alpha_{gen}) \cdot \sin (\gamma_{gen}) \\
&\quad + \sin (\gamma_{sun}) \cdot \cos (\gamma_{gen})) \\
&= \arccos (-\cos (\gamma_{sun}) \cdot \sin (\gamma_{gen}) \cdot \cos (\alpha_{sun} - \alpha_{gen}) + \sin (\gamma_{sun}) \cdot \cos (\gamma_{gen}))
\end{aligned} \tag{4.3.6}$$

4.3.3 Einordnung in den aktuellen Forschungsstand

In einigen Forschungsarbeiten wurde die Verschattung von Dachflächen lediglich auf Basis von Rasterdaten betrachtet. Als Beispiele sind in diesem Kontext insbesondere die LANUV Potentialstudie [17], das Grazer [47] und Steiermarker Solardachkataster [82] zu nennen. Diese Kataster verfügen über eine sehr gute Dokumentation und verfügen über eine detaillierte Beschreibung der Erstellung der angewandten Methodik. Des Weiteren sind Solardachkataster und Potentialstudien im deutschsprachigen Raum verfügbar. Eine Vielzahl von Kommunen in NRW verfügen über eigene Solardachkataster trotz der Tatsache, dass vom LANUV ein einheitliches Solardachkataster für das gesamte Landesgebiet NRW vorliegt. Es wurde für alle Fälle mit Rasterdaten gearbeitet, welche aus den 3D-Messwerten abgeleitet wurden, da dies einer gängigen Vorgehensweise entspricht.

Ebenso liegt eine Potentialstudie aus der Schweiz vor, in welcher eine kleine Teilmenge von Häusern in Zürich akkurat und manuell analysiert wurden [48]. Es wurden insgesamt 99 Gebäude mit insgesamt 690 Teilflächen nach dem Zufallsprinzip ausgewählt. Ausgewertet wurden diese, indem die Teilflächen manuell mit PV-Modulen innerhalb der Simulation belegt wurden. Dabei wurden nicht nur detailliert Verschattungseffekte analysiert, sondern ebenfalls ästhetische Aspekte berücksichtigt [48]. Aus der Auswertung der Analyse wurden Reduktionsfaktoren ermittelt, welche im Anschluss auf die Gesamtanalyse bezüglich des Dachflächenpotentials angewandt wurden. Dieser Prozess weicht demnach von der gängigen Strategie ab, die bei Solardachkatastern üblicherweise angewandt wird. Vermutlich wurde dieser Ansatz verwendet, da die Schweizer Potentialstudie nicht primär die Visualisierung der Ergebnisse fokussiert.

In allen betrachteten Analysen und Potentialstudien wurde in Bezug auf die Verschattung bei Rasterdaten entweder mit Sonnenbahndiagrammen oder mit Raytracing auf Pixelebene gearbeitet. Es existieren allerdings weitere Verfahren, die in der Literatur zur Schattenermittlung genutzt werden. Im Folgenden werden diese weiteren Techniken näher betrachtet. Hierzu zählt u.a. das Pixel Counting.

Schatten auf Flachdächern und Pixel Counting

Bereits in den 80er Jahren wurden diverse Forschungsarbeiten durchgeführt, welche sich mit der geometrischen Berechnung von Verschattungen beschäftigt haben. Diese nutzten die bereits bekannten trigonometrischen Berechnungen, welche auch in der geometrischen Optik beschrieben werden [86, 87]. Hierbei werden die komplizierten quantenphysikalischen Effekte von Lichtstrahlung ignoriert und näherungsweise angenommen, dass das Licht einen Verlauf aufweist, welcher durch eine lineare Gleichung beschrieben werden kann [86]. Einige Grundlagen wurden bereits in Kapitel 4.3.2 beschrieben. Im Jahre 1982 haben Stevenson und Suckling ihren technischen Bericht publiziert, in welchem sie einen Algorithmus für die Ermittlung von Verschattungspolygonen auf Flachdächern beschreiben [111]. Der Algorithmus wurde anschließend in FORTRAN implementiert. Es wurde untersucht, wie sich die theoretische Energieverfügbarkeit auf ein Gebäude verändert, wenn die Verschattung mit eingeschlossen wird. Das Potential für das untersuchte Gebäude verminderte sich dabei um 57% [111]. Es sollte hervorgehoben werden, dass keine umfangreiche Analyse durchgeführt worden ist und sich das untersuchte Gebiet lediglich auf einen Block beschränkte.

Beim Pixel Counting lassen sich die Schatten mit Hilfe von Rechnern auf Basis von Bildern (gerendert oder fotografiert) ermitteln. Vereinfacht erklärt, werden die verdunkelten Pixel gezählt und daraus ableitend die Fläche des Schattens ermittelt [112, 113].

Im Rahmen einer weiteren Forschungsarbeit wurde herausgefunden, dass in der Praxis das Pixel Counting auch für komplexere Gebäudestrukturen realistische Werte liefert [112]. Die weiteren Verfahren sind komplizierteren Strukturen der Gebäude anfälliger für Fehler. Diese Tatsache ist auf die zugrundeliegenden Algorithmen und die Polygondarstellung zurückzuführen [112], welche in Kapitel 6 näher erläutert werden.

Sonnenbahndiagramme für einfache Verschattungsanalysen

Gegenwärtig werden für Verschattungsanalysen hauptsächlich Sonnenbahndiagramme (vgl. Abbildung 4.4) verwendet. Diese werden zusätzlich um die Silhouetten der umstehenden Gebäude erweitert, wie der Abbildung 4.10 zu entnehmen ist.

Dies erlaubt eine vorläufige Lageeinschätzung der Verschattungssituation (Betrachtungspunkt vom Referenzpunkt ausgehend). Praktischerweise erlauben die Sonnenbahndiagramme eine Bestimmung der Sonnenposition zu jeder Tageszeit. Daraus folgend wird aus den Diagrammen für die einfache Verschattungsanalyse direkt ersichtlich, wann ein Schatten auf einen Beobachterpunkt fällt. Dieser wird im Vorfeld der Analyse festgelegt und liegt für gewöhnlich auf der Dachfläche, auf welcher eine PV-Anlage installiert werden soll.

Als Beispiel wird ein fiktives Einfamilienhaus herangezogen, auf dessen Dachfläche eine PV-Anlage installiert werden soll [20]. Um das Haus herum sind einige Bäume und weitere Gebäude vorzufinden. Zunächst wird, wie weiter oben bereits erläutert, der Beob-

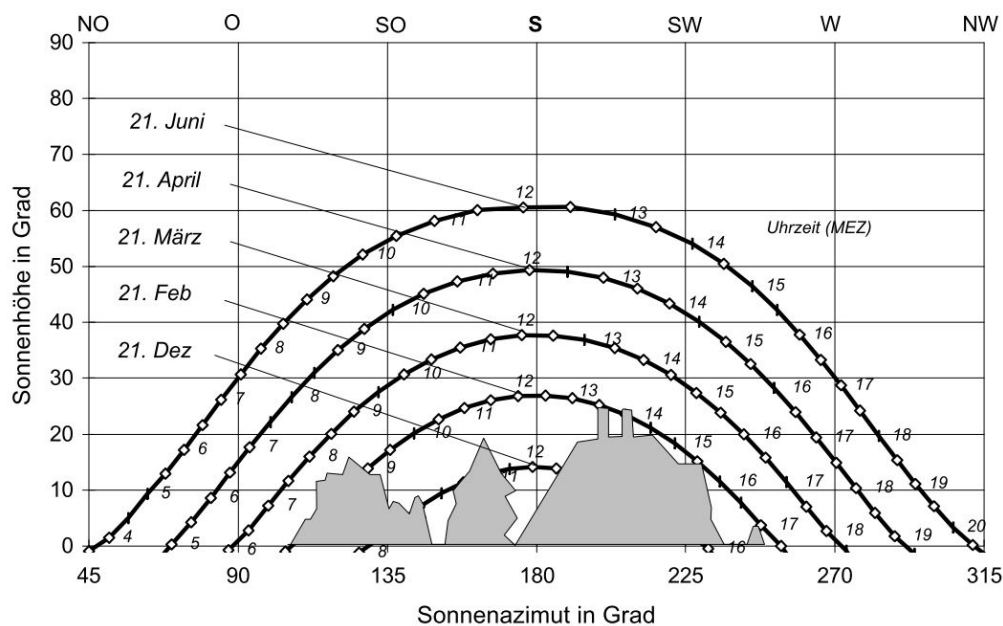


Abbildung 4.10: Sonnenbahndiagramm für einen festgelegten Referenzpunkt auf einem Dach. Die direkte Umgebung wurde ebenfalls mit in das Diagramm aufgenommen um eine vereinfachte Schattenanalyse durchzuführen. Abbildung aus [20].

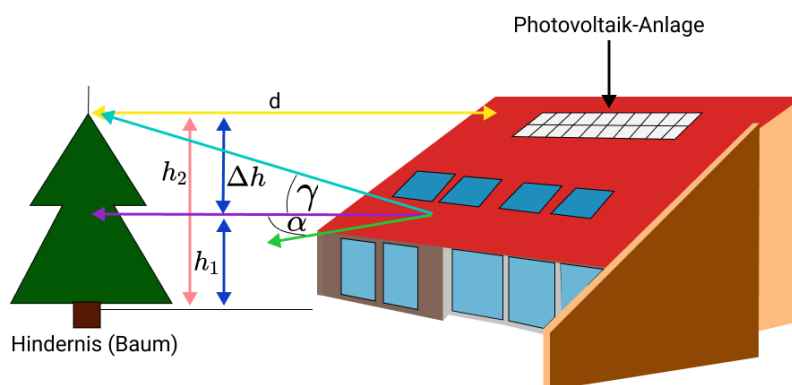


Abbildung 4.11: Schematische Darstellung der Berechnungsgrundlagen zur Inklusion von Hindernissen in der Umgebung, i.A.a. [20].

achterpunkt festgelegt, von welchem aus das Sonnenbahndiagramm erstellt wird. Zumeist stellt dieser den niedrigsten Punkt der geplanten PV-Anlage dar [20], da dort die höchste Wahrscheinlichkeit für Verschattung durch angrenzende Strukturen vorliegt. Dieser Beob-

achterpunkt dient im Rahmen der Verschattungsanalyse als Referenzpunkt, von welchem aus alle Objekte, wie beispielsweise die Umgebung, Gebäude und Bäume, erfasst werden müssen. Dahingehend müssen sowohl Azimutwinkel als auch Höhenwinkel der Objekte ermittelt werden, wobei diese Werte mit Bezug auf den Referenzpunkt zu erfassen sind. Eine visuelle Darstellung des Prozesses findet sich in Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12. Dieses Verfahren wurde ebenso für einige Fälle bei der Potentialstudie des LANUVs angewandt. Das LANUV gibt in diesem Kontext eine Auflösung von 0,1 Grad an [17].

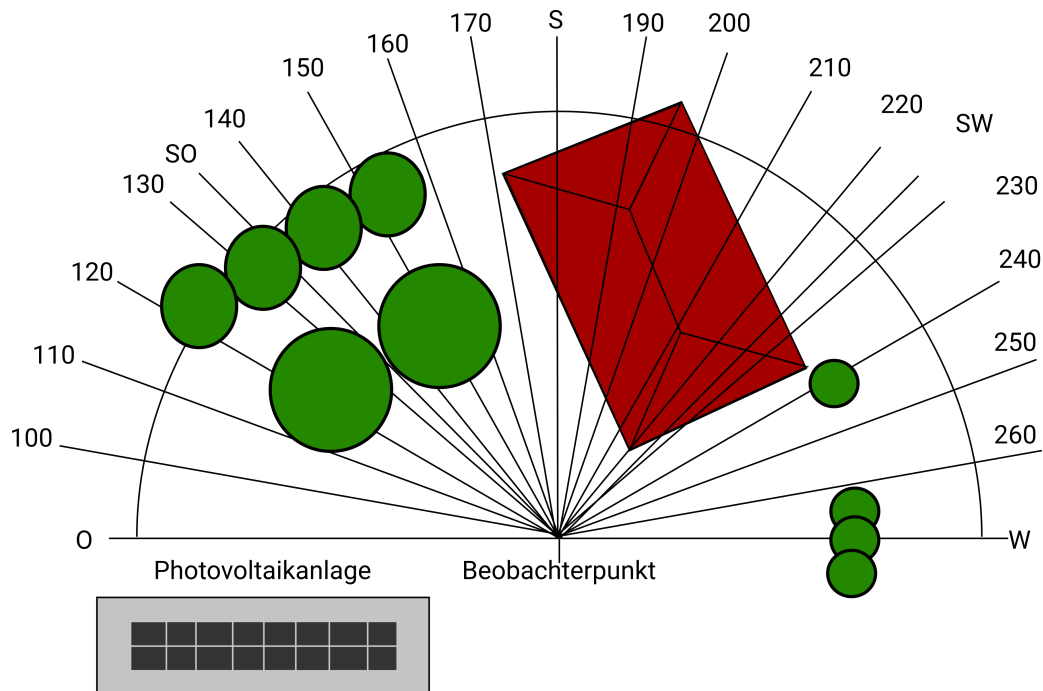


Abbildung 4.12: Vogelperspektive des Sonnenbahndiagramms zur direkten Ansicht der umliegenden Gebäude und Bäume, i.A.a [20].

Schattenberechnung in der Computergrafik

Die Computergrafik im Bereich der Schattenermittlung und -generierung beschäftigt sich hauptsächlich mit Techniken, die der visuellen Darstellung dienen [114]. Schatten werden im Bereich der Computergrafik hauptsächlich verwendet, um Objekte in einer virtuellen Umgebung darzustellen und diese mit der Umgebung zu verbinden. Dies erzeugt ein Gefühl der Tiefe auf einer 2D-Fläche (dem Bildschirm) [114]. Nichtsdestotrotz spielen die hier besprochenen Techniken eine wichtige Rolle für das Forschungsvorhaben. In vereinfachten Versionen werden die Algorithmen zur Berechnung der Kernschatten verwendet, die bei der Verschattungsanalyse eine essentielle Rolle spielen. Zudem ergibt sich in weiteren Verfahren, in Kombination mit dem Pixel Counting, ebenfalls die Möglichkeit, quantitative Aussagen zur Verschattung zu treffen und beispielsweise die Fläche des Schattens zu berechnen.

Generell wird der Schatten auch in diesen virtuellen Umgebungen in Kernschatten und Halbschatten unterteilt. Als Kernschatten wird der Teil des Schattens bezeichnet, welcher dunkler ist und eine klare Abgrenzung zum hellen, unverschatteten Teil hat. Er liegt meist zentral, während der Halbschatten heller ist und den Kernschatten mit einem linearen Verlauf umgibt. Letzterer weist eine aufwendige Berechnung auf, weshalb beim Renderingprozess in Echtzeit fast ausschließlich Punktlichtquellen verwendet werden, die lediglich den Kernschatten generieren.

Es besteht die Option, die Projektion eines Schatten werfenden Gegenstandes (in dieser Arbeit Gebäude) auf eine Ebene zu berechnen [115]. Das Rendern von weichen Schatten wird mit dem Ersetzen der ausgedehnten Lichtquelle durch mehrere Punktlichtquellen ermöglicht. Der Schatten, welcher aus diesem Prozess resultiert, stellt die Summe aller Schatten dar, welche durch diese Punktlichtquellen generiert wird [116]. Um eine realistische Schattenberechnung nach physikalischen Modellen zu gewährleisten, ist ein hoher Zeitaufwand unabdingbar. Beispiele für Algorithmen zum Erzeugen von fotorealistischen Schatten sind Diffuses Raytracing oder Radiosity [20].

4.4 Solares Einstrahlungspotential

Das solare Einstrahlungspotential stellt prinzipiell keinen direkten Parameter in Bezug auf die Verschattung dar. Allerdings wird dieser Faktor im Kontext der Potentialberechnung sehr relevant, da sich andernfalls keine Aussage zur potentiellen Energiebilanz treffen lässt. Des Weiteren bilden theoretische Grundlagen aus diesem Abschnitt die Basis für die vektorbasierte Berechnung der direkten Lichtstrahlen für die harten Schatten.

Unter dem solaren Einstrahlungspotential ist die auftreffende Energie auf eine horizontale Fläche auf der Erde zu verstehen [20, 83, 117]. Die Energie des auftreffenden Lichts hängt von mehreren Faktoren ab, wie beispielsweise vom Einfallswinkel, der Standorthöhe oder der Beschaffenheit der Atmosphäre. Abhängig von diesen Faktoren trifft das Licht entweder mit einer größeren oder einer niedrigeren Wellenlänge auf. Lichtstrahlung mit einer größeren Wellenlänge bei gleichbleibender Amplitude resultiert in niedrigeren Energiepotentialen als Strahlung mit kürzerer Wellenlänge.

Bei der solaren Einstrahlung ist zu bedenken, dass diese sich grob aus diffuser und direkter Strahlung zusammensetzt [118]. Die direkte Strahlung E_{Direkt} umfasst dabei jegliche Einstrahlungsenergie, welche von der Sonne direkt auf den Referenzpunkt trifft [117]. Die diffuse Strahlung E_{Diffus} schließt vom Boden oder anderen Gebäuden reflektierte Strahlung sowie durch Wolken und Nebel verminderte Strahlungsenergie ein [18, 20]. Besonders im Kontext urbaner Topografien spielt das Zusammenspiel der unterschiedlichen Strahlungsarten und der Anteil diffuser Strahlung eine immense Rolle bei der Berechnung und realistischen Schätzung von PV-Potentialen.

Die Gesamtheit aller Strahlungsarten wird als Globalstrahlung E_{Glob} bezeichnet (vgl. Gleichung 4.4.1) [118]. Diese ist auch die Größe, die bei der Messung von Einstrahlungsenergie

an den jeweiligen Messstationen direkt aufgenommen wird [119]. Die direkte Messung der einfallenden Strahlungsenergie, von der Außenhülle der Erde aus direkt auf eine senkrechte Erdoberfläche, würde im Durchschnitt 1.367 Watt pro Quadratmeter ergeben [20, 35]. Sie wird auch als Solarkonstante bezeichnet [35].

$$E_{\text{Glob}} = E_{\text{Direkt}} + E_{\text{Diffus}} \quad (4.4.1)$$

An dieser Stelle müssen die Ergebnisse aus der Dissertation von Quaschnig [20] berücksichtigt werden. Im Rahmen der Dissertation wurde untersucht inwiefern Abschattungen Verluste bei den PV-Anlagen generieren und wie sich diese modellieren lassen. Simple Modelle zur Ermittlung der Abschattungsverluste auf Basis von Sonnenbahndiagrammen wurden aufgestellt, zudem diverse 3D-Modelle entwickelt, welche mit Hilfe von Computern und Implementierungen ausgeführt werden können.

Ebenso liegen diverse theoretische Modelle und Bibliotheken vor, welche in der Lage sind Strahlungseinbußen aufgrund von verschatteten Zellen zu berechnen. Dabei ist wichtig hervorzuheben, dass die Strahlungseinbußen hauptsächlich von der Verschattung der Module abhängt und im Detail von der angewandten elektrischen Topologie [18, 20]. In der Arbeit von Quaschnig wurde bereits untersucht inwiefern unterschiedliche Verschattungen der PV-Anlagen im Durchschnitt bessere Leistung erbringen können [20]. Im Vorfeld ist dies jedoch schwierig einzuschätzen, da sich einige Situationen als unvorhersehbar erweisen, so beispielsweise wann und an welchem Modul eine Verschattung genau vorliegen wird. Jedoch sind gut brauchbare Packages vorhanden, wie das Python `pvl` Package [120], welches vereinfacht diverse Modelle mit bestimmten festen Annahmen zur Simulation anbietet. Eine besondere Vereinfachung findet sich in der Annahme, dass Verschattung ausschließlich die direkte Sonneneinstrahlung betrifft und bei der diffusen Strahlung davon ausgegangen wird, dass die gesamte Bandbreite auf den PV-Anlagen ankommt. Dieser Umstand entspricht nicht der realen, praktischen Anwendung. Modelle zur Berechnung der Strahlungseinbußen bei diffuser Strahlung sind weitaus komplexer und dahingehend anfälliger für Fehler [121].

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen für die Ermittlung und Modellierung von Verschattungen erörtert. Insbesondere wurde auf die Position der Sonne und die Berechnungsgrundlagen eingegangen. Zudem konnten weitere Techniken in der aktuellen Forschungslandschaft aufgezeigt werden, welche ebenfalls bei der Ermittlung von Verschattungen Verwendung finden. Abschließend wurden die Strahlungseinbußen fokussiert betrachtet, welche im Kontext der verschatteten PV-Module verzeichnet werden.

5 Datenverfügbarkeit und Beschaffung

Von besonderer Relevanz in dieser Forschungsarbeit ist die Verfügbarkeit von öffentlich zugänglichen Daten und wie diese bestmöglich in ein Modell integriert werden können, um besonders akkurate und realistische Prognosen ermitteln zu können. Nicht nur im Kontext der PV-Potentialermittlung, sondern ebenfalls rund um die Energiewende und der damit verbundenen Datenanalyse ist die Verfügbarkeit von höchster Bedeutung.

Besonders hervorzuheben ist, dass die Bundesrepublik und das Land NRW im Besonderen eine außerordentliche Arbeit in der Veröffentlichung von Daten in allen möglichen Bereichen leisten. Mit der Initiative Open Government in NRW auf der Plattform von OpenNRW [102] stehen allen Bürgerinnen und Bürgern sowie jeder Forschungseinrichtung seit 2017 kostenlos Daten in den Bereichen Bevölkerung, Bildung und Wissenschaft, Geobasis, Geologie, Gesundheit, Infrastruktur, Bauen und Wohnen, Transport und Verkehr, Umwelt und Klima zur Verfügung [122].

Zusätzlich existiert für NRW das Geoportal [76], welches dem Anschein nach dieselben Daten publiziert wie OpenNRW, jedoch eine feinere Selektion erlaubt. Dies wird dadurch erreicht, dass Datensätze und Kategorien auf einer interaktiven geografischen Karte spezifisch auf das betrachtete Gebiet abgestimmt werden können. Diese sind ebenfalls kostenlos zu beziehen. Ein Service, welcher nicht von allen Bundesländern angeboten wird. In Bayern beispielsweise müssen die Daten kostenpflichtig erworben werden [123].

In diesem Kapitel wird erläutert, welche Datenformate verwendet wurden und inwiefern diese Schwächen aufweisen, die bei der Umsetzung der Modellierung für Restriktionen gesorgt haben. Des Weiteren soll erörtert werden, welche Prozesse und Techniken angewandt werden können, um diese Restriktionen zu umgehen. Zu diesen Möglichkeiten zählen u. a. geometrische Softwaretools, Programmbibliotheken und Algorithmen der geografischen Informationsverarbeitung. Als erstes wird dabei der Prozess der Datenauswahl und ihrer Beschaffung beschrieben. Dabei werden ebenfalls die eingesetzten Technologien und ihre Vor- und Nachteile für das Forschungsvorhaben besprochen.

Betrachtet werden als erstes die LiDAR-Laserscan-Daten, da diese die Basis für die Gebäuderekonstruktion darstellen und als Grundlage für die Forschungsarbeit dienen. In diesem Kontext werden die unterschiedlichen Versionen und deren jeweilige Eigenschaften analysiert. Nachfolgend liegt der Fokus auf den diversen Gebäudemodellen, die öffentlich bereitgestellt werden. Es wird zudem begründet, weshalb die Gebäudemodelle im Rahmen dieser Forschungsarbeit in einen alternativen Kontext eingeordnet wurden und anders verwendet werden, als es bei anderen Potentialanalysen bisher der Fall war. Insbesondere soll auf die Unterschiede zwischen den verfügbaren Detaillevels eingegangen und erläutert werden aus welchen Gründen die aktuell verfügbaren Detaillevels relativ unbrauchbar für den Zweck dieser Arbeit sind. Anschließend soll die Einbettung von denkmalgeschützten Gebäuden vorgenommen werden. Die Schwierigkeit auf dieser Umsetzungsebene liegt in der Datenbeschaffung begründet. Mangelnde Vernetzung zwischen den Regionen und feh-

lende Einheitlichkeit, welche in einer vielfältigen Datenstruktur mündet, sind als Gründe aufzuführen. Hinzu kommt noch die Tatsache, dass einige Datensätze sehr alt sind und z. B. nur im Papierformat zur Verfügung stehen.

5.1 3D-Messdaten Laserscanning

In einem Turnus von fünf Jahren werden die Gebietsflächen von NRW mit Hilfe von flugzeuggestütztem Laserscanning erfasst [124]. Die Gebietsflächen werden dabei nicht vollumfänglich abgeflogen, sondern in Teilflächen unterteilt und in einem bestimmten Jahr erfasst [124]. Die Flüge für ein bestimmtes Gebiet werden dabei immer am Anfang eines jeden Jahres festgesetzt, sodass spätestens am Ende des Flug-Jahres die Daten aufbereitet auf dem Portal von OpenNRW zum Download bereitstehen.

So konnte es sein, dass zum Zeitpunkt der Anfertigung der Arbeit der älteste Datensatz aus dem Jahr 2015 stammt und der neueste aus dem Jahr 2020. Eine Übersicht der Jahre, in denen die Laserscans für dedizierte Gebiete NRWs stattgefunden haben, findet sich in Abbildung 5.1. Die 3D-Messdatensätze ab dem Jahr 2017 konnten dabei aufgrund zusätzlich abgespeicherter Parameter effizienter verarbeitet werden als die Datensätze, welche vor dem Jahr 2017 aufbereitet wurden. Die genauen Zusammenhänge und Prozesse werden dabei in Kapitel 6 behandelt.

Mit dem flugzeuggestützten Laserscanning (Airborne Laser Scanning, im Folgenden ALS) werden, wie der Name vermuten lässt, aus einem Flugzeug heraus Laserpulse auf die Erdoberfläche gesendet [125]. Dabei handelt es sich um eine Methode zur Fernerkundung und dient somit der Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche. Im Falle von ALS handelt es sich somit um den Einsatz von elektromagnetischen Wellen (*Light detection and ranging*, kurz LiDAR) zur Erstellung von Punktwolken, welche die Erdoberfläche mit all ihren Gebäuden, Vegetation und anderen Strukturen abbilden [125]. Dabei kommt seit dem Jahr 2017 das sogenannte *Full Wave Laserscanning* in NRW zum Einsatz [126]. Zu jedem Koordinatenpunkt kommen damit zu dem bereits vorher erfassten Höhenwert auch ein Intensitätswert der Reflexion, der Winkel, *Last Return* und *First Return* sowie für viele Bereiche *Medium Return* Werte (Zwischenreflexionen, siehe Abbildung 5.3). Die technischen Spezifikationen werden im Abschnitt 5.1.1 und in Kapitel 6 tiefergehend betrachtet. Besonders die letzten drei Werte sind für die Extraktion der digitalen Gelände- und Oberflächenmodelle relevant [126]. Im Abschnitt 5.1.2 wird dabei näher auf die Nutzung und technischen Aspekte des digitalen Geländemodells (DGM) und des digitalen Oberflächenmodells (DOM) eingegangen.

Neuere LiDAR-Aufnahmen beinhalten bereits eine automatische Klassifizierung der Punkte, sodass nicht nur Bodenpunkte als solche gekennzeichnet sind, sondern auch ggf. Vege-

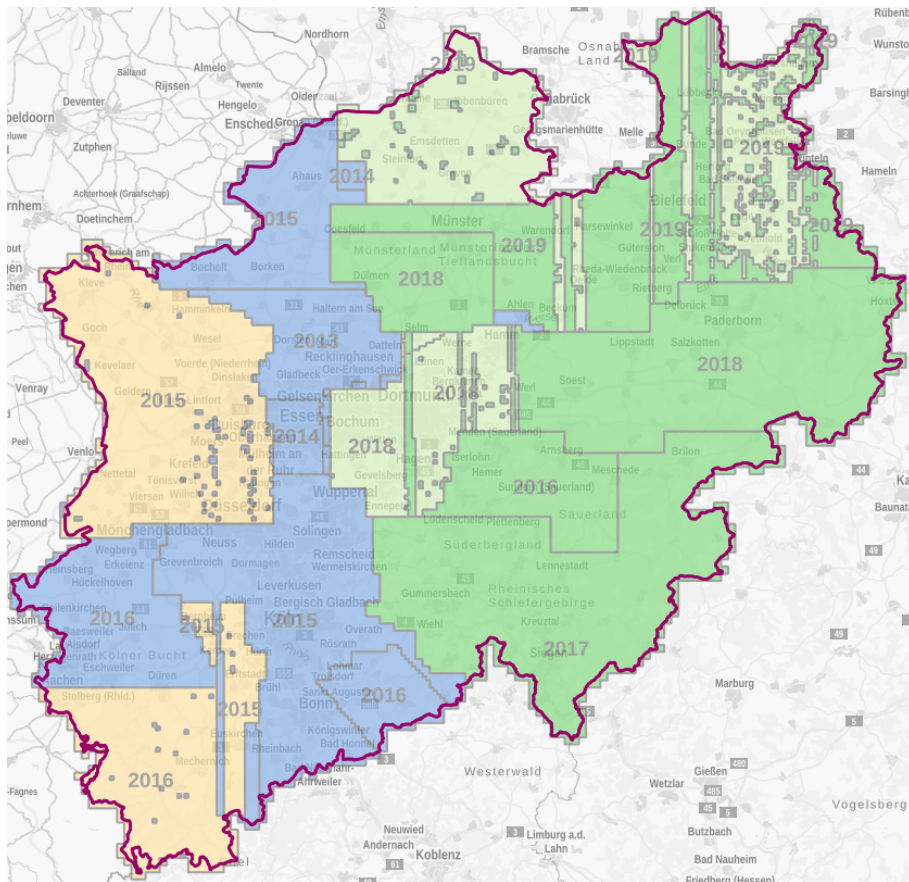


Abbildung 5.1: Übersichtskarte der Regionen in NRW inklusive Jahresangabe des letzten Laserscan-Flugs. Abbildung aus [124].

tation, Gebäude und Gewässer [126]. Eine vollständige Liste der Punktkategorien findet sich in Tabelle 5.1 und wird durch Abbildung 5.2 ergänzt.

In den gängigen Geoinformationsanwendungen und Solarkatastern wird nicht die Punktwolke selbst verwendet. Stattdessen werden die 3D-Messdaten zu einer flachen Rasterkarte verarbeitet [47, 125, 127, 128]. Dieser Vorgang ist bekannt unter der Bezeichnung „Rasterisierung“. Dabei wird die enorme Datenmenge, die durch die Speicherung der einzelnen Punkte mit ihren dreidimensionalen Koordinaten und zusätzlichen Eigenschaften aufkommt, auf eine zweidimensionale Karte, bestehend aus Kacheln mit den aufgezeichneten Eigenschaften, reduziert. Durch den Prozess der Rasterisierung wird ein einheitliches Raster über die gesamte verfügbare Fläche gelegt, mit einer Größe, die zur Punktdichte der Daten passt. Beim LANUV waren das beispielsweise Raster von 50 x 50 cm im Durchschnitt [17]. Sehr hoch aufgelöste Raster weisen mitunter auch eine Auflösung von 25 x 25 cm oder weniger auf [47]. Der Vorgang der Rasterisierung kann analog zum Konvertieren einer Vektorgrafik in eine pixelbasierte Grafik betrachtet werden. Im Normalfall ist dieser Schritt der Ausgangspunkt für die Erstellung der digitalen Oberflächenmodelle, welche in herkömmlichen Solardachkatastern verwendet werden. Einer der Vorteile für die Anwen-

Tabelle 5.1: Auflistung der LiDAR-Klassen, wie sie durch die Flüge in NRW aufgezeichnet wurden, i.A.a. [126].

Punktkategorie	Klasse	Zuordnung in Abbildung 5.2
Geländepunkt, Bodenpunkt	2	Punkte 4, 5, 6, 9, 10
Kellerpunkt	24	Punkt 20
Brückenpunkt	17	Punkt 7
aufgefüllter Bodenpunkt (<i>synthetisch</i>) ^a	26	Punkte 12-15
aufgefüllter Gebäudepunkt (<i>synthetisch</i>) ^a	21	Punkte 16-18
aufgefüllter Gewässerpunkt (<i>synthetisch</i>) ^a	9	Punkt 19
<i>Last Return</i> (nicht Boden) ^b	20	Punkte 2, 11
Unklassifizierter Punkt	1	Punkte 21, 22
Hochpunkt (Rauschen)	18	Punkt 23

^a synthetische Punkte haben in der LAS-Spezifikation noch eine *Synthetic-Flag*. Dies wird in Abschnitt 5.1.1 näher erläutert. ^b Diese Punkte spielen besonders bei der Generierung des 3D-Gebäudemodells eine wichtige Rolle

dung dieses Verfahrens ist, wie bereits erläutert, die Reduktion der großen Datenmenge. Allerdings geht damit ebenso die Vereinheitlichung der Anzahl der Höhenwerte für ein bestimmtes Gebiet einher. Konkret bedeutet dies, dass beim Rasterisieren des Gebiets lediglich ein Höhenpunkt pro Kachel vorhanden ist. Wenn das Raster bzw. Gitter beispielsweise 1x1 m weit ist, dann wird lediglich ein Höhenwert pro Quadratmeter erreicht, statt der vormals durchschnittlichen 4-10 Höhenpunkte pro Quadratmeter.

Entscheidend beim Prozess der Rasterisierung ist die verfügbare mittlere Punktdichte in einem Gebiet. Für die Region NRW werden LiDAR-Datensätze mit einer durchschnittlichen Punktdichte von 4-10 Punkten pro Quadratmeter angeboten [124]. Diese Werte werden im Allgemeinen als eine hohe Punktdichte betrachtet, welche es ermöglichen viele Details der Oberflächenstruktur einzufangen. Dabei zieht eine höhere Punktdichte im Prozess der Rasterisierung kleinere Kacheln nach sich (analog zum Grafikbeispiel: kleinere Pixel) und damit ebenfalls mehr Details und Schärfe. Die kleineren Kacheln sind der Ausgangspunkt für die Erkenntnisse bezüglich der bereits diskutierten Solardachkataster. Die Erkenntnisse beziehen sich darauf, dass ebenso kleine Strukturen auf Dächern mit in die Berechnung und Bestimmung der solaren Einstrahlung einbezogen werden können. In Kapitel 6 wird auf diesen Umstand im Rahmen der Gebäudemodellierung und Rekonstruktion näher eingegangen. Da im Prozess der Rasterisierung allerdings die Punkte in einer definierten Kachelgröße gemittelt werden und die auf Dächern vorhandenen Strukturen oftmals relativ zur gesamten Dachfläche nur einen kleinen Teil der Punktmenge ausmachen, ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei dieser Punktdichte genügend Details abgebildet werden können eher gering. Wahrscheinlicher ist, dass ein Punkt, welcher einem

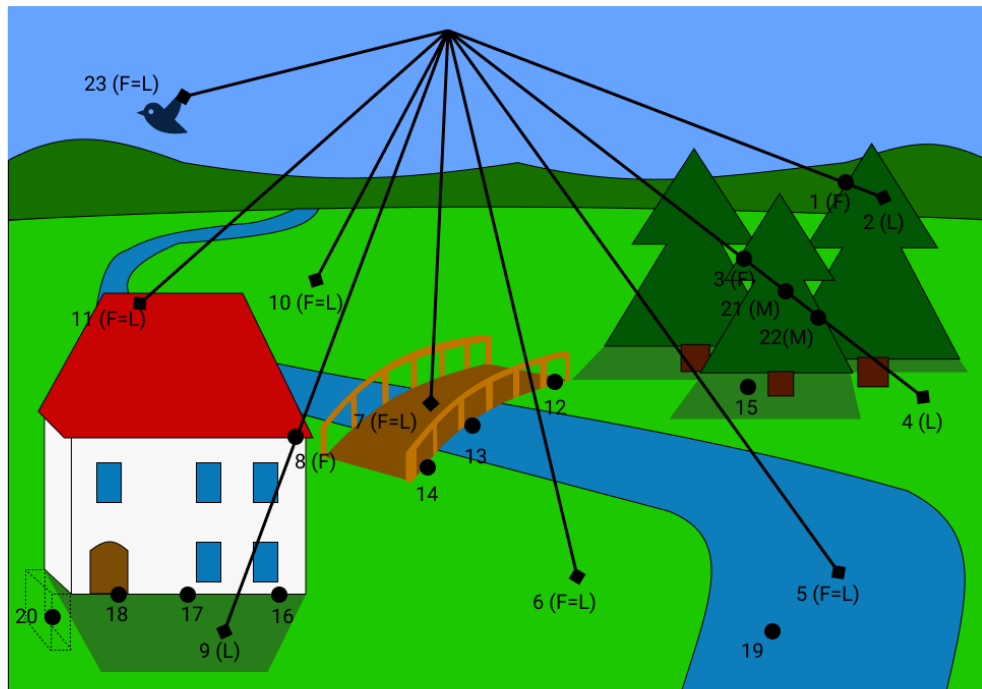


Abbildung 5.2: Funktionsweise der Airborne LiDAR-Messung und Punkt-Klassifizierung
 F = *First Return*, L = *Last Return*, M = *Medium Return*, i.A.a. [126].

Schornstein zugeordnet werden würde, am Ende auf die Höhe der Dachfläche reduziert werden würde.

Als weiterer, für die Betrachtung der Aussage der Detailtreue, relevanter Aspekt gilt, dass oftmals eine höhere Punktdichte in Regionen um Wälder und Vegetation erreicht wird. Deutlich zu erkennen ist, dass die durchschnittliche Punktdichte zwar im Bereich 4-10 Punkte/m² liegt, allerdings variiert die effektive Anzahl der Punkte pro Quadratmeter innerhalb einer Region stark und ist abhängig vom Winkel der Aufnahme und wahrscheinlich ebenso vom Zeitraum, in welchem die Aufnahme durchgeführt wurde. In aktuelleren Aufnahmen werden aufgrund des technischen Fortschritts höhere Punktdichten erreicht. Zudem werden durch die höhere Anzahl der Reflexionen in der Vegetation, bzw. in Waldgebieten und in Wohngebieten mit Bäumen, ebenfalls höhere Punktdichten in diesen Bereichen erzeugt. Dies liegt darin begründet, dass Bäume bzw. deren Blätter das Licht auf dem Rückweg zum Laserscanner öfter reflektieren. Daraus resultiert eine erhöhte Anzahl von Punkten. Schlussfolgernd liegt in allen Gebieten, in denen vermehrt Vegetation/Bäume existieren, im Schnitt eine höhere Punktdichte vor. Mit neueren Kameras wird zudem allgemein eine höhere Punktdichte erzielt. Folglich sorgen zwei Faktoren für eine höhere Punktdichte: Vegetation sowie bessere Technik. Dies ist ebenfalls ersichtlich

in Abbildung 5.3, welche die durch die Blätter von Bäumen entstehende Reflexionsanhäufung aufzeigt.

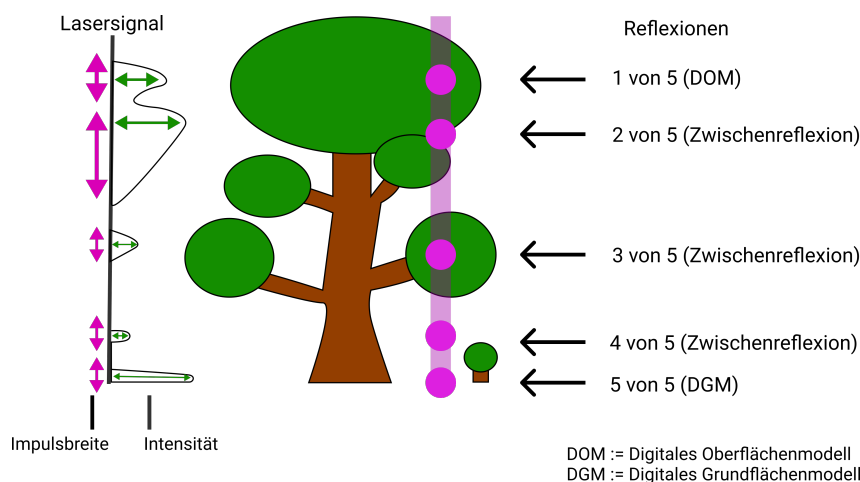
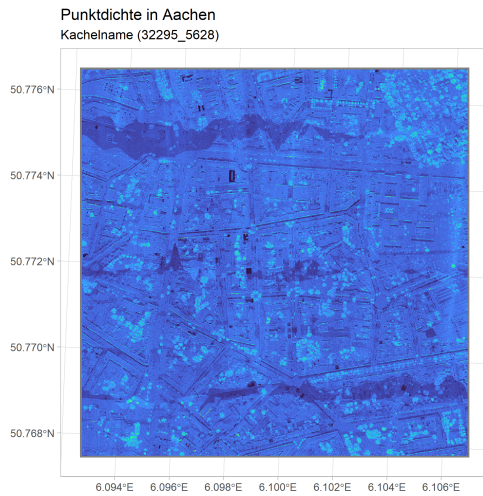


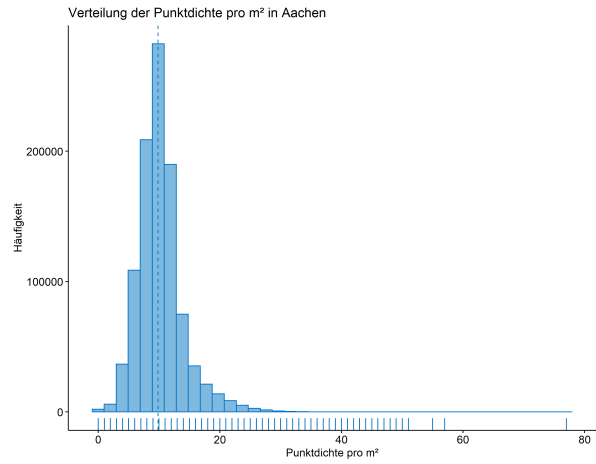
Abbildung 5.3: Ansicht der Anzahl reflektierter Laserpulse beim Auftreffen auf das Blätterdach von Bäumen. Es werden durch die Blätter mehrere Reflexionen zurückgesendet, i.A.a. [126].

Im weiteren Verlauf stellt dies einen der Prozessschritte dar, mit denen die Identifizierung von Bäumen stattfindet. Neuere Aufnahmen nutzen ebenfalls einen Prozess zur automatischen Klassifizierung von Punkten. Die Abbildung 5.4 verdeutlicht, wie sich in einigen Beispielregionen, die aus unterschiedlichen Erfassungszeiträumen stammen, die Verteilung der Punktdichte pro Quadratmeter unterscheidet. Dabei ist der Effekt, den die Vegetation auf die ermittelte Punktdichte hat, ebenfalls in den Betrachtungshorizont aufgenommen worden.

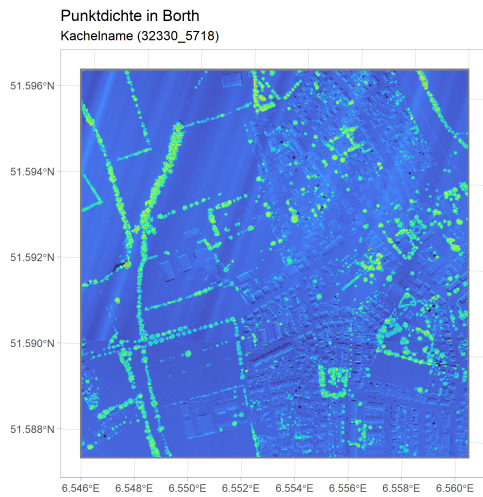
Im Rahmen dieser Forschungsarbeit unterscheidet sich der Einsatz der 3D-Messdaten von den Anwendungen der Solardachkataster. Die Punkte werden hauptsächlich verwendet, um Baumstrukturen zu modellieren und Gebäude mit realistischeren Proportionen und höherem Detailgrad zu rekonstruieren. Diese werden anschließend als Basis für die Bestimmung der Verschattung über einen Jahreszeitraum verwendet. Damit wird der Effekt von gegenseitiger Gebäudeverschattung (G2G), von Verschattung durch Bäume (B2G) und durch Dachstrukturen (E2G) auf die freiliegende Dachfläche ermittelt. Die freiliegenden Potentialflächen werden im weiteren Verlauf für eine Solarpotentialanalyse weiterverwendet. Hierdurch lässt sich die Frage klären, ob und wie viel Potential Dachflächen-PV in NRW vorweist und in welcher Relation die Ergebnisse zu den vom LANUV stehen. Daraus schlussfolgernd wird eine Bewertung der Umsetzbarkeit der Energiewende ermöglicht werden.



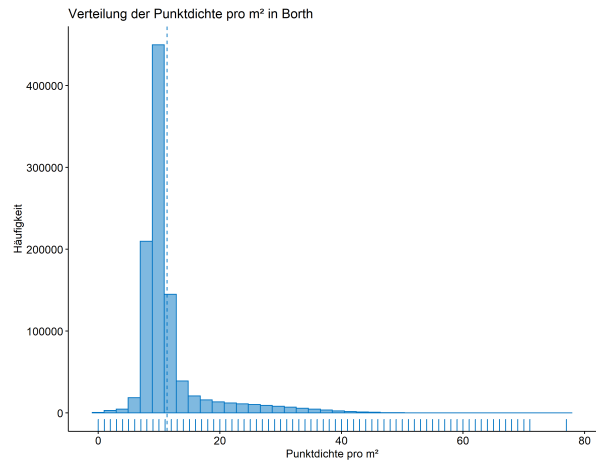
(a) Punktdichteraster Aachen



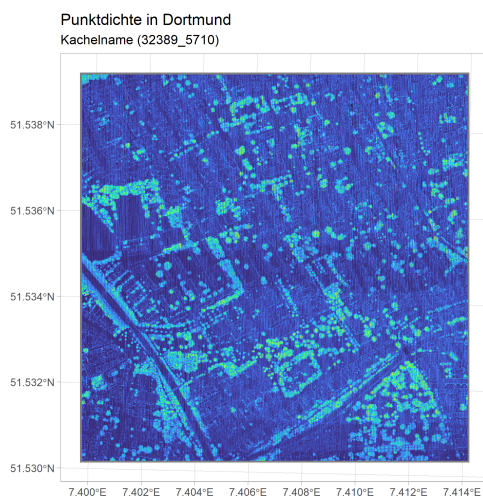
(b) Punktdichtehistogramm Aachen



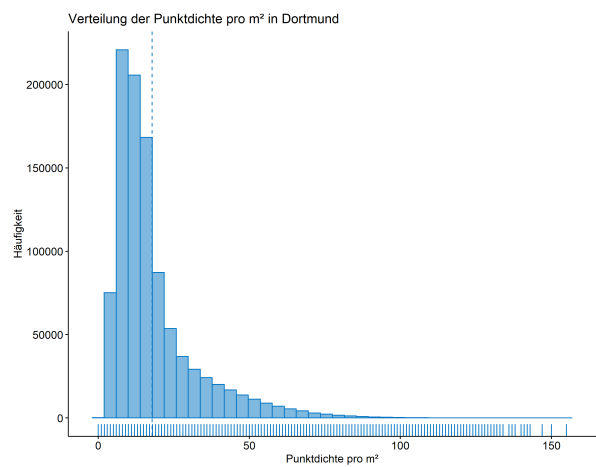
(c) Punktdichteraster Borth



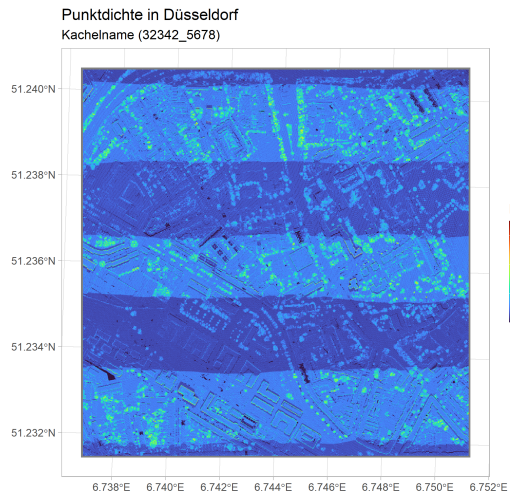
(d) Punktdichtehistogramm Borth



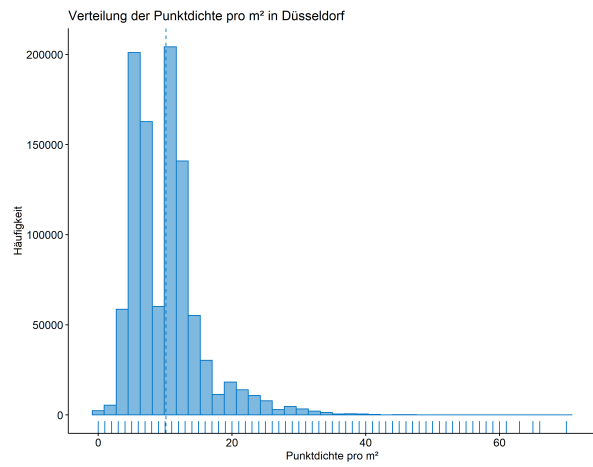
(e) Punktdichteraster Dortmund



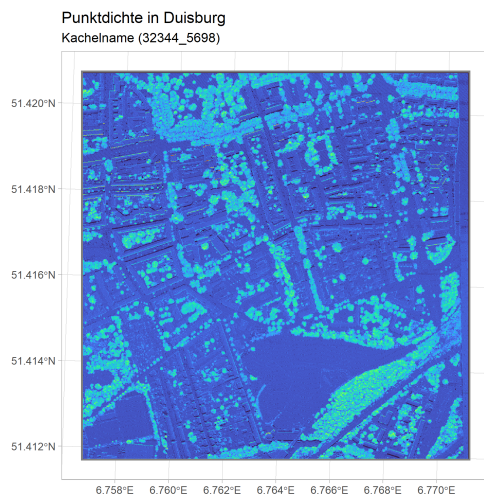
(f) Punktdichtehistogramm Dortmund



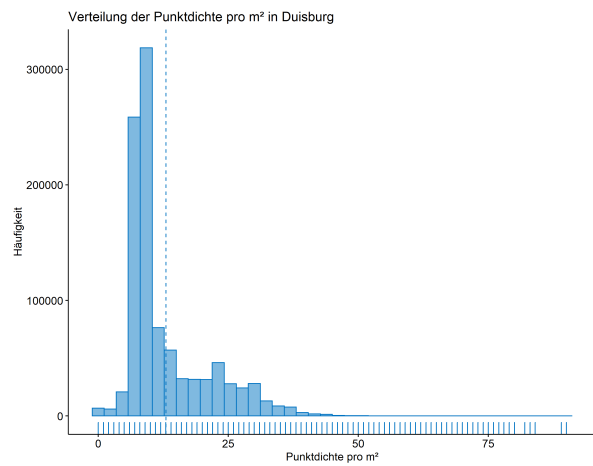
(g) Punktdichteraster Düsseldorf



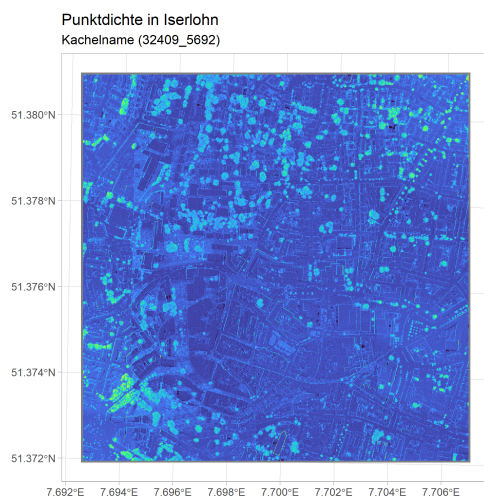
(h) Punktdichtehistogramm Düsseldorf



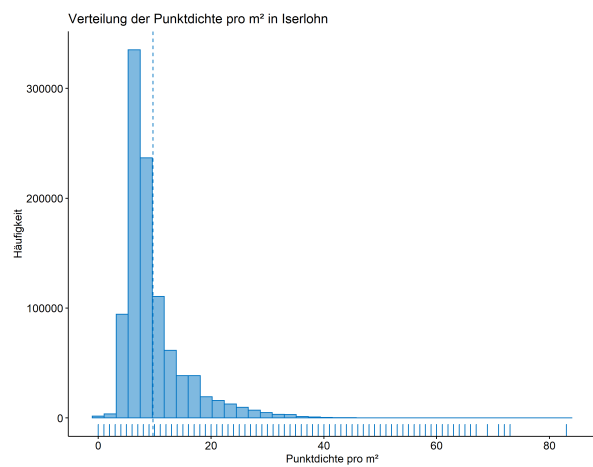
(i) Punktdichteraster Duisburg



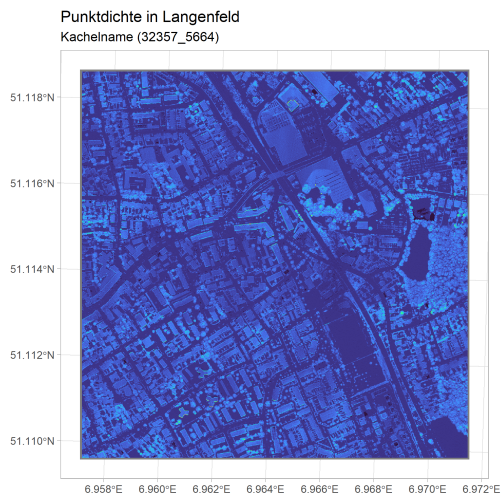
(j) Punktdichtehistogramm Duisburg



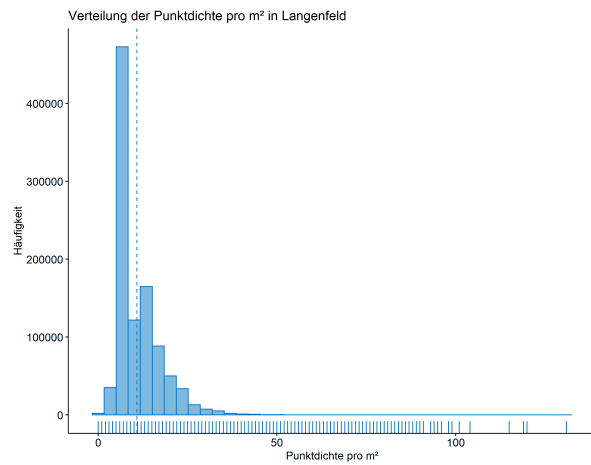
(k) Punktdichteraster Iserlohn



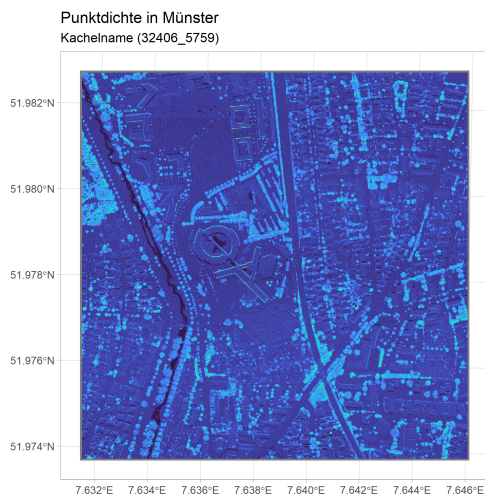
(l) Punktdichtehistogramm Iserlohn



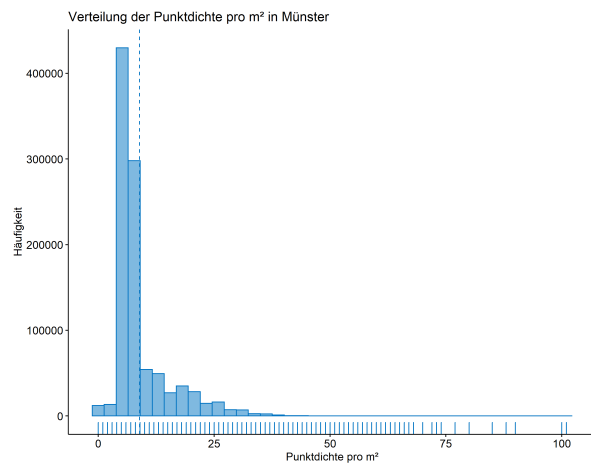
(m) Punktdichteraster Langenfeld



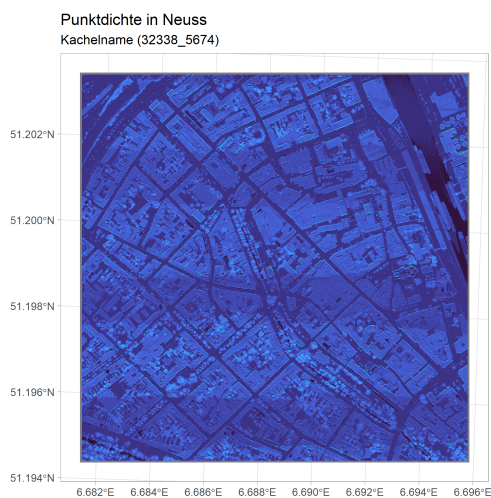
(n) Punktdichtehistogramm Langenfeld



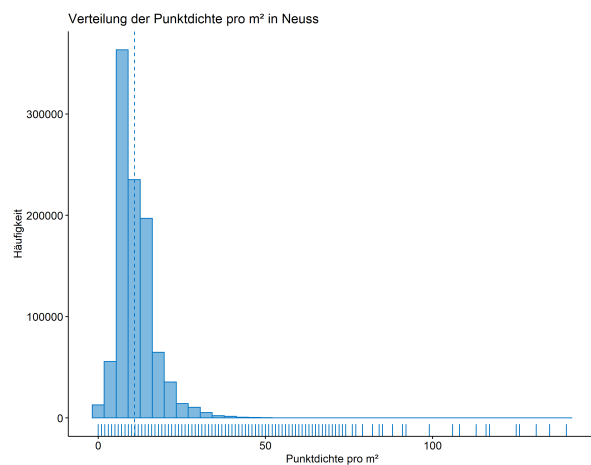
(o) Punktdichteraster Münster



(p) Punktdichtehistogramm Münster



(q) Punktdichteraster Neuss



(r) Punktdichtehistogramm Neuss

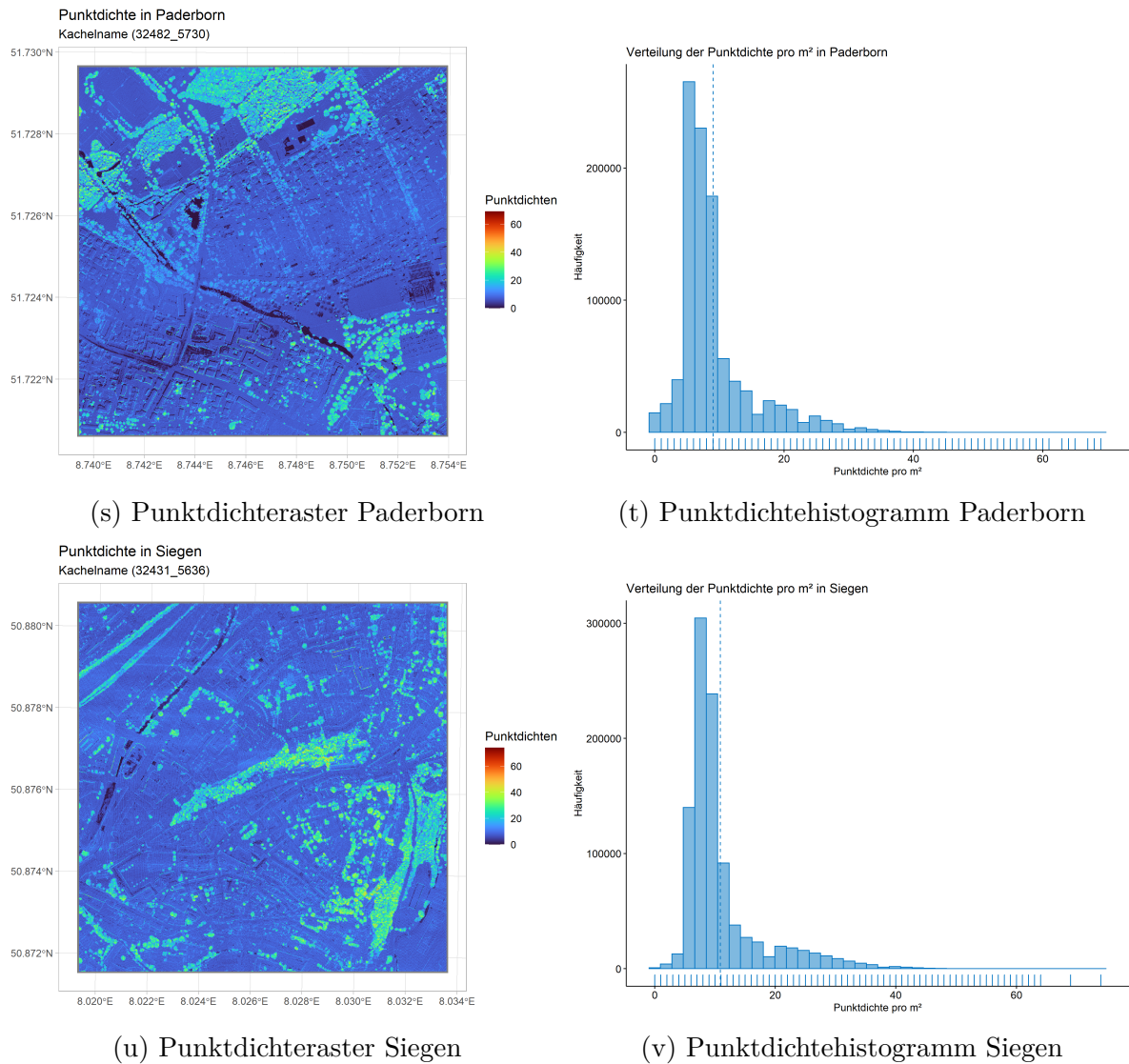


Abbildung 5.4: Punktdichte und entsprechende Verteilung der Punktdichte für exemplarische Regionen in NRW.

5.1.1 LiDAR-Technologie und Anwendungsmöglichkeiten

In den vergangenen Jahrzehnten hat das LiDAR-Verfahren im Rahmen der Fernerkundungssensorik große Bedeutung erlangt, was nicht zuletzt an der hohen Detailtreue liegt, die bei der Datengenerierung und Abbildung erzielt wird [125]. Der erfolgreiche Einsatz dieser Technologie im Bereich der Geoinformationsverarbeitung, Geographie, Ökologie sowie Forstwirtschaft hat zur Verbreitung von LiDAR-Anwendungen geführt. Obwohl dabei einige unterschiedliche Definitionen zum Thema Fernerkundung in der Literatur existieren, wird allgemein als Basis für jegliche Technologie in diesem Bereich das elektromagnetische Spektrum angenommen [125]. Der relevante Teil des elektromagnetischen Spektrums hat dabei innerhalb der Wellenlängen von 10^{-12} bis 10^5 m Platz in der Forschungsliteratur und in technologischen Anwendungen [125]. Dabei erstreckt sich das Intervall der sichtbaren elektromagnetischen Strahlung, welche allgemein als “Licht” bezeichnet wird, nur auf etwa 380 bis 730 nm (siehe Abbildung 5.5).

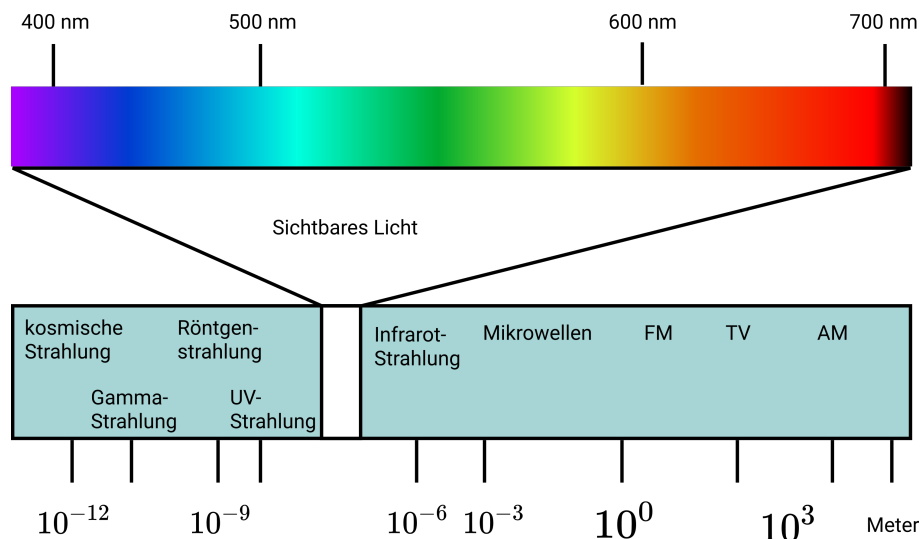


Abbildung 5.5: Darstellung des elektromagnetischen Spektrums und des Teils, der zum sichtbaren Licht gehört, i.A.a. [125].

Dabei lässt sich zwischen aktiven und passiven Fernerkundungssystemen unterscheiden. Die passiven Systeme nutzen bereits vorhandene, beispielsweise von der Sonne emittierte und reflektierte Energie. Aktive Systeme hingegen verwenden eine eigene Energiequelle und emittieren die Strahlung in die Richtung ihres Ziels. Dabei ist der entscheidende Vorteil, dass diese aktiven Systeme unabhängig vom Wetter und anderen Umweltfaktoren sind und akkurate Berechnungen von beispielsweise Distanzen erlauben. [127]

Bei der schlussendlichen Datenverarbeitung und -speicherung finden die relevanten Prozessschritte statt, welche die Datenausgabe und potentiellen Anwendungszwecke beeinflussen. Es hängt dabei von den eingesetzten Laserscan-Geräten ab, welche Daten am Ende in die LiDAR-Datensätze aufgenommen werden. Beispielsweise sind einige Geräte in der Lage Zwischenreflexionen zu registrieren und somit mehr Laserpulse zu detektieren. Die

am weitesten verbreitete Dateispezifikation für LiDAR-Daten ist das LAS-Datenformat. Dieses wird bei den Datensätzen von OpenNRW in der Version 1.2 [129] verwendet. In der Spezifikation sind auch die möglichen Felder definiert, die bei der Datengenerierung abgespeichert werden können. Wie bereits zuvor erwähnt, sind die essentiellen Werte stets die X und Y-Koordinaten. Diese dienen dazu die räumliche Position festzulegen. Ohne diese Koordinaten bieten die Daten keinen besonderen Mehrwert im Rahmen der Fernerkundung, da ein räumlicher Bezug zwingend notwendig ist. Zusätzlich werden die Höhenwerte, also die Z-Koordinaten, abgespeichert. Diese drei Werte (in Verbindung mit der Georeferenzierung) stellen das absolute Minimum dar, welches in den Datensätzen vorhanden ist.

Die Spezifikation des LAS-Datenformats ermöglicht allerdings auch Klassifizierungen der Punkte sowie einiger anderer Daten. Im Anhang C.1 befindet sich eine Übersicht aller möglichen Felder und Flaggen für das LAS 1.2 Format, an dieser Stelle sollen nur die wichtigsten beschrieben werden. Zu diesen gehören neben den bereits erwähnten X, Y und Z-Koordinaten auch die *Return Number*, *Number of Returns*, *Classification*, *Intensity* (falls vorhanden) und ggf. die *GPS Time* (falls vorhanden). Die Datentypen und Größe der Felder wird in der LAS 1.2 Spezifikation im Detail beschrieben [129] und in Kapitel 6 noch einmal aufgegriffen.

Das Classification-Feld ist bei der Ableitung des Gebäudemodells von besonderem Interesse, da es unter anderem auch die Bit-Flaggen des Punktes setzt. Die einzige relevante Flagge hierbei ist die „Synthetic-Flag“, daher wird auf diese hier kurz eingegangen. Ein Punkt, welcher das „Synthetic-Bit“ gesetzt hat, wurde durch eine andere Technik als durch die LiDAR-Laserscanning Sensoren erstellt. Eine weitere Möglichkeit wäre z.B. durch Photogrammetrie. Das Classification-Feld hat insgesamt eine Größe von einem Byte (acht Bits). Die ersten fünf Bits dienen dabei zur Spezifikation der Punktklassifizierung und bieten nach der LAS 1.2 Spezifikation Platz für bis zu 31 unterschiedliche Klassen, davon sind 11 bereits Teil der *ASPRS Standard LiDAR Point Classes* und die anderen sind unbelegt bzw. *Reserved for ASPRS Definition*. Wie in Tabelle 5.1 ersichtlich, wurden einige der nicht-belegten Klassen von den Mitarbeitern, die die Daten für OpenNRW verarbeitet und bereitgestellt haben, belegt. Das sechste Bit speichert die Synthetic-Flag. Der Vollständigkeit halber gilt es an dieser Stelle zu erwähnen, dass das siebte Bit für die „Key-Point“ und das achte Bit für die *Withheld* Flagge steht. Diese werden allerdings nicht verwendet und werden nicht weiter betrachtet. Dem Anhang C lässt sich eine vollständige Liste aller Standardklassen laut Definition nach LAS 1.2 entnehmen. Die weiteren Datentypen und Größe der Felder werden in der LAS 1.2 Spezifikation [129] im Detail beschrieben und in Kapitel 6 abermals aufgegriffen.

5.1.2 Digitales Gelände- und Oberflächenmodell und normalisiertes Oberflächenmodell

Die Basis für einen Großteil der Prozesse bei der Geoinformationsverarbeitung hängt mit Modellen des Gebietes zusammen, die im Betrachtungshorizont liegen. Diese Modelle bilden in unterschiedlichen Graden und Detaillevels die Erdoberfläche ab. Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen dem digitalen Geländemodell (DGM) und digitalem Oberflächenmodell (DOM). Neben dem DOM gibt es zudem das normalisierte digitale Oberflächenmodell (nDOM), welches das Gelände begradigt und somit sämtliche Objekte auf der Oberfläche mit ihrer absoluten Höhe darstellt (vgl. Abbildung 5.6) [130]. Alle Modellvarianten können in zwei Formen vorkommen, die auch bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt wurden: als Punktwolke oder Raster [131]. Ein DGM, welches beispielsweise in Rasterform vorliegt, wird auch als Gitter-DGM bezeichnet, da das Raster auch wie ein einheitliches Gitter auf einer Gebietskarte betrachtet werden kann [128].

Das digitale Geländemodell bildet die Geländeform und Topografie der Erdoberfläche ab (vgl. Abbildung 5.6). Im Normalfall ist dieses eher grob strukturiert und hat eine niedrige Auflösung, damit Bäume, Häuser und weitere Strukturen, die nicht die Struktur der Erdoberfläche abbilden, ihre Erscheinung und die Verarbeitungsprozesse nicht beeinflussen [131]. Das DGM wird genutzt um eine Analyse in Bezug auf das Gelände anzufertigen und dient als Basis der geotopografischen Analyse. Eine Beispielanwendung wäre die Analyse von Gebirgsformationen. Das digitale Oberflächenmodell repräsentiert die Erdoberfläche inklusive aller auf ihr befindlichen Objekte (vgl. Abbildung 5.6). Mit in die Punktwolke einbegriffen sind somit Bäume, Sträucher, Telefonmasten, Ampeln und ebenso weitere Strukturen, abhängig von ihrer Auflösung. Bei der normalisierten Variante des DOM wird in den meisten Fällen mit Hilfe des DGM gearbeitet. Dabei werden die Werte aus dem DGM vom DOM subtrahiert und dadurch entsteht das normalisierte DOM, welches nur noch die absoluten Distanzen vom Boden zur Oberseite des Objekts, das abgebildet wird, repräsentiert (vgl. Abbildung 5.6). Die Subtraktion ist dabei nur eine mögliche Technik die eingesetzt werden kann, um das normalisierte digitale Oberflächenmodell zu generieren. Wenn beispielsweise kein DGM zur Verfügung steht, müssen andere Techniken angewandt werden. Zusätzlich sollte angemerkt werden, dass die simple Subtraktion des DGM vom DOM nur in einem Raster, welches dieselbe Auflösung vorweist, ohne weiteres möglich ist. Dies bedeutet, dass sowohl DGM als auch DOM als Raster vorliegen und dieselbe Auflösung haben müssen. Andernfalls bedarf es der Ausführung weiterer Operationen. Wenn die Modelle als Punktwolken vorliegen und nicht rasterisiert sind, wird wiederum eine differente Methodik angewandt. Auf das Vorgehen in diesen Fällen wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

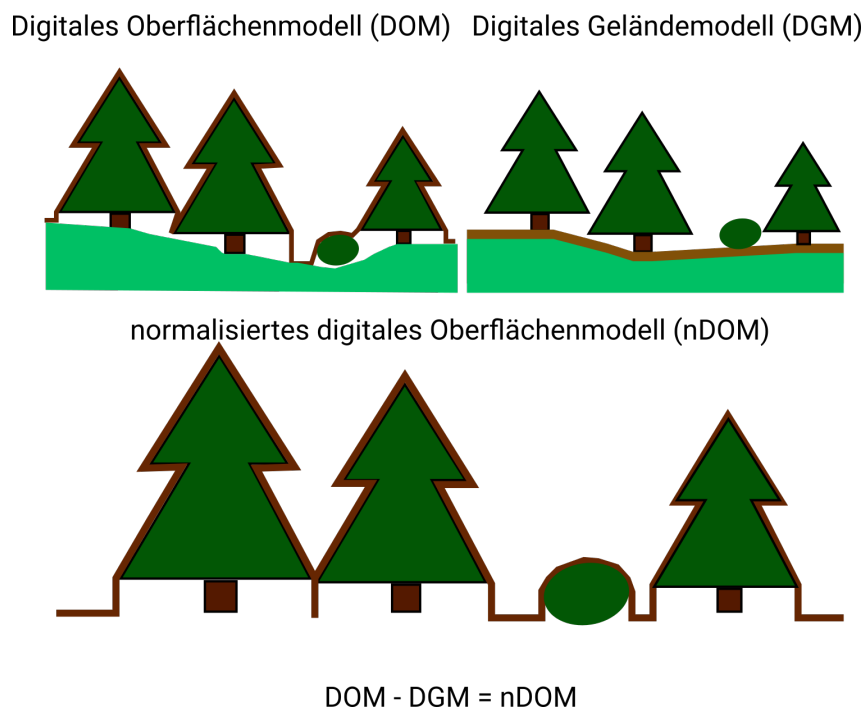


Abbildung 5.6: Grafische Darstellung von DGM, DOM und nDOM, i.A.a. [132].

5.2 3D-Gebäudemodell

Dreidimensionale Gebäudemodelle kamen in den vergangenen Jahren vermehrt zum Einsatz, um Städtestrukturen abzubilden und eine einheitliche Spezifikation für, von Menschen errichtete, Strukturen zu bieten. Besondere Anwendung finden diese 3D-Gebäudemodelle allerdings in der Geoinformationsverarbeitung, da hierbei die Besonderheiten der Städtestrukturen visuell dargestellt und für dreidimensionale Analyseverfahren eingesetzt werden können. In diesem Kontext kommen unterschiedliche Versionen und Spezifikationen in der Industrie und im akademischen Raum zum Einsatz [64]. Dabei haben sich weitestgehend zwei Formate durchsetzen können: das Building Information Modelling (BIM)⁸ und die seit 2010 bestehende City Geographic Markup Language (CityGML) [133], welche in Nordrhein-Westfalen entwickelt wurde. Besonderes Augenmerk liegt auf dem CityGML Format, da es auf einer Extension des XML Formats basiert und somit einer standardisierten Grammatik entspricht, die leicht durch einen Parser verarbeitet werden kann. Zusätzlich ist es das Format, welches ebenfalls vom Land NRW für das digitale Gebäudemodell bereitgestellt wird. Als einzigen Nachteil birgt das Modell die große Menge an

⁸Streng genommen ist das BIM nicht eine einzige, konkrete Spezifikation, sondern vielmehr ein Prozess, welcher in unterschiedlichen Softwarelösungen implementiert ist und das Verwalten von allen möglichen Informationen rund um ein bestimmtes Gebäude erlaubt. Es enthält also nicht primär Informationen zur Gebäudestruktur und dem Gebäudeaufbau, sondern vielmehr jede Information, die mit einem Gebäude assoziiert sein kann. Seit 2019 existiert in der ISO 19650 ein Framework für das BIM, basierend auf Standards, die im Vereinigten Königreich entwickelt wurden.

Daten, welche gespeichert und verarbeitet werden müssen, da das CityGML Format zu hoher Verbosität⁹ neigt und durch die vielen Verschachtelungen der Gebäudestrukturen und ihrer Definitionen, dementsprechend viele Abzweigungen aufweist. Diese werden in reinem Textformat, und damit als ASCII Datensatz gespeichert. Durch die vielen Textzeichen, die verwendet werden, erhöht sich jedoch zudem die Speichergröße einer durchschnittlichen Datei. Im Kontrast dazu steht das CityJSON Format [134], welches ebenfalls einem klaren Schema folgt und sich dadurch gut parsen lässt. Es ist wesentlich weniger verbos, da Strukturen nicht durch Tags markiert werden müssen und dadurch das Format bis zu sechs Mal kleiner ist als eine äquivalente CityGML Datei. Allerdings wird dieses nicht standardgemäß vom Land NRW angeboten. Einige Konvertierungstools sind verfügbar, welche öffentlich zugänglich sind.¹⁰ Diese wiesen allerdings Probleme mit den spezifischen bereitgestellten Daten auf und konnten somit keine Zuverlässigkeit garantieren.

Das CityGML Format liefert unterschiedliche Detailabstufungen. Diese werden als Level-of-Detail (LoD) bezeichnet und um eine numerische Angabe ergänzt, welche das Detaillevel beschreibt. Dabei stellt das Level-of-Detail 0 (LoD0) das niedrigste Detaillevel dar, bei welchem ein Gebäude als einzige Information die Koordinaten der Grundfläche aufweist. Das Level-of-Detail 1 (LoD1) ergänzt zusätzlich die Höhe des Gebäudes und stellt es somit als simple quaderförmige Struktur dar. Beim Level-of-Detail 2 (LoD2) werden Dächer mit vorgegebenen, standardisierten Dachformen modelliert. Somit sehen die Gebäudemodelle bereits realistischer aus. Allerdings spiegeln die standardisierten Dachformen nicht zwangsläufig die realen Dachwinkel wider und sind bei fehlenden Informationen lediglich flach dargestellt. Das Level-of-Detail 3 (LoD3) beinhaltet zu den standardisierten Dachformen auch die Positionen der Schornsteine und beispielsweise der Dachgauben. Das Level-of-Detail 4 (LoD4) wird hauptsächlich zur Darstellung des Interieurs eines Gebäudes verwendet und kennzeichnet die Räume und ihren Inhalt durch normierte Bezeichnungen. Der Abbildung 5.7 lassen sich die unterschiedlichen Darstellungen der Details entnehmen.

Die 3D-Gebäudemodelle liegen, ebenso wie die 3D-Messwerte, flächendeckend für das Landesgebiet NRW vor und beinhalten die Detailabstufungen LoD1 und LoD2. Hierbei ist zu unterscheiden, dass LoD1 lediglich die Höhe der Gebäude, extrahiert von den Punktwolken, mit einbezieht und die Gebäude als quaderförmige Strukturen darstellt. Das LoD2 nutzt hingegen noch weitere Merkmale der Gebäudemodelle und generiert damit standardisierte Dachformen für die Gebäude. Spezifikationen zu den Dachformen finden sich ebenfalls auf der Onlinepräsenz.¹¹ Alle Vorteile des CityGML 3D-Gebäudemodells zusammengefasst:

⁹Mit Verbosität ist im Falle des CityGML Datenformats gemeint, dass es durch die öffnenden und schließenden Tags und die vielen Attribute in den Dateien zu einer Menge Zeichen kommt. Diese sind oft redundant, aber notwendig, um die XML-ähnliche Struktur zu wahren und die Grammatik der Spezifikation zum Parsen zu nutzen.

¹⁰Beispielsweise `citygml-tools` [135].

¹¹Dachflächenbeschreibungen und Definitionen speziell vom AdV, gehören nicht zum offiziellen CityGML Spec-Sheet und werden in [136] definiert.

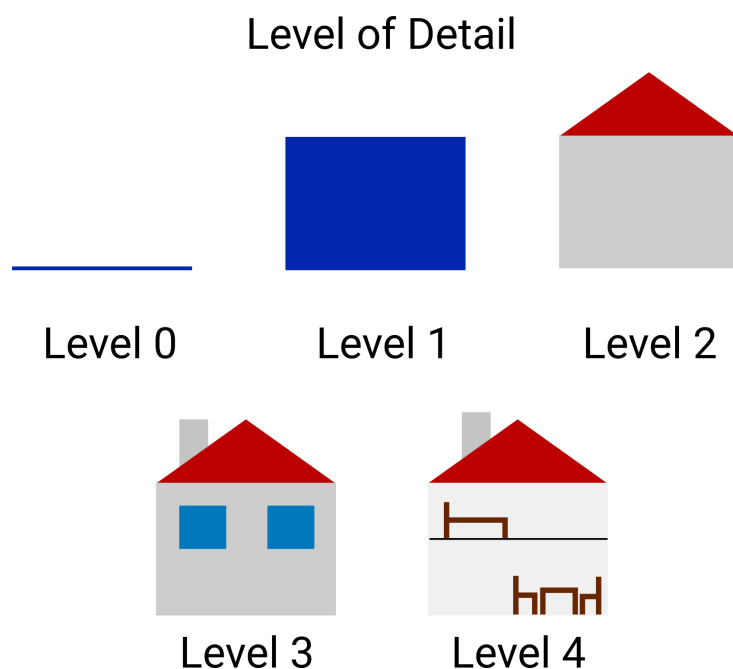


Abbildung 5.7: Übersichtliche Darstellung der Unterschiede zwischen CityGML Formaten, i.A.a. [64].

- Es bietet ein einheitliches, strukturiert definiertes Datenformat.
- Durch die XML-ähnliche Struktur ist die Verarbeitung relativ einfach und effizient.
- Die einzelnen, aufeinander aufbauenden Detaillevels ergänzen sich nahtlos und erlauben das Hinzufügen weiterer Details auch zu einem späteren Zeitpunkt.
- Die XML-ähnliche Struktur erlaubt es auch Informationen zu integrieren, die nicht mit der Geometrie der Gebäude zusammenhängen, wie beispielsweise Adressinformationen.
- Die XML-ähnliche Struktur erlaubt es ebenfalls eigene Tags zu definieren, welche zusätzliche Informationen beinhalten können, wie beispielsweise vom AdV die Kategorie / Funktion eines Hauses im „Function“-Tag.¹²
- Durch die Möglichkeit, in XML-ähnlichen Formaten die Strukturen hierarchisch zu definieren können Gebäude nutzerfreundlich als zusammenhängende Polygone beschrieben werden.

Die aufgeführten Vorteile sind auf keinen Fall extensiv, zeigen allerdings, welche Gründe es für die Nutzung im Allgemeinen für das CityGML-Format gibt. Im Zusammenhang dieser Forschungsarbeit wurde allerdings darauf verzichtet ausschließlich das CityGML-Format zu verwenden, da einige Limitationen mit den vorliegenden Daten vorliegen. Diese werden im folgenden Abschnitt detailliert erörtert. Um realistische Prognosen über Verschattungseffekte und somit auch über die Energieverfügbarkeit auf Dachflächen treffen

¹²Function-codes werden in [137] definiert.

zu können, bedarf es einer tieferen Detailebene, die leider im höchsten vorhandenen Detaillevel auf den Servern von OpenNRW, dem LoD2, nicht vorhanden sind.

Beschränkung des Gebäudemodells

Wie bereits erläutert besitzt das CityGML Gebäudemodell sämtliche positive Faktoren, die im Allgemeinen eine gute Verarbeitung und einen effizienten Einsatz erlauben. Nichtsdestotrotz existieren einige Probleme und Ungenauigkeiten der verfügbaren Daten, welche im LoD2 vorliegen. Diese führen zu Einschränkungen bei der Ermittlung des Energiepotentials und sollen im folgenden Abschnitt adressiert werden. Eine weitere Problematik stellt zudem die grundlegende Unsicherheit dar, die auf die Generierung der 3D-Gebäudedaten zurückzuführen ist [64], welche zwar nur am Rande aufgegriffen wird, jedoch einen nicht unerheblichen Einfluss hat. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit fällt dies nicht in den Betrachtungshorizont, da die CityGML-Daten direkt von den 3D-Messwerten abgeleitet und nur als Ergänzung zu ebendiesen verwendet wurden.

Im Allgemeinen gilt, dass die größte Schwäche der 3D-Gebäudemodelle für die Auswertung von Solarpotentialen auf Dachflächen, ihr Detailgrad ist. OpenNRW bietet, wie bereits angemerkt, die CityGML Gebäudedaten in LoD1 und LoD2 an. Prinzipiell ist dabei das LoD2 vorzuziehen. Allerdings berücksichtigen die standardisierten Dachformen nicht immer die realen Neigungswinkel der Dachflächen. Auch wird die Fläche vereinfacht und die Komplexität reduziert, um das Gebäudemodell und die Spezifikation nicht zusätzlich auszudehnen. Dabei werden Strukturen auf den Dächern nicht mit einbezogen, was zu einem Verlust von Dachgauben, Schornsteinen oder anderer Strukturen führt (vgl. Abbildung 5.8), welche allerdings auf das Solarpotential eines Daches einen erheblichen Einfluss ausüben können.

In diesem Kontext sind nicht nur die Unterschiede in der Detailtreue problematisch. Diese Strukturen werden erst ab dem LoD3 angeboten (vgl. Abbildung 5.7), welches aber mit wesentlich mehr Aufwand generiert werden muss. Dabei ist fraglich, ob in einem landesweiten Kontext jemals dieses Detaillevel breitflächig zur Verfügung gestellt werden kann und wird, da die Datenmenge bei diesem Detailgrad um ein Vielfaches ansteigt [64].

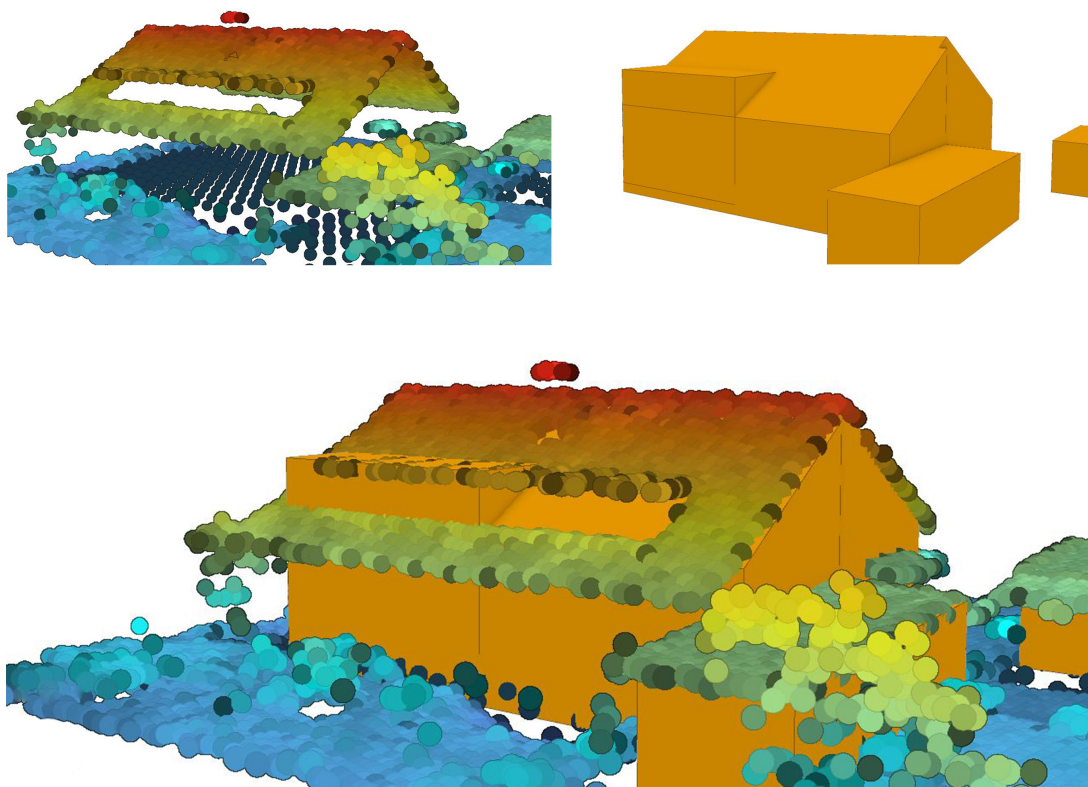


Abbildung 5.8: Punktwolke eines Gebäudes mit entsprechender Überlagerung des CityGML Gebäudemodells.

5.3 Denkmalschutz

Ein besonderer Hinderungsgrund für die Anbringung von PV-Dachanlagen, auf einem ansonsten gut geeigneten Dach, kann das Vorliegen von Denkmalschutz sein. In Nordrhein-Westfalen befinden sich über 82.000 Denkmäler in Form von Sakralbauten, historischen Wohn- und Geschäftshäusern sowie Adelsbauten und alten Befestigungsanlagen [138, 139]. Davon befinden sich 78 Prozent in Privatbesitz und der Großteil fällt unter die Kategorie der Baudenkmäler [138]. Ein besonderes Anliegen dieser Arbeit ist es, den Effekt des Ausschlusses dieser Gebäude auf die gesamte Energieverfügbarkeit für das solare Einstrahlungspotential zu ermitteln. Es kann vorweggenommen werden, dass es keine einheitliche Datenquelle gibt, um die Positionen oder Adressen der denkmalgeschützten Gebäude in NRW zu ermitteln. Einer der Hauptgründe für diesen Umstand liegt darin begründet, dass viele Datensätze veraltet sind und nur im Papierformat existieren. Die Digitalisierung jener älteren Daten, welche zu einem erheblichen Teil vor 1980 geniert wurden, dauert

bereits seit 2015 an. Das Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung des Landes Nordrhein-Westfalen schreibt dazu auf ihrer Internetpräsenz folgendes:

“Nach der Denkmalverordnung vom 13. März 2015 ist für Altdaten eine schrittweise Digitalisierung des Bestandes der Denkmäler im Rahmen der personellen und finanziellen Möglichkeiten der unteren Denkmalbehörden anzustreben. Dabei gewährleisten die Denkmallisten führenden Stellen, soweit möglich, dass der analoge Altdatenbestand in digitaler Form veröffentlicht wird.”[75]

Stand 30.09.2020 gab es keine Schnittstellen oder offizielle Server des Landes, über die entsprechende Daten bezüglich der denkmalgeschützten Gebäude heruntergeladen werden können. In der Theorie hätte der Datensatz durch die INSPIRE-Schnittstelle über `geoportal.nrw` bezogen werden können, diese hat die Daten allerdings nicht ausgeliefert und stattdessen eine Fehlermeldung zu dieser Zeit erzeugt. Die Daten hierfür wurden von den bei Wikipedia eingetragenen Denkmälern extrahiert. Dafür wurden alle entsprechenden Artikel, die Denkmäler in NRW enthalten, manuell gefiltert, damit anschließend automatisch ein Webscraper die Koordinaten und Adressen der Baudenkmäler abrufen und lokal speichern konnte. Dafür wurden insgesamt über 800 Artikel von Wikipedia verwertet, und in diesem Sinne über 23.000 Positionen erzeugt (von offiziell mehr als 82.000 Baudenkmälern). Über die Webseite von `denkmal.nrw` sind seit Anfang 2021 alle verfügbaren Koordinaten der eingepflegten Denkmäler ebenfalls abrufbar. Über die Zusammenfassung beider Quellen lässt sich eine Gesamtzahl von über 28.000 denkmalgeschützten Gebäuden in NRW generieren. Bis zur Finalisierung dieser Forschungsarbeit gab es keine einheitliche Schnittstelle, über welche sich Adressen oder Koordinaten simpel abrufen ließen. Allerdings fokussiert das Land NRW über die Initiative *Denk mal digital* Unterstützung für Kommunen bei der digitalen Erfassung und Vereinheitlichung der Daten zu den Denkmälern des Ministeriums für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung [140].

5.4 Solare Einstrahlungsreihen

Für die abschließende Potentialanalyse der Solarenergie muss eindeutig hervorgehoben werden, wie viel solare Energie auf eine bestimmte Dachfläche einfällt. Dafür muss, wie bereits im Abschnitt 4.4 erwähnt, von Messdaten Gebrauch gemacht werden. Diese Daten werden entweder für einen der über 320 konkreten Messstandorte, oder für das bundesdeutsche Gebiet gemittelt angeboten. Zudem stehen unterschiedliche Auflösungen zur Verfügung. Nutzer können zwischen 1-minütigen, 10-minütigen, täglichen, monatlichen oder jährlichen (Mittel-)Werten auswählen. Diese Daten werden in Deutschland vom Deutschen Wetterdienst (DWD) [141] aufbereitet und online zum kostenlosen Download bereitgestellt.

Für eine akkurate, standortabhängige Ermittlung der Strahlung wurden von den deutschen Messstandorten nur diejenigen ausgewählt, die sich in NRW befinden oder dem

Bundesland am nächsten sind. Somit standen mehr als 70 Standorte für die Messdatenauswertung zur Verfügung. Wie die Daten der Strahlungsreihen konkret bei der Einstrahlungssimulation verwendet wurden und mit welchen Softwarepaketen diese verarbeitet wurden, wird in Kapitel 6 ausführlich erörtert. Dort wird weiterhin dargelegt, wie die Einstrahlungsdaten, welche die Strahlung auf eine horizontale Fläche als Globalstrahlung darstellen, in die Komponenten Direktstrahlung und Diffusstrahlung aufgeteilt werden. Dieser Schritt ist von besonderer Relevanz für die Umrechnung der Einstrahlungsenergie von einer horizontalen Fläche auf eine geneigte Fläche.

5.5 Weitere Daten

Ebenso kamen weitere Daten der bundesdeutschen Fläche in Frage, die beispielsweise den Gebäudebestand umfassen. Diese liefern u.a. wichtige Erkenntnisse über die Aufteilung der Wohngebäude in die Kategorien Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhaus. Sie wurden vermehrt bei landesweiten Studien genutzt, so wie von Fath [36], Kaltschmitt [34, 35, 42] oder Quaschnig [41], wenn die Potentialermittlung auf Basis von statistischen Daten durchgeführt wurde. Hierbei wurde Gebrauch von jenen Daten gemacht, die vom Statistischen Bundesamt erhoben wurden, welche die Anzahl der Häuser in Deutschland umfasst. In diesem Kontext wurde zwischen Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäusern sowie Nicht-Wohngebäuden unterschieden. Zudem wurden dabei lediglich die Grundrissdaten der Häuser angegeben. Schlussfolgernd wurden nie konkrete Dachflächen-Größen berücksichtigt, sondern eine indirekte Berechnung durchgeführt. Bei den Angaben zu den Fassaden, in Bezug auf die Ermittlung der Fassadenpotentiale, wurde ebenfalls auf Umrechnungen zurückgegriffen [35, 36, 46].

In Kapitel 3 wurde eine Anzahl diverser Faktoren aufgezeigt, welche eine Anbringung von PV-Dachanlagen verhindern können. Diesbezüglich ist es für den Großteil dieser Parameter nicht sinnvoll, sie in das Modell zu integrieren, da sich ihr Einfluss nicht akkurat abschätzen und quantifizieren lässt oder keine Datenbasis vorhanden ist. An dieser Stelle kann als Beispiel der Parameter der Dachlastreserven aufgeführt werden: Zwar sind die Zonen und die Angaben bezüglich der maximalen Trägerlast bekannt, nichtsdestotrotz kann nicht zu 100 % ermittelt werden, ob ein Dach diese Standards erfüllt. Eine theoretische Annahme ist, dass z.B. Einfamilienhäuser unter der Baunorm die zusätzliche Dachlast tragen können. Für die Modellierung dieses Parameters würde dies schlussfolgernd bedeuten, dass diese Annahme bei einer Vielzahl von Häusern getroffen werden kann. Dementsprechend genügt die Einbeziehung dieses Parameters nicht den Ansprüchen der Genauigkeit dieser Forschungsarbeit. Die Unzugänglichkeit von Daten für einen Großteil der Faktoren, welche in Kapitel 3 erwähnt wurden lässt sich zudem beispielhaft in der Hindernis-Analyse aus Berlin [68] betrachten.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde erörtert, aus welchen Quellen jene Daten stammen, welche für das Modell genutzt werden. Fokussiert wurde die Datenbeschaffung aus öffentlichen und frei verfügbaren Quellen, um das Ziel der Unabhängigkeit von privaten oder kommerziellen Anbietern zu gewährleisten. Die Basis der genutzten Daten stellen die 3D-Messwerte, das 3D-Gebäudemodell, die Koordinaten/Adressen der denkmalgeschützten Gebäude und die Strahlungsdaten dar. Zudem wurde aufgezeigt, welche zusätzlichen Daten in weiteren Potentialstudien verwendet wurden und warum diese im Rahmen dieser Arbeit keine Verwendung finden.

6 Algorithmus und Beschreibung der Prozessschritte

Der Prozess zur Ermittlung der Dachflächenverschattung besteht aus unterschiedlichen Modulen, welche jeweils eine dedizierte Aufgabe erfüllen. Die Implementierung erfolgte mit unterschiedlichen Programmiersprachen, welche alle für einen bestimmten Teil der Berechnung zuständig sind und über Bash-Skripte teilweise automatisiert nacheinander ablaufen konnten. Der Großteil der reinen Berechnung und Lösung der linearen Gleichungen sowie die Gebäuderekonstruktion wurde in C++ implementiert. Sie nutzt die sehr robusten und performanten Bibliotheken BOOST, CGAL und SCIP. Diese sind mit den höchsten Standards der Softwareentwicklung und auf Basis wissenschaftlicher Arbeiten gebaut und eignen sich besonders dann, wenn viele Gleitkommaoperationen so schnell wie möglich ausgeführt werden müssen [142–145]. Sie bieten effiziente und sichere Implementierungen für beispielsweise Polygone, Lösungen linearer Gleichungssysteme und geometrischer sowie boolescher Operationen mit Polygonen.

Zur besseren Orientierung ist ein Flow-Chart in Abbildung 6.1 aufgeführt, welches die einzelnen Module des Programmablaufs skizziert. Es werden für die vier Module Datenvorbereitung, Erweiterung des Gebäudemodells, Vegetationsmodellierung und Verschattungsermittlung die essentiellen Schritte der Implementierung aufgezeigt, ebenso in welcher Sprache und mit welchen zusätzlichen Modulen und Programmbibliotheken diese eingebaut wurden. Die Besonderheit in dieser Forschungsarbeit liegt in der Verarbeitung der großen Datenmenge von über 6,2 Terabyte, allein für NRW, und der Zusammenführung unterschiedlicher Datentypen. Für die Organisation der Daten und Zwischenspeicherung wurde ebenfalls eine Datenbankbindung aufgesetzt. In dieser wurden unter anderem die Gebäudedaten abgespeichert. Diese umfasst nach Ablauf des Algorithmus über zehn Millionen Datensätze. Die Gebäudeanzahl für das gesamte Landesgebiet NRW beträgt insgesamt 10.021.673.

Den größten Raum in diesem Kapitel nimmt die Realisierung der Gebäuderekonstruktion auf Basis der Punktwolken ein. Es kommen unterschiedliche Analyseverfahren aus der analytischen Geometrie zum Einsatz. Zudem werden lineare Optimierungsansätze verwendet, die ermöglichen sollen möglichst wasserdichte¹³ und simple Gebäudeobjekte zu rekonstruieren, die gleichzeitig so viele Strukturen aus der Realität übernehmen, wie es mit den vorhandenen Daten möglich ist. Die Modellierung und Rekonstruktion der Gebäude nutzt in ihrer Basis den Algorithmus der TU Delft von Nan und Wonka [148], welcher seit 2019 ebenso in der häufig verwendeten CGAL Bibliothek verfügbar ist. Der Ansatz musste für die vorliegenden Zwecke angepasst und erweitert werden. Die genauen Umstände werden in Abschnitt 6.2 erläutert.

¹³Als deutsche Übersetzung zum englischen Begriff *watertight*. Der Begriff bezeichnet eine polygonale Geometrie, die keine Zwischenräume aufweist und komplett geschlossen ist. [146, 147]

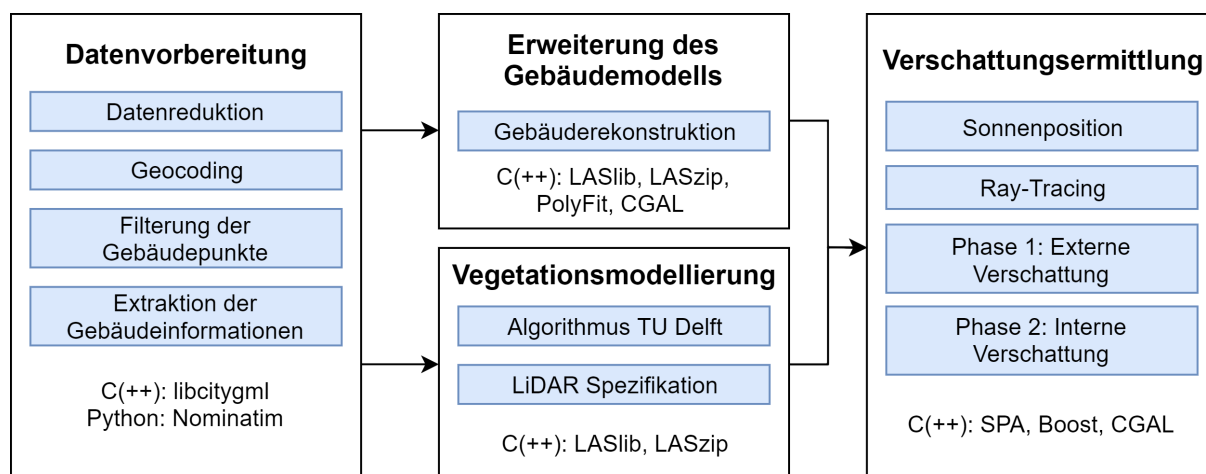


Abbildung 6.1: Übersicht der Prozessschritte der vier Hauptmodule des Algorithmus.

Abschließend erfolgt eine Diskussion über die technische Genauigkeit der Berechnungen und dementsprechend der Verlässlichkeit der Aussagen, die aus der Auswertung getroffen werden. Es soll aufgezeigt werden, welche Limitationen durch die Hard- und Software gesetzt werden und mit wie viel Unsicherheit die Berechnungen verbunden sind. Vorweg kann bereits hervorgehoben werden, dass es mit der numerischen Genauigkeit bei den Ergebnissen der Analyse weit weniger kritisch ist als angenommen. Jedoch sollte berücksichtigt werden, dass Gleitkommaoperationen im binären System immer risikobehaftet sind [149]. Besonders wenn im Kontext der Berechnungen und der Winkelangaben (inverse) trigonometrische Funktionen eingesetzt werden.

6.1 Datenverarbeitung und Vorbereitung der Infrastruktur

Der folgende Abschnitt behandelt die nötigen Schritte, die zur Vorbereitung der Datensätze ergriffen werden. Eine anschauliche Darstellung der einzelnen Komponenten hierfür findet sich in Abbildung 6.2. Hierbei soll auf die erste Filterung der Daten eingegangen werden sowie auf die nötigen Programmabläufe, welche die Schnittstelle zur Gebäuderekonstruktion und Schattenberechnung darstellen.

Mit einer Fläche von 34.112 km² ist NRW das zweitgrößte Bundesland Deutschlands [150]. Damit stehen, nur von dieser Zahl ausgehend, eine enorme Menge an Laserscandaten zur Verfügung. Faktisch kommen allerdings unterschiedliche Umstände und Faktoren zu Stande, die dafür sorgen, dass auf eine Vielzahl der Daten bei der Analyse verzichtet werden kann. Unter anderem liegt dies daran, dass nicht das gesamte Landesgebiet flächendeckend Gebäude beinhaltet. Dadurch kann die zu untersuchende Fläche eingeschränkt und die Effizienz erhöht werden.

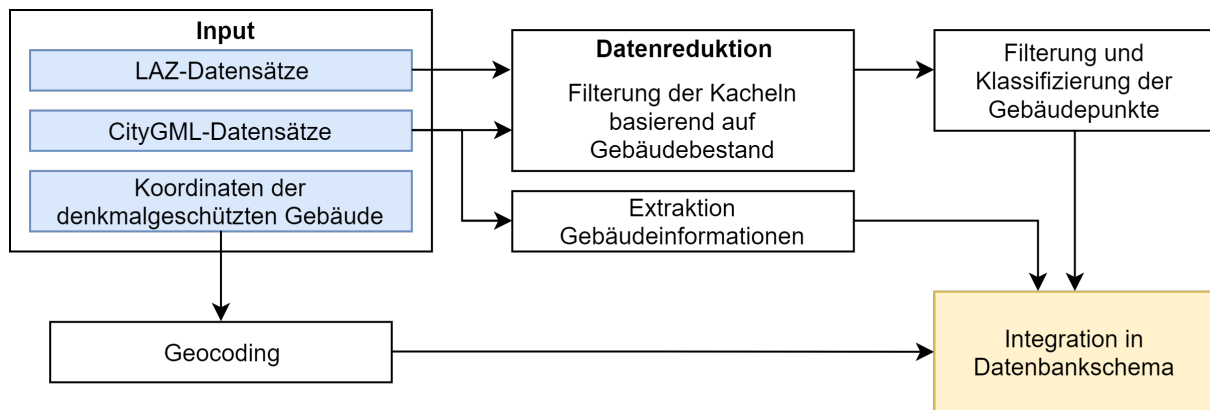


Abbildung 6.2: Übersicht der Arbeitsschritte zur Vorbereitung der Datensätze für die Rekonstruktion der Gebäude und anschließenden Schattenanalyse.

Im ersten Schritt erfolgte die Auswahl, welche der 1 km x 1 km Kacheln der Punktwolken notwendig sind. Dadurch bedingt, dass diese mitunter die größte Datenressource darstellen, ist es von enormer Bedeutung, dass keine unnötigen Kacheln mit in die Berechnung einfließen. Die Entscheidung wurde getroffen im Rahmen von 1 km² großen Flächen zu arbeiten, da diese kleinstmögliche Einheiten darstellen, welche gut verarbeitet werden können. Zudem wird dadurch eine Hochskalierung der Ergebnisse ermöglicht, indem in einer Region unterschiedliche Rasterkacheln zusammengefasst werden.

Für die effiziente Zwischenspeicherung der Daten wurde ein Datenbanksystem verwendet, welches sowohl die Gebäudedaten als auch die zugehörigen Punkte aus der Punktwolke speichert. Auf die Details zum verwendeten Datenbanksystem, dem Datenbankschema und der Erweiterungspakete, die hinzugezogen wurden, wird im Abschnitt 6.1.2 eingegangen. Im Anschluss wird die Einbindung des Denkmalschutzes besprochen. Dabei mussten die Koordinaten, die öffentlich zugänglich waren, in Adressdaten überführt und zu den bereits gepflegten Gebäudedaten hinzugefügt werden.

6.1.1 Auswahl der Datensätze und Datenkonvertierung

Vor der konkreten Implementierung des Modells musste eine detaillierte Sichtung und Vorfilterung der Daten durchgeführt werden. Ein Problem ist u. a., dass nicht alle 1 km² Kacheln der Punktwolken auch Häuser enthalten. Von der Gesamtfläche NRW, die etwa 34.112 km² umfasst, sind fast 25 % reine Waldflächen.¹⁴ Auf dieser Grundlage erscheint es unnötig und ineffizient alle Punktwolken-Daten auszuwerten und zu analysieren. Es sollte folglich im Vorfeld eine Filterung stattfinden, die es erlaubt die 1 km² Kacheln

¹⁴Siehe Pressemitteilung IT.NRW vom 11. September 2020, unter [151].

auszufiltern, die keine Gebäude enthalten, bevor diese vom komprimierten LAZ-Format in das wesentlich größere LAS-Format konvertiert werden.¹⁵

Um diese Filterung zu implementieren, wurden zunächst die 3D-Gebäudemodelldaten betrachtet. Diese wurden ebenfalls wie die 3D-Messdaten in Kacheln von 1 km² bereitgestellt. Dadurch gibt es für jedes Gebäudemodell-File ein entsprechendes File bei den Punktwolken, welches denselben geografischen Raum abdeckt. Im Beispiel unten soll aufgezeigt werden, wie die Struktur der Dateinamen aussieht.

Beispiel:

3D-Gebäudemodell Datei	3D-Messdaten Datei
LoD2_32_280_5657_1_NW.gml	3dm_32_280_5657_1_nw.laz

Zunächst wurde eine Auswahl allein basierend auf den Dateinamen angewandt. Diese erste Filterung hat dafür gesorgt, dass bereits über 500 Kacheln aus der Betrachtung ausgefiltert wurden, was zu einer Reduktion von über 5,8 Milliarden Datenpunkten geführt hat. Im Anschluss wurde die Beobachtung gemacht, dass trotz der Existenz eines Datenfiles für das 3D-Gebäudemodell nicht zwangsläufig ein Gebäude in dem File repräsentiert ist. Konkret bedeutet dies, dass trotz der Tatsache, dass eine Datei für eine Kachel existiert, in der Datei keinerlei Gebäudeinformationen vorhanden sind und dementsprechend eine leere Kachel vorliegt. Diesem Umstand können unterschiedliche Gründe zugrunde liegen. Einer dieser Gründe ist beispielsweise, dass ein Gebäude an der Grenze der Kachel lag und demnach durch die Automatisierung beim Erstellen der Dateien seitens der Unternehmen, welche die Daten generiert haben, ein weiteres leeres File erstellt wurde. Über diesen Schritt sind weitere 2.730 Dateien rausgefallen, was einer Reduktion von ebendieser Anzahl 1 km² Kacheln gleich kommt. Insgesamt konnte somit eine Reduktion von ca. 10 % der Datensätze erreicht werden, was in einem signifikanten Unterschied bei der Verarbeitung resultiert.

Nachdem die Auswahl der Datensätze beendet werden konnte, mussten die entsprechenden Datensätze der 3D-Messdaten verarbeitet bzw. konvertiert werden. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Punktwolken-Daten im komprimierten LiDAR-LAZ-Format vorliegen. Dieses kann allerdings nicht nativ von den verwendeten Bibliotheken verwendet werden. Es gibt zwar eine C++ Bibliothek, welche die Arbeit mit komprimierten LAZ-Daten vereinfacht, allerdings ist die Kompatibilität mit anderen verwendeten Bibliotheken nicht gegeben. Daher wurde der Entschluss gefasst, eine direkte Konvertierung vom LAZ-Format in das anfängliche LAS-Format durchzuführen, damit im weiteren Verlauf keine zusätzlichen Komplikationen oder Rechenfehler entstehen. Durch diesen Schritt der Konvertierung erhöht sich die Datenmenge um ein Vielfaches. Für das Transformieren der Daten wurde die C++ Implementierung von las2las [152] verwendet. Dieses kleine

¹⁵Durch die Konvertierung werden aus etwa 15MB großen Dateien über 300MB, was natürlich eine enorme Steigerung darstellt und nicht wünschenswert ist, wenn die Datei nicht benötigt wird und dadurch wertvolle Ressourcen blockiert.

Programm gehört zur LasTools-Suite, welche von Martin Isenburg konzipiert und entwickelt wurde [153]. Das verwendete Tool ist open-source und konnte daher nativ in die Implementierung integriert werden. Die LasTools-Suite bietet ebenfalls zahlreiche weitere Anwendungen, welche in der Geoinformationsverarbeitung eingesetzt werden können, allerdings sind nicht alle mit einer freien Lizenz belegt [154]. Besonders die spezifischeren und komplexeren Anwendungen sind closed-source und müssen erst durch den Kauf einer entsprechenden Lizenz freigeschaltet werden, da sie ansonsten zum Schutz des geistigen Eigentums des Entwicklers zufälliges Rauschen in die Ergebnisse einführen [155]. Die Anwendung ist noch zu edukativen Zwecken zu gebrauchen, allerdings für professionelle Anwendungen nicht akkurat genug. In dieser Arbeit wurde nur von dem open-source Paket `las2las` für die Konvertierung der Daten Gebrauch gemacht, welches ohne Lizenzierung frei genutzt werden kann.

6.1.2 Datenbank und Datenbankschema

Aufgrund der Tatsache, dass im Programmablauf häufiger auf diverse Datensätze zugegriffen werden sollte und eine Vielzahl Zwischenschritte bei der Verarbeitung benötigt wurden, war es unumgänglich eine Datenbankanwendung zu integrieren. In diesem Kontext zählten eine hohe Leistungsfähigkeit und die Verfügbarkeit robuster Softwarepakete zu den zwei wichtigsten Kriterien. Zudem sollte das verwendete System es erlauben, geografische Daten einfach und effizient zu integrieren und wenn möglich, ebenso einfache Operationen der Geoinformationsverarbeitung ermöglichen.

Durch diese Voraussetzungen und Kriterien fiel die Entscheidung auf PostgreSQL [156] als Datenbanksystem. Hierbei ist eine Extension vorhanden, welche die Einbindung und Verarbeitung geografischer Daten erlaubt. Diese nennt sich PostGIS [157] und ist einer der Hauptgründe weswegen PostgreSQL in der Geoinformationsverarbeitung verwendet wird. Alle großen GIS erlauben über Schnittstellen Daten, welche auf PostgreSQL Servern mit der PostGIS Erweiterung abgelegt sind, auszulesen und nativ zu integrieren. PostgreSQL inklusive PostGIS bilden zusammen eine effiziente und leistungsstarke Geodatenbank, welche die Vorteile besitzt open-source zu sein und eine endlose Anzahl Datenformate verarbeiten zu können.

Durch die Tatsache, dass PostgreSQL ein objektrelationales Datenbanksystem ist, welches die weit verbreitete SQL Syntax verwendet, ist es möglich auf standardisierte Art und Weise Datensätze abzufragen und neu hinzuzufügen. Außerdem bietet der relationale Charakter des Datenbanksystems die Möglichkeit die Daten, die für die Forschungsarbeit von Relevanz sind, trotz unterschiedlicher Prozessschritte und Tabellen miteinander in Verbindung zu setzen. Dies ist durch das, bereits im Vorfeld aufgesetzte und speziell an die Ansprüche der Implementierung orientierte, Datenbankschema erreicht worden. Das Datenbankschema findet sich in Abbildung 6.3 und zeigt alle Zusammenhänge der Datenbanktabellen, die Datentypen und die vorliegenden Verbindungen über Primär- und Fremdschlüssel.

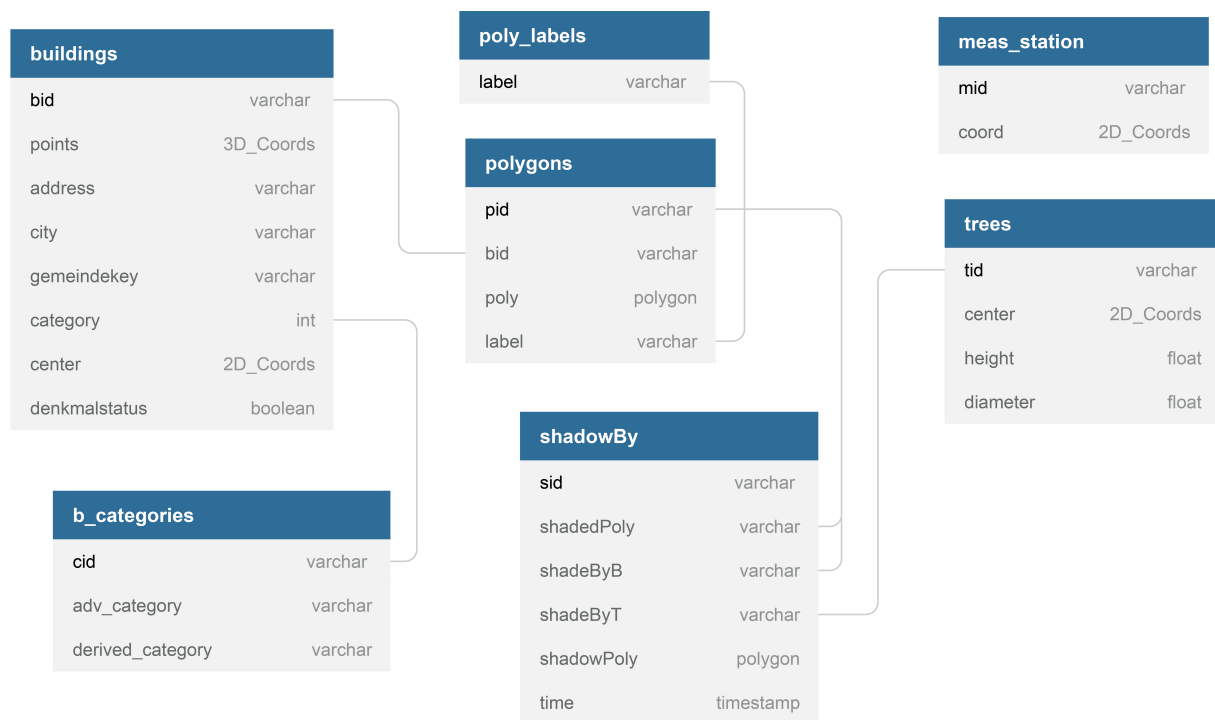


Abbildung 6.3: Spezifikation des Datenbankschemas inklusive entsprechender Primär- und Fremdschlüssel, die bei der Implementierung des Algorithmus eingesetzt werden.

6.1.3 Filterung der Gebäudepunkte und Metadaten

Nach der Einführung der Infrastruktur zur Speicherung der notwendigen Daten wird im folgenden Abschnitt der Prozess der Aufteilung der Punktwolken und Extraktion der Gebäudemetadaten beschrieben. Das Datenformat der Punktwolken und die enthaltenen Informationen wurden bereits in Abschnitt 5.1 behandelt. Die Gebäudemetadaten umfassen Informationen des Gebäudebestandes. Sie sind enthalten in den CityGML Datensätzen, welche in Abschnitt 5.2 erläutert wurden. Darunter fallen beispielsweise die Adresse des Gebäudes, die Kategorie, die standardisierte Dachform und Informationen bezüglich der Datenqualität und Herkunft.

Der hier beschriebene Prozessschritt umfasst die Filterung der Gebäudepunkte aus den 3D-Messdaten. Durch die Filterung werden für jedes einzelne Gebäude die zugehörigen Punkte gespeichert, sodass in einem weiteren Schritt bei der Gebäuderekonstruktion diese Teilmengen der Punktwolke verwendet werden können. Weiterhin werden die Metadaten zu den Gebäuden aus den CityGML Dateien extrahiert, damit diese ebenfalls für die Analyse und Auswertung verwendet werden können. Alle Punkte, welche keinem Gebäude zugeordnet werden können und demnach unklassifiziert sind, werden als separate Punktwolke abgespeichert. Da im späteren Verlauf die Modellierung der Vegetation, insbe-

sondere von Bäumen, erfolgen muss, dienen diese restlichen Punkte dazu herauszufinden, wo sich Bäume befinden, um diese zielführend zu modellieren.

Filterung der Gebäudepunkte

Eine simple Filterung der Gebäudepunkte findet statt, indem die Gebäudegrundrisse verwendet werden und für jeden Punkt der Punktwolke bestimmt wird, ob dieser sich innerhalb des Polygons befindet. Dies stellt einen häufig vorkommenden Prozess innerhalb der Geoinformationsverarbeitung dar [158]. Es sind unzählige Implementierungen und Ansätze bekannt, um dieses Point-in-Polygon [158–161] Problem zu lösen, von denen einige eher suboptimale Ergebnisse liefern oder eine hohe Ineffizienz vorzeigen.

Ein möglicher Weg genauere Daten und Informationen über die Gebäude zu erhalten, ist das DOM in Form der Punktwolke zu verwenden und einen Ansatz wie aus [162] oder [148] anzuwenden. Dies wird in Abschnitt 6.2 weiter ausgeführt.

Die Punktwolken sollen im besten Fall basierend auf den Umrissen der Gebäude gefiltert werden. Dieser Schritt inkorporiert die Point-in-Polygon Abfrage und ist, wie bereits angeschnitten, ein Standardprozess in der Geoinformationsverarbeitung [158]. Eine Schwierigkeit stellt in diesem Kontext das Problem der Bestimmung dar, ob ein Punkt innerhalb eines Polygons liegt. Einige geometrische Ansätze sind vorhanden, wobei anzumerken ist, dass einige von denen nicht optimal in einem Szenario mit Dezimalzahlen arbeiten und stattdessen nur in einem Zahlenraum mit ganzen Zahlen funktionieren [163]. In einem Großteil der Fälle muss eine Entscheidung zwischen dem „Winding Number“ Algorithmus und dem „Ray-casting“ Algorithmus getroffen werden. Für den Zweck der vorliegenden Arbeit sind beide Algorithmen gleichwertig von ihren Resultaten her einzuordnen, da im Allgemeinen keine Situationen mit komplexen, „durchlöcherten“ Polygonen (siehe Abbildung 6.4) vorliegen. Nichtsdestotrotz wurde der „Winding Number“ Algorithmus gewählt, weil er rechnerisch weniger komplex ist und dadurch (wenn auch nur wenige Millisekunden) schneller abläuft. Bei der Größe des Datensatzes macht die Effizienzsteigerung einen großen Unterschied. Eine Implementierung in Pseudocode findet sich im Anhang B.1.

Filterung der Gebäude Metadaten

Alle Metadaten, welche zu einem Gebäude gehören, werden in den XML-basierten Datensätzen der 3D-Gebäudemodelle zur Verfügung gestellt. Hierzu zählen unter anderem die Gebäudekategorie, Gebäudehöhe, standardisierte Dachform, Adresse, der Gemeindegemeinschaft und wie bereits zu Anfang des Kapitels beschrieben Daten zur Qualität und Herkunft der Datensätze. Zusätzlich beinhalten die Datensätze ebenfalls die Knotenpunkte der Polygone, welche die Basis des Gebäudemodells darstellen. Ihnen zugehörig ist das entsprechende Georeferenzsystem, welches die Punkte und demnach auch die Polygone auf der Erdoberfläche virtuell verankern. Sie besitzen Labels, die ein entsprechendes Polygon als Wand, Dachfläche, Grundfläche oder Füllfläche kennzeichnen.

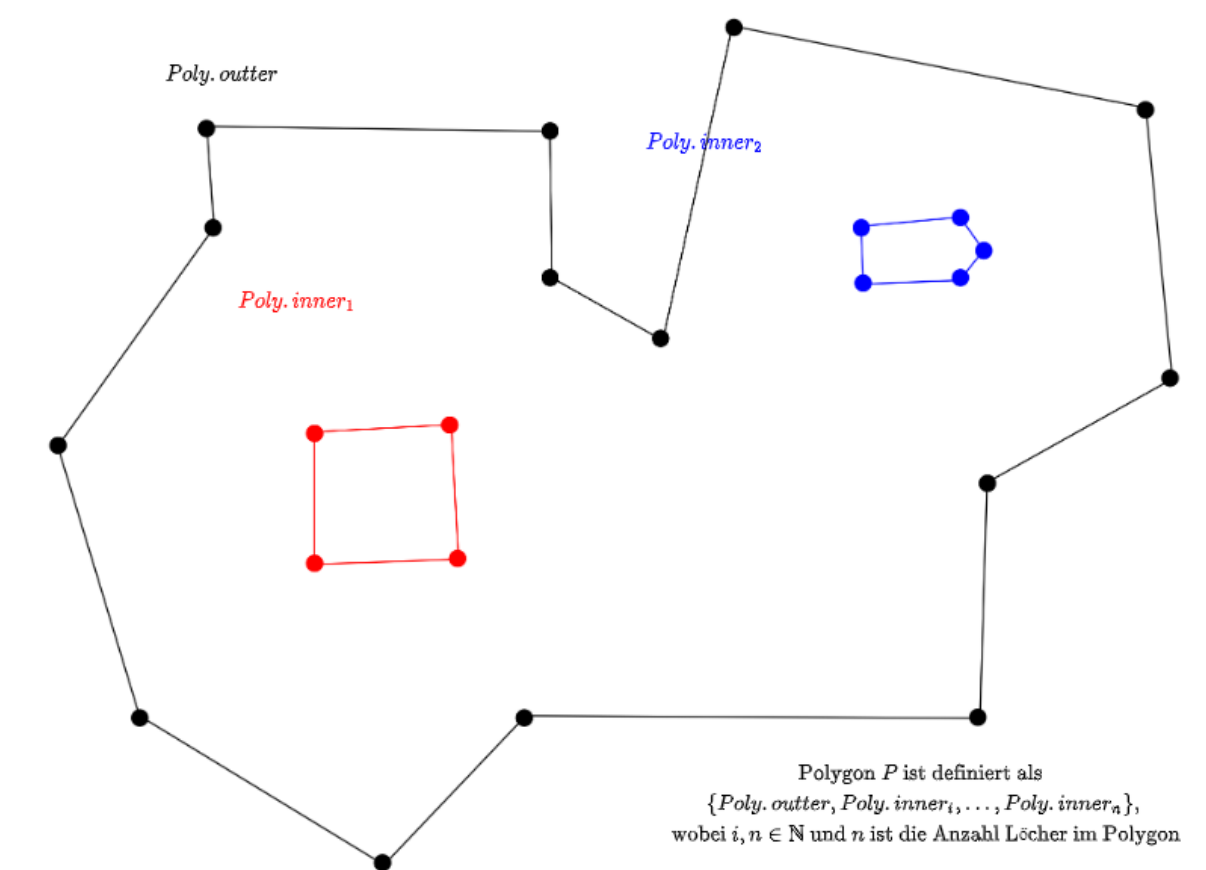


Abbildung 6.4: Darstellung eines Polygons mit Löchern und dessen Definition.

Zum Auslesen der Daten wird ein XML-Parser verwendet. Diese Funktionen sind so konzipiert, dass sie die Struktur und Grammatik der XML-Definitionen auswerten können und dahingehend die gewünschte Information extrahieren. Der Datenbestand gliedert alle Informationen zu einem Gebäude derart, dass entsprechende Attribute einem spezifischen Gebäude-Objektidentifikator zugeordnet werden. Dieser besteht aus einer eindeutigen Zeichenkette, die einzigartig für jedes Gebäude im Datenbestand von NRW ist. Der Objektidentifikator wird ebenso innerhalb der Datenbank verwendet, um diese zu befüllen und einzelne Gebäudeobjekte zu referenzieren. An dieser Stelle finden keine geometrischen oder mathematischen Operationen statt. Der Prozess läuft automatisiert ab und ermittelt alle Informationen, die bei der Spezifikation der Datenbank als relevant eingestuft werden.

6.1.4 Denkmalschutz-Koordinaten und Reverse Geocoding

Für die Verarbeitung der Daten, die für die Filterung der denkmalgeschützten Gebäude gedacht sind, müssen die Koordinaten mit den vorhandenen Gebäuden abgeglichen werden. Hier gibt es einige unterschiedliche Fälle zu beachten, die auftreten und eine Zu-

ordnung erschweren können. Das grundlegende Problem ist, dass es sein könnte, dass ein Koordinatenpunkt eines denkmalgeschützten Gebäudes nicht genau genug ist und nicht richtig zu einem Grundrisspolygon zugeordnet werden kann, d.h. der Punkt wird nicht durch den Point-in-Polygon-Algorithmus zugeordnet. Hierbei können zwei Fälle auftreten: entweder es ist kein Gebäude in der direkten Nähe oder es sind mehrere Gebäude in der Nähe, sodass der Punkt nicht eindeutig zugeordnet werden kann.

In den Fällen, bei denen eine eindeutige Zuordnung nicht möglich war, weil die Koordinaten nicht genügend Informationen geboten haben, mussten Adressinformationen hinzugezogen werden. Diese waren in einigen wenigen Fällen bei den Datensätzen der Denkmalkoordinaten vorhanden. In den anderen Fällen musste *Reverse Geocoding* eingesetzt werden, um an konkrete Adressinformationen zu gelangen.

Reverse Geocoding stellt die Praxis dar, bei welcher Koordinaten zu Adressen transformiert werden [164, 165]. Dies stellt den dualen Prozess zum reinen Geocoding dar, bei welchem Adressen zu geografischen Koordinaten transformiert werden [165]. Den höchsten Standard in beiden Situationen stellt die Google Maps API dar, welche die meisten Daten umfasst. Diese ist allerdings closed-source und nutzt eigene Datenbanken sowie ein Vergütungsmodell, welches auf dem Ansatz basiert die Aufrufe der API zu berechnen [166]. Somit ist diese API weder kosten- noch lizenzfrei zugänglich. Daher wurde in dieser Forschungsarbeit auf die Dienste von OpenStreetMaps (OSM) zugegriffen, welche open-source sind und für jeden kostenfrei zur Verfügung stehen. Im Besonderen war es die Schnittstelle der Nominatim API [167], welche einen soliden Dienst geleistet hat. In keinem Fall kam es zu Problemen bei der Erkennung oder Verarbeitung der gegebenen Koordinaten und es mussten keine Lizenzen erworben oder Nutzerkonten erstellt werden.

Mit Hilfe des Reverse Geocodings konnte somit eindeutig festgestellt werden, welches Gebäude unter Denkmalschutz stand. Diese Informationen wurden dann nachträglich bei den entsprechenden Datensätzen in die Datenbank integriert, welche den Denkmalschutz im Datebankschema bereits berücksichtigt hatte (vgl. Abbildung 6.3).

6.2 Erweitertes Gebäudemodell und Modellierungsprozess

Das Gebäudemodell basierend auf den CityGML Spezifikationen kann für den weiteren Verlauf nicht alleinstehend verwendet werden. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt die Erweiterung des Gebäudemodells beschrieben, welches über etablierte geometrische Konstruktionen und Prozesse durchgeführt wurde.

Im Folgenden soll zunächst die potentielle Rekonstruktion mittels Polygonnetzen (engl. *mesh*) präsentiert und erläutert werden, wie diese Technik angewandt wurde und welche Nachteile diese mit sich bringt. Im weiteren Verlauf wird die letztendlich eingesetz-

te Technik beschrieben, welche über ganzzahlige lineare Optimierungsverfahren¹⁶ und primitiv-planare Konstrukte die Gebäudefassaden inklusive kleinteiliger Objekte auf den Dächern remodelliert. Dabei wird ebenfalls aufgezeigt, in welchen Fällen diese Technik dennoch suboptimale Ergebnisse liefert. In diesem Zusammenhang werden zudem etwaige Limitationen des Modells aufgezeigt und eine Abschätzung der Verluste von Schärfe und Genauigkeit ausgeführt.

Die Objekte auf den Dächern werden indirekt während des Schrittes der Oberflächenrekonstruktion identifiziert. Dabei wird ein Ansatz von Lianglian und Wonka [148] verwendet, welcher im Gegensatz zu den weit verbreiteten Polygonnetz Rekonstruktionsalgorithmen besser für Objekte geeignet ist, die klare Kanten enthalten und eher keine weiche Oberfläche aufweisen [169]. Abbildung 6.5 zeigt beispielhaft ein Szenario, in welchem die Oberfläche mit Hilfe von Polygonnetzen rekonstruiert wurde. Es ist klar sichtbar, dass dieser Ansatz für von Menschen errichtete Objekte suboptimal ist, da beispielsweise sonst ebene Dachflächen nun feine Hebungen besitzen, welche am realen Objekt nicht vorhanden sind.

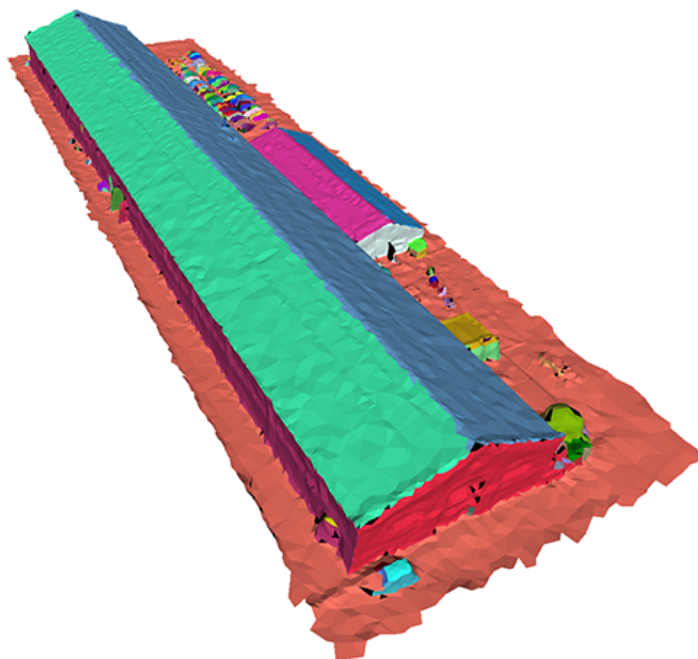


Abbildung 6.5: Ansicht eines automatisch erstellten Meshes. Abbildung aus [142].

Damit der Polygon-Rekonstruktionsansatz funktionieren kann, müssen neben den Punktkoordinaten auch die Normalen in Bezug auf die Teilmenge der zu untersuchenden Punktwolke bestimmt werden. Diese Aufgabe wird in alten Datensätzen (vor 2017) schwieriger,

¹⁶Ganzzahlige lineare Optimierung (engl. *integer linear optimization*) ist ein Spezialfall der linearen Optimierung. In beiden Fällen wird die Optimierung einer linearen Zielfunktion angestrebt, welche durch lineare Gleichungen und Ungleichungen beschränkt wird. Die Besonderheit bei der ganzzahligen linearen Optimierung besteht darin, dass einige oder sogar alle Variablen der Gleichungen nur ganzzahlige Werte annehmen können. [168]

da während der Scan-Flüge die Aufnahmewinkel nicht mitgespeichert oder zumindest nicht in die bereitgestellten Datensätze integriert wurden. Diese Daten hätten eine nachträgliche Ermittlung der Normalen vereinfacht, da zumindest der Einfallswinkel des Laserpulses dadurch bekannt gewesen wäre. Um den Prozess zu vereinheitlichen, wurde für alle Datensätze dasselbe Verfahren angewandt und die Normalenvektoren wurden basierend auf den Punktkoordinaten bestimmt bzw. näherungsweise geschätzt. Wie dieses Verfahren vermuten lässt, kommen hierbei nicht immer die optimalen Ergebnisse zu Stande, da für einige Geometrien und Situationen die Berechnungen nicht korrekt sind oder die Orientierung gerade in die falsche Richtung weist (z. B. statt nach außen richtet sich der Vektor nach innen).

Im Anschluss an die Ermittlung der Normalen findet der Schritt der Flächenbestimmung statt, welcher entweder einen nicht-deterministischen Ansatz verfolgt (über eine effiziente RANSAC¹⁷ Implementierung) oder einen Ansatz über Region Growing¹⁸ verwendet. Letztere Variante hat den Vorteil deterministisch zu sein und demnach immer dieselben Ergebnisse bei gleichen Inputs zu bieten, dafür weist sie eine schlechtere Performance auf [148, 169].

Insgesamt wird, sofern ein Ergebnis mit der Region-growing Variante möglich ist, dieser Ansatz gewählt. Führt diese Variante zu ungenügenden Flächen für die Rekonstruktion, dann wird der Ansatz mit der RANSAC-Methode mehrmals durchlaufen, um dann das Beste der ermittelten Ergebnisse auszuwählen. Bei diesem Schritt ist allerdings auffällig geworden, dass in einigen Fällen Probleme resultieren, wenn der Versuch unternommen wird die Oberfläche der Gebäude über die Punktwolken wiederherzustellen. Gebäude-Teilmenngen der Punkte haben im Durchschnitt etwa 7.000-10.000 Punkte. Dies mag zwar nach einer großen Anzahl klingen, allerdings wurden die Beispiele von Liangliang und Wonka mit über 50.000 (bis hin zu 911.000) Punkten erstellt.¹⁹ Durch die geringere Anzahl Punkte in der zu rekonstruierenden Punktwolke werden mögliche Flächen für die Polygon-Schnittpunkte nicht korrekt erkannt, was in unvollständigen Körpern und demnach in verformten Gebäuden endet (vgl. Abbildung 6.6). Diese Tatsache wird zusätzlich dadurch negativ bekräftigt, dass aufgrund des Aufnahmewinkels bei den Flügen einige Seiten gar keine Punkte aufweisen.

Um zu verhindern, dass Gebäude aufgrund der weiten Entfernung des Scangerätes bei den Flügen fehlende Mauern aufweisen, welche als Lücken in den Punktwolken zu erkennen sind, wurde beschlossen die Punkte synthetisch zu ergänzen. Der logische Schritt wur-

¹⁷RANSAC steht für **random sampling consensus** und ist eine Resampling-Methode, die beim Ermitteln von Parametern für ein mathematisches Modell genutzt wird. Da RANSAC sehr robust gegenüber Ausreißern und Datenrauschen ist, wird es oftmals in der Computer Vision und Kartographie verwendet, da hier in der Regel automatische Messdaten ausgewertet werden [170].

¹⁸Region Growing gehört zu den Region-orientierten Verfahren der Segmentierung in der Bildverarbeitung. Hierbei werden die Pixel oder Messwerte von Regionen, die eigentlich zusammengehören, miteinander verbunden und zu einer zusammenhängenden Region (oder Fläche) verschmolzen. Die Verbindung erfolgt dabei über zuvor festgelegte Homogenitätskriterien.

¹⁹Basierend auf den Daten aus [148] und eigener Ermittlung auf Basis der Testdaten von [171] und der Demodaten, die in den Beispielskripten aus [172] referenziert werden.

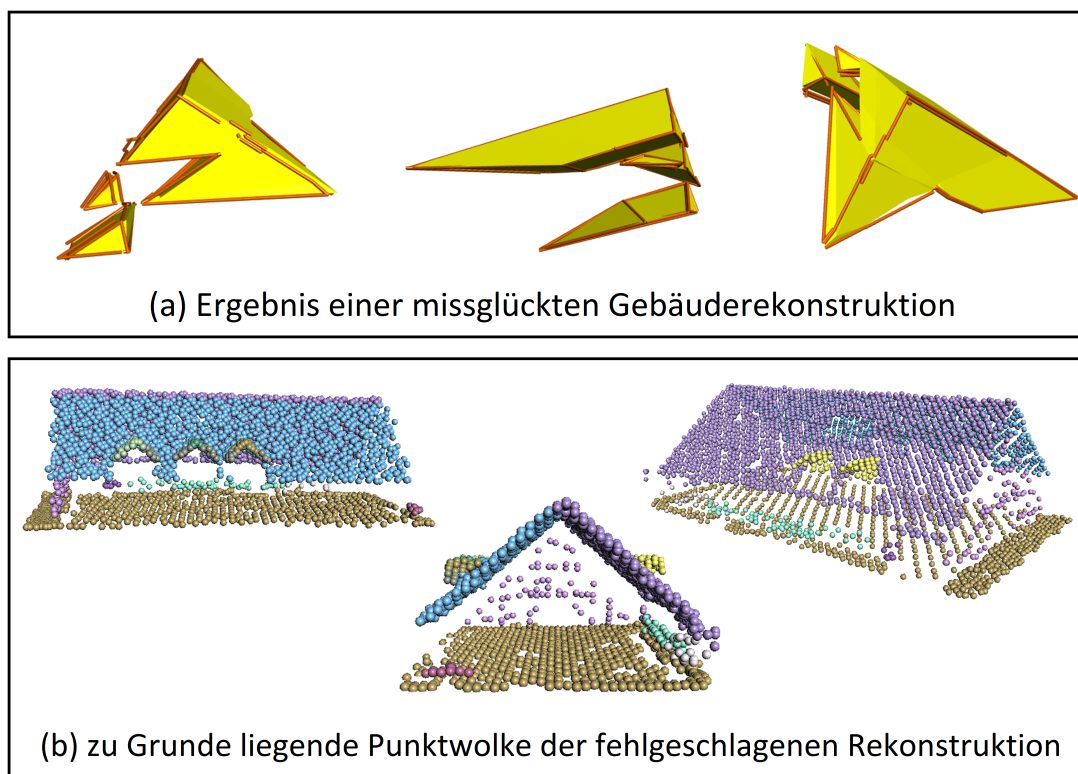


Abbildung 6.6: Ansicht einer missglückten Gebäuderekonstruktion aufgrund mangelnder Punkte an den Wänden.

de mit Hilfe des 3D-Gebäudemodells implementiert. Dabei sind zufällige Punkte entlang der Wand-Polygone projiziert und in die Punktwolke eingefügt worden. Dabei kamen die Algorithmen und Ansätze aus der Boost und CGAL Bibliothek für C++ zum Einsatz, welche auf fundierten Erkenntnissen aus der Computational Geometry basieren und effizient implementiert sind [142]. Durch diesen Schritt konnten Gebäudepunktwolken, die zu wenige Punkte vorwiesen, verbessert und lösbar dargestellt werden, ohne die grundlegende Geometrie des Gebäudes zu verändern. Im Vergleich zur Nutzung des bereits vorliegenden 3D-Gebäudemodells werden mit diesem Ansatz bessere Resultate erzielt, da besonders die Darstellung der Dächer anfällig für Ungenauigkeiten sind, besonders wenn standardisierte Dachformen verwendet werden (beispielsweise falsche Neigungswinkel der Dachflächen, siehe Abbildung 5.8). Ausschließlich Punkte für die Wände wurden ergänzt, somit blieb der Bereich der Dachflächen unmodifiziert und die Dachformen konnten originalgetreu ergänzt werden.

Abschließend soll noch auf die Verminderung der Dachflächen im erweiterten Gebäudemodell eingegangen werden, welche durch Dachfenster entsteht. Das Problem hierbei ist, dass diese Fälle nicht bei der Rekonstruktion der Gebäude erkannt werden können, weil die Rekonstruktion von Nan und Wonka [148] lediglich über planare Primitive die Rekonstruktion betreibt. Hierbei werden Löcher im Dach, die auf Glas und somit Fenster

hinweisen, nicht vom Algorithmus erkannt, da es auch nicht vorgesehen ist Dachfenster zu rekonstruieren [148, 169]. Es musste dementsprechend ein alternativer Ansatz eingesetzt werden, um die Dachfenster akkurat und effizient zu erkennen und sie im Gebäudemodell integrieren zu können. Dieser wird in Abschnitt 6.2.4 erläutert.

6.2.1 Zufallspunktgenerierung an fehlenden Mauern

Wenn alle Wände eines Gebäudes nicht genügend oder überhaupt Punkte aufweisen, muss ein zusätzlicher Schritt bei der Implementierung des Rekonstruktionsalgorithmus integriert werden. Hierbei werden zufällige Punkte innerhalb eines dreidimensionalen Polygons generiert und in die Punktwolke eingefügt, welche das zu rekonstruierende Gebäude beinhaltet. Ein Szenario, aus welchem gut erkennbar wird wie das Fehlen der Punkte Probleme verursachen kann, findet sich in der Abbildung 1.2. In der Punktwolke aus der Abbildung 6.7 ist zu erkennen, dass die vordere Fläche des Gebäudes keinerlei Punkte aufweist. Ebenfalls beinhaltet eine der seitlichen Flächen keinen Punkt.

Im weiteren Verlauf erweist sich dieser Umstand für die Rekonstruktion der Oberflächen als problematisch, da für diese Seiten keine Polygone generiert werden können oder es nur für eine niedrige Konfidenz reicht. Somit erhalten die Flächen keine ausreichend hohe Priorität beim Optimierungsverfahren. Beim Optimierungsverfahren wird die Verschneidung der Kandidaten-Polygone generiert und letztendlich das finale 3D-Gebäudemodell erstellt. Wie das Ergebnis für so einen Fall aussehen kann, wurde bereits in Abbildung 6.6 aufgezeigt.

Aufgrund keiner direkten Verfahren, die zufällige Punkte entlang der Wand-Polygone generieren, um die fehlenden Punkte aufzufüllen, musste ein anderer Ansatz gewählt werden. Es ist bekannt, dass die Generierung von zufälligen Punkten in Dreiecken basierend auf zwei zufälligen reellen Zahlen im offenen Intervall $(0, 1)$ zuverlässig und einfach funktioniert [173, 174]. Zunächst müssen die Polygone aus dem dreidimensionalen Raum auf eine zweidimensionale Ebene projiziert werden. Da die Polygone alle planar sind, ist dies jeweils mit Vektorgeometrie zu bewerkstelligen, indem die entsprechende Transformationsmatrix ermittelt und angewandt wird. Im Anschluss müssen die Polygone, wie in [173] beschrieben, in Dreiecke partitioniert werden (auch als Triangulierung bezeichnet). Diese erhalten eine Gewichtung anhand ihrer relativen Größe zum kompletten Polygon, die genutzt wird um eine einheitliche Verteilung der Anzahl Punkte über alle disjunkten Dreiecke im Polygon zu erreichen. Die generierten Punkte werden anschließend mit der Umkehrung der Transformationsmatrix zurück in das dreidimensionale Koordinatensystem überführt. Daraufhin werden diese Punkte zurück in den entsprechenden Datensatz der Datenbank geführt, um die dort vorhandene Teilmenge der Punktwolke zu ergänzen. Diese umständliche Ergänzung ist notwendig, da die Polygone, obgleich zum Großteil konvex, nicht immer rechteckig oder quadratisch sind. Daher sind einfache Methoden, um zufällige Punkte zu generieren, so nicht möglich.

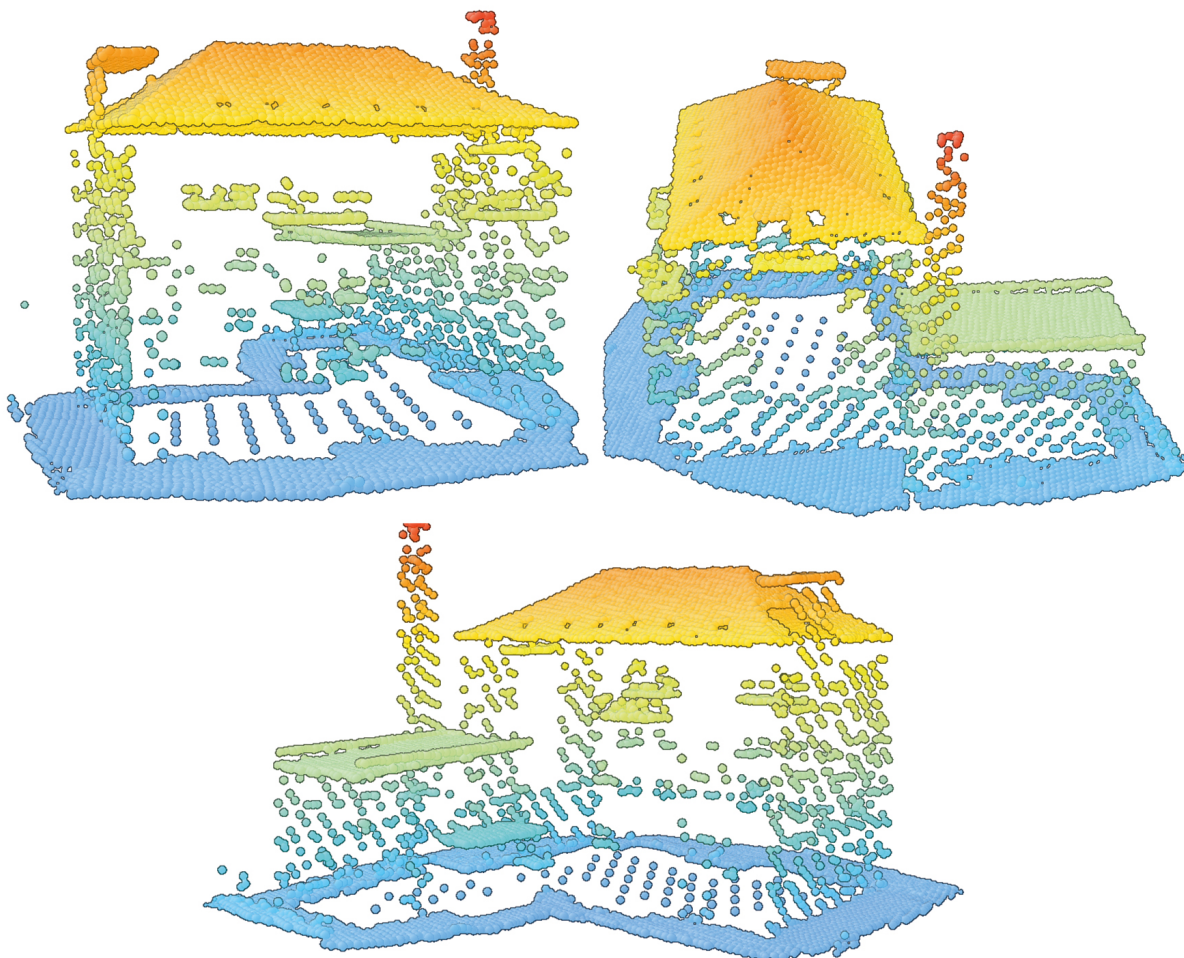


Abbildung 6.7: Ansichten einer exemplarischen, zufällig ausgewählten Gebäudepunkt-
wolke aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln.

6.2.2 Berechnung der Normalen für Gebäudepunkt- wolken

Der Ansatz aus [148] setzt voraus, dass zu jedem Punkt in der Punktwolke ein Normalenvektor vorhanden ist. Leider ist es nicht ganz trivial Normalen zu allen Punkten automatisch und vor allem korrekt-orientiert für eine willkürlich gewählte Punktwolke zu berechnen. Was für das menschliche Auge und den Verstand eine grundsätzlich leichte Aufgabe ist, erweist sich auf mathematisch-abstrakter Ebene als durchaus schwierig. Grundsätzlich sind einige Verfahren verwendbar, die bei der Bestimmung von Normalenvektoren für die Punkte und im Weiteren auch für die Wiederherstellung der Flächen verwendet werden können [162, 175, 176]. Dabei ist anzumerken, dass alle Verfahren nicht ideal sind und eine gewisse Ungenauigkeit vorhanden ist. Besonders für den Fall, wenn keine weiteren Informationen außer der Punktkoordinaten vorhanden sind. Um die Berechnungen und Datenstruktur besonders generisch zu halten, wurde der Beschluss gefasst, dass Informationsfelder, die in aktuelleren Laserscan Datensätzen (ab 2017) vorhanden

sind, nicht mit einbezogen werden. Hierbei geht es speziell um das Feld, welches den Winkel der Laseraufnahme abbildet. Dies hat den Grund, dass ansonsten unterschiedliche Prozesse für Datensätze entwickelt werden müssten und durch die gleiche Handhabung aller Datensätze ein einheitlicher Workflow gewährleistet werden konnte.

Trotz einer Vielzahl neuer Algorithmen und Ansätze werden weiterhin als Standard für die Berechnung der Normalen für eine unorientierte Punktwolke, die Ideen aus [162] angewandt. Diese wurden ebenfalls im Kontext dieser Forschungsarbeit verwendet und um einige zusätzliche Routinen erweitert. Diese werden genutzt um Ambiguität bei den Ergebnissen zu vermeiden, indem der Algorithmus zusätzliche Checks ausführt und weitere Hintergrundinformationen über die Punktwolke mit einbezieht. Beispielsweise kann durch die Georeferenzierung und die vorhandenen Informationen über den Bezug zur Bodenfläche klar abgegrenzt werden wo die Unter- und Oberseite des Gebäudes liegen und die Normalen können somit ggf. schnell korrigiert werden, wenn sie durch den Algorithmus in die falsche Richtung gesetzt werden. Falls die Normalen entlang der Wände oder am Boden versehentlich nach innen gesetzt werden statt nach außen (siehe Abbildung 6.8), kann dies durch Bestimmung der Lagebeziehung zu einer willkürlich gewählten anderen Wand desselben Gebäudes kontrolliert und ggf. korrigiert werden.

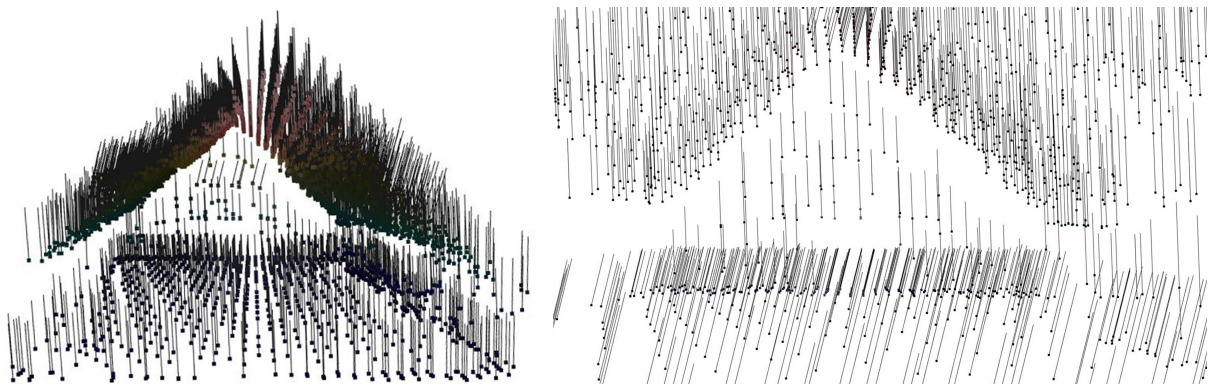


Abbildung 6.8: Ansicht einer Punktwolke inklusive berechneter Normalenvektoren mit falscher Ausrichtung.

In Rahmen dieser Forschungsarbeit sind beispielsweise grundlegende Erkenntnisse über die Orientierung der Punktwolke vorhanden, z.B. ist durch das Grundrisspolygon bekannt, wo der Boden, also die Unterseite ist. Somit können diese eingesetzt werden, um eine Eindeutigkeit des Algorithmus zu gewährleisten und zu kontrollieren, ob ein ermittelter Normalenvektor in die richtige Richtung zeigt.

Nachfolgend soll auf die Prozessschritte eingegangen werden, die beim Algorithmus von Hoppe [162] angewandt werden. Kurz zusammengefasst versucht der Algorithmus von Hoppe [162] die komplette Oberfläche einer Punktwolke zu rekonstruieren. Das Resultat soll ein Mesh sein, welches aber in dieser Forschungsarbeit nicht angestrebt wird, da Mesh-Strukturen für Gebäuderekonstruktionen sehr unnatürliche Ergebnisse erzielen (siehe Abbildung 6.5). Der relevante Teil des Algorithmus von Hoppe [162] für diese For-

schungsarbeit umfasst die Berechnung der Normalen, bzw. die von Hoppe verwendete Ausdrucksweise „oriented tangent plane of each data point“ [162]. Die orientierten Tangentialebenen an jedem Punkt sind de facto per Definition die Normalenvektoren für die voraussichtliche Außenfläche der Punktwolke. Die relevanten Schritte für die Ermittlung der Normalenvektoren nach Hoppe [162] sind in Abschnitt 3.2 und 3.3 seines Papiers zu finden und können vereinfacht in die folgenden Schritte eingeteilt werden:

1. Ermittlung des k NN-Graphen der Punktwolke. Dabei sind die Knotenpunkte des Graphen die Punkte der Punktwolke. Zwei Punkte sind verbunden, wenn sie jeweils vom anderen Punkt der k -nächste-Nachbar sind.²⁰
2. Bestimmung der Gewichte der Kanten im Graphen. Diese sind bei Kante (v, w) , wobei v und w zwei Koordinatenpunkte der betrachteten Punktwolke sind, über die Gleichung $1 - |nv \times nw|$ zu berechnen.
3. Bestimmung des minimalen Spannbaums (MST, durch den englischen Begriff *Minimum Spanning Tree*) des resultierenden Graphen.
4. Festlegung eines Wurzelknotens, welcher dann mit Nutzung der Tiefensuche (engl. *Depth-First Search*) durchlaufen wird. Dabei wird jedem Knoten auf dem Pfad eine konsistente Orientierung entsprechend dem Elternknoten zugewiesen.

Die komplette Implementierung des Algorithmus findet sich in der open-source Variante in C++ unter [177] und beinhaltet auch die Mesh-Generierung aus den verarbeiteten Punktwolken. Der vorhandene Programmcode wurde um die Komponente erweitert, am Ende die Richtigkeit der Orientierung der Normalen zu kontrollieren. Zudem wurde der nicht benötigte Teil, welcher sich mit der Mesh-Generierung befasst, ausgelassen und andere Teile verworfen, die für die Ziele dieser Forschungsarbeit und Simulation redundant waren. Die ausgelassenen Teile umfassen beispielsweise die Generierung der Oberflächen-Meshstruktur, da für die Oberflächenrekonstruktion *Polygonal Surface Reconstruction* [169] eingesetzt werden sollte. Hoppe weist selbst in dem Papier darauf hin, dass der Algorithmus keine perfekte Orientierung der Normalen garantieren kann [162]. Dies ist insofern nicht problematisch, da ebenfalls aus dem 3D-Gebäudemodell die Informationen der Wand- und Dachflächenpolygone genutzt wurden, um eine konsistente Orientierung zu generieren. Diese wurden nämlich als Referenz verwendet, um nach dem vierten Schritt zu kontrollieren, ob die Orientierung der Punkte korrekt war.

In einer Stichprobe von 100.000 Gebäudepunktwolken wurde gemessen, wie häufig eine Korrektur der Normalen vorgenommen wurde auf Basis des Prozesses, der zu Beginn von Abschnitt 6.2.2 geschildert wird. Es wurde in 14,27 % der Fälle eine falsch orientierte Normale durch den Algorithmus von Hoppe [162] generiert und in allen Fällen war es durch

²⁰Der Wert für k ist eigentlich ein Nutzer-spezifizierter Wert und müsste im Prinzip eigens ermittelt und angegeben werden. In [162] wird allerdings für empirisch erfasste Werte ein Verfahren beschrieben, das eine automatische Festlegung für diesen Wert erlaubt. Dies ist auch im Falle der Forschungsarbeit möglich, da die Datenpunkte eine einheitliche Distanz voneinander haben und kaum bzw. so gut wie gar kein Datenrauschen eingeschlossen ist.

die bereits erwähnten Erweiterungen und zusätzlichen Checks möglich die Orientierung der Normalen zu korrigieren.

6.2.3 Rekonstruktion

Nachdem fehlende Punkte entlang der Wände generiert und die Normalen errechnet wurden, konnte letztendlich die konkrete Rekonstruktion der Gebäude durchgeführt werden. Dabei wurde, wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, ein lineares Optimierungsverfahren verwendet [148]. Dieses bezog sich dabei auf die erkannten Oberflächen in der Punktwolke. Kurz zusammengefasst, durchläuft der Algorithmus grob folgende Schritte:

1. Extraktion der einzelnen Ebenen (shape detection) aus der Punktwolke
2. Generierung der möglichen Polygonflächen (vgl. hierzu Abbildung 6.9)
3. Selektion der optimalen Teilmenge der Polygonflächen durch Optimierung mit „hard constraints“ (strenge Begrenzung)

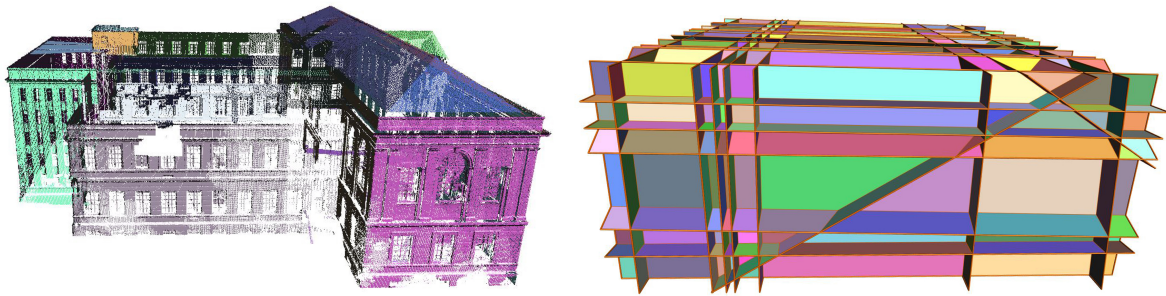


Abbildung 6.9: Ansicht der während der Gebäuderekonstruktion generierten potentiellen Polygonflächen.

Im Anschluss an diese Schritte resultiert ein polygonales, geschlossenes (engl. watertight) Gebäudemodell. Für den ersten Schritt, bei dem die einzelnen Flächen aus der Punktwolke generiert werden sollen, wird in dem Originalpapier von Nan und Wonka [148] ein effizienter RANSAC-basierter Ansatz von Schnabel et al. [178] verwendet. Dieser hat allerdings den Nachteil nicht-deterministisch zu sein und deshalb für dieselbe Punktmenge möglicherweise unterschiedliche Outputs zu generieren [142, 148, 178]. Als Alternative steht ein Ansatz von Lafarge und Hoang [179] im Rahmen der wissenschaftlichen Geometrie Softwarebibliothek CGAL zur Verfügung. Dieser ist im Gegensatz zum RANSAC-Algorithmus deterministisch und wurde eingesetzt, um den Großteil der Gebäuderekonstruktion zu betreiben [169].

Für die Generierung der möglichen Polygonflächen werden zunächst die identifizierten Ebenen eingegrenzt. Diese werden außen herum durch eine imaginäre bzw. virtuelle „Bounding Box“ um das betrachtete Gebäude begrenzt, sodass nicht mit „endlosen“ Ebenen gearbeitet werden muss. In der Abbildung 6.9 ist der Prozess der Generierung aus [148] zu

sehen sowie die Korrekturen der planaren Polygone, welche Schnittpunkte untereinander bilden.

Für die Selektion am Ende der endgültigen Polygone, die das neu rekonstruierte Gebäude ausmachen, wurde, wie bereits erwähnt, ein lineares Optimierungsproblem aus dem gesamten Modell fokussiert. Die Berechnung beschränkte sich dabei darauf, dass für jede Kante einer Polygonfläche entweder genau zwei oder null Verbindungen ausgewählt werden. Mit dieser Vorgehensweise werden multiple Verschneidungen von drei oder mehr Flächen vermieden (vgl. Abbildung 6.10).

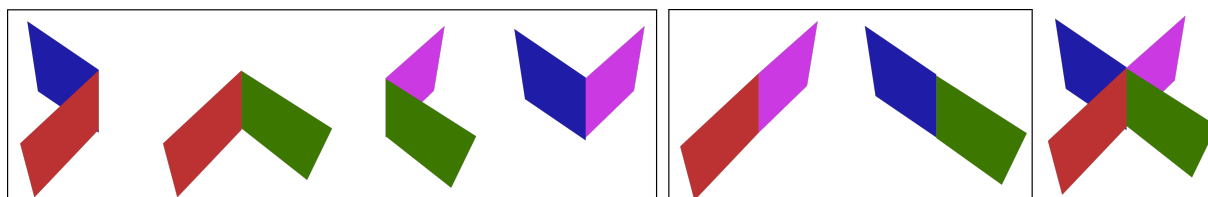


Abbildung 6.10: Ansicht der erlaubten 2-er Polygonflächenverbindungen, i.A.a. [148].

Für die Lösung der Gleichungssysteme, welche durch die linearen Gleichungen als Beschränkungen des Optimierungsproblems entstehen, werden Mixed-Integer-Programming (MIP) Solver bzw. Solver für ganzzahlige lineare Optimierung verwendet. Diese erlauben es die große Menge an linearen Gleichungssystemen effizient (oder im Zweifelsfall näherungsweise) zu lösen. Es stehen dabei unterschiedliche Solver, sowohl open-source als auch kommerzielle Lösungen zur Verfügung. In [148] werden unterschiedliche Solver verglichen und ihre Geschwindigkeit aufgezeigt. In diesem Rahmen stellte sich heraus, dass die beiden kommerziellen Lösungen von Gurobi und CBC mit Abstand vorne liegen und die Gleichungssysteme am schnellsten lösen [169]. Eine Übersicht der Laufzeitperformance der unterschiedlichen Solver, welche von Nan innerhalb der CGAL Bibliothek evaluiert wurden [169], findet sich in Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Laufzeit der einzelnen Solver bei der Lösung der Optimierungsgleichungen pro Modell, i.A.a [169].

Modell	Problemgröße / Nebenbedingungen	Solver			
		Gurobi	CBC	SCIP	GLPK
	1244/2660	0.05 sec	0.2 sec	0.3 sec	9 sec
	2582/5420	0.2 sec	0.6 sec	2.6 sec	35 min
	21556/442191	2 sec	7.5 sec	9 sec	–

Der schnellste frei verfügbare open-source Solver wird von SCIP bereitgestellt und wurde ebenfalls in dieser Forschungsarbeit genutzt, da er den besten Kompromiss zwischen Effizienz und freier Verfügbarkeit bietet [148]. Hinzu kommt, dass die Gebäudemodelle in dem Fall der vorliegenden Forschungsarbeit nie mehr als 19.804 *candidate faces* generiert

haben und somit der Einsatz eines kommerziellen Solvers keine signifikante Performancesteigerung einbringt. Die Implementierung erfolgte dabei durch das vom Autor selbst entwickelte Paket *Polygonal Surface Reconstruction* aus der CGAL Bibliothek [169].

An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass die Oberflächenrekonstruktion laut Autoren [148] unter Umständen nicht perfekt abläuft. In den Stichproben aus der Auswertung und in den Zwischenergebnissen sind keine signifikanten Auffälligkeiten verzeichnet worden, dennoch sollten Unsicherheiten und Unstimmigkeiten einkalkuliert werden. Weiterhin ist anzumerken, dass eine unterschiedliche Anzahl von Punkten in der Punktwolke auch zu unterschiedlich akkuraten und guten Ergebnissen bei der Oberflächenrekonstruktion führen kann.

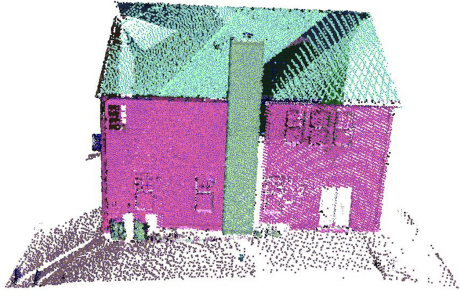
Einige Beispiele sind der Abbildung 6.11 zu entnehmen, welche Vorher-Nachher Bilder von den anfänglichen Punktwolken bis hin zu der fertigen Rekonstruktion aufzeigen. Die erläuterte Vorgehensweise fand Anwendung auf alle Gebäude im Landesgebiet NRW.

6.2.4 Verminderung der Dachflächen durch Dachfenster

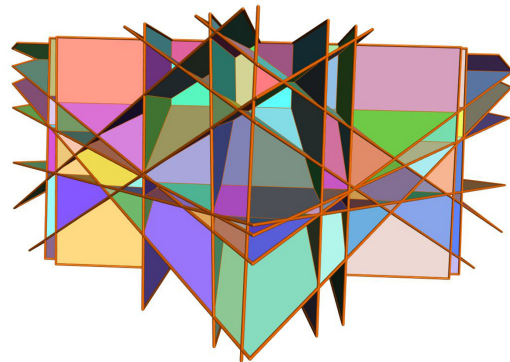
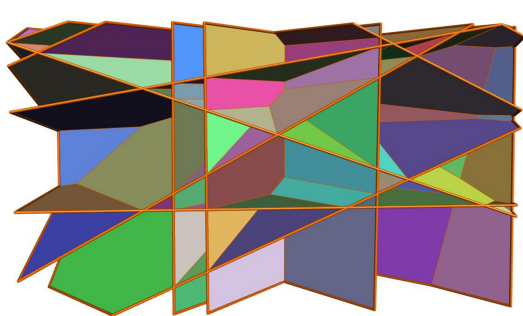
Dachfenster spielen besonders für Ein- und Zweifamilienhäuser eine erhebliche Rolle bei der Betrachtung der Verminderung der Dachfläche, die für PV-Anlagen zur Verfügung steht. Bisher wurde dieser Faktor im Rahmen von weiteren Potentialanalysen nicht aufgegriffen, da die Erfassung der Strukturen in rasterisierten Oberflächenmodellen keine 100%ige Umsetzbarkeit garantiert. In den betrachteten Analysen vom LANUV, der Steiermark und der Schweiz findet die Berücksichtigung von Dachfenstern nicht statt [17, 48, 82].

Bei der Analyse und genaueren Betrachtung der Punktwolken fiel allerdings auf, dass an den Stellen, die „Löcher“ in der Punktwolke auf den Dachflächen vorwiesen, in den entsprechenden fotografisch erfassten Dateien die Dachfenster sichtbar waren. Dies stimmt ebenfalls mit der Tatsache überein, dass LiDAR-Laserpulse Fensterscheiben durchdringen, ohne dass sie reflektiert und somit detektiert werden [180].

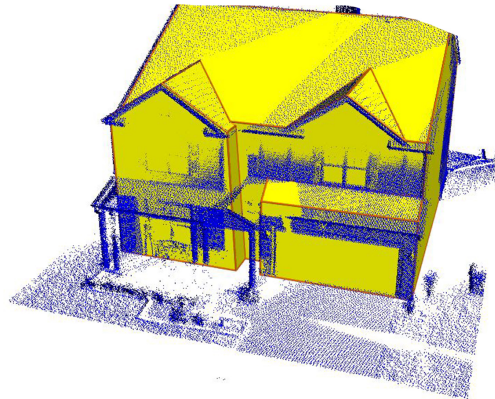
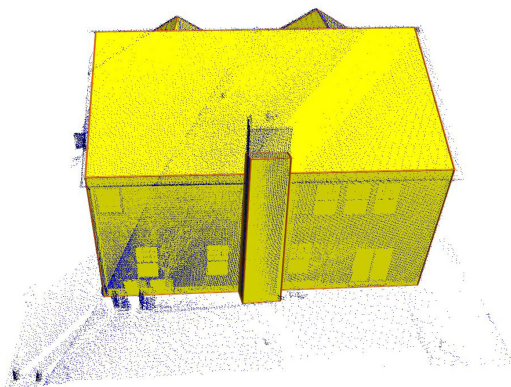
In der Literatur finden sich mehrere Ansätze für Algorithmen, die Löcher in den Punktwolken detektieren können [181–183]. All diese Algorithmen sind ebenfalls für das Erfassen von diesen Unstimmigkeiten bzw. Löchern in 3D-Punktwolken geeignet. Dahingehend wurde letztendlich auf den Algorithmus aus [182] zurückgegriffen, da dieser bereits eine C++ Implementierung der Autoren besitzt, welche nur im Bezug auf die verwendeten Datentypen angepasst werden musste, um für die Zwecke dieser Forschungsarbeit verwendet werden zu können. Weiterhin ist ein Vorteil, dass der Algorithmus laut experimenteller Validierung der Autoren sehr gute Ergebnisse für die Art von Verwendung, die bei der Ermittlung von „Löchern“ der Dachfenster relevant sind, liefert [182]. Schlussendlich wird noch erläutert, wie die Größen der Fenster ermittelt bzw. wie diese daraufhin modelliert werden können. Der Algorithmus wird lediglich dafür verwendet, die konvexe Hülle des „Loches“ zu identifizieren. Dieses bildet allerdings in den seltensten Fällen die konkreten



(a) Punktwolke vor der Rekonstruktion.



(b) Gebäuderekonstruktion nach Generierung der *candidate faces*.



(c) Abgeschlossene Gebäuderekonstruktion.

Abbildung 6.11: Vorher-Nachher Vergleich von Punktwolke vor der Rekonstruktion und fertig rekonstruiertem Gebäude.

Ausmaße des Fensters ab. Um eine Einheitlichkeit des Vorhabens zu gewährleisten, und da keine Möglichkeit besteht anderweitig eine verlässliche Aussage zu treffen, wird der Mittelpunkt des konvexen „Lochpolygons“ ausgewählt und von diesem aus „Standardmaße“ für die Dachfenster verwendet. Diese werden daraufhin von der verfügbaren Dachfläche subtrahiert. Leider sind keine offiziellen „Standardmaße“ oder feste Verordnungen darüber verfügbar, welche die Größen der Fenster festlegen. Daraus resultierend wurde eine eigene Marktrecherche vorgenommen und ausgewertet, welche Größen handelsüblich sind. Die Auswertung von über 30 Modellen ergab, dass Fenster zumeist zwischen 78 und 140 cm hoch und zwischen 54 und 114 cm breit sind. Um einen Richtwert für die vorliegende Arbeit zu erhalten, soll jeweils der Median angenommen werden. Somit ergibt sich ein „Standardfenster“ der Größe 84x109 cm. Diese Maße wurden bei Entdeckung eines Lochs in der entsprechenden Dachflächenpunktwolke von der verfügbaren Dachfläche subtrahiert.

6.3 Vegetationsmodellierung

Bäume stellen voraussichtlich eine nicht zu vernachlässigende Hinderung für die Anbringung von PV-Anlagen auf Dächern dar. Dies gilt insbesondere für PV-Dachanlagen auf Ein- und Zweifamilienhäusern (aufgrund der geringeren Höhe), welche einen Großteil der zur Verfügung stehenden Gebäude ausmachen und in der dezentralen Energiebereitstellung eine höhere Relevanz gewinnen.

An dieser Stelle muss angemerkt werden; so wichtig die Modellierung und Einbeziehung von Bäumen für eine korrekte und funktionale Schattenanalyse ist; dass kaum brauchbare open-source Daten vorliegen. Für das Landesgebiet NRW stehen zum Zeitpunkt der Forschungsarbeit (Jahr 2020) lediglich für einige Bereiche der Stadt Köln und Münster sogenannte „Baumkataster“ Daten zur Verfügung, welche die Position und den Durchmesser von Bäumen mittels zweidimensionalen Koordinaten markieren [184, 185]. Für eine Berechnung der Verschattung durch Bäume in den relevanten Bereichen von NRW ist dies mehr als unzureichend.

Dabei sind mittels der vorhandenen Airborne Laserscan Daten Baumstrukturen durchaus in den Punktwolken zu identifizieren. Die Schwierigkeit besteht allerdings in der automatisierten Klassifizierung ebendieser Strukturen und in der Differenzierung zwischen ihnen und den verrauschten Daten- oder Gebäudepunkten. Ansätze aus der künstlichen Intelligenz werden dabei in Zukunft sicher Abhilfe schaffen, allerdings sind die meisten Modelle zu komplex und würden den zeitlichen Rahmen dieser Forschungsarbeit unverhältnismäßig ausdehnen. Zusätzlich ist die Zuverlässigkeit nicht gewährleistet, da weiterhin Probleme vorliegen, komplexe neuronale Netzwerke zu trainieren und entsprechende Daten als Trainingssets bereitzustellen.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde dahingehend von den Möglichkeiten (mit all ihren Vor- und Nachteilen) der Lokalisierung von Baumstrukturen über die vorhandenen

Daten zur Klassifikation der Punktwolken Gebrauch gemacht. Ergänzt wurde dies in den bestimmten Fällen, bei denen die Klassifikationsdaten nicht vorhanden waren, über einen Ansatz aus [186]. Dieser definiert einen effizienten Algorithmus, welcher mit relativ hoher Zuverlässigkeit Baumstrukturen identifizieren kann. Die Auswertung der Fallstudie in [186] gibt eine Trefferwahrscheinlichkeit bei der Erkennung von Baumpunkten zwischen 92 und 97 % [186] an. Für die letztendliche Modellierung wurden Ideen aus [187] verwendet, welche im Abschnitt 6.3.1 detaillierter erörtert werden.

6.3.1 Parameter der Vegetation

Bei den Parametern der Vegetation liegt der Ablauf der Baummodellierung hauptsächlich im Fokus. Offizielle Richtlinien sind nicht vorhanden, welche Art von Datentypen oder Datenstrukturen dafür verwendet werden können [187]. Theoretisch könnte für die Spezifikation eine ähnliche Anwendung wie CityGML verwendet werden, sie ist allerdings sehr verbos und führt zusätzliche Ebenen an Komplexität ein. In [187] werden unterschiedliche Darstellungen und Baumrepräsentationen in 3D automatisch aus LiDAR-Daten extrahiert und modelliert. Das dortige Vorgehen setzt vor allem ESRI's ArcGIS Pro mit unterschiedlichen Lizenzen und weiteren Geoinformationstools ein, die kommerziell und closed-source sind. Besonders hervorzuheben ist die Tatsache, dass hierbei eine extrem hochauflösende Datenbasis vorhanden war (über 30 Punkte/m² für Airborne LiDAR und über 350 Punkte/m² für mobiles LiDAR). Verglichen mit den in NRW zur Verfügung stehenden LiDAR-Daten liegt ein wesentlich höherer Detailgrad für die Rekonstruktion von Bäumen, aber auch beispielsweise von Gebäuden vor. Zudem sollte noch angemerkt werden, dass in [187] ebenfalls die Auswirkungen von einem realistischeren Baummodell auf die Schattenermittlung analysiert wurden. Das Resultat in diesem Kontext war, dass eine realistischere Modellierung nicht zwangsläufig zu einem wesentlich besseren Ergebnis führt. Insgesamt waren rudimentäre Ansätze bei der Modellierung im Wesentlichen nicht weit von den realitätsnahen Modellberechnungen entfernt. Die Arbeit von [187] ist zwar bisher die Einzige ihrer Art, zeigt jedoch gut auf, wie die unterschiedlichen Detaillevels bei der Baummodellierung ähnliche Ergebnisse erzielen, wenn es um den Effekt der Verschattung geht. Dies wurde zum Anlass genommen keine Fokussierung auf die extreme Genauigkeit zu legen, da reale Rekonstruktionen von Bäumen nicht notwendig, bzw. auch nicht möglich sind.

Für diese Forschungsarbeit war es schlussfolgernd von hoher Priorität, dass die Lage der Bäume, die Höhe sowie die Durchmesser korrekt bestimmt werden. Daraufhin konnte mittels primitiver Formen eine Baumdarstellung generiert werden. Dementsprechend wurden diese drei Parameter für die Modellierung der Bäume eingesetzt. Auf Basis dieser Parameter, die aus den Daten der Punktwolken gewonnen wurden (Techniken werden in den folgenden beiden Abschnitten erläutert), wurden die Bäume als Kegelstrukturen dargestellt. Dies liegt darin begründet, dass dieses primitive geometrische Objekt mitunter am simpelsten zu verarbeiten ist und am ehesten dem Modell eines Baumes entspricht.

Würden Kugelformen verwendet werden, müssten diese mit hoher Wahrscheinlichkeit für ein passendes Modell weiter aufgearbeitet werden, beispielsweise durchs Stauchen oder Dehnen der Formen [188].

6.3.2 Filterung über LiDAR-Kategorien

Die LiDAR-Daten bieten bestenfalls eine gute Möglichkeit um Bäume zu lokalisieren. Dies funktioniert entweder über die (automatische) Klassifizierung der einzelnen Punkte oder durch die Analyse der *Return*-Werte der Punkte. Bei den *Return*-Werten funktioniert das Ganze, weil die Blätter von Bäumen die Laserpulse mehrere Male reflektieren. Dieser Umstand wurde bereits in Kapitel 4 ausführlich erörtert. Durch die Abfrage, welchen *Return*-Wert ein Punkt hat, lässt sich eine Abschätzung vornehmen, ob der betrachtete Punkt einem Baum bzw. einer Vegetation zugeordnet werden kann oder nicht. Wichtig ist in diesem Kontext, dass die Punkte nicht nur isoliert, sondern im Kontext ihrer Umgebung betrachtet werden. Abbildung 6.12 verdeutlicht, wie sich die *Return*-Werte in Punktwolken verhalten, die einen Baum bzw. eine Vegetation darstellen, verglichen mit anderen (menschengemachten) Strukturen. Hierbei sind niedrige *Number of Returns* Werte besonders bei Gebäuden zu finden, wohingegen höhere Werte bei Vegetationen vorliegen. Die Analyse der Umgebung und der nächsten Nachbarn eines Punktes ist sehr effektiv und der bevorzugte Weg, um Bäume zu identifizieren. Nach der Identifikation einer Teilmenge von Punkten, die zu einem Baum gehört, kann über Berechnung der Ausdehnung der Punktwolke ermittelt werden, wie groß der Durchmesser und die Höhes des Baumes ist. Dafür wird die maximale Distanz in Höhe und Breite zwischen den Punkten ermittelt.

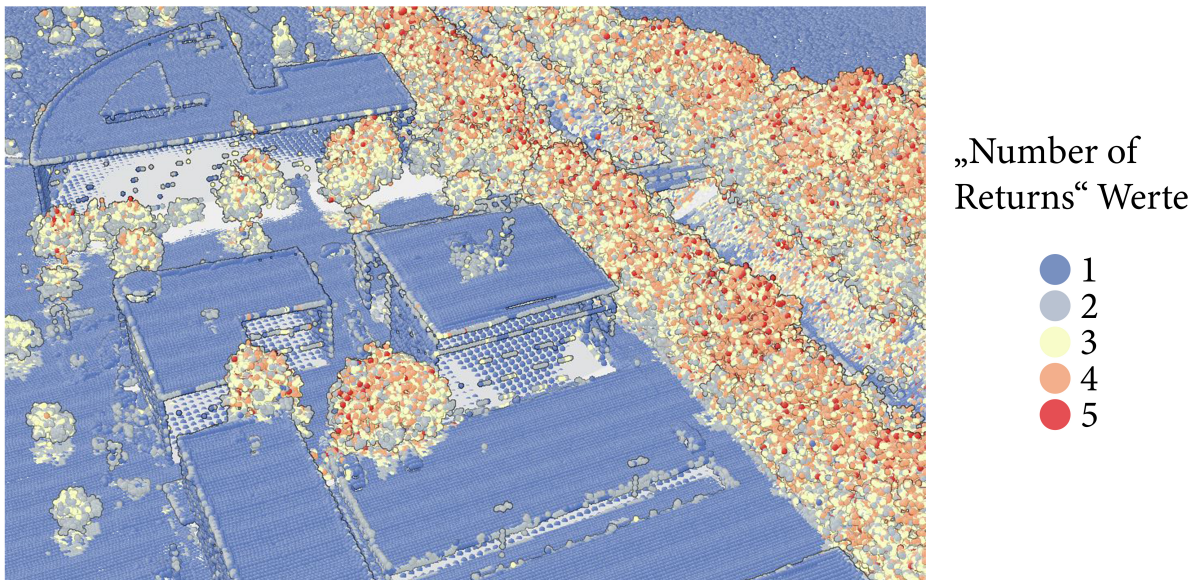


Abbildung 6.12: Ansicht einer exemplarischen Punktwolke an der TU Dortmund mit Punkten farblich nach *Number of Returns* Werten eingefärbt.

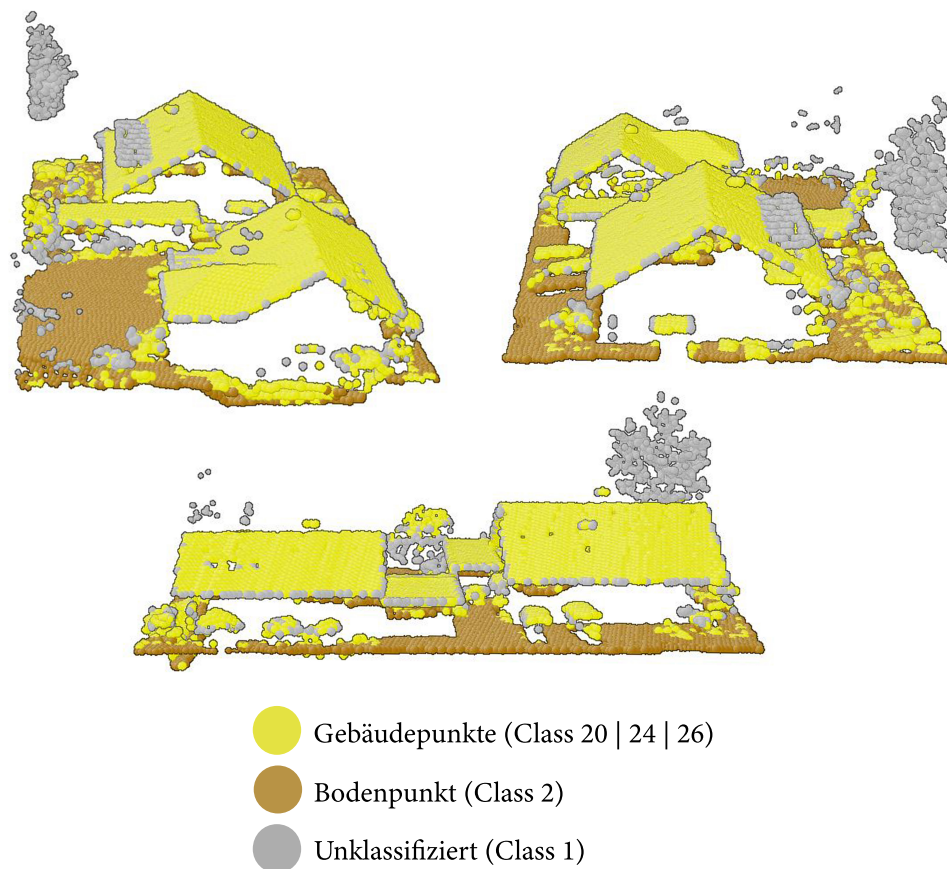


Abbildung 6.13: Ansicht einer exemplarischen Teilmenge der LiDAR Punktwolke aus einem der neuesten Datensätze (2020) mit farblich markierter Klassifizierung der Punkte.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Baumpositionen auf Basis der automatischen Klassifizierung zu bestimmen. Dabei werden die, ebenfalls in Kapitel 4 besprochenen, Klassencodes verwendet um herauszufinden, ob ein betrachteter Punkt zur Vegetation gehört. Im Anschluss kann die Höhe im Vergleich zu den Nachbarpunkten betrachtet und entschieden werden, ob die Darstellung einem Baum oder einer anderen Pflanze zugeordnet werden kann. Das Problem in diesem Kontext ist, dass die automatische Klassifizierung in den Daten von OpenNRW nicht sehr konsistent ist. Demnach gibt es lediglich wenige Bereiche, die überhaupt klassifizierte Punkte aufweisen bzw. bei welchen der (automatisierte) Klassifizierungsprozess durchgeführt wurde. Die Ergebnisse sind jedoch kritisch zu betrachten. Abbildung 6.13 verdeutlicht wie Punkte, die eigentlich einem Baum zugeordnet werden sollten, als unklassifiziert kategorisiert werden.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit liegt dies darin begründet, dass das Aufnahmegerät nicht über die nötigen Fähigkeiten verfügt oder sonstige Schwierigkeiten vorlagen, wie mangelnde Auflösung und fehlende technische Implementierung der Algorithmen, die eine automatisierte Klassifizierung anhand der *Return*-Werte vornehmen können. Die Methode über

Klassencodes konnte aufgrund der fehlenden Daten in älteren Datensätzen nicht für alle Fälle konsistent verwendet werden, obwohl diese für entsprechende Datensätze bestmöglich geeignet wäre und eine hohe Effizienz gewährleisten würde, bei entsprechend korrekter Klassifizierung. Der Übersicht halber findet sich in Abbildung 6.14 ein Diagramm, welches die Logik der Baumidentifizierung über *Return*-Werte und Klassencodes aufzeigt. Für alle Datensätze vor 2017, die keine *Return*-Werte mitliefern, musste der Ansatz, der im folgenden Absatz beschrieben wird, eingesetzt werden.

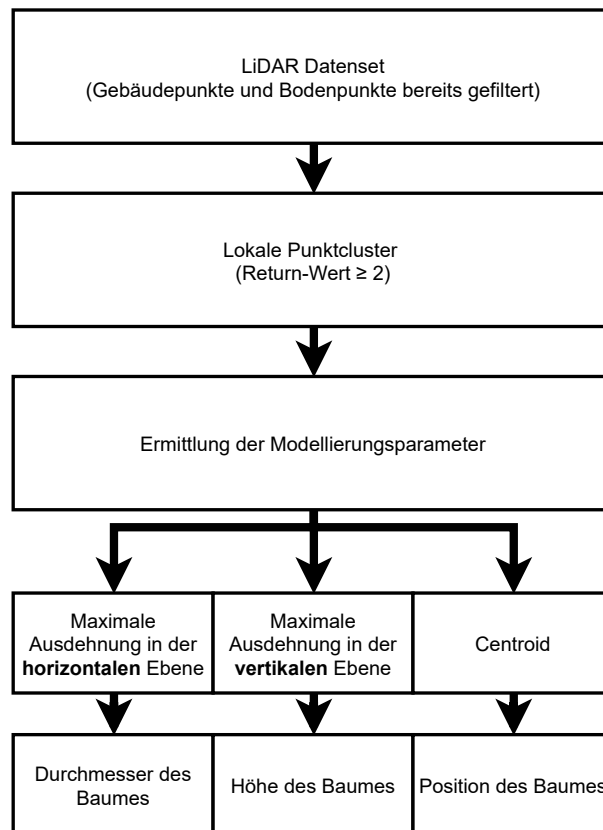


Abbildung 6.14: Prozessübersicht des Programmablaufs mit Filterung der Baumpunkte über die *Return*-Werte der Punkte.

6.3.3 Filterung über TU Delft Algorithmus

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, konnten leider nicht in allen LiDAR-Datensätzen Bäume über die vorhandenen *Return*-Werte lokalisiert werden. Daher musste für diese Datensätze ein anderer Ansatz gewählt werden, welcher nur auf Basis der dreidimensionalen Koordinaten der Punkte agiert und damit die notwendigen Eigenschaften der Bäume für diese Arbeit extrahiert. In der Forschung gibt es unterschiedliche Arbeiten, die sich mit der Lokalisierung und Ermittlung von Bäumen und ihrer definierenden Parameter (z. B. Höhe, Durchmesser, Baumkrone, Standort-Koordinaten etc.) beschäftigen

(u.a. [186, 187, 189–192]). Die meisten von ihnen zeichnen sich durch eher rechenintensive Methoden aus, welche beispielsweise Voxel-Datenstrukturen²¹ verwenden, die im Hintergrund aus den Punktwolken generiert werden. Diese werden dann über die entsprechend entwickelten Algorithmen verarbeitet und für die Extraktion von Baumstrukturen genutzt [108].

Ein interessanter, grundlegend anderer Ansatz ist der von zwei Wissenschaftlern der TU Delft, welche die Punkte einer LiDAR-Punktwolke mittels einer Wahrscheinlichkeitsmatrix klassifizieren [186]. Es ist zu beachten, dass ihr Vorgehen lediglich den Punkten die Klasse „Baum“ oder „nicht-Baum“ zuordnet und keine Rekonstruktion oder Ermittlung einzelner Bäume durchführt. Dennoch liefert der Algorithmus solide Klassifizierungswerte von über 90 % korrekt klassifizierten Punkten [186]. Als Limitation wird von den Autoren u.a. genannt, dass einige falsch-positive Klassifizierungen stattfinden. Dabei werden Laternen, Ampeln oder andere Punkte, die nah bei einer Baum-Punkteilmenge stehen, falsch zugeordnet. Für die vorliegende Forschungsarbeit stellt dies kein fundamentales Problem dar, weil Gebäudepunkte bereits im Vorfeld ausgefiltert wurden. Für alle weiteren falsch-positiven Fälle ist es kein Problem, da keine restriktive Vorgehensweise gewählt wurde. Wenn beispielsweise eine kleine Struktur fälschlicherweise als Baum klassifiziert wurde, dann wurde sie aufgrund ihrer Größe bei der späteren Anwendung nicht weiter betrachtet, da sie ohnehin eine zu geringe Höhe aufweist um einen Schatten auf ein Gebäude zu werfen. Wenn hingegen ein Mast fälschlicherweise durch den Algorithmus klassifiziert wurde, dann wurde dieser zumindest auch in die Schattenberechnung einbezogen.

Der Algorithmus der TU Delft durchläuft grob vier übergeordnete Prozessschritte [186]. Diese lauten wie folgt:

1. Generierung der Wahrscheinlichkeitsmatrix als zweidimensionales Raster. Das Raster hat dabei die selbe Ausdehnung wie die Punktwolke.
2. Bestimmung der Hochwerte/ Maxima in der Wahrscheinlichkeitsmatrix. Diese deuten auf die Lage, welche die höchste Wahrscheinlichkeit hat einen Baumstamm zu beinhalten.
3. Punktklassifizierung für die Punkte, die höchstwahrscheinlich zu einem Baum gehören. Dabei können eigene Klassenlabels verwendet werden, oder es wird sich an den Classification-Codes der LAS-Spezifikation gehalten.
4. Ausfilterung der Bodenpunkte. Dieser Schritt wurde in der Implementierung für die Forschungsarbeit ausgelassen, da er nicht notwendig für den Algorithmus war.

Bei den Experimenten des Forschungsteams der TU Delft stellte sich heraus, dass der Algorithmus zwischen 92% und 97% der Punkte korrekt als Bäume klassifiziert, je nach Datenquelle (Airborne LiDAR oder mobiler Laserscanner) [186]. In zwei manuell ausgewerteten Tests mit den LiDAR-Punktwolken von OpenNRW konnten diese Werte bestätigt werden. In einem Fall lag dabei die Erkennungsrate bei 96% und in dem anderen

²¹Ein Voxel ist ein Pixel im dreidimensionalen Raum.

Fall bei 98%. Diese sehr guten Erkennungsraten ergeben sich ebenso aus der Tatsache, dass bereits Punkte rausgefiltert wurden, die zu den Gebäuden gehören. Somit können Gebäudepunkte nicht fälschlicherweise als Baumpunkte klassifiziert werden. Die beiden klassifizierten Gebiete der Tests können der Abbildung 6.15 entnommen werden.

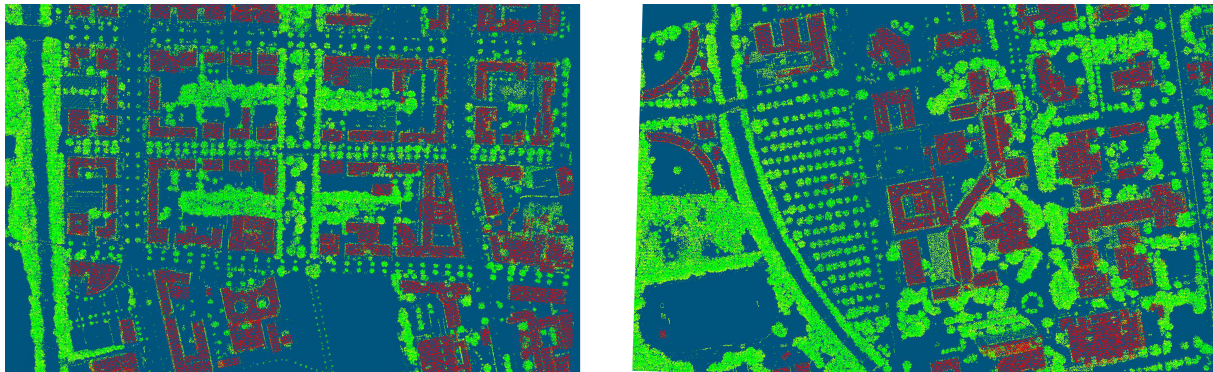


Abbildung 6.15: Ergebnis der exemplarischen Vegetationsklassifizierung der Punktwolken von der Region an der TU Dortmund mit dem Algorithmus der TU Delft.

Nachdem die Punkte klassifiziert wurden, wurde abschließend der Prozess, wie schon im vorherigen Abschnitt erläutert, durchgeführt. Im Rahmen dessen wurden die klassifizierten Baumpunkte wieder verarbeitet um die Höhe und den Durchmesser des Baums zu bestimmen. Dabei wurden die nächsten Nachbarn der Baumpunkte analysiert, um festzustellen, wie weit und in welche Höhe diese sich ausdehnen. Mit diesen Informationen konnten die Bäume dann entsprechend der vorgesehenen Methode modelliert werden. Eine Abbildung des Prozesses findet sich im Flow-Chart von Abbildung 6.16.

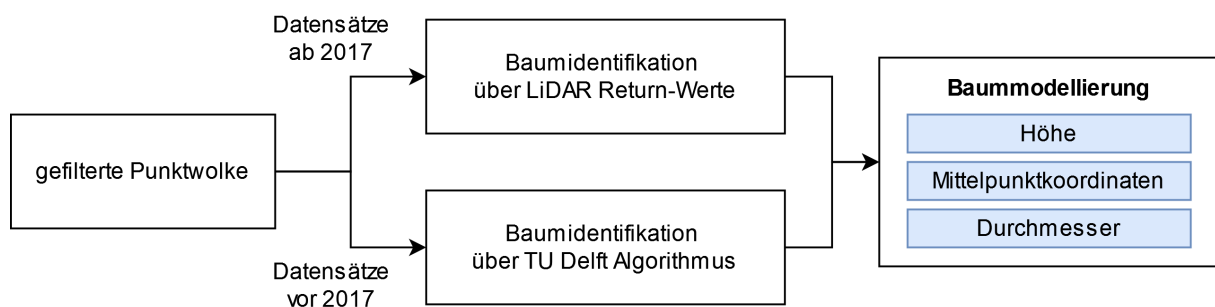


Abbildung 6.16: Übersicht der kompletten Vegetationsmodellierung.

6.4 Implementierungsdetails des Verschattungsprozesses

Die mathematischen Grundlagen der Berechnung der Schattenpolygone wurden bereits in Kapitel 4 erläutert. In diesem Abschnitt soll auf die Implementierung und einige Details,

sowie auf die Code-Quellen, eingegangen werden. Alle relevanten Teile für die Ermittlung der Schattenpolygone wurden in C++ programmiert und haben entweder eine Schnittstelle zu vorgefertigtem Code in C (wie beispielsweise bei der Sonnenposition) oder wurden nur teilweise aus dem Originalcode verändert.

6.4.1 Sonnenposition

Für die Ermittlung der Sonnenposition gibt es, wie bereits in Kapitel 4.3.2 vorgestellt, unterschiedliche Algorithmen. Die Entscheidung für die Implementierung wurde zu Gunsten des SPA gefällt, welcher vom National Renewable Energy Laboratory (NREL) verwaltet wird. Bedingt durch die Tatsache, dass die Berechnung der linearen Gleichungssysteme für die Ermittlung der Schattenpolygone in C++ erfolgt, wurde hierbei auf die bereits bestehende und erprobte Implementierung des Algorithmus in C zurückgegriffen. Da C-Programme ohne große Komplikationen in C++ Applikationen integriert werden können, musste keine separate Testung und Verifikation an dieser Stelle erfolgen. Der SPA-Algorithmus in C bietet robuste Ergebnisse und arbeitet effizienter als jede andere Implementierung, da C und C++ sehr Hardware-nahe Sprachen sind. Der Programmcode für diesen Teil steht offen zum Download auf der Website vom NREL [193] zur Verfügung.

6.4.2 Schattenpolygone und ihre Verschneidung mit den Gebäuden

Das Kernstück der Anwendung ist die Berechnung der Schattenpolygone. Unabhängig davon in welcher Phase der Algorithmus sich befindet (G2G, B2G, E2G – siehe Abbildung 7.4 und 7.9), wird die Ermittlung der Schattenpolygone immer auf dieselbe Art durchgeführt und folgt denselben Prinzipien der Trigonometrie und Vektorgeometrie. Diese wurden ebenso in Kapitel 4 beschrieben. Die in der Computergrafik viel diskutierte Ray-Tracing Technik repräsentiert die Aufstellung der linearen Gleichungen von einem Bezugspunkt (beispielsweise ein Knoten eines Dachflächenpolygons) zum Sonnenpunkt und die Ermittlung der Schnittstelle mit einem potentiellen Hindernis [194]. Existiert ein solcher Schnittpunkt, kann die Schlussfolgerung erfolgen, dass der betrachtete Punkt in einer Schattenfläche liegt, da ein direkter Strahl zur Sonne nicht möglich ist. Um hierbei eine effiziente Vorgehensweise sicherzustellen, werden die Strahlen (engl. *rays*) bzw. deren Geradengleichungen direkt in die entsprechende Richtung des Referenzpunktes aufgestellt und von der Sonne aus auf die Hindernisse projiziert. Diese Vorgehensweise könnte ebenso als umgekehrtes bzw. *reverse* Raytracing bezeichnet werden, da das Raytracing lediglich in die entgegengesetzte Richtung erfolgt. Hierdurch wird ermöglicht, dass nicht nur eine Verschattung eines bestimmten Punktes ermittelt, sondern direkt das gesamte Schattenpolygon identifiziert wird (vgl. Abbildung 6.17).

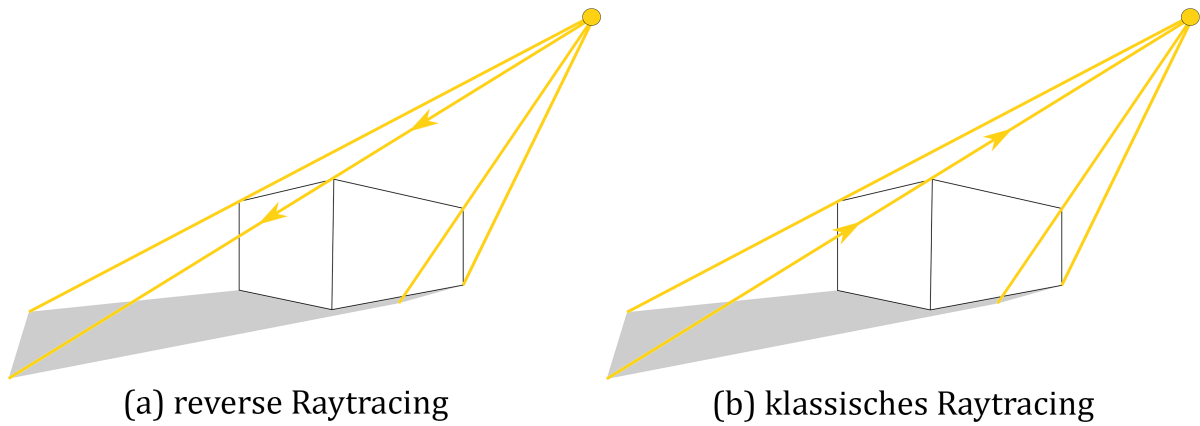


Abbildung 6.17: Übersicht des Vorgehens beim klassischen Raytracing und bei dem in dieser Arbeit verwendeten umgekehrten Prozess (*reverse Raytracing*).

Anhand der folgenden Beschreibung soll näher betrachtet werden, wie der Prozess des Raytracings verwendet wird. Dabei wird systematisch für jedes Gebäude und jeden Baum eine Schattenprojektion auf den Boden erstellt und mit dem entsprechenden Gebäude oder Baum assoziiert (bezugnehmend auf die Schritte G2G und B2G). Dieser Schritt wird ebenso als „Erstellung der Shadow-Map“ bezeichnet.

Im Anschluss werden die Schattenprojektionen aus der Shadow-Map mit den vorhandenen Grundrissen abgeglichen. Wenn eine Schattenprojektion einen anderen Gebäudegrundriss schneidet, liegt auch eine potentiell verschattete Dachfläche vor. In diesem Fall muss, bevor eine erneute, konkrete Projektion auf die spezifische Dachfläche erfolgt, zunächst beurteilt werden, ob die Berechnung lohnenswert ist. Dies erfolgt dadurch, dass die Höhe des schattenwerfenden Gebäudes $G_{shading}.height$, mit der Höhe des potentiell verschatteten Gebäudes, $G_i.height$ verglichen wird. Wenn das Schatten werfende Gebäude $G_{shading}$ höher als das betrachtete Gebäude G_i ist, dann kann davon ausgegangen werden, dass auch wirklich ein Schatten auf das Dach von G_i fällt und somit würde nur in diesem Fall eine konkrete Projektion auf die Dachfläche von G_i erfolgen. Formal wird der Prozess durch die Fallunterscheidung der Gleichung 6.4.1 beschrieben.

$$\text{RoofShadingArea}(G_{shading}, G_i) = \begin{cases} \text{shadow}(G_{shading}, G_i) & \text{if } G_{shading}.height > G_i.height \\ \emptyset & \text{if otherwise} \end{cases} \quad (6.4.1)$$

wobei

$G_{shading}$	Schatten verursachendes Gebäude
G_i	Potentiell verschattetes Gebäude, i stellt die Laufvariable dar
RoofShadingArea	Stellt die Funktion dar, welche die Verschattung der Dachfläche(n) von Gebäude G_i durch das Gebäude $G_{shading}$ ermittelt
shadow()	Funktion zur konkreten Berechnung der Verschattungseffekte von Gebäude $G_{shading}$ auf Gebäude G_i

Die Schattenpolygone werden im Falle einer potentiellen Verschattung wieder mittels Raytracing bestimmt, allerdings mit einer anderen Projektionsfläche. Im ersten Fall der allgemeinen Schattenprojektion werden die Schatten auf den Boden projiziert und die Berechnung mit dem eigentlichen Dach als Referenzfläche durchgeführt. Im zweiten Fall werden die Schatten direkt auf die Ebene der Dachfläche projiziert. Danach wird ermittelt, ob der projizierte Schattenpunkt innerhalb des Dachflächenpolygons fällt.

Zur Verdeutlichung der Verschattung, die nur von Gebäuden ausgeht, findet sich aus der Vogelperspektive eine Visualisierung in Abbildung 6.18 für die Kachel, welche die geografische Region um die TU Dortmund abbildet.



Abbildung 6.18: Verschattungseffekt in der Region um die TU Dortmund exemplarisch am 21.06. (links) und 21.12. (rechts).

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die gesamte Datenverarbeitung besprochen, die vom Algorithmus übernommen wird. Dabei ging es im ersten Teil um die Vorbereitung der Daten, die Beschreibung des Datenbankschemas und die Datenbeschaffung. Der zweite Teil hat die Probleme mit dem vorhandenen Gebäudemodell und dessen potentielle Erweiterung behandelt. Der dritte Teil hat die Modellierung der Vegetation, insbesondere von Bäumen fokussiert sowie die Identifikation dieser innerhalb der Punktwolken. Abschließend wurden Implementierungsdetails und Ergänzungen zur Schattenbestimmung diskutiert.

7 Ausführung der Schattenanalyse und Einstrahlungssimulation

Das folgende Kapitel befasst sich mit der Ausführung der beiden Phasen für die Schattenanalyse und der weiteren Verarbeitung in der Einstrahlungssimulation. Dabei soll auf die Eingangsparameter der beiden Prozesse eingegangen werden. Diese umfassen unter anderem bei der Schattenanalyse das Gebäude- und Baummodell sowie für die Einstrahlungssimulation die solaren Einstrahlungsdaten. Begleitet wird der Text durch entsprechende Abbildungen und Diagramme, welche den Programmablaufplan der einzelnen Komponenten beschreiben. Die Schattenanalyse, bei welcher die reinen Polygonformen der Schattenstellen ermittelt werden, ist wie bereits am Anfang von Kapitel 6 erwähnt in zwei dedizierte Teilprozesse gespalten (vgl. Abbildung 7.1, Phase 1 und Phase 2). Dieses Vorgehen stellt sicher, dass die Effizienz bei der Berechnung durch die kostspieligen geometrischen Berechnungen gesteigert wird und keine redundanten Kalkulationen auftreten. Daraus folgend kann bei den Ergebnissen unterschieden werden, welche Verschattungseffekte durch Bäume, andere Gebäude oder die eigenen Dachstrukturen aufkommen, was wichtige Hinweise bei der Bewertung und Interpretation der Ergebnisse liefert.

Die Phase 1 wird nur mit den nötigsten Strukturen der Gebäudemodelle durchgeführt, da dieser Schritt für die grobe Abschätzung bestimmt ist und die allgemeine Verschattung von einem Gebäude auf ein anderes bestimmen soll. Somit werden beispielsweise bei der Schattenprojektion von Gebäude A auf ein Gebäude B, Dachaufbauten von Gebäude A nicht einkalkuliert, um den Rechenaufwand für diesen Schritt zu minimieren. In Phase 2 werden daraufhin die Dächer, die keine starke Verschattung in Phase 1 vorweisen, weiter bezüglich der Eigenverschattung hin analysiert. Hierbei werden die Dachaufbauten auf die betrachtete Dachfläche projiziert, um zu ermitteln wie sehr diese die verfügbare Fläche einschränken.

Den zweiten Teil des Kapitels nimmt die Einstrahlungssimulation ein, welche dazu dient das theoretische Potential ausgehend von den schattenfreien Dachflächen-Polygonen zu ermitteln. Diese nutzen die Daten der Strahlungsreihen vom Deutschen Wetterdienst, wie in Kapitel 4 beschrieben. Die Energiedaten werden für horizontale Referenzflächen ermittelt und im Programmmodul, welches sich mit der Einstrahlungssimulation beschäftigt, für entsprechend geneigte Flächen umgerechnet.

7.1 Schattenanalyse

Die Schattenanalyse teilt sich, wie bereits in der Einleitung des Kapitels erwähnt, in zwei Phasen auf: Die Berechnung von Gebäude-zu-Gebäude (G2G) Verschattung, welche auch die Bäume-zu-Gebäude (B2G) Verschattung mit einschließt, und die Ermittlung der Eigenverschattung (E2G). Dabei werden Dachflächen, die bereits nach der ersten Phase

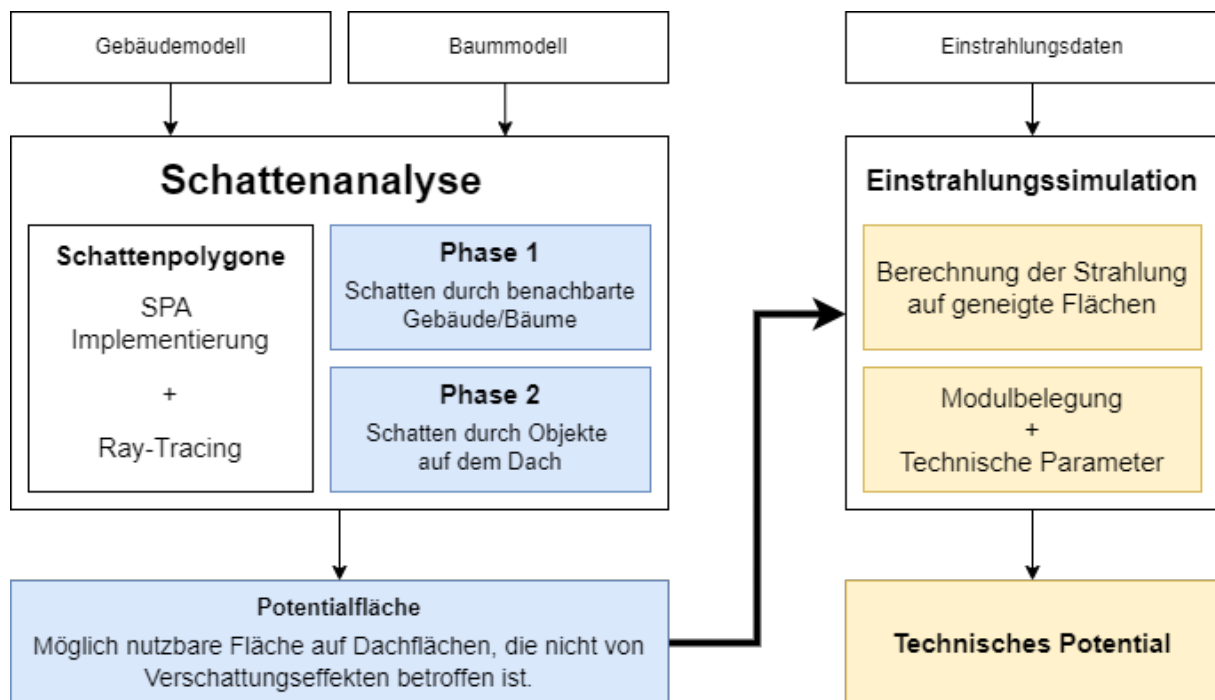


Abbildung 7.1: Modulablauf der Schattenanalyse und Einstrahlungssimulation.

eine ungeeignete Dachfläche aufweisen, nicht für die Phase 2 berücksichtigt, um die Rechenleistung zu optimieren. Diese Flächen würden ohnehin, unabhängig von zusätzlicher Eigenverschattung, eine nicht ausreichende Fläche für die wirtschaftliche Installation von PV-Dachanlagen bieten. Dahingehend kann diese zusätzliche Berechnung eingespart werden. Zudem finden die Berechnungen der Phase 1 nur statt, wenn die Dachfläche keine gänzliche Nordausrichtung aufweist, da die Energieausbeute nicht gewährleistet ist und eine Installation nicht sinnvoll wäre. Alle weiteren Ausrichtungen (Süd, West, Ost und Flachdach) werden in Phase 2 detaillierter betrachtet, im Rahmen der Berechnung der Eigenverschattung. Wichtig ist in diesem Kontext ebenso, dass Dachflächen eines Gebäudes Schatten auf anderen Dachflächen des selben Gebäudes verursachen können (vgl. Abbildung 7.2). Dies tritt insbesondere bei L-förmigen Gebäuden auf.

Der erste Prozess der Schattenanalyse widmet sich zunächst dem Aufstellen einer allgemeinen Schattenkarte. Dabei werden die Schatten von allen Bäumen und Gebäuden auf den Boden projiziert und als zweidimensionale Polygone beschrieben. Beim zweiten Teil des Prozesses werden die in Schritt eins erstellten Schattenkarten mit den Gebäudegrundrissen verschnitten. Ob eine Verschattung der Dachfläche letztendlich zu Stande kommt, hängt ebenso von der Höhe der betrachteten Gebäude und Bäume ab.

Der zweite Prozess der Schattenanalyse behandelt die Detailverschattung bzw. Eigenverschattung des Gebäudes. Dabei ist der Begriff abzugrenzen, da es in diesem Kontext beispielsweise nicht um eine verschattete Gebäudeseite oder Dachseite (bei nördlicher Ausrichtung, vgl. Abbildung 7.3) geht, sondern um die Verschattung auf der Dachfläche,

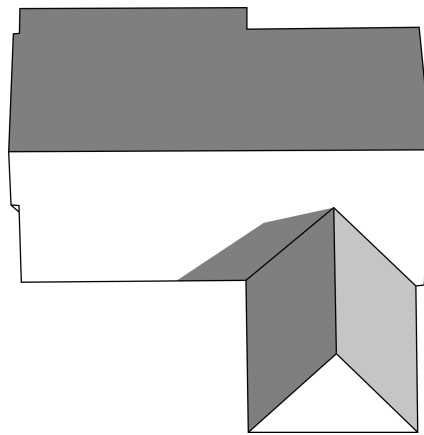


Abbildung 7.2: Schematische Skizzierung von L-förmigem Gebäude aus der Vogelperspektive mit einfallendem Schatten, der von einer anderen Dachfläche desselben Gebäudes generiert wird.

welche durch Dachaufbauten und die Dachstruktur entsteht. Dabei wird ebenso die Ausrichtung und Neigung der Dachflächen einbezogen, da eine Abweichung vom optimal nach Süden ausgerichteten Dach unter Umständen während des relevanten Zeitintervalls für die Analyse (10:00 bis 14:00 Uhr täglich) zur Teilverschattung der Dachfläche führen kann.

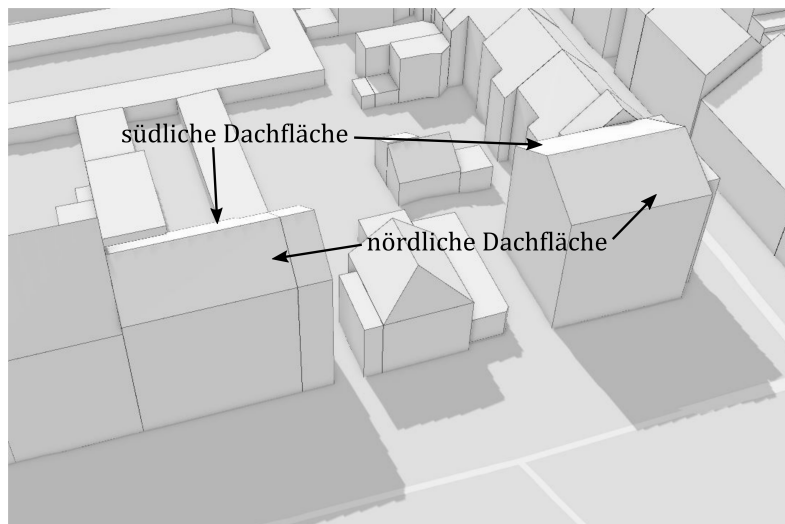


Abbildung 7.3: Verschattungseffekt auf nördlich ausgerichteten Dach- und Fassadenseiten.

Das Modul, welches für die Ermittlung der Schattenpolygone verwendet wird, arbeitet in Abhängigkeit eines dedizierten Zeitpunktes für einen einzelnen Gebäude-Datensatz. Somit ist deutlich, dass für eine vollständige Analyse aller Gebäude, eine Vielzahl von Iterationen durchlaufen werden müssen, da jedes Gebäude im Prinzip einzeln abgearbeitet wird. Dass im Hintergrund Gebrauch von Parallel-Datenverarbeitungstechniken gemacht wurde, um eine gleichzeitige Verarbeitung mehrerer Gebäude zu gewährleisten, ändert zunächst nichts an dem sequentiellen Aufbau des Programmablaufplans.

7.1.1 Phase 1: Schatten durch benachbarte Gebäude und Objekte/Bäume

Die erste Phase der Schattenanalyse unterteilt sich des Weiteren noch in mehrere Prozesse, die nacheinander ablaufen. Dies soll dafür sorgen, dass Berechnungen nicht redundant ausgeführt werden. Dabei wird als Erstes eine zweidimensionale Schattenkarte erzeugt. Diese Schatten sind die Schattenpolygone, die statt auf ein Dach, zunächst auf den Boden projiziert werden. Dafür wird das Modul „Schattenpolygone“ (vgl. Abbildung 7.4) verwendet. Dadurch, dass die Punktwolke normalisiert wurde, liegen die rekonstruierten Gebäude und Bäume alle auf einer Höhe und die natürlichen potentiellen Unebenheiten des Geländes werden aus der Rechnung ausgeschlossen.

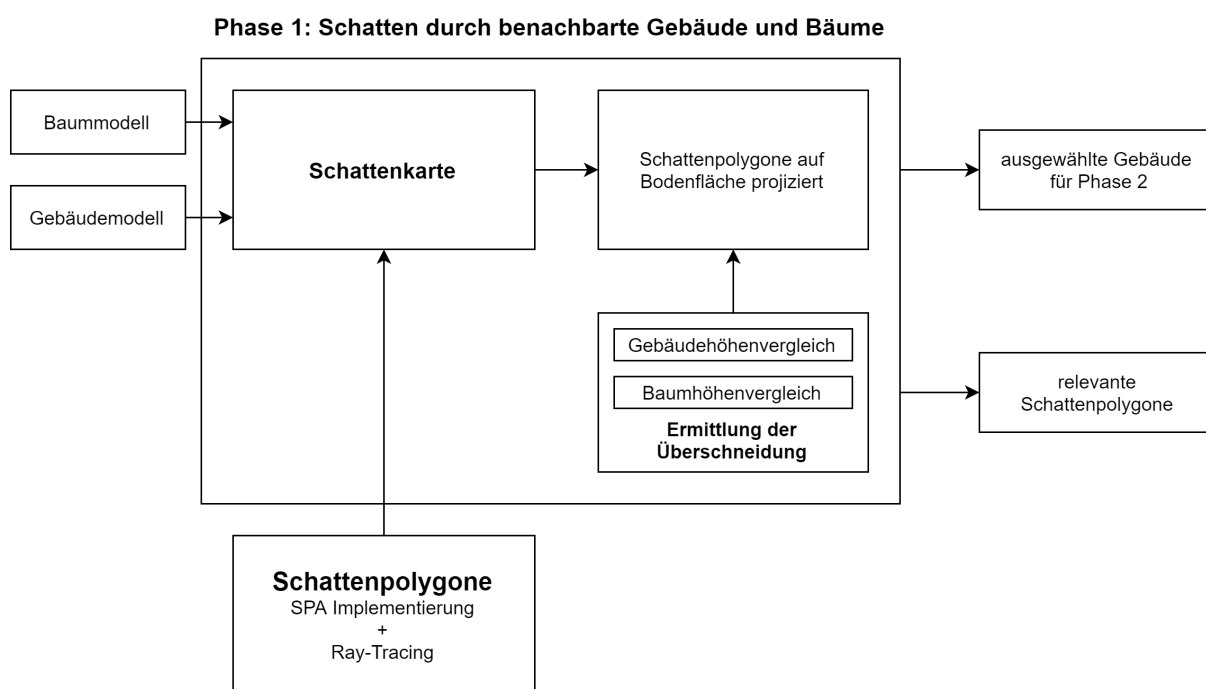


Abbildung 7.4: Übersicht der Komponenten und Programmablauf von Phase 1 der Schattenanalyse.

Nachdem die Schattenkarte erstellt ist, werden diese Schattenpolygone mit den Gebäudegrundrissen verschritten. Das Ziel ist zu verdeutlichen, welche Gebäude oder Bäume ein weiteres Gebäude potentiell verschatten. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass allein die Überschneidung von einem Schattenpolygon und eines Gebäudegrundrisses in diesem Stadium noch keine Schlussfolgerung erlaubt, dass tatsächlich ein Schatten auf der Dachfläche vorliegt. Es liefert lediglich eine erste Filterung, um Rechenleistung einzusparen. Der anschließende zweite Schritt vergleicht bei einer Überschneidung die Höhe des schattenwerfenden Objekts (Baum oder Gebäude) mit dem betrachteten Gebäude. Ist das betrachtete Gebäude, dessen Grundriss vom Schattenpolygon geschnitten wird, niedriger, dann fällt der Schatten potentiell auf die Dachfläche. Erst an diesem Punkt werden die

etwas aufwendigeren Rechenschritte der konkreten Schattenpolygonberechnung auf der Dachfläche durchgeführt. Hierfür kann glücklicherweise das Modul „Schattenpolygone“ (vgl. Abbildung 7.4) wiederverwendet werden, nachdem für diesen Fall die Referenzfläche für die Schattenprojektion vom Boden zur Dachfläche wechselt.

Dadurch, dass die Referenzebene für die Projektion auf dem Dach liegt, wird das Schattenpolygon richtig auf die Dachfläche projiziert. Allerdings ist das Problem, wie der Abbildung 7.5 zu entnehmen ist, dass sich unter Umständen ein Schatten bis außerhalb des Dachflächenpolygons erstrecken kann. Ein solches Schattenpolygon besitzt keinen Wert, da sich dieses nicht strikt auf der Dachfläche befindet (die Weiterführung der von der Dachfläche gebildeten Ebene hat in der „realen“ Umgebung keine Bedeutung). Dahingehend muss das Schattenpolygon so modifiziert werden, dass es an den überstehenden Stellen abgeschnitten wird. Hierbei kommen wiederum Algorithmen aus der Computergrafik zum Einsatz. Unterschiedliche Ansätze zur Problembehandlung sind möglich: ein Ansatz wäre, von konvexen Polygonen auszugehen und den „Polygon Clipping“ Algorithmus von Sutherland und Hudgekin [195] anzuwenden. Dieser ist simpel und effizient, kann allerdings, wie bereits erwähnt, nur mit konvexen Polygonen umgehen.

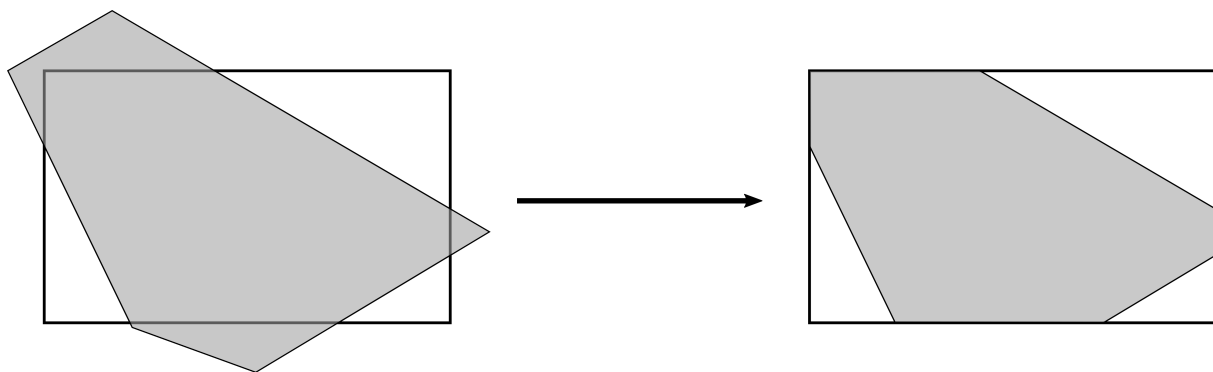


Abbildung 7.5: Visualisierung der Anpassung von Schattenpolygonen auf den Dachflächen, wenn diese über das Dachflächenpolygon hinausragen.

Bei den Dachflächen und den Gebäude-Polygonen kann man zwar noch davon ausgehen, dass alle Polygone konvex sind, aber bei den projizierten Schatten-Vereinigungen kann diese Annahme nicht aufrecht erhalten werden. Da der Programmteil eine hohe Wiederverwendbarkeit gewährleisten muss, musste ein Algorithmus verwendet werden, welcher mit willkürlichen Polygonen arbeiten kann. Eine Adaption vom Bentley-Ottman Algorithmus [196] kann in diesem Kontext verwendet werden. Dieser wurde auf Basis des Standardwerks „Computational Geometry in C“ [197] an die Datentypen der Boost und CGAL Bibliothek angepasst. Der Algorithmus ist vielseitig einsetzbar und kann auch mit wenigen Veränderungen an andere boolesche Operationen angepasst werden (Vereinigung, Durchschnitt, etc.), welche in Abbildung 7.6 beispielhaft an Polygonen dargestellt sind. Ein weiterer Ansatz findet sich in der Forschungsarbeit von Quaschnig, welcher den Prozess der Schattenermittlung ebenfalls auf Basis von Polygonen beschreibt. Hier kommt

allerdings der Polygon Clipping Algorithmus von Sutherland und Hodgkin zum Einsatz [20].

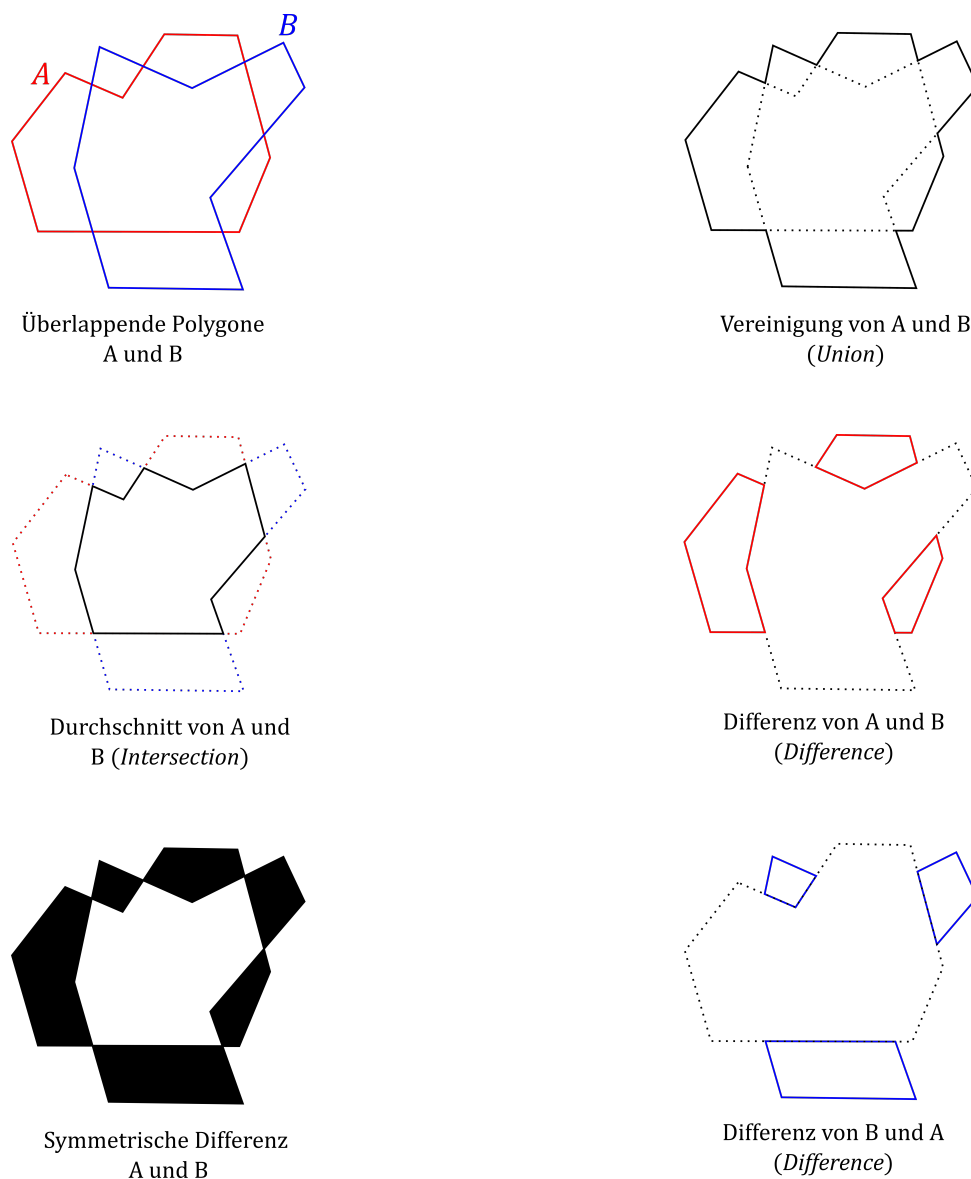


Abbildung 7.6: Visuelle Darstellung der Polygon-Operationen Vereinigung, Durchschnitt und (symmetrische) Differenz.

Das Endergebnis der Phase 1 ist, dass für jede verschattete Dachfläche, am Ende ein Schattenpolygon übrig bleibt. Durch die Tatsache, dass der Prozess für jeden Tag im 10-Minuten Takt von 10:00 Uhr bis 14:00 Uhr abläuft, werden 8.760 Polygone für jede Schattenprojektion erstellt. Diese sind teilweise kaum voneinander zu unterscheiden, weil ein bestimmter Teil des Schattens permanent vorhanden ist und weitere Teile beispielsweise nur bei besonders niedrigem Höhenwinkel der Sonne aufkommen. Um diese unnötigen Daten zu beseitigen und die Datenmenge zu reduzieren, wird die Schnittmenge

aller Schattenprojektionen ermittelt. Allerdings wird bei der Berechnung der Schnittmenge ebenso die relative Häufigkeit, mit der einige Teilflächen erscheinen, mit in die Berechnung aufgenommen. So werden die selten auftretenden Teilflächen ausgeschlossen und die Teilflächen, welche präsenter sind, mit eingeschlossen. Die Abbildung 7.7 zeigt exemplarisch für den 21.12. die Generierung der Schattenpolygone für ein Gebäude zu jeder vollen Stunde zwischen 9:00 Uhr und 17:00 Uhr. Generell wurde der Schwellenwert so gewählt, dass Teilflächen, die mindestens in 33 % der Fälle als Schattenprojektion auftreten (vgl. Abbildung 7.7, (c)), auch in die letztendliche Schnittmenge eingeschlossen werden, da hier davon ausgegangen werden kann, dass der Schatten oft genug auftaucht (in mehr als einem Drittel der Zeitpunkte und Fälle), um signifikante Einbußen bei der PV-Leistung zu verursachen.

In Phase 2 werden anschließend die Dachflächen weitergeleitet, die eine Mindestgröße von 7m^2 haben. Dieser Wert orientiert sich an den Empfehlungen und Werten aus den in Kapitel 2 aufgegriffenen Meta-Analysen und Forschungsarbeiten [17, 20, 25, 38, 47, 48, 82].

7.1.2 Phase 2: Schatten durch Objekte auf dem Dach

In der zweiten Phase der Schattenberechnung werden die Dachflächen, welche aus der Phase 1 übrig geblieben sind, weiterverarbeitet. Der Grenzwert für die Übernahme in die zweite Phase wurde im vorherigen Schritt gesetzt und beläuft sich auf eine Mindestgröße von 7 m^2 schattenfreie Dachfläche. In diesem Kontext wird zunächst nicht die Verteilung der verschatteten/unverschatteten 7 m^2 detailliert betrachtet. Dies ist insofern relevant, dass beispielsweise in der Theorie eine Dachfläche als ausreichend erkannt wird, allerdings in der Praxis die freien Flächen zu unregelmäßig verteilt sind und somit keinen zusammenhängenden Platz für PV-Module ermöglichen (vgl. Abbildung 7.8).

Das Ziel von Phase 2 ist es zu ermitteln wo Verschattungseffekte, bedingt durch die auf dem Dach befindlichen Strukturen, aufkommen. Im Prinzip unterscheidet sich die allgemeine Ermittlung der Verschattung in dieser Phase nicht von Phase 1, da dasselbe Modul für die dreidimensionale Berechnung der Schattenpolygone verwendet wird. Es muss allerdings keine grobe Schattenkarte erstellt werden. Das entsprechende Gebäude wird direkt betrachtet. Dabei werden die identifizierten Dachstrukturen durchgegangen und das entsprechende Schattenpolygon errechnet. Die Schatten werden dahingehend direkt auf die Dachfläche projiziert (nicht wie bei Beginn von Phase 1 auf die Bodenfläche).

Im Anschluss kommen an dieser Stelle ebenfalls wieder die Algorithmen zum Schneiden der überstehenden Polygonstücke zum Einsatz, wenn schlussendlich das finale Schattenpolygon abgespeichert werden soll. Dies ist notwendig da, wie in Phase 1, hier ebenso mehrere Tausend Schattenpolygone für eine Projektion erstellt werden. Eine visuelle Darstellung des Prozesses findet sich in Abbildung 7.9. Sie ähnelt der Abbildung 7.4, da es eine Teilmenge der dortigen Prozessschritte darstellt, bezogen auf die Dachflächenstruktur und die dortigen Objekte.

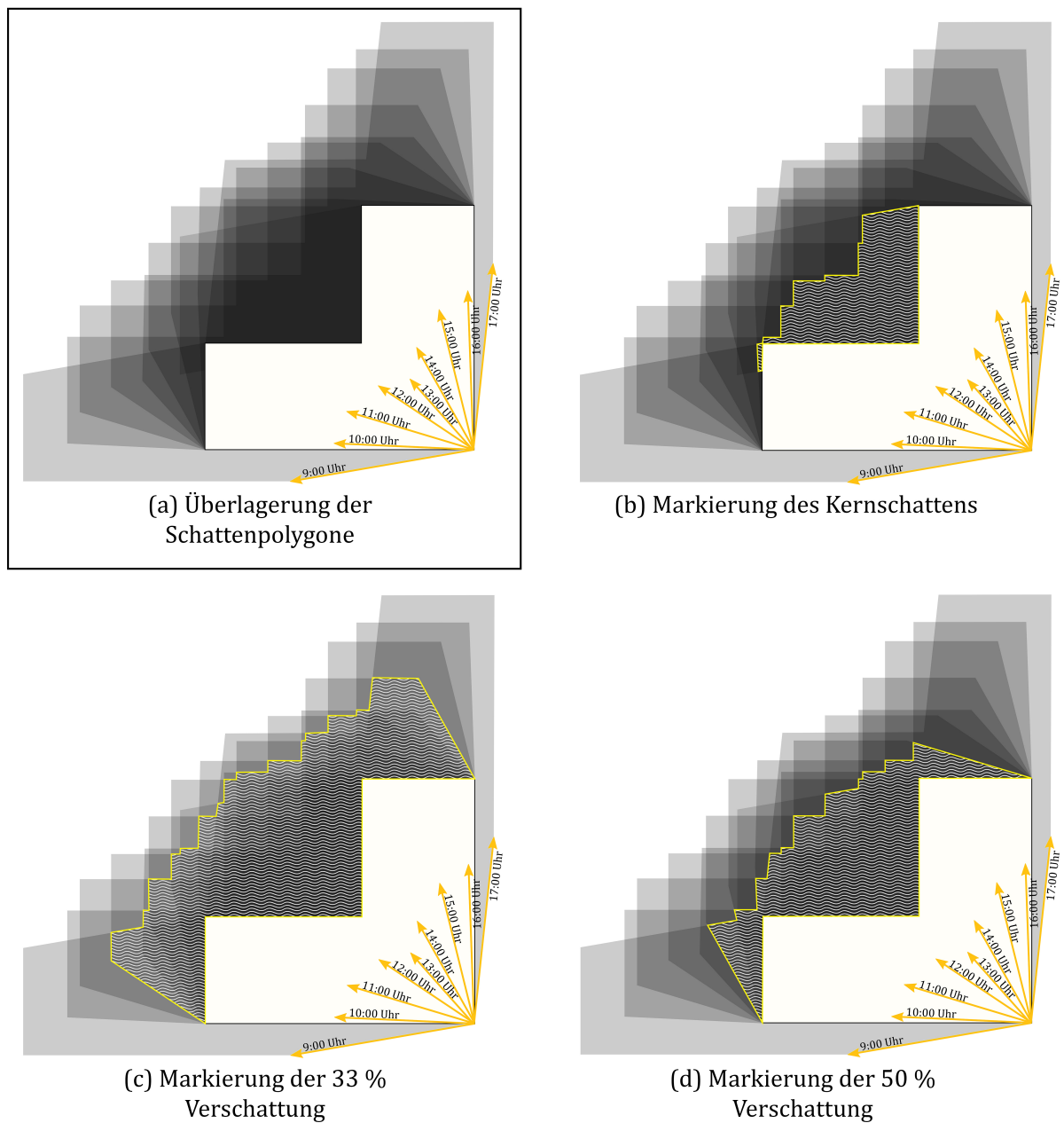


Abbildung 7.7: Ansicht der Reduktion der Schattenpolygone, die exemplarisch über den Verlauf des 21.12. generiert werden.

7.1.3 Überschneidung und Vereinigung der Schattenpolygone

Beide Phasen der Schattenanalyse produzieren ggf. mehr als ein Schattenpolygon. Dies kommt daher, dass unter Umständen mehrere Gebäude oder Bäume Schatten auf ein anderes Gebäude werfen können oder, dass mehrere Objekte auf den Dächern vorliegen können, die dort Schatten verursachen. An dieser Stelle ist es sinnvoll die Schattenpolygone,

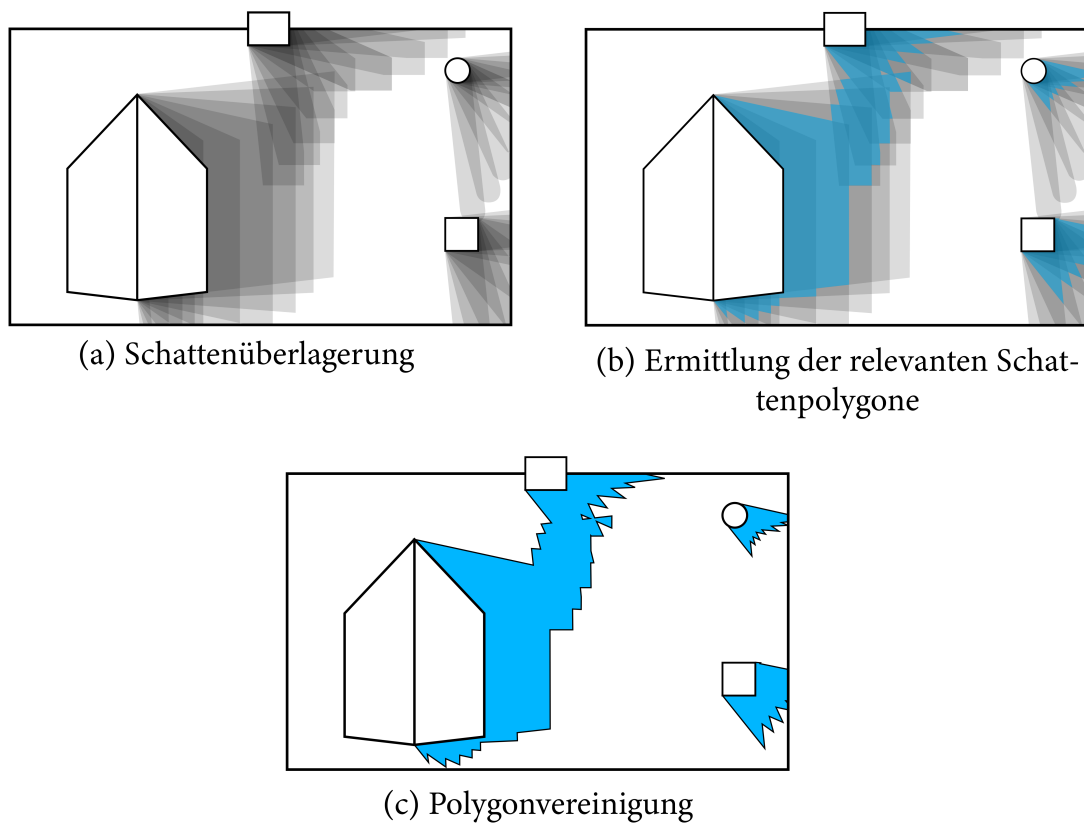


Abbildung 7.8: Ansicht einer zufällig ausgewählten Dachfläche und der Verteilung der schattenfreien Dachflächen, welche auf dieser zu finden sind.

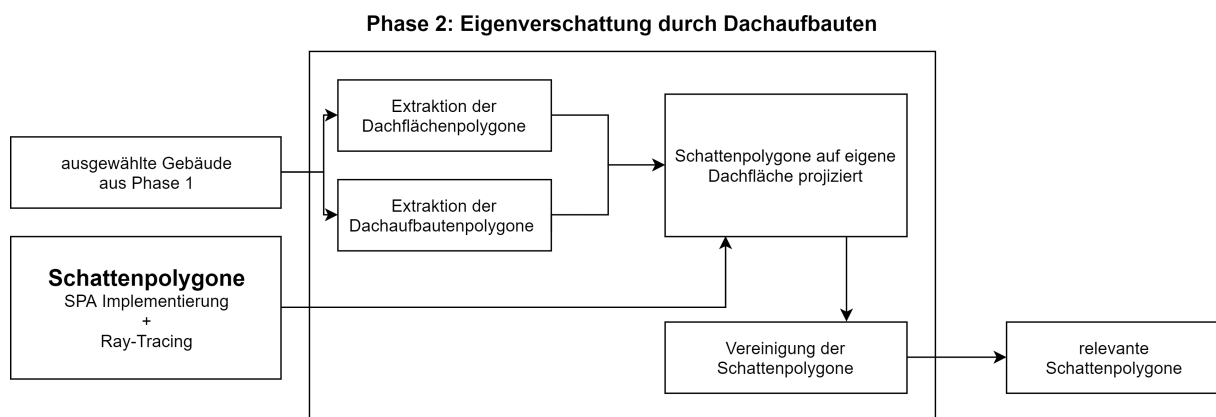


Abbildung 7.9: Übersicht der Komponenten und Programmablauf von Phase 2 der Schattenanalyse.

die zur selben Phase gehören und sich eigentlich schneiden/ überschneiden zusammenzufassen. Eine Veranschaulichung ist der Abbildung 7.10 zu entnehmen.

Ein möglicher Ansatz für das Zusammenfassen der Polygone stellt der „naive“ Weg dar. Bei diesem werden die Knoten einfach in einer Menge vereinigt. Im Anschluss wird aus

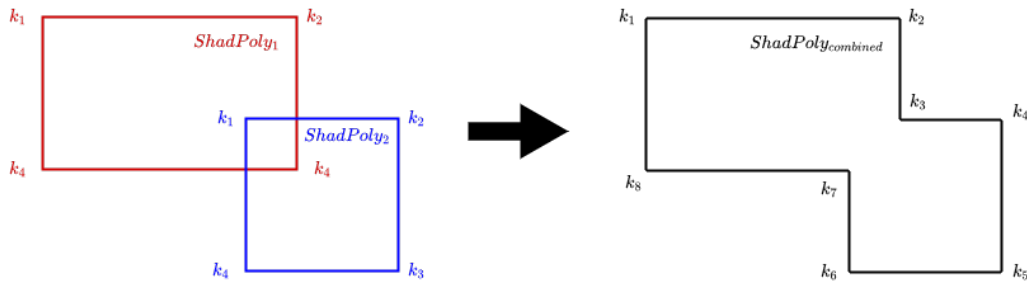


Abbildung 7.10: Kombination von Polygonen bei vorhandener Überschneidung.

dieser Menge über einen Algorithmus zur Identifikation der konvexen Hülle dieser Menge das Polygon generiert, welches die Vereinigung darstellt. Es sind mehrere Algorithmen in der wissenschaftlichen Literatur bekannt, welche die konvexe Hülle einer Menge bestimmen können. Als bekannteste Beispiele können die folgenden Algorithmen aufgeführt werden:

- Gift-Wrapping-Algorithmus – welcher auch als Jarvis-March bekannt ist. Er hat eine Laufzeit-Komplexität von $\mathcal{O}(nh)$, wobei n die Anzahl der Punkte darstellt und h die letztendliche Anzahl Punkte der konvexen Hülle repräsentiert. Die worst-case Laufzeit-Komplexität kann allerdings auf $\mathcal{O}(n^2)$ steigen [198, 199].
- Graham-Scan – dieser Algorithmus ist eine effizientere Variante als der Gift-Wrapping-Algorithmus und hat eine Laufzeit-Komplexität von $\mathcal{O}(n \log n)$, wobei n für die Anzahl der Input-Punkte steht [198, 200].
- Quickhull Algorithmus – dieser hat eine Laufzeit-Komplexität von $\mathcal{O}(n \log n)$, kann allerdings im worst-case Szenario bis auf $\mathcal{O}(n^2)$ wachsen [201].
- Divide-and-Conquer Algorithmus – dieser hat eine Laufzeit-Komplexität von $\mathcal{O}(n \log n)$, wobei n die Anzahl der Punkte darstellt, für welche die konvexe Hülle bestimmt werden soll. Der Algorithmus kann ebenfalls im dreidimensionalen Raum verwendet werden [198, 202].
- Kirkpatrick-Seidel-Algorithmus – dieser hat ebenfalls eine Laufzeit-Komplexität von $\mathcal{O}(n \log n)$, wobei n die Anzahl der Punkte darstellt, für welche die konvexe Hülle bestimmt werden soll [203]. Trotz der guten Laufzeit-Komplexität ist er für moderate Datengrößen eher ungeeignet [204].
- Chans Algorithmus – ist ein ausgabesensitiver Algorithmus²² welcher ebenfalls eine Laufzeit-Komplexität von $\mathcal{O}(n \log n)$ aufweist. Dabei stellt n die Anzahl der Punkte dar, für welche die konvexe Hülle bestimmt werden soll [205]. Unabhängig von Chan hat Frank Nielsen zeitgleich dieselbe Methode innerhalb seiner Dissertation entwickelt [206]. Dabei ist anzumerken, dass für den ausgabesensitiven Fall

²²Die Bezeichnung *ausgabesensitiv* bedeutet, dass die Laufzeit-Komplexität sowohl von der Größe des Inputs als auch von der Größe des Outputs abhängt.

bei Chans Algorithmus eine untere Laufzeitschranke von $\Omega(n \log h)$, wobei h die Anzahl Punkte im Output darstellt, bewiesen werden kann.

Eine naive Vereinigung der Knotenpunkte von den entsprechenden Schattenpolygonen ist allerdings nicht zielführend und potentiell eine problembehaftete Operation. Eine visuelle Ansicht davon wie eine naive Vereinigung zu fehlerhaften Schattenpolygon-Vereinigungen führen kann, findet sich in Abbildung 7.11. Hierbei stellt die rote Umrandung der Polygonverschneidung das Ergebnis des naiven Ansatzes dar. Die grünen Markierungen zeigen hingegen, wie die Vereinigung im korrekten Fall das Polygon umranden müsste.

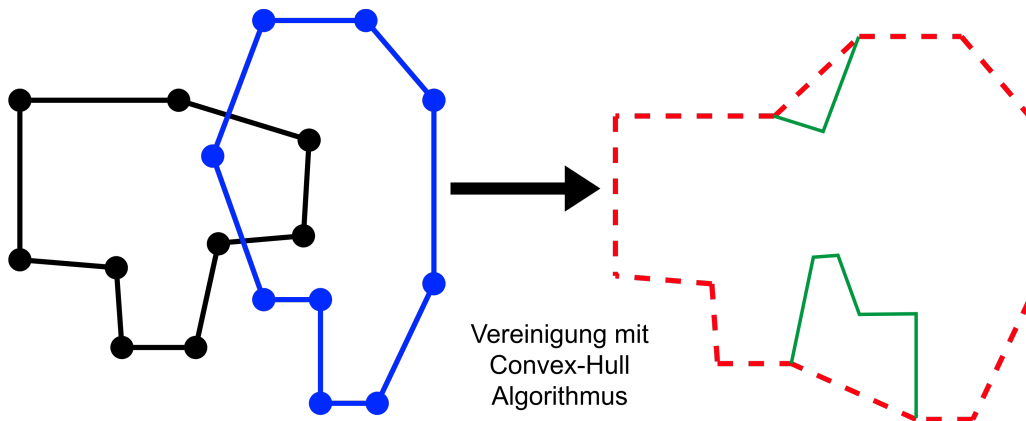


Abbildung 7.11: Fehlerhaftes Resultat von naiver Polygonvereinigung.

Stattdessen wäre der korrekte Ansatz die boolesche Operation auf generelle Polygone anzuwenden, im Speziellen die *union* (Vereinigung) Operation [197]. Der Ansatz wird in dem Papier von Rivero und Feito beschrieben [207] und enthält Pseudocode für alle booleschen Operationen (beispielsweise Vereinigung, Durchschnitt, Differenz – vgl. Abbildung 7.6), welcher dann in C++ adaptiert wurde. Alle Operationen sind binär, d.h. dass stets zwei Operanden notwendig sind und bis auf die *not* Operation sind diese auch kommutativ. Die CGAL Bibliothek bietet bereits eine Implementierung an, allerdings bezieht sich diese nur auf zweidimensionale, regelmäßige Polygone [208]. Die Projektion der dreidimensionalen Polygone aus dem Modell in den zweidimensionalen Raum stellt grundsätzlich kein Problem dar, dahingehend bleibt allerdings die Tatsache erhalten, dass keine Garantie bzgl. der Regelmäßigkeit der Polygone vorliegt.

7.2 Analyse des Solarpotentials

Die Analyse des Einstrahlungspotentials fand auf Basis der schattenfreien Flächen, die bei der Schattenanalyse ermittelt wurden, statt. Von Relevanz ist, dass am Ende nur Dachflächen in die Solarpotential Analyse aufgenommen wurden, die mindestens eine schattenfreie Fläche von 7 m² vorweisen konnten. Alle Dachflächen mit weniger schattenfreier

Fläche liefern im Schnitt zu wenig freie Fläche um Dachflächen-PV Anlagen wirtschaftlich zu betreiben [17, 47, 209].

Um realistische Werte für die potentiell auftreffende Solarenergie zu ermitteln, wurden die schattenfreien Dachflächen in der Simulation mit der maximalen Anzahl von Solarmodulen belegt. Der Grund für diesen Schritt ist, dass die schattenfreien Flächen eine willkürliche, teilweise nicht regelmäßige Form besitzen. Am Ende kommen bei einer PV-Anlage immer rechteckige Solarmodule zum Einsatz, die eine festgelegte Größe haben. Dementsprechend kann nicht die gesamte schattenfreie Fläche genutzt werden. Zur visuellen Verdeutlichung soll Abbildung 7.12 hinzugezogen werden.

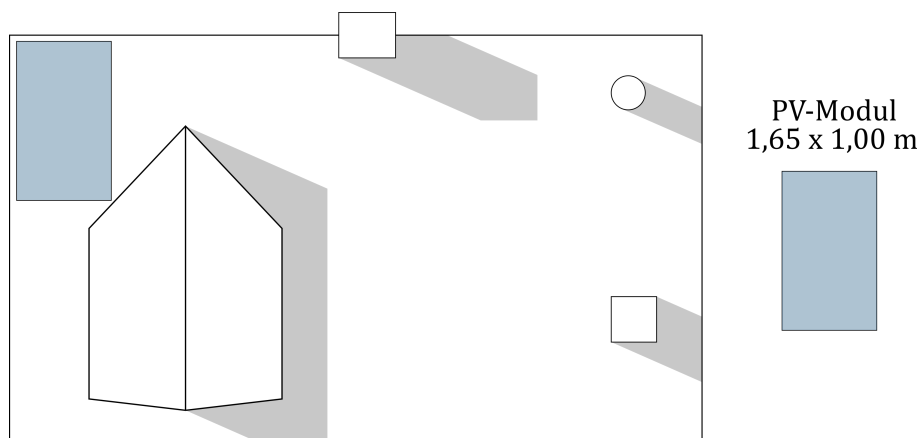


Abbildung 7.12: Schematische Darstellung einer Dachfläche inklusive Markierung der verschatteten Dachfläche und Dachgauben sowie Dachaufbauten.

Da die solaren Einstrahlungsdaten, die vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt wurden, sich auf Referenzflächen beziehen, welche horizontal vom Erdboden aus aufliegen, muss zunächst die Einstrahlungsenergie für den entsprechenden Standort umgerechnet werden. Ebenso muss der Neigungswinkel der Dachfläche mit einbezogen werden (vgl. hierzu [20]). Die Berechnungsgrundlagen orientieren sich dabei an den im Kapitel 4 dargelegten theoretischen Hintergründen, werden allerdings zudem im Abschnitt 7.2.2 wiederholt und für die Anwendung spezifiziert bzw. detaillierter erläutert.

7.2.1 Modulbelegung der verfügbaren Flächen

Die potentiellen, schattenfreien Dachflächenpolygone weisen nach der Schattenanalyse keine regelmäßigen Formen auf und erhebliche Deformationen sind erkennbar. Der Abbildung 7.12 kann dieser Zustand entnommen werden. In Anbetracht der Bestückung von Dachflächen mit Solarmodulen wird deutlich, dass nicht die gesamte Fläche der ungünstig geformten, schattenfreien Flächen zwangsläufig für die Energiegewinnung geeignet ist. Der Betrachtungshorizont liegt daher zunächst auf der Analyse, wo und wie viele Module angebracht werden können und wie viel Fläche diese einnehmen. Dafür mussten zunächst

gängige Maße festgelegt werden, die bei den Solarmodulen anfallen. Wenn die bereits in Kapitel 2 erwähnten Potentialstudien betrachtet werden, wird deutlich, dass Maße von $1.650 \times 1.000 \text{ mm}$ ($1,65 \text{ m}^2$) pro Solarmodul üblich sind [17, 47, 48]. Demnach wurden diese Maße an dieser Stelle übernommen. Diese wurden ebenfalls im Rahmen der Potentialstudie des LANUV verwendet [17]. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden nur die Flächen in die Ergebnisse der Modulbelegung eingeschlossen, welche Platz für mindestens ein $1,65 \text{ m}^2$ PV-Modul vorweisen.

Nachdem die Maße für die einzelnen Solarmodule festgelegt wurden, liegt der Fokus auf der simulierten Belegung der Fläche mit Solarmodulen, sodass schlussendlich die Fläche feststeht, welche effektiv für die Energieermittlung verwendet werden kann. Die Frage nach der Belegung ist ein klassisches kombinatorisches Optimierungsproblem, nämlich eine Abwandlung des zweidimensionalen „Behälterproblems“ (im engl. *bin packing problem* genannt), welches sich darauf reduzieren lässt die maximale Anzahl Solarmodule zu ermitteln, die gänzlich in das schattenfreie Polygon passen. Das speziell im Rahmen dieser Forschungsarbeit vorliegende Problem wird der Kategorie der geometrischen Behältnisprobleme zugeordnet. Es existiert ebenso eine Kategorie der rein numerischen Probleme, bei denen der Schwerpunkt der Optimierung auf den reinen Zahlenwerten basiert. Im Unterschied zu dieser umfasst die geometrische Kategorie ebenfalls Flächen und Formen zur Optimierung. Allen Optimierungsproblemen, die in die Kategorie der Behältnisprobleme gehören liegt allerdings zu Grunde, dass diese sich auf das folgende abstrakte Entscheidungsproblem zurückführen lassen [210]:

- Gegeben ist eine Anzahl $k \in \mathbf{N}$ von Behältern der Größe b und eine Anzahl n „Objekte“ mit den Gewichten/ Größen $a_1, a_2, \dots, a_n \leq b$
- Können die n „Objekte“ so auf die k „Behälter“ verteilt werden, so dass keiner der Behälter überläuft?

Das Entscheidungsproblem befasst sich mit der Frage nach der theoretischen Möglichkeit eine Lösung zu finden. Das dazugehörige Optimierungsproblem würde nach der optimalen Lösung suchen. Dabei können unterschiedliche Wege eingeschlagen werden (Minimierung oder Maximierung). Die Definition der Behälter und Objekte sowie der Größen und Gewichte variiert je nach spezieller Adaption des Problems auf eine bestimmte Situation in der realen Welt. Beispielsweise wurde für die vorliegende Forschungsarbeit folgende Definition, in Anlehnung an die Spezifikation des Behältnisproblems [210], formuliert:

- Gegeben ist: Ein unregelmäßiges 2D Polygon p mit k Knoten und eine unendliche Anzahl von Rechtecken, mit der festgelegten Größe $1,65 \times 1$ (Einheiten werden an dieser Stelle der Einfachheit halber weggelassen, weil diese nichts an der Berechnung ändern)
- Gesucht ist: Die maximale Anzahl Rechtecke, die ohne Überlappung mit den Grenzen des Polygons und ohne intern miteinander zu überlappen (disjunkt) in das Polygon p passen. Oder anders: Die Anzahl Rechtecke, welche in das Polygon p oh-

ne Überlappung gelegt werden können und die Fläche maximieren (vgl. Abbildung 7.13).

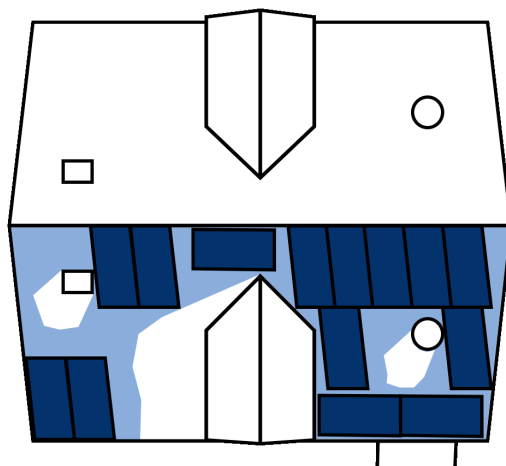


Abbildung 7.13: Draufsicht einer Dachfläche mit optimaler Modulbelegung.

Dabei spielt zusätzlich die Orientierung der Rechtecke eine Rolle. Zwei unterschiedliche Fälle können in diesem Kontext differenziert betrachtet werden. Der erste Fall ist, wenn die Module/Rechtecke nicht rotiert werden können und beispielsweise lediglich im Hochformat liegen dürfen. Der zweite Fall beschreibt die reale Situation, dass die Module sowohl horizontal als auch vertikal installiert werden können. Das Problem bei der Modellierung des zweiten Falls ist, dass das rechnerische Optimierungsproblem um ein Vielfaches erschwert wird (vgl. das analoge rechteckige *packing problem* aus [211, 212]). Bei individueller Betrachtung der einzelnen Fälle und der einhergehenden Konsultierung eines Fachunternehmens, wird die Frage einfach beantwortet werden können, da im Allgemeinen bei individuellen Problemen durch das Ausprobieren (*trial and error*) Lösungen ermöglicht werden. Wenn allerdings automatisierte Softwarelösungen aufgrund der großen Datenmenge notwendig sind, dann werden Spezifikationen in Form von Gleichungen benötigt, mit welchen das Optimierungsproblem beschrieben und ggf. gelöst werden kann. Unter Umständen kommen notwendige Nebenbedingungen oder Einschränkungen hinzu. Diese Sorte kombinatorischer Optimierungsprobleme sind oft komplexitätstechnisch schwer zu lösen oder finden ggf. nicht die korrekte Lösung [210]. Da es sich in dem vorliegenden Fall der Forschungsarbeit um eine Abwandlung des NP-schweren *bin packing* Problems (Behälterproblem) handelt, gibt es in jedem Fall keine Möglichkeit, das Problem deterministisch in polynomialer Rechenzeit zu lösen [210–217].

Bedingt durch die Tatsache, dass im Fall der vorliegenden Arbeit keine extrem großen Polygone vorliegen (damit ist die Anzahl Knoten gemeint und nicht die Flächengröße) und die Belegung mit immer gleich großen Rechtecken – den Solarmodulen – erfolgt,

sind genügend Bedingungen gegeben, um eine Heuristik anzuwenden und mit dieser eine bestmögliche Lösungen zu approximieren. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

1. Die Polygone werden in zweidimensionale Koordinaten überführt.
2. Es wird eine „Bounding-Box“ um das Polygon gelegt (vgl. Abbildung 7.14). Dabei entspricht die obere linke Ecke den Koordinaten (0,0).
3. Es wird ein Raster der Größe der Solarmodule ($1.650 \times 1.000 \text{ mm}$ ($1,65 \text{ m}^2$)) entsprechend über die „Bounding-Box“ gelegt.
4. Es wird die Anzahl Rasterzellen gezählt, welche komplett innerhalb des Polygons liegen. Dies stellt die Anzahl Solarmodule dar, welche auf dem Dach platziert werden können.

Der gesamte Prozess ist in Abbildung 7.14 veranschaulicht. Es werden neue Polygone, welche den Umriss der Rasterzellen darstellen, erstellt und als Referenz für die im folgenden Schritt stattfindende Berechnung der Einstrahlungsenergie genutzt.

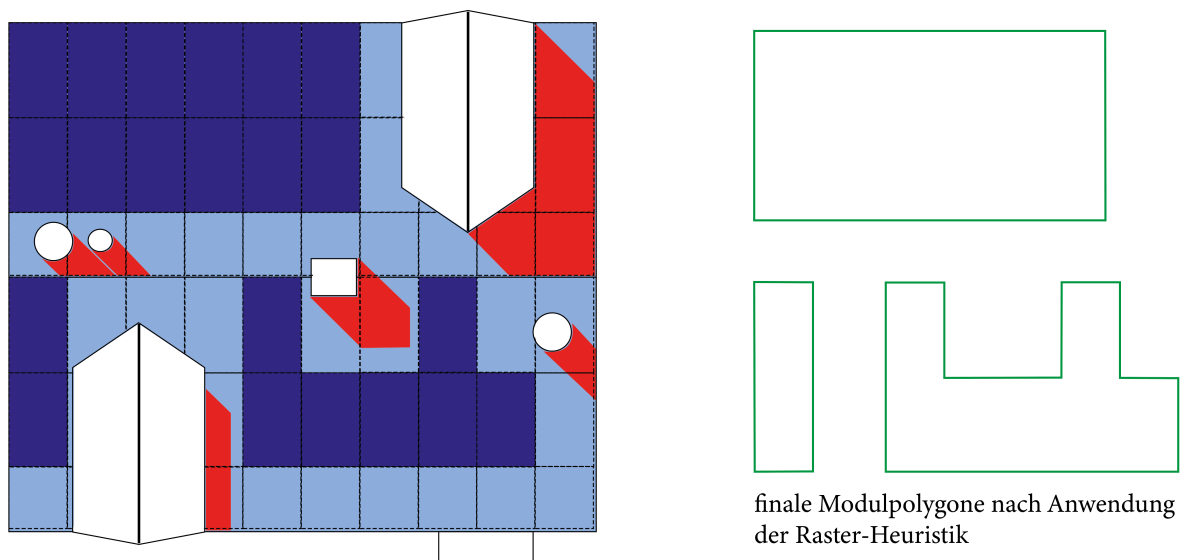


Abbildung 7.14: Draufsicht einer Dachfläche mit visueller Darstellung der Raster-Heuristik.

7.2.2 Berechnung der Einstrahlungsenergie

Für die Berechnung der realistisch nutzbaren Einstrahlungsenergie wird die im vorherigen Schritt ermittelte potentielle Modulbelegung verwendet. Um aufzuzeigen welche Diskrepanzen im Kontrast dazu aufkommen, wenn die potentielle solare Einstrahlung vereinfacht über die gesamte Dachfläche berechnet wird, wird ebenfalls die Einstrahlungsenergie über

dem gesamten Dachflächenpolygon berechnet. Um redundante Rechenschritte auszuschließen wird zunächst die Einstrahlungsenergie auf das gesamte Dach berechnet und erst im Anschluss die potentielle Modulbelegung als Teilmenge der auftreffenden Strahlung aufgezeigt.

In Kapitel 5 wurde bereits erörtert, welche Daten bzgl. der Einstrahlungsenergie zur Verfügung stehen. Für das gesamtdeutsche Gebiet werden die Daten vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt. Diese Daten stammen von den einzelnen Messstationen, welche auf der Gesamtfläche Deutschlands verteilt sind. Für diese Arbeit wurden jedoch nur die entsprechenden Messstationen ausgewählt, welche sich in NRW oder in den Grenzgebieten befinden. Eine Abbildung von der geografischen Verteilung der Messstationen in und um NRW kann der Abbildung 7.15 entnommen werden. Um ein möglichst akkurates Ergebnis zu ermöglichen, werden nicht über alle in Deutschland vorhandenen Messstationen die Einstrahlungsenergien gemittelt, sondern der Versuch unternommen die geografische Lage der Messstationen mit einzubeziehen, wenn für eine bestimmte Dachfläche die Einstrahlungsenergie ermittelt wird. So wurde in Abhängigkeit zur Lage einer Dachfläche die Messstation gewählt, welche geografisch am nächsten ist. Hierbei erwies sich die Wahl des Datenbanksystems als vorteilhaft, da PostgreSQL mit der Geoinformationssystem-Erweiterung PostGIS intern bereits das räumliche Indexieren der geografischen Daten erlaubt. Damit kann über SQL-Befehle durch das Datenbanksystem bereits die richtige Messstation gewählt werden.

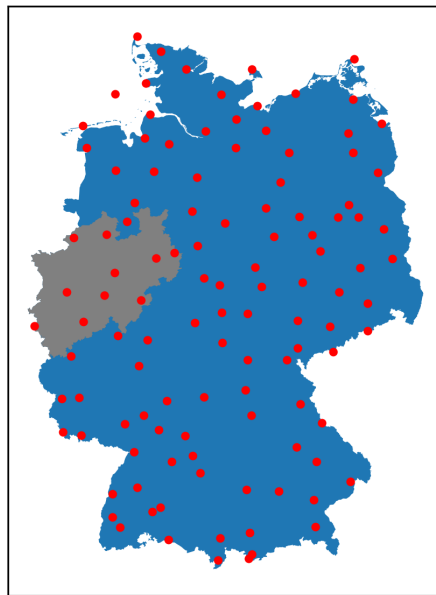


Abbildung 7.15: Verteilung der Messstationen des Deutschen Wetterdienstes in Deutschland (Grenzdaten von OpenNRW [102]).

Die Daten der Messstationen beziehen sich immer auf horizontale Flächen, um den Referenzwert möglichst allgemein zu halten. Das bedeutet allerdings, dass die Messwerte

für die erfolgreiche Anwendung noch umgerechnet werden müssen, wenn sie auf geeigneten Flächen Anwendung finden. Für diese Umrechnung ist es von essentieller Bedeutung ein anisotropes Strahlenmodell zu verwenden, denn die Modellierung der eintreffenden Strahlungsenergie ist entgegen der Erwartung nicht direkt über einfache Konversion zu berechnen [48]. Unterschiedliche Neigungswinkel der Referenzflächen haben einen Einfluss darauf, wie viel potentielle solare Energie zur Verfügung steht. Zudem sind unterschiedliche Verteilungen von diffuser und direkter Sonnenstrahlung von hoher Relevanz, da die gesamte auftretende Strahlungsenergie in direkte und diffuse Strahlung (und in reflektierte Strahlung, welche aber auch teilweise bei der diffusen Strahlung eingerechnet wird) unterteilt wird [17, 218]. Das Modell mit der besten Genauigkeit ist dabei das Perez-Modell [101, 219], welches als Standard in allen kleinen und größeren GIS verwendet wird [7, 13, 14]. Zudem wurde dieses Modell explizit bei der Potentialstudie des LANUV verwendet [17].

Das Modell nach Perez umfasst einige sehr komplexe Berechnungen, um die solare Einstrahlung auf geneigte Flächen zu definieren [101]. Die allgemeine Formel zur Berechnung der einfallenden Energie E_{Diffus} in W/m^2 wird in Gleichung 7.2.1 deutlich.

$$E_{\text{Diffus}} = DHE \times \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos(\theta_T)}{2} \right) + F_1 \left(\frac{a}{b} \right) + F_2 \sin(\theta_T) \right] \quad (7.2.1)$$

wobei

F_1, F_2	eigene, komplexe Funktionen sind, welche auf Basis von empirischen Daten innerhalb von [101] determiniert wurden. Diese beschreiben jeweils die zirkumsolare Helligkeit und Horizonthelligkeit.
a	$= \max(0, \cos(AOI))$
b	$= \max(85^\circ, \cos(\theta_Z))$
DHE	die diffuse Horizontalstrahlung (aus den Daten des DWD)
AOI	der Winkel der solaren Einstrahlung zwischen der Sonne und dem Dach bzw. dem anzubringenden Solarmodul
θ_T	der Winkel des Daches bzw. des Solarmoduls
θ_Z	der Zenitwinkel der Sonne (errechnet durch $1 - \gamma$)

Die Funktionen für F_1 und F_2 sind spezifiziert in den Gleichungen 7.2.2a und 7.2.2b. Dabei sind die f -Koeffizienten so definiert, dass sie spezifischen Klarheitskategorien (als ϵ bezeichnet) des Himmels zugeordnet werden.

$$F_1 = \max \left[0, \left(f_{11} + f_{12} \Delta + \frac{\pi \theta_Z}{180^\circ} f_{13} \right) \right] \quad (7.2.2a)$$

$$F_2 = f_{21} + f_{22} \Delta + \frac{\pi \theta_Z}{180^\circ} f_{23} \quad (7.2.2b)$$

Die Werte für Δ werden über die Gleichung 7.2.3 ermittelt.

$$\Delta = \frac{DHI \times AM_a}{E_a} \quad (7.2.3)$$

wobei

AM_a die absolute Luftmasse darstellt, und
 E_a die extraterrestische Strahlung darstellt

Die Klarheitskategorien des Faktors ϵ werden über die Gleichung 7.2.4 ermittelt.

$$\epsilon = \frac{(DHI + DNI)/DHI + \kappa\theta_Z^3}{1 + \kappa\theta_Z^3} \quad (7.2.4)$$

wobei

DNI die direkte solare Einstrahlung darstellt
 κ ist eine Konstante mit dem Wert 1.041 wenn die Winkel im Bogenmaß sind
und 5.525×10^{-6} wenn die Winkel in Grad angegeben werden

Die relevanten Faktoren f_{11} , f_{12} , f_{13} , f_{21} , f_{22} und f_{23} sind als feste Koeffizienten von Perez über statistische Verfahren für unterschiedliche Datensets ermittelt worden. Perez hat in zwei Papieren die Koeffizienten veröffentlicht [101, 219]. In dieser Arbeit wird von den Werten [101] ausgegangen, welche im Jahr 1990 veröffentlicht wurden. Allerdings schreibt Perez selbst in [101], dass ebenfalls eine Entscheidung zu Gunsten der Werte aus [219] unproblematisch sei. Die entsprechenden Faktoren für Koeffizienten in Abhängigkeit von ϵ und die Ober- und Untergrenzen der Klarheitskategorien finden sich in jeweils in Tabelle 7.1 und 7.2.

Tabelle 7.1: Koeffizienten der solaren Strahlung aus dem Perez-Modell (Tabelle 6 aus [101]).

ϵ	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
1	-0.008	0.588	-0.062	-0.06	0.072	-0.022
2	0.13	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
3	0.33	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
4	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
5	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
6	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
7	1.06	-1.6	-0.359	0.264	-1.127	0.131
8	0.678	-0.327	-0.25	0.156	-1.377	0.251

Nachdem die grundlegenden Annahmen und Methoden zur Berechnung identifiziert und erläutert sind, gilt es noch diesen Prozess auf die Dachflächenpolygone bzw. auf die Teile der Dachflächen, die unverschattet sind, anzuwenden. Mit der mathematischen Definition

Tabelle 7.2: Kategorien der Himmelsklarheit (aus Tabelle 1 in [101]).

ϵ Kategorie	Untergrenze	Obergrenze
1 (bedeckt)	1	1,065
2	1,065	1,230
3	1,230	1,500
4	1,500	1,950
5	1,950	2,800
6	2,800	4,500
7	4,500	6,200
8 (klar)	6,200	—

von Gleichung 7.2.1 kann die solare Einstrahlung in Watt auf den Quadratmeter genau berechnet werden. Dieser Wert muss entsprechend der Fläche, die für die Solarmodule geeignet ist, multipliziert werden, um den realistischen Energieertrag ermitteln zu können. Für den Energieertrag der gesamten Dachfläche wird diese ganzheitlich betrachtet. Beide Werte werden in die entsprechende Stelle des Datensatzes gespeichert. Dies wurde durchgeführt, um einen Vergleich zu den realen, unverschatteten Potentialen aufzuzeigen.

Zusammenfassung

Dieses Kapitel kann als eine Erweiterung von Kapitel 6 eingeordnet werden. Es wurden die Grundlagen der Prozesse, welche die Schattenanalyse umfassen, sowie die geometrischen Algorithmen erläutert. Zudem wurde die rechnerische Komplexität (engl. *computational complexity*) der automatisierten, optimalen Modulbelegung der Dachflächen und die letztendlich eingesetzte Approximationsfunktion diskutiert. Im zweiten Teil wurde die konkrete Berechnung der solaren Einstrahlung mit Hilfe des anisotropischen Strahlungsmodells nach Perez [219] beschrieben sowie die Zusammenhänge seiner Modellierung aufgezeigt.

8 Ergebnisse

Die in Kapitel 6 und 7 beschriebenen Prozesse und Algorithmen verursachten eine enorme Datenerzeugung. Bereits zu Beginn waren über sechs Terabyte Rohdaten vorhanden, die während der unterschiedlichen Phasen der Datenvorbereitung, Datenaufbereitung und Datennachbereitung stark angestiegen sind. Die Daten, welche durch die Bearbeitung entstanden sind, wurden vorwiegend den entsprechenden Gebäude-IDs in der Datenbank zugeordnet. Die am Ende entscheidenden Informationen für die Auswertung finden sich in Tabelle 8.1. Diese enthält ebenfalls alle möglichen Faktoren, die als relevant identifiziert wurden und eine Datengrundlage vorweisen. Es werden zudem die Faktoren eingeblendet, welche zwar relevant sind, jedoch lediglich abgeschätzt oder nicht eingearbeitet werden konnten.

Die Auswertung erfolgt auf Basis der Kreisregionen NRWs. Der Grund hierfür ist die Übersichtlichkeit, wobei gleichzeitig noch detailliert genug aufgelöst wird um sinnvolle Schlussfolgerungen zuzulassen. Die Auswertung auf Kreisebene erlaubt eine simplere Übersicht, welche Regionen jeweils welchen Output liefern. Die nächsthöhere Ebene, die Bezirksregierungen, decken eine weitaus größere Fläche ab. Daraus resultierend ist weniger ersichtlich, welche Faktoren eine wichtige Rolle spielen. Hingegen würde die Auswertung auf Basis der Gemeinden zu kleine Strukturen aufbringen (vgl. Abbildung 8.1). Es werden sowohl die Ergebnisse basierend auf der absoluten Fläche dargestellt, als auch in Relation zu Größen wie die Gebietsfläche und Anzahl der Gebäude. Dies wird durchgeführt um die Tatsache zu reflektieren, dass einige Kreise wesentlich größer sind als andere oder mehr Gebäude aufweisen (inklusive-oder). Ohne diese Dimension könnte unter Umständen eine verzerrte Darstellung entstehen, da die Größe der Kreise logischerweise Einfluss auf die verfügbaren Gebäude hat. Die zusätzlich normalisierte Ansicht muss somit ebenfalls angeführt werden, um eine möglichst vollständige Aufarbeitung zu gewährleisten.

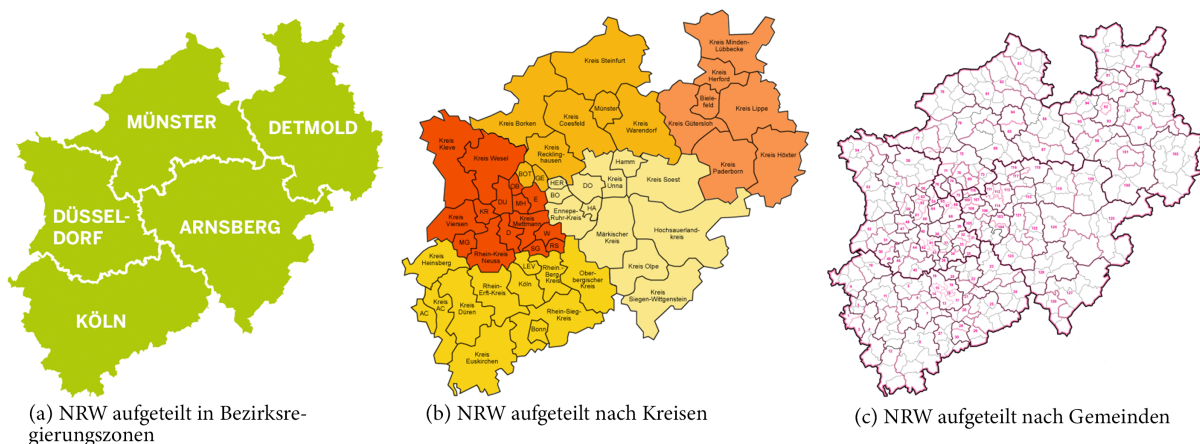


Abbildung 8.1: Aufteilung NRWs in Bezirksregierungszone(n), nach Kreise und Gemeinden (Grenzdaten von OpenNRW [102]).

Tabelle 8.1: Übersicht aller signifikanten Faktoren und ihrer Datengrundlage sowie Bezug in der Forschungsarbeit.

Faktor	Datengrundlage	Inklusion in Forschungsarbeit	Auswertung
Oberflächenmodell/ Geländemodell	3D-Messdaten	ja	für Gebäuderekonstruktion
Bäume (Höhe, Position, Durchmesser)	3D-Messdaten	ja	für Schattenanalyse
polygonales Gebäudemodell	CityGML Modell + Gebäuderekonstruktion	ja	für Schattenpolygone
Hausumringe	Katasterdaten	ja	für Gebäuderekonstruktion
Gebäudedichte	CityGML	ja	für statistische Auswertung
Alter des Gebäudes	nicht vorhanden	nein	
Verschattung	polygonales Gebäudemodell + Algorithmus	ja	für verwendbare Dachflächen
Sonnenposition	algorithmische Ermittlung	ja	für Schattenanalyse
Denkmal Status der Gebäude	unvollständig: denkmal.nrw und CityGML	ja	für verwendbare Dachflächen
Dachlastreserven	nicht vorhanden	nein	
Meteorologische Faktoren			
solare Einstrahlung	Rasterdaten des DWD	ja	für Einstrahlungsanalyse
Temperaturverteilung	Rasterdaten des DWD	nein	
Wetterdaten (Regen, Bewölkung, etc.)	Rasterdaten des DWD	nein	
Schneefall	Rasterdaten des DWD	nein	
Wind	Rasterdaten des DWD	nein	
Sozio-ökonomische Faktoren und Demographie			
Alter der Besitzer	unvollständig	nein	
Verteilung der Geschlechter	großflächige statistische Daten	nein	
Besitzverhältnisse bzgl. der untersuchten Gebäude	nicht vorhanden	nein	
Einkommen der Besitzer	großflächige statistische Daten	nein	
Anzahl Hausbewohner	unvollständig	nein	

Die Auswertung orientiert sich an der Aufteilung von Kapitel 7, erfolgt also einmal für die Schattenanalyse und einmal für die Einstrahlungssimulation. Am Ende werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

8.1 Ergebnisse der Schattenanalyse

Die Auswertung der Schattenanalyse zeigt, dass von den rund 1.250 km^2 , die theoretisch als Dachflächen in ganz NRW zur Verfügung stehen, nach alleiniger Subtraktion der Verschattungseffekte weniger als 60 % der Flächen effektiv für die Nutzung geeignet sind. Der numerische Wert beläuft sich auf etwa 747 km^2 (oder $747.490.954,8 \text{ m}^2$), die als schattenfreie Dachflächen angenommen werden können. Wenn darauffolgend die Teile der Flächen subtrahiert werden, die aufgrund von Dachaufbauten nicht nutzbar sind, kommt eine Fläche von ca. 633 km^2 ($633.423.880,3 \text{ m}^2$) auf. Somit sind etwa 50,7 % der Dachflächen schattenfrei und frei von Dachaufbauten. Wie viel Fläche davon wirtschaftlich nutzbar ist, wird im zweiten Teil der Auswertung dargestellt. In diesem Kontext wird die Modulbelegung inkludiert, welche zu einer weiteren Verringerung der nutzbaren Flächen führt. Fokussiert wird die Auswertung der Ergebnisse mit Hilfe der bereits vorgestellten Heuristik. Für die Anwendung des Korrekturfaktors reicht die durchgeführte Anzahl an Strichproben nicht aus, um signifikante Ergebnisse ermitteln zu können. Eine tiefergehende Analyse des Korrekturfaktors hätte den zeitlichen Rahmen dieser Forschungsarbeit deutlich überschritten. Der mit den Stichproben ermittelte Korrekturfaktor kann daher als kleine Hilfestellung bei der Einordnung der Ungenauigkeiten bzgl. der Ergebnisse betrachtet werden. Dieser Faktor dient ebenfalls als eine unverbindliche, grobe Obergrenze.

8.1.1 Top-5 Kreise in NRW

In diesem Kapitel wird eine Teilmenge der Ergebnisse im Detail betrachtet. Alle weiteren Kreise sind in Anhang C.3 in Tabellenform vorzufinden. Eine gesamte Betrachtung wäre nicht effizient, da die interessantesten Fälle gehäuft in den Extremen vorzufinden sind. Von allen Kreisen in NRW schneiden am besten, in absteigender Reihenfolge, ab: die Kreise

- Rhein-Erft Kreis,
- Borken,
- Köln,
- der Rhein-Sieg Kreis und
- Wesel

Sie bilden, bezogen auf die absolute Gesamtfläche der schattenfrei verfügbaren Dachflächen ohne Dachaufbauten, mit einer Mindestgröße von 7 m^2 , die Top-5 ab (vgl. Tabelle 8.2). Es ist trivial, dass Kreise, die insgesamt mehr Gebäude besitzen, tendenziell größere Flächen vorweisen.

Für Borken bleibt dabei von den $39,09 \text{ km}^2$ Dachfläche nach der Verschattungsanalyse eine Fläche von $28,12 \text{ km}^2$ übrig. Nach Abzug der Flächenteile, die für Dachaufbauten genutzt werden, bleiben noch $24,1 \text{ km}^2$ übrig. Wird im Anschluss die Modulbelegung (mindestens

ein 1,65 m² PV-Modul) berücksichtigt bleibt ein Wert von 15,82 km² (vgl. Tabelle 8.3) übrig. Der entscheidende Faktor zur Einordnung in die Top-5 Kategorie stellen die Dachflächen >7 m² dar. Unter Verwendung dieser Größe wird für Borken ein endgültiger Wert von 14,98 km² ermittelt. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 62,3 % zum Anfangswert der absoluten Dachflächen. Borken belegt den zweiten Platz hinter dem Rhein-Erft Kreis (vgl. Tabelle 8.3).

Tabelle 8.2: Übersicht Top5-Kreise in NRW bezüglich der absoluten Dachflächen, ohne Modulbelegung.

Kreise	absolute Dachflächen (km ²)	unverschattete Dachflächen (km ²)	ohne Dach- aufbauten (km ²)	Anzahl Gebäude	Gebietsfläche (km ²)	Gebäudedichte (GB / km ²)
Rhein-Erft Kreis	31,91	20,03	18,76	411.157	704,71	583
Borken	39,09	28,12	24,10	398.039	1.420,98	280
Köln	45,94	23,05	19,05	478.985	405,01	1.182
Rhein-Sieg Kreis	42,61	19,27	16,99	604.763	1.153,21	524
Wesel	36,32	22,46	19,90	436.417	1.042,80	418

Für den Kreis Wesel stehen zu Anfang 36,32 km² reine Dachflächen zur Verfügung, welche nach Durchführung der Schattenanalyse bereits auf 22,46 km² reduziert werden. Nach Subtraktion der Dachaufbauten bleiben 19,9 km² übrig. Der entscheidende Wert (Modulbelegung, >7 m²) für den Kreis Wesel beträgt 13,33 km². Dies stellt eine Reduktion von ca. 63,3 % dar.

Tabelle 8.3: Auflistung der Modulbelegung für die Top5-Kreise, Verschattung und Dachaufbauten ausgefiltert.

Kreise	absolute Dachflächen (km ²)	Modul- belegung (km ²)	Modul- belegung > 7 m ² (km ²)	Modul- belegung > 12 m ² (km ²)	Fläche pro Gebäude (m ²)
Rhein-Erft Kreis	31,91	16,10	14,98	13,69	36,42
Borken	39,09	15,82	14,72	13,45	36,97
Köln	45,94	15,37	14,30	13,07	30,54
Rhein-Sieg Kreis	42,61	14,44	13,43	12,27	22,20
Wesel	36,32	14,33	13,33	12,18	30,54

Die Kreise Köln und Rhein-Erft haben jeweils reine Dachflächen von 45,94 km² und 31,91 km². Beim Kreis Köln stehen nach der Schattenanalyse noch 23,05 km² an Dachflächen zur Verfügung und nach Abzug der Dachaufbauten noch 19,05 km². Die Einbeziehung der Modulbelegung (>7 m²) ergibt einen Wert von 14,30 km², was einer Reduktion von 68,87 % entspricht. Beim Rhein-Erft Kreis liegen nach der Schattenanalyse noch 20,03 km² vor. Nach Abzug des Anteils der Dachaufbauten, sind 18,76 km² nutzbar. Die Analyse der

Modulbelegung für $>7 \text{ m}^2$ liefert $14,98 \text{ km}^2$ und damit insgesamt eine Reduktion von ca. 53,7 % der absoluten Dachflächen. Mit dem Wert von $14,98 \text{ km}^2$ steht der Rhein-Erft Kreis an der Spitze der Top-5 Kreise in NRW. Der Rhein-Sieg Kreis weist ursprünglich Dachflächen in Höhe von $42,61 \text{ km}^2$ auf. $13,43 \text{ km}^2$ liefert die Analyse der Modulbelegung für $>7 \text{ m}^2$, was einer Reduktion von ca. 68,48 % entspricht.

Tabelle 8.4: Top-5 sortiert nach mittlerer nutzbarer Dachfläche pro Gebäude.

Kreise	absolute Dachflächen (km^2)	Modul- belegung (km^2)	Modul- belegung > 7 m^2 (km^2)	Modul- belegung > 12 m^2 (km^2)	Fläche pro Gebäude (m^2)
Warendorf	27,97	12,20	11,35	10,37	38,81
Coesfeld	23,30	10,48	9,75	8,91	37,83
Borken	39,10	15,82	14,71	13,45	36,97
Minden-Lübbecke	31,73	13,23	12,31	11,25	36,76
Rhein-Erft Kreis	31,91	16,10	14,98	13,69	36,42

Des Weiteren ist es von Relevanz die Ergebnisse nach den mittleren nutzbaren Dachflächen zu sortieren (vgl. Tabelle 8.4). Diese liefern eine differente Auflistung von Kreisen. Borken und der Rhein-Erft-Kreis weisen eine sehr niedrige Gebäudedichte von jeweils 280 und 260 Gebäuden pro Quadratkilometer auf und verfügen gleichzeitig über ein großes Flächengebiet. Es liegen dort insgesamt viele Gebäude mit durchschnittlich größeren Dächern vor. Schlussfolgernd finden diese beiden Kreise sich ebenfalls in den besten fünf Regionen, abhängig von den nutzbaren Dachflächen pro Gebäude, wieder.

Bei Fokussierung auf die Top-5 Regionen und die Verschattungskategorien, welche den größten Teil der Verschattung verursacht haben, wird deutlich, dass im Kreis Köln, der Großteil des Schattens durch andere Gebäude (G2G) verursacht wird (vgl. Tabelle 8.5). In den weiteren Kreisen wird der Großteil der Verschattung durch Objekte auf dem Dach (E2G) verursacht, wie Schornsteine und andere Aufbauten. Am höchsten ist der Anteil der Eigenverschattung im Rhein-Erft Kreis, wo dieser einen Anteil von 72,92 % ausmacht.

Tabelle 8.5: Verteilung der Verschattungsarten in den Top5-Kreisen.

Kreise	Anteil G2G (in %)	Anteil B2G (in %)	Anteil E2G (in %)
Rhein-Erft Kreis	21,69	5,38	72,92
Borken	33,08	24,91	41,99
Köln	61,94	3,16	34,90
Rhein-Sieg Kreis	45,64	16,93	37,43
Wesel	39,94	10,31	49,75
Durchschnitt	40,48	12,14	47,40
Standardabweichung	14,96	8,88	14,34

In den fünf präsentierten Kreisen liegt die höchste Baumverschattung (B2G) im Kreis Borken mit einem Anteil von fast 25 % vor, gefolgt vom Rhein-Sieg Kreis mit 16,93 %. Diese beiden Werte liegen weit vom durchschnittlichen Anteil der Baumverschattung entfernt, welcher bei einem Wert von 9,41 % liegt. Den insgesamt höchsten Wert von allen Kreisen weist der Hochsauerlandkreis mit 25,18 % auf. Der niedrigste Wert liegt in den Kreisen Bochum und Duisburg mit jeweils 0,31 % und 0,36 % vor. Abbildung 8.2 visualisiert die Intervalle innerhalb welcher sich die Verschattungsanteile bewegen. Die G2G-Verschattung liegt dabei im Schnitt zwischen 10,52 % und 61,93 % pro Kreis (alle Kreise NRWs, nicht pro Dach). Der Durchschnitt liegt bei 32,80 % Reduktion der verfügbaren Dachflächen durch die G2G-Verschattung. Die Eigenverschattung (E2G) nimmt einen Anteil zwischen 34,30 % und 83,21 % pro Kreis ein mit einem Durchschnittswert von 57,78 % (vgl. Tabelle 8.6). Somit wird deutlich, dass die Eigenverschattung für mindestens ein Drittel der durch Verschattung verursachten Dachflächenreduktion verantwortlich ist.

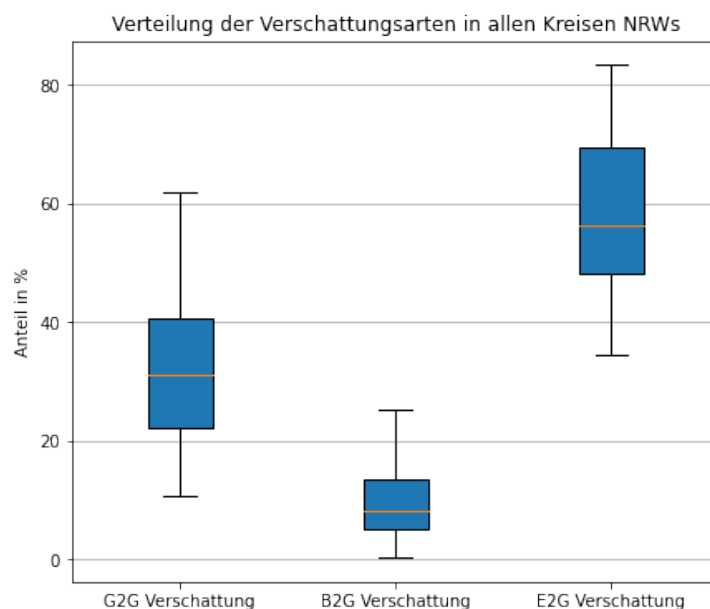


Abbildung 8.2: Verteilung der einzelnen Verschattungsarten in allen Kreisen NRWs.

Tabelle 8.6: Beschreibende Werte zu Abbildung 8.2 in Prozent.

	G2G	B2G	E2G
Durchschnitt	32,806	9,411	57,783
Standardabweichung	13,127	5,991	13,763
Minimum	10,522	0,311	34,304
Maximum	61,934	25,181	83,218

8.1.2 Flop-5 Kreise in NRW

Die fünf Kreise NRWs mit der schlechtesten absoluten Ausbeute an Dachflächen nach Teil 1 der Analyse sind in aufsteigender Reihenfolge:

- Mülheim an der Ruhr,
- Bottrop,
- Remscheid,
- Leverkusen und Oberhausen

Eine Übersicht der erreichten Werte findet sich in Tabelle 8.7. Beim Kreis Bottrop liegen die reinen Dachflächen zunächst bei $7,88 \text{ km}^2$, welche sich nach der Verschattungsanalyse bereits auf $3,91 \text{ km}^2$ reduzieren. Wird von diesem Wert zudem der Anteil der Dachaufbauten rausgerechnet, bleiben $3,01 \text{ km}^2$ Dachflächen übrig. Nach der Analyse der Modulbelegung mit einer Mindestgröße der Dachflächen von 7 m^2 wird ein Wert von $2,37 \text{ km}^2$ ermittelt. Dies entspricht einem Anteil von ca. 30 % der ursprünglichen Flächen. Der Kreis Mülheim an der Ruhr verfügt über $8,95 \text{ km}^2$ absolute Dachflächen. Die Verschattungsanalyse postuliert eine Reduktion auf $4,46 \text{ km}^2$ und die Subtraktion der Dachaufbauten liefert ein Ergebnis von $3,64 \text{ km}^2$, die theoretisch zur Verfügung stehen für die Installation von PV-Anlagen. Das Ergebnis der Modulbelegung $> 7 \text{ m}^2$ beträgt $1,92 \text{ km}^2$. Dies entspricht einem Anteil von 21,45 % der ursprünglichen Dachflächen. Dahingehend steht der Kreis Mülheim an der Ruhr an der Spitze der Flop-5 Kreise. Die reinen Dachflächen für den Kreis Oberhausen weisen den höchsten Wert dieser fünf betrachteten Kreise auf mit $13,06 \text{ km}^2$, wobei nach der Verschattungsanalyse der Wert auf $5,50 \text{ km}^2$ reduziert wird. Nach der Reduktion der Dachaufbauten bleiben Flächen von $4,26 \text{ km}^2$ übrig. Die Modulbelegung $> 7 \text{ m}^2$ liefert $3,19 \text{ km}^2$, was einem Anteil von ca. 24,42 % der ursprünglichen Dachflächen entspricht. Oberhausen weist somit das beste Ergebnis in dieser Kategorie unter den fünf Kreisen auf. Zusätzlich ist in Tabelle 8.7 ersichtlich, dass Oberhausen mit 2.362 Gebäuden pro Quadratkilometer die höchste Gebäudedichte der fünf vorgestellten Kreise aufweist.

Tabelle 8.7: Übersicht Flop5-Kreise in NRW bezüglich der absoluten Dachflächen, ohne Modulbelegung.

Kreise	absolute Dachflächen (km^2)	unverschattete Dachflächen (km^2)	ohne Dach- aufbauten (km^2)	Anzahl Gebäude	Gebietsfläche	Gebäudedichte (GB / km^2)
Mülheim a.d. Ruhr	8,95	4,46	3,64	86.699	91,28	949
Bottrop	7,88	3,91	3,01	103.816	100,61	1.031
Remscheid	6,71	5,06	4,18	80.667	74,52	1.082
Leverkusen	8,53	4,96	4,14	106.374	78,87	1.348
Oberhausen	13,06	5,50	4,26	209.566	77,09	2.362

Der Kreis Leverkusen weist $8,53 \text{ km}^2$ reine Dachflächen vor, welche nach der Verschattungsanalyse auf $4,96 \text{ km}^2$ dezimiert werden. Die Subtraktion der Dachaufbauten führt

zu einer verfügbaren Dachfläche von 4,14 km². Die Analyse der Modulbelegung >7 m² liefert eine Fläche von 2,93 km², was einem Anteil von ca. 34,35 % der ursprünglichen Dachflächen entspricht. Für den Kreis Remscheid liegen 6,71 km² an reinen Dachflächen vor, welche nach dem Prozess der Verschattungsanalyse auf 5,06 km² reduziert werden. Die Reduktion um die Dachaufbauten und unter Berücksichtigung der Modulbelegung >7 m² wird ein Wert von 2,67 km² ermittelt. Dies entspricht einem Anteil von ca. 39,79 % der anfänglichen Dachflächen.

Tabelle 8.8: Auflistung der Modulbelegung für die Flop5-Kreise, Verschattung und Dachaufbauten ausgefiltert.

Kreise	absolute Dachflächen (km ²)	Modul- belegung (km ²)	Modul- belegung > 7 m ² (km ²)	Modul- belegung > 12 m ² (km ²)	Fläche pro Gebäude (m ²)
Mülheim a.d. Ruhr	8,95	2,11	1,92	1,79	22,63
Bottrop	7,88	2,55	2,37	2,16	22,84
Remscheid	6,71	2,88	2,67	2,44	33,11
Leverkusen	8,53	3,15	2,93	2,68	27,58
Oberhausen	13,06	3,43	3,19	2,91	17,52

Analog zu der Kategorie Top-5 wurde an dieser Stelle ebenfalls eine Übersicht der Flop-5 Kreise, sortiert nach mittlerer nutzbarer Dachfläche, erstellt (vgl. Tabelle 8.9). Die Kreise Bochum, Wuppertal, Bonn und Heinsberg schneiden im Vergleich zu den weiter oben ausgeführten Flop-5 Kreisen, schlechter bei der mittleren nutzbaren Dachfläche ab. Lediglich Oberhausen ist ebenfalls in dieser Kategorie vorzufinden. Dies hängt primär mit der hohen Gebäudedichte von 2.362 Gebäuden pro Quadratkilometer und der vergleichsweise geringen Gebietsfläche (77,09 km²) zusammen.

Tabelle 8.9: Flop-5 sortiert nach mittlerer nutzbarer Dachfläche pro Gebäude.

Kreise	absolute Dachflächen (km ²)	Modul- belegung (km ²)	Modul- belegung > 7 m ² (km ²)	Modul- belegung > 12 m ² (km ²)	Fläche pro Gebäude (m ²)
Bochum	19,75	4,64	4,31	3,95	17,09
Oberhausen	13,06	3,43	3,19	2,91	17,52
Wuppertal	16,64	4,14	3,85	3,52	17,54
Bonn	16,02	4,62	4,30	3,93	20,89
Heinsberg	22,56	8,11	7,54	6,90	21,86

Der Anteil der Verschattungsursachen bildet einen ähnlichen Trend wie bei den Top-5 Kreisen NRW (vgl. Tabelle 8.10). Demnach dominiert wieder der Anteil der E2G-

Verschattung und erreicht beim Kreis Leverkusen seinen Höchstwert von 81,42 %. Insgesamt liegt der Anteil der Eigenverschattung in den Flop-5 Kreisen zwischen 41,21 % und 81,42 %. Damit stellt dieses Intervall eine auffallend große Spannweite dar. Insgesamt weichen die Werte jedoch nicht zu weit von den Durchschnittswerten der Top-5 Kreise ab. Die B2G-Verschattung tritt am prominentesten bei Remscheid mit einem Anteil von fast 20 % auf. Dies ist ebenfalls der Kreis mit dem niedrigsten Anteil E2G-Verschattung. Der Anteil der G2G-Verschattung liegt dabei innerhalb der Standardabweichung. Leverkusen weist in der Kategorie der G2G-Verschattung den geringsten Anteil auf und liegt mit 11,49 % noch außerhalb der Standardabweichung vom Mittelwert.

Tabelle 8.10: Verteilung der Verschattungsarten in den Flop5-Kreisen.

Kreise	Anteil G2G (in %)	Anteil B2G (in %)	Anteil E2G (in %)
Mülheim a.d. Ruhr	32,13	5,99	61,87
Bottrop	38,67	2,91	58,41
Remscheid	38,78	19,99	41,21
Leverkusen	11,49	7,08	81,42
Oberhausen	42,52	2,42	55,06
Durchschnitt	32,71	7,68	59,59
Standardabweichung	12,44	7,16	14,50

Verglichen mit den fünf Regionen, die in Tabelle 8.2 dargestellt sind und die besten Regionen in NRW darstellen, in Bezug auf die absolut höchste Ausbeute der Dachflächen, fällt auf, dass sich die Gebäudedichte dort in einem Intervall mit niedrigeren Werten bewegt. Für die besten fünf Regionen liegt die Gebäudedichte zwischen 260 und 1.182 Gebäuden pro Quadratkilometer, wobei die schlechtesten fünf Regionen zwischen 949 und 2.121 Gebäude pro Quadratkilometer vorweisen.

In Abbildung 8.3 wird die Relation zwischen den zur Verfügung stehenden Dachflächen vor und nach der Schattenanalyse visualisiert. Es wird auf den ersten Blick deutlich, dass bei den meisten Kreisen ein Großteil der Flächen nach diesem Schritt als irrelevant eingestuft werden. Am deutlichsten ist dies zu erkennen bei den Kreisen, welche die größten Flächen vorweisen, wie Steinfurt, Köln, Recklinghausen und Borken.

Es liegt eine weitestgehend große Homogenität bei der Verteilung der Gebäudetypen in allen Kreisen vor. Dem Großteil der Gebäude werden die Kategorien „Wohnen“ und „Garage“ zugeordnet. Zusammengenommen beträgt deren Anteil mindestens 50 % am gesamten Gebäudebestand. In Tabelle 8.11 ist die Verteilung für die bereits besprochenen fünf besten und schlechtesten Kreise vorzufinden. Dieselbe Verteilung ist ebenso bei den anderen Kreisen zu beobachten. Die komplette Tabelle mit der Verteilung der Gebäudetypen für alle Kreise NRWs findet sich im Anhang C.4. Die Kategorien, wie sie der Tabelle 8.11 zu entnehmen sind (Wohnen, Garage, Landwirtschaft, usw.) sind manuell aus den 315 Funktionscodes abgeleitet worden, welche von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) beschrieben worden sind. Die Einteilung, die für die vorliegenden Kategorien verwendet wurde

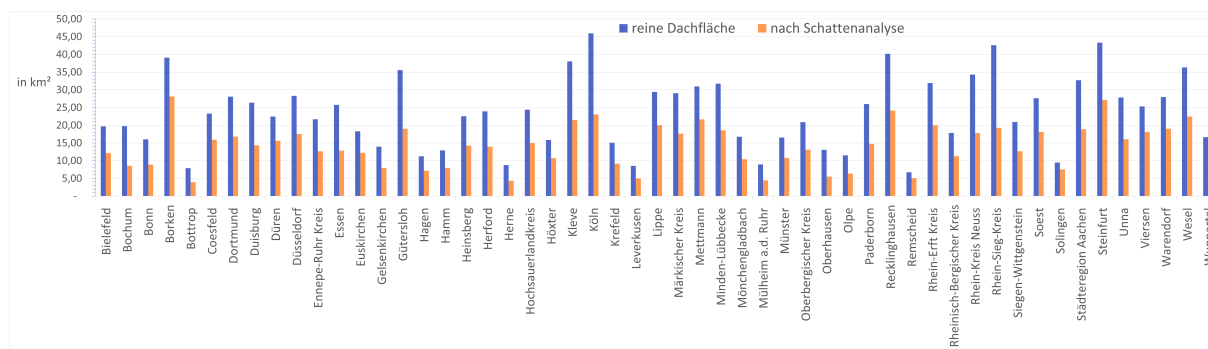


Abbildung 8.3: Grafische Übersicht der Verluste auf Kreisebene durch Verschattungseffekte auf Dachflächen. Die spezifischen Werte aller Kreise können dem Anhang C.3 entnommen werden.

und welche der ursprünglichen Funktionscodes genau den sechs endgültigen Kategorien zugeordnet wurden, ist ebenfalls im Anhang D vorzufinden. Es ist ersichtlich, dass Wohngebäude in jedem der hier vorgestellten Gebiete und in den weiteren Kreisen, welche im Anhang C.4 zu finden sind, die Mehrheit der Gebäudetypen darstellen. Mindestens 30 % beträgt der Anteil der Wohngebäude in einem Kreis, wobei der Minimalwert bei 30,1 % für den Kreis Coesfeld vorliegt (siehe Anhang C.4). Tabelle 8.11 hingegen verdeutlicht die Verteilung der Gebäudetypen auf Kreisebene für die zehn Kreise, die hier als Top-5 und Flop-5 betrachtet werden. Visuell ist deutlich zu erkennen, dass den größten Teil der Gebäude die Wohnhäuser, Garagen, Industrie & Gewerbe sowie „Anderes“ ausmachen, was als Auffangbecken für alle kleineren Kategorien gilt (für die Details, welche Gebäudetypen bei „Anderes“ kategorisiert sind, siehe Anhang D).

Tabelle 8.11: Verteilung der Gebäudekategorien für die Top-5- und Flop-5-Kreise in Prozent.

Kreis	Wohnen	Garage	Landwirtschaft	Industrie & Gewerbe	Freizeit	Sonstiges
Rhein-Erft Kreis	43,6	29,5	9,1	7,1	1,1	9,5
Borken	36,7	25,4	16,8	6,7	0,7	13,5
Köln	52,9	21,8	0,7	11,8	1,2	10,9
Rhein-Sieg Kreis	42,7	15,3	4,8	19,3	1,5	16,1
Wesel	43,5	28,3	13,8	4,8	1,8	7,2
Mülheim a.d. Ruhr	52,0	30,0	6,5	4,8	1,5	4,0
Bottrop	35,6	29,8	11,2	4,4	5,9	12,5
Remscheid	41,6	26,6	3,9	8,7	6,7	12,0
Leverkusen	41,9	27,2	6,1	5,4	2,3	16,5
Oberhausen	36,1	20,9	5,6	6,5	16,4	14,4

Der Faktor des Denkmalschutzes hat einen geringen Einfluss auf die verfügbare Potentialflächen. Im Rahmen der Potentialstudie dieser Forschungsarbeit konnten über 28.000 Koordinaten der insgesamt über 82.000 denkmalgeschützten Gebäude extrahiert werden (siehe Kapitel 5). Damit stellen die zur Verfügung stehenden denkmalgeschützten Gebäude

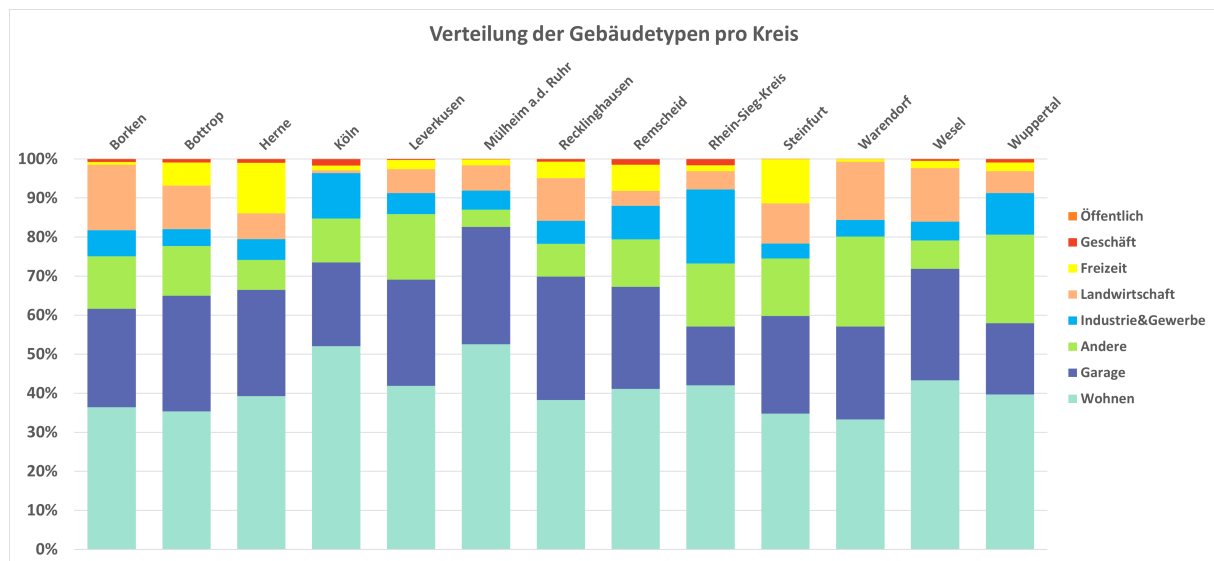


Abbildung 8.4: Visuelle Darstellung der Verteilung von Gebäudekategorien von ausgewählten Kreisen in NRW.

etwa 0,28 % aller Gebäude dar. Bei allen untersuchten Gebäuden dieser Kategorie entfällt 87,3 % der verschattungsbedingten Dachflächenreduktion auf die Eigenverschattung durch auf dem Dach befindliche Objekte und Aufbauten. Etwa 1 % geht auf die Baumverschattung zurück und die restlichen 11,7 % auf Verschattung durch andere Gebäude. Den größten Einfluss auf die Reduktion von potentiell nutzbaren Dachflächen weisen jedoch die Dachaufbauten selbst auf. Diese reduzieren die potentiellen Dachflächen im Durchschnitt um 54 %, wohingegen Verschattung im Allgemeinen nur eine durchschnittliche Reduktion von 11,3 % innerhalb der denkmalgeschützten Gebäude verursacht.

8.2 Ergebnisse der Einstrahlungsanalyse

Wie bereits in Kapitel 7 angeschnitten und ebenfalls in Abschnitt 8.1 dargestellt wurde, sind die theoretisch schattenfreien Flächen ohne Dachaufbauten nicht gleichzusetzen mit den tatsächlich nutzbaren Flächen. Diese setzen nämlich voraus, dass auf den schatten- und hindernisfreien Dachflächen rechteckige PV-Anlagen installiert werden können.

Aufgrund der Tatsache, dass keine theoretisch optimale Belegung ermittelt werden konnte (die genauen Hintergründe wurden in Kapitel 7 behandelt), musste zur Ermittlung der Modulbelegung auf ein simpleres heuristisches Verfahren zurückgegriffen werden. Dieses liefert aller Voraussicht nach einen geringeren Wert als realistisch möglich wäre, gewährleistet nichtsdestotrotz wichtige Erkenntnisse und definiert die untere Grenze für die potentiell belegbaren Flächen. Anhand einiger Beispiele (insgesamt 30 zufällig ausgewählte Dächer) wurde ebenso die Optimalbelegung mit PV-Modulen manuell durchgeführt und daraus ableitend ein potentieller Korrekturfaktor ermittelt, welcher angewandt werden

kann, um das heuristische Verfahren aufzuwerten. In jedem Fall stehen von den 633 km² schattenfreien Dachflächen nach Anwendung der Heuristik nur knapp 465 km² (genau genommen 465.559.828,9 m²) zur Verfügung. Durch Anwendung des Korrekturfaktors von 1,097 erhöhte sich dieser Wert auf fast 511 km² (genau genommen 510.719.132,3 m²). Durch den Korrekturfaktor können somit fast 10 % der Dachflächen wieder in die realen Potentiale integriert werden. Dies entspricht einem realistischen Wert vor dem Hintergrund, wie die Heuristik im Vergleich zur Optimalbelegung abschneidet. Hierbei wird noch nicht die angesetzte Mindestgröße für eine wirtschaftliche Anbringung von PV-Dachanlagen einbezogen, welche in Kapitel 7 auf 7 m² gesetzt wurde und bei einigen Potentialstudien auf 12 m² (siehe [17, 36]) festgelegt wurde. Unter Berücksichtigung dieser Filterung, ergeben sich die Werte 432,97 km² für alle Dachflächen, die mindestens 7 m² Platz für PV-Module bieten und 395,72 km² für alle Dachflächen mit einer Mindestgröße von 12 m² für PV-Module, welche ebenfalls in Tabelle 8.13 ersichtlich sind.

Tabelle 8.12: Flächenverfügbarkeit in NRW nach unterschiedlichen Kriterien und Filterungen der Dachflächengrößen – relative Werte zu total verfügbaren Dachflächen in eckigen Klammern.

Total verfügbare Dachflächen (in km ²)	1.250	
	Heuristik	Korrekturfaktor
Modulbelegung (in km ²)	465,55 [37,24 %]	510,71 [40,85 %]
Größer als 7m ² (in km ²)	432,97 [34,63 %]	474,96 [37,99 %]
Größer als 12m ² (in km ²)	395,72 [31,65 %]	439,21 [35,13 %]

Tabelle 8.13: Flächenverfügbarkeit in NRW nach unterschiedlichen Kriterien und Filterungen der Dachflächengrößen – relative Werte zu schattenfreien Flächen ohne Dachaufbauten in eckigen Klammern.

Schattenfrei, ohne Dachaufbauten (in km ²)	633,47	
	Heuristik	Korrekturfaktor
Modulbelegung (in km ²)	465,55 [73,49 %]	510,71 [80,62 %]
Größer als 7m ² (in km ²)	432,97 [68,34 %]	474,96 [74,97 %]
Größer als 12m ² (in km ²)	395,72 [62,46 %]	439,21 [69,33 %]

Die Werte der Sonneneinstrahlungsenergie, welche im Folgenden dargestellt werden, haben Gültigkeit für beide Szenarien (Heuristik und Korrekturfaktor), um ein detaillierteres Bild abzugeben und ebenso aufzuzeigen wie unterschiedlich das theoretische Potential aussehen kann. Wichtig ist dabei zu beachten, dass diese Werte nicht die durch PV-Anlagen erzeugte Energie darstellen, sondern die Einstrahlungsenergie der Sonne repräsentieren. Diese dient als Basis, um mit den Informationen zur potentiellen Anlagentechnik die generierbare Energiemenge bestimmen zu können. Diese wird, wie bereits in den vorherigen Kapiteln

aufgegriffen, volatil und nicht determinierbar sein. Die letztendliche Leistung hängt von den zu installierenden Anlagen ab. In diesem Abschnitt sollen einige unterschiedliche Szenarien durchleuchtet werden, die aufzeigen, welche realistischen Möglichkeiten vorhanden sind.

Weiterhin ist von Relevanz, wie in Abschnitt 7.2 ebenfalls erwähnt, dass diese Werte in der Zeit zwischen 10:00 und 14:00 Uhr generiert werden. Diese Zeiten wurden gewählt, um eine einheitliche Vergleichbarkeit für alle Tage des Jahres zu gewährleisten [220]. Sofern keine unvorhergesehenen Ereignisse eintreten, kann mit einer gewissen Energieeinstrahlung kalkuliert werden. Bedingt durch unterschiedliche Tageslängen im Sommer und Winter, lassen sich beispielsweise die Tage am 01.06. und 01.12. bezüglich der solaren Einstrahlungsenergie nicht gleichsetzen.

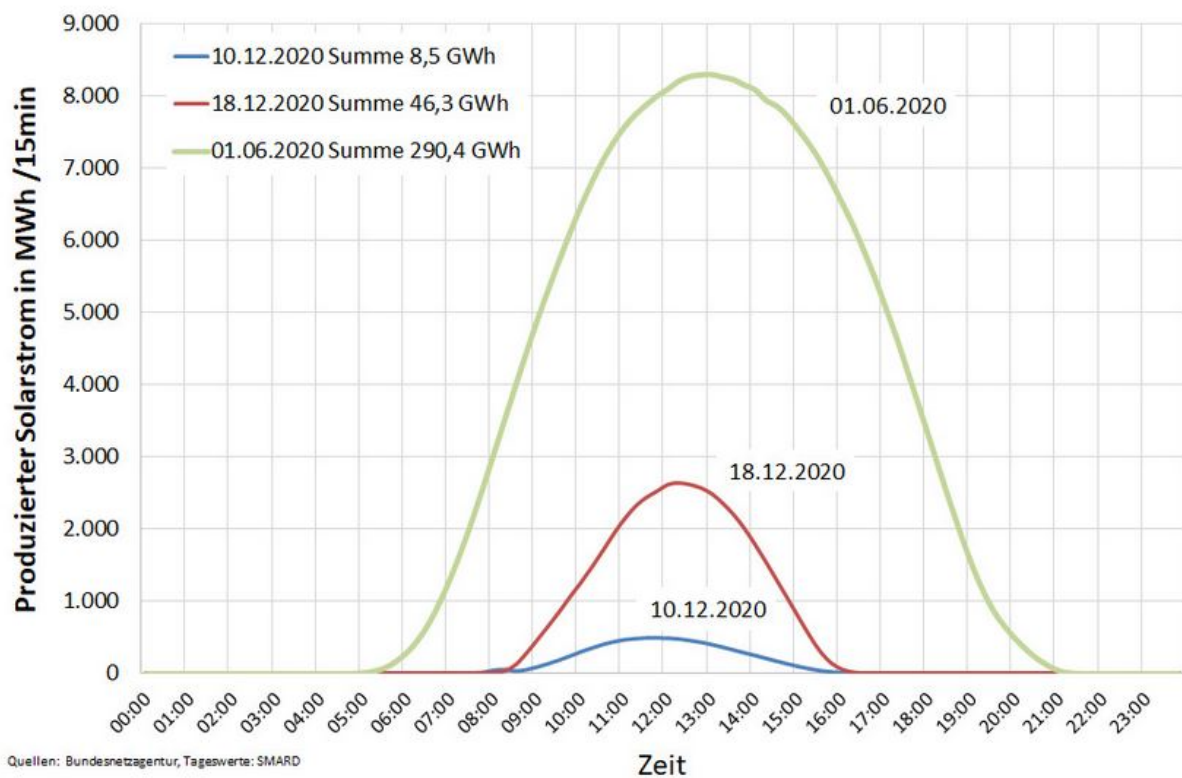


Abbildung 8.5: Solarstromertrag in Deutschland im Tagesverlauf an drei Beispieltagen. Grafik entnommen aus [220].

Abbildung 8.5 illustriert die Stromproduktion durch PV-Anlagen an drei beispielhaften Tagen und wie viel Gesamtenergie produziert werden kann über den Tagesverlauf, wenn die gesamte Anzahl der Sonnenstunden der jeweiligen Tage mit in die Rechnung integriert wird. Ebenso steht die Abbildung der Stromproduktion repräsentativ für den Verlauf der Sonneneinstrahlung innerhalb der Tage, da die PV-Energieproduktion direkt von der eintreffenden Strahlung abhängt. Daraus ableitend wird ersichtlich, dass relative Vergleiche innerhalb der Tage nur möglich sind, wenn identische Zeitfenster als Betrachtungshorizont

gewählt werden. Andernfalls müsste ein Sommertag von 8:00 Uhr bis 18:00 Uhr mit einem Wintertag von 10:00 Uhr bis 14:00 Uhr verglichen werden. Die dynamische Ausweitung des Zeitraums wird betrachtet, wenn das mögliche Gesamtpotential in Kapitel 9 fokussiert wird.

Tabelle 8.14: Kumulierte, durch Sonneneinstrahlung einfallende Energiemenge pro Top-5 und Flop-5 Kreis.

Kreis	in TWh/a (Heuristik)		in TWh/a (Korrektur)	
	Modulbelegung >7m ² >12m ²		Modulbelegung >7m ² >12m ²	
Borken	5,53	5,05	6,07	5,61
Rhein-Sieg Kreis	4,90	4,47	5,36	4,96
Wesel	5,19	4,74	5,69	5,23
Köln	5,48	5,01	6,01	5,56
Rhein-Erft Kreis	5,75	5,25	6,31	5,83
Bottrop	0,89	0,81	0,98	0,90
Mülheim a.d. Ruhr	0,73	0,67	0,80	0,74
Oberhausen	1,24	1,13	1,36	1,25
Leverkusen	1,10	1,01	1,21	1,12
Remscheid	0,97	0,88	1,06	0,98

Tabelle 8.14 visualisiert eine Übersicht der Top-5 und Flop-5 Regionen NRWs in Bezug auf die Einstrahlungsenergie. Der Kreis Borken weist dabei mit einer potentiellen solaren Einstrahlungsenergie zwischen 5,53 bis 6,07 TWh/a den höchsten Wert auf. Zu beachten ist dabei, dass diese Werte sich von den möglichen Energiewerten unterscheiden, die durch die PV-Module generiert werden können.

Oftmals wird in diesem Kontext lediglich die installierbare Leistung und darauf aufbauend die potentiell erzeugbare Energie aufgezeigt. Diese kann allerdings, je nach Annahmen, stark variieren, da die eingesetzte Technik einen erheblichen Einfluss hat [17, 18, 25, 38, 221]. In Kapitel 9 folgt, zwecks Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des LANUV, eine Übersicht der Potentiale ausgehend von der installierbaren Leistung. Die jeweiligen Annahmen die dabei getroffen wurden orientieren sich an denjenigen, die aus den LANUV-Daten und der Potentialstudie extrahiert werden konnten. Allerdings ist anzumerken, dass die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit diejenigen des LANUV und der anderen Forschungsarbeiten ergänzen und nicht vollständig ersetzen oder obsolet machen, da alle genannten Arbeiten mit ihrer Methodik ihre Berechtigung haben und keine offensichtlichen Fehler in der Methodik oder Logiklücken aufweisen.

Für den Analysezeitraum von 10-14 Uhr haben die Dachflächen in NRW, ohne Berücksichtigung von Verschattung und Dachaufbauten (1.250km²), eine jährliche solare Einstrahlungsenergie von 900,96 TWh. Die final verwendbaren Dachflächen (schattenfrei, ohne Dachaufbauten) mit >7m² weisen ein theoretisches, jährliches Potential von 343 TWh auf (bei >12m² 286 TWh). Diese theoretischen Potentiale sind von den technischen ab-

zugrenzen, welche die tatsächliche, unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades von PV-Modulen, nutzbaren Potentiale und somit den potentiellen Stromertrag darstellen. Die Diskussion bezüglich Wirtschaftlichkeit und Vergleichbarkeit mit den aktuellen Studien und Meta-Analysen sowie mit der LANUV Potentialstudie wird in Kapitel 9 erörtert.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die übergeordneten Ergebnisse der Schattenanalyse und Strahlungssimulation präsentiert. Wichtige Erkenntnisse umfassen die Tatsache, dass Schatten durch Bäume den geringsten Faktor darstellen, sowie, dass der größte Teil der Gebäude den Kategorien “Wohnen”, “Garage” oder “Industrie & Gewerbe” zugeordnet werden können. Weiterhin ist hervorzuheben, dass der Rhein-Erft Kreis, Borken, Köln, der Rhein-Sieg Kreis und Wesel das größte Potential von allen Kreisen NRWs aufweisen. In diesem Kontext gilt es die großen Unterschiede in den Gebäudedichten zu beachten. Weiterhin liegt für das gesamte Landesgebiet von NRW ein theoretisches Einstrahlungsenergie-Potential von 343 TWh/a (bei $>7\text{m}^2$) für die gesamten, final verwendbaren Dachflächen vor (schattenfrei, ohne Dachaufbauten). Im anschließenden Kapitel wird dieses theoretische Potential auf das technische Potential relativiert, welches die optimale Modulbelegung von PV-Dachanlagen einschließt. Unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Wirkungsgrades von PV-Modulen wird daraufhin das Stromerzeugungspotential ermittelt.

9 Kontextuelle Interpretation der Ergebnisse

Wie bereits im Kapitel 8 ermittelt, stehen von den gesamten Dachflächen NRW lediglich 34,63 % – 37,99 % ($>7 \text{ m}^2$, Heuristik-Korrekturfaktor) für die Anbringung von PV-Dachanlagen zur Verfügung (vgl. Tabelle 8.12). In diesem Kapitel werden alle Ergebnisse und Zwischenergebnisse aus dieser Arbeit mit den weiteren relevanten Studien [17, 36, 45, 221] verglichen. In diesem Kontext werden die Unterschiede bei den Ergebnissen hervorgehoben, so dass verdeutlicht wird, welchen Ursprung diese haben und wie diese eingeordnet werden können.

9.1 LANUV-Studien aus den Jahren 2013 und 2018

Die Auswertung der vom LANUV ermittelten Werte kann nur auf Basis der Methodik aus der Studie von 2013 [17] erfolgen. Für die Ergebnisse, die 2018 auf der Internetpräsenz publiziert wurden [222], finden sich keine detaillierten Beschreibungen bezüglich der angewandten Methodik. Allerdings kann angenommen werden, dass grundsätzlich ähnliche Schritte wie bei der Studie von 2013 unternommen wurden, da sich im Grunde nur wenige Prozesse in der Geoinformationsverarbeitung wesentlich unterscheiden. Es ist allerdings der Internetpräsenz zu entnehmen, dass in der Überarbeitung von 2018 nicht nur 24 Modellgebiete für die Berechnung der potentiellen Kollektorfläche ausgewertet wurden, sondern die gesamte Landesfläche NRW analysiert wurde [222]. Wie in Tabelle 2.3 deutlich wird, resultiert die unterschiedliche Herangehensweise und die ausgelassene Fläche in einem signifikanten Unterschied bei der letztendlich festgestellten Modulfläche (und der daraus resultierenden installierbaren Leistung sowie dem Stromertrag). Einen geringen Teil der Fläche detailliert zu analysieren und daraus auf den Rest des Landes NRW hochzukalieren (LANUV 2013) endet mit etwa halb so viel verfügbarem Potential, verglichen mit der ganzflächigen Analyse (LANUV 2018).

Die Werte für die installierbare Modulfläche und Leistung, welche durch die Potentialstudie in dieser Forschungsarbeit ermittelt wurden (vgl. Tabelle 9.1), werden mit den Werten des LANUV aus dem Jahr 2018 verglichen. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Werte als Vergleich für den potentiellen Stromertrag mit denselben Voraussetzungen ($>7 \text{ m}^2$, entspricht ca. 1 kW_p) wie bei der LANUV-Studie kalkuliert wurden. Zur Auswertung wurde ein mittlerer Wirkungsgrad von 17 % der PV-Anlagen angenommen. Angewandt wurde die bereits erörterte Heuristik. Bei dem durchgeführten Vergleich mit den Werten vom LANUV ist erkennbar, dass eine Diskrepanz in den ermittelten Ergebnissen vorliegt. In dieser Forschungsarbeit wurde eine installierbare Modulfläche von $432,97 \text{ km}^2$ berechnet. Das LANUV hat einen Wert von 483 km^2 bestimmt. Somit liegt eine Abweichung von ca. 10,36 % vor. Beachtet werden sollte in diesem Kontext allerdings,

dass den Werten eine von Grund auf andere Berechnungsgrundlage zugrunde liegt und in der vorliegenden Forschungsarbeit wesentlich mehr Faktoren, wie beispielsweise Verschattung durch Dachaufbauten und Denkmalschutz, explizit untersucht wurden, die bei den LANUV-Potentialstudien nicht berücksichtigt wurden. Dies ist, wie bereits in Kapitel 7 und 8 angeschnitten, auf die Art der Geoinformationsverarbeitung zurückzuführen und stellt eine Limitation des dort gewählten Weges dar.

Tabelle 9.1: Installierbare Modulfläche, Leistung und möglicher Stromertrag nach Verwaltungsregion in NRW, ermittelt durch die vorliegende Forschungsarbeit (Heuristik, $>7 \text{ m}^2$) – im direkten Vergleich mit den 2018-Daten vom LANUV (in eckigen Klammern).

Region	Installierbare Modulfläche (km^2)		Installierbare Leistung (GW_p)		Möglicher Stromertrag (TWh/a)	
Arnsberg	38,80	[38]	5,82	[6,4]	4,32	[5,1]
Detmold	65,41	[69]	9,57	[11,7]	7,58	[9,6]
Düsseldorf	70,46	[99]	10,67	[16,7]	9,06	[14,4]
Köln	103,22	[118]	14,71	[19,9]	12,55	[17,0]
Münster	54,94	[60]	7,94	[10,1]	6,14	[8,3]
Regionalverband Ruhr	100,12	[99]	14,23	[16,7]	11,73	[13,9]
Gesamt NRW	432,97	[483]	62,94	[81,4]	51,38	[68,4]

Tabelle 9.2: Zustand des PV-Ausbaus in NRW seit 2016 inklusive Energieerzeugung und installierter Leistung (Daten des LANUV [61]).

	2016	2017	2018	2019	2020	Einheit
Erzeugung aus PV-Dachanlagen	3.719	3.886	4.130	4.533	5.020	GWh
Dazugekommen	120	167	244	403	487	GWh
Installierte Leistung	4.188	4.376	4.651	5.105	5.654	MW_p
Dazugekommen	135	188	275	454	549	MW_p
Anlagenzahlen	240.970	252.009	263.581	282.386	315.062	Anzahl
Zubau	8.528	11.039	11.572	18.805	32.676	Anzahl

Der direkte Vergleich der Forschungs- mit den LANUV-Ergebnissen verdeutlicht wesentliche Unterschiede. Zu der bereits erläuterten Abweichung von ca. 10,36 % bei der installierbaren Modulfläche reihen sich die Abweichungen bei der installierbaren Leistung und dem möglichen Stromertrag ein. Die installierbare Leistung ($62,94 \text{ GW}_p$ zu $81,4 \text{ GW}_p$) weist eine Diskrepanz von ca. 22,68 % auf. Beim möglichen Stromertrag liegt eine reduzierte Annahme von Seiten dieser Forschungsarbeit in Höhe von ca. 24,88 % vor ($51,38$

TWh/a zu 68,4 TWh/a). Aus diesen Ergebnissen und Abweichungen lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass bei der Potentialbestimmung von PV-Dachanlagen eine Vielzahl von Parametern berücksichtigt werden und komplexe Analyseverfahren angewandt werden müssen, um akkurate Ergebnisse zu gewährleisten. Wie bereits erwähnt, werden selbst die Werte dieser Forschungsarbeit in der Realität geringer ausfallen, bei Berücksichtigung weiterer elementarer Parameter. An dieser Stelle sind wieder die sozio-ökonomischen Daten zu erwähnen, welche bei Verfügbarkeit in zukünftigen Forschungsarbeiten Berücksichtigung finden können. Hinsichtlich der Energiewende und der damit verbundenen Ziele sind die Abweichungen und Potentiale zentral zu bewerten. Bei einer installierbaren Leistung, welche um 18,46 GW_p geringer ausfällt als vom LANUV angenommen, ist die Einordnung in den Ist-Zustand von NRW von elementarer Bedeutung. Die Tabelle 9.2 dient der Einordnung der Ergebnisse in Bezug auf die gegenwärtig installierte Leistung und die jährlichen Zubauraten. In dem Jahr 2020 waren insgesamt 5,654 GW_p Leistung auf den Dachflächen NRWs installiert. 0,549 GW_p davon wurden im Laufe des Jahres 2020 neu installiert (vgl. Tabelle 9.2). In diesem Kontext erscheint die Reduktion des Potentials um 18,46 GW_p (3,26-facher Wert der gegenwärtig installierten Leistung) als durchaus hoch. Konkrete Zubaupläne für PV-Dachanlagen in NRW bis zum Jahr 2030 bzw. 2050 sind gegenwärtig nicht vorhanden. Die Prognosen und Szenarien definieren vielmehr bundesdeutsche Zubau-Ziele, um die Energiewende realisieren zu können. Diese auf das Landesgebiet NRW runter zu skalieren, würde zu Ungenauigkeiten bei den Ergebnissen führen. An dieser Stelle wird dahingehend die Einordnung vorgenommen, dass die Abweichungen in NRW groß genug sind, um schlussfolgern zu können, dass bei einer bundesdeutschen Analyse mit hoher Wahrscheinlichkeit ähnlich abweichende Ergebnisse ermittelt werden könnten. Vor diesem Hintergrund und dem Ziel, dass die festgelegten jährlichen Zubauraten erreicht werden sollen, ist die realistische Umsetzbarkeit kritisch zu hinterfragen. Dahingehend könnte in Anlehnung an die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit ein Korrekturfaktor für die gängigen Prognosen und Szenarien in Höhe von ca. 22,68 % angesetzt werden, um die ohnehin mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erreichbaren Zubau-Pläne zu relativieren. Unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Entwicklung wird ohne die Beseitigung von Hemmnissen und der Bereitstellung weiterer Anreize die Dachflächen-PV keine elementare Säule der Energiewende bilden können.

9.2 Fath 2018

Der Unterschied der ermittelten Ergebnisse und der von Fath [36] liegen vor allem darin, wie der Schwerpunkt der Analyse gesetzt wurde. In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden Faktoren untersucht, welche die mögliche Modulfläche einschränken. Ein besonderer Fokus lag auf dem Faktor der Verschattung. Fath untersuchte zwar ebenfalls Verschattungseffekte, diese werden allerdings auf die LoD2 Gebäudemodelle angewandt und exemplarisch für drei verschiedene Stadtteile/ Stadttopografien ermittelt [36]. Aufgrund der Tatsache, dass LoD2 Gebäudemodelle keine Dachaufbauten und Fensteraussparungen

beinhalten, kann folglich keine Verminderung der Dachflächen aufgrund dieser Faktoren ermittelt werden. Fath unterscheidet zwischen Gebieten mit den folgenden Charakteristiken:

- Ein- und Mehrfamilienhäuser mit niedriger Gebäudedichte
- Kleine Mehrfamilienhäuser
- Große Mehrfamilienhäuser
- Industrie- und Gewerbegebäude
- Innenstadt

Dabei sind einzelne Dachflächen, wie von der Analyse von Fath ermittelt, zum Großteil maximal 10 % verschattet – genau genommen sind je nach Untersuchungsszenario bzw. Stadttopografie zwischen 76 % und 94 % der Dachflächen zu bis zu 10 % verschattet. Hierbei handelt es sich explizit nur um die Verschattung durch andere Gebäude, weshalb die logische Schlussfolgerung trivial ist, dass die Gesamtverschattung, die bei der Analyse aus dieser Forschungsarbeit ermittelt wurde, höher ist. Zusätzlich wird nicht fokussiert wie viel Fläche konkret für die installierbaren Module übrig bleiben würde, da diese je nach Schattenstelle und -größe, die verfügbare Modulfläche durchaus einschränkt (vgl. Kapitel 7 und 8).

In [36] führt Fath ebenfalls aus, dass mit einer höheren Anzahl betrachteter Parameter, von dem theoretischen Potential ausgehend, das technische und realistische Potential stetig reduziert wird [36]. Da in dieser Arbeit ebenfalls explizit jede Verschattungskategorie im Einzelnen betrachtet wurde, können die Werte aus dem ersten Teil der Verschattungsanalyse genutzt werden, um diese mit den Ergebnissen von Fath zu vergleichen.

Insgesamt lässt sich ausführen, dass im Rahmen dieser Forschungsarbeit eine mittlere Reduktion von 13,22 % der gesamten zur Verfügung stehenden Dachflächen nach der G2G Schattenanalyse ermittelt wurde. Dieser Wert weicht etwas von den Werten aus [36] (ca. 10 %) ab. Dies liegt darin begründet, dass eine wesentlich größere Stichprobe durchgeführt und eine höhere Anzahl unterschiedlicher Topografien und Vermischungen der Topografien verwendet wurden. In Abbildung 9.1 ist eine Übersicht der Klassifizierung des Schattenanteils pro Dach beispielhaft für die Stadt Köln dargestellt. Hierbei wurden 478.985 Gebäude betrachtet.

Über 80 % der Gebäude in Köln weisen eine maximale Verschattung von 30 % der gesamten zur Verfügung stehenden Dachfläche auf. Höhere Verschattungen sind vorwiegend bei sehr niedrigen Gebäuden vorzufinden, vor allem auf Garagen. Allerdings gibt es auch einige Gebäude, die der Kategorie „Industrie/ Gewerbe“ zugehören, welche einen hohen Verschattungsanteil (> 50 %) durch andere Gebäude aufweisen. Die grundsätzliche Verteilung des Verschattungsanteils pro Dach weicht nicht signifikant von den Ergebnissen von Fath [36] ab.

Das Einschließen von Gebäudefassaden bei Fath stellt ebenso einen Unterschied dar, welche im Rahmen dieser Forschungsarbeit explizit ausgeschlossen wurden. Die exakte Be-

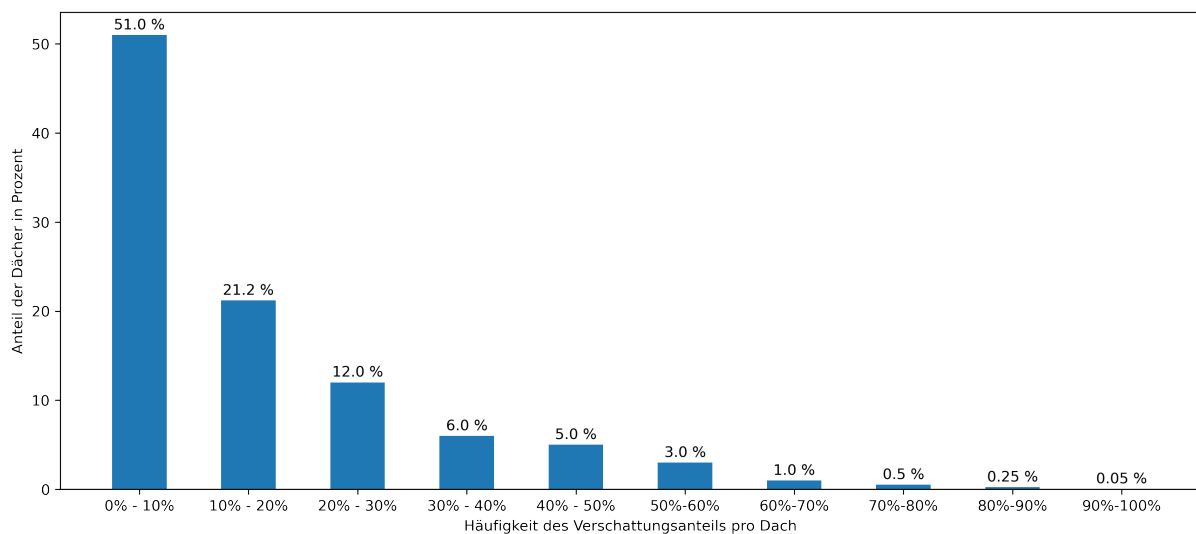


Abbildung 9.1: Ermittelter Verschattungsanteil pro Dach für alle Gebäude der Stadt Köln.

rechnung von Verschattungseffekten und deren Einfluss würde zu immenser Rechenkomplexität führen, wenn Schattenpolygone ebenfalls auf alle Gebäudefassaden projiziert und dieser Prozess auf eine Vielzahl von Gebäuden angewandt werden soll. Hierbei sind kleinere Analysen, die mit manuellen Berechnungen arbeiten und Faktoren zur Hochskalierung nutzen, wesentlich besser geeignet und haben, bedingt durch die geringere Rechenkomplexität, ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis [36]. Dieser Ansatz wird ebenfalls bei den Potentialanalysen von Fath [36] und Eggers et al. [221] angewandt.

Fath macht bei der Untersuchung der solaren Einstrahlungsenergie Gebrauch von der open-source Software Radiance, welche ursprünglich für Architekten entwickelt wurde. Bei der Verwendung ging es primär um die Ermittlung der Reflektionseffekte der Lichteinstrahlung, welche durch (dichte) Bebauung eine hohe Bedeutung erlangen und besonders im urbanen Kontext relevant sind. In dieser Forschungsarbeit wurde das, ebenfalls bei Fath vorgestellte, open-source Software Tool r.sun [223] verwendet, welches im Wesentlichen eine sehr ähnliche Funktionsweise aufweist wie Radiance [36]. Allerdings bot Radiance für die Berechnung von solarer Einstrahlung, wenn zusätzlich die Gebäudefassaden mit einbezogen werden, einige programmtechnische Eigenschaften, die sich als vorteilhaft erwiesen [36]. Die Anwendung von Radiance in dieser Forschungsarbeit wurde aufgrund der großen Datenmenge und der Automatisierung ausgeschlossen. Hierbei fügte sich r.sun wesentlich besser in den Automatisierungsprozess ein und erforderte keine Separation von der bereits genutzten Datenstruktur. Hinzu kommt die Tatsache, dass Radiance eine Umwandlung der Polygon-Daten erfordert und bei der Ermittlung der Einstrahlung anschließend die Verbindung mit der Gebäude-ID verloren geht. Dies führt zum Verlust von Informationen, welche in dem Datensatz von Fath [36] zwar durch ein Skript „repariert“ werden konnte, allerdings in dem Kontext dieser Forschungsarbeit keine Lösungsmöglichkeit dargestellt hat.

9.3 Vergleich mit Eggers et al. 2020 [221]

Eggers et al. haben auf Basis des Gebäudebestands in 2.5D bzw. LoD1 eine gebäudescharfe Potentialanalyse für das bundesdeutsche Gebiet durchgeführt [221]. Für die Stadt Dresden wurde sogar eine Analyse mit detaillierteren LoD2 Gebäudemodellen durchgeführt. In der Methodik wird beschrieben, dass Strahlenverfolgung bzw. Raytracing verwendet wurde, um ebenfalls Verschattungseffekte mit einzubeziehen. Das Raytracing-Verfahren wird ebenso in dieser Forschungsarbeit angewandt, allerdings nicht nur für ein festgelegtes 2.5D Raster, sondern für 3D-Gebäudemodelle. Dementsprechend weist die Analyse von Eggers et al. eine höhere Genauigkeit als die restlichen Potentialanalysen, [17, 47, 48, 82, 84], auf. Sie lässt allerdings keine genaueren Zusammenhänge bei den Verschattungen durch andere Gebäude zu bzw. differenziert nicht zwischen Verschattungen, die durch Dachaufbauten und ggf. Bäume entstehen können. Eggers et al. verweisen speziell auf das bauwerksintegrierte Photovoltaik Potential (BIPV) [221]. BIPV-Anlagen werden bei der Planung eines Gebäudes direkt in die Fassade oder das Dach integriert, im Unterschied zu den „Building-Attached PV“ Anlagen, die erst im Nachhgang installiert werden.

Die großflächige Analyse von Eggers et al. [221] untersucht nicht wie groß der Anteil der Flächen ist, die aufgrund von Verschattung oder zu geringer solarer Einstrahlung spezifisch ausgeschlossen werden.

Beide Fälle werden inkludierend betrachtet und einer Kategorie zugeordnet. Somit kann nicht analysiert werden, ob eine Fläche beispielsweise aufgrund ihrer Ausrichtung unter die dort festgelegte Grenze von $500 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ fällt oder aufgrund von potentieller Verschattung ausgeschlossen wird. Der Arbeit von Eggers et al. lässt sich entnehmen, dass für die deutschlandweite Analyse von 6.101 km^2 theoretischen Dachflächen nur 2.800 km^2 für die Installation von BIPV-Modulen geeignet sind, was einem Anteil von etwa 45 % entspricht und somit einen Verlust von 55 % der theoretischen Dachflächen bedeutet. In Anbetracht der Tatsache, dass hier lediglich mit Hilfe von Radiance eine Einstrahlungssimulation durchgeführt wurde, besonders nur auf Basis der LoD1 Datensätze, kann davon ausgegangen werden, dass der Verlust bei der Analyse von Eggers et al. [221] etwas überschätzt wurde.

In der vorliegenden Forschungsarbeit, welche mehrere Verschattungsarten und Verluste durch Dachaufbauten inkludiert hat, liegt nach Ablauf aller Prozessschritte ein Verlust von ca. 60-64 % vor. Im direkten Vergleich dieser Forschungsarbeit mit den Ergebnissen von Eggers et al. gilt zu berücksichtigen, dass Eggers et al. mit lediglich einem Faktor (Einstrahlungsanalyse) einen relativ hohen Verlustanteil bestimmt hat, wohingegen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eine Vielzahl von Faktoren zu einem marginal höher ausfallenden Ergebnis geführt haben. Dahingehend sind die Ergebnisse von Eggers et al. im entsprechenden Kontext zu betrachten.

9.4 Einfluss der Methodik auf die Ergebnisse

In einigen Aspekten weisen die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit erhebliche Unterschiede zu den Analysen des LANUV auf. Diesem Umstand können unterschiedliche Ursachen in der gewählten Methodik zugrunde liegen. Es werden allerdings weder die Ergebnisse des LANUV noch die Ergebnisse der hier durchgeführten Analyse dadurch diskreditiert.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden die Daten unterschiedlich genutzt und verarbeitet. Während beim LANUV, ebenso in nahezu jedem weiteren aktuell in Deutschland vorhandenen Solardachkataster, mit rasterbasierten digitalen Oberflächenmodellen (DOM) gearbeitet wurde ([17, 47, 48, 82, 84]), werden in dieser Arbeit direkt dreidimensionale Gebäudemodelle verwendet, die eigens rekonstruiert wurden. Diese weisen zwar keine 100 %-ige Übereinstimmung mit den realen Gebäuden auf, allerdings kann angenommen werden, dass eine höhere Detailebene der Gebäude vorhanden ist, im Vergleich zur Methodik, wenn Punktwolken auf ein Raster reduziert werden und für jede Kachel lediglich ein Höhenwert verwendet wird.

Weiterhin werden in dieser Arbeit Verschattungseffekte detailliert berücksichtigt. Für diese wird ein zeitlicher Rahmen festgelegt, welcher zwischen 10:00 Uhr und 14:00 Uhr über jeden einzelnen Tag im Jahr liegt. Damit soll gewährleistet werden, dass die Tageszeiten mit der maximalen Ausbeute im Betrachtungshorizont liegen. In den Wintermonaten verläuft der Sonnenstand für die Verschattungseffekte günstiger, daher ist die Wahrscheinlichkeit für vermehrte Verschattungen durch die niedrigere Sonnenhöhe höher.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse der vorliegenden Forschungsarbeit vor dem Hintergrund der drei Potentialstudien vom LANUV, Fath und Eggers et al. erläutert [17, 36, 221]. Zudem wurden einige Limitationen der Methodik und die Ergebnisse diskutiert. Es wurde hervorgehoben, dass die Ergebnisse sich von den bestehenden Potentialstudien unterscheiden und durchaus neuere Erkenntnisse zulassen. Die mögliche installierbare Modulfläche beträgt nach der Analyse dieser Forschungsarbeit 432,97 km² und ist um 22,68 % geringer als das LANUV-Ergebnis. Der mögliche Stromertrag beläuft sich nach Durchführung der Analyse auf einen Wert von 51,38 TWh/a und ist um 24,88 % reduziert im Vergleich zum LANUV-Ergebnis. Die totale Reduktion der verfügbaren Dachflächen in der vorliegenden Forschungsarbeit unterscheidet sich deutlich von den Ergebnissen bei Eggers et al. [221]. Insgesamt bieten die ermittelten Ergebnisse mehr Einsicht in Bezug auf den Einfluss von Verschattungseffekten und Dachaufbauten auf das PV-Potential. Mit fortschreitendem technologischen Fortschritt werden in Zukunft mehr Parameter akkurater eingebunden werden können, die zu besseren und realistischeren Prognosen führen. Diese Technologien umfassen Sensorik, Datenverarbeitung und Algorithmik.

10 Fazit und Ausblick

In dieser Forschungsarbeit wurde extensiv an der Untersuchung von physikalischen Faktoren geforscht, die eine Verminderung des PV-Dachflächenpotentials verursachen. In diesem Kontext lag der Fokus besonders auf der Verminderung der potentiellen Modulflächen durch Verschattung und Dachaufbauten. Zu Beginn wurden alle Grundlagen der Schattenentstehung beschrieben sowie die mathematischen Prinzipien erläutert, die bei der Berechnung von Relevanz sind. Weiterhin wurden die Faktoren enumeriert, welche einen Einfluss auf das letztendlich generierbare Potential haben. Hierbei ist wichtig zu beachten, dass einige Faktoren, beispielsweise Dachlastreserven oder Verschattung durch Schneefall, bedingt durch fehlende Daten nicht bestimmt werden konnten. Wie groß ihr Effekt schlussendlich auf die Verminderung der PV-Leistung ist, lässt sich somit nicht eindeutig quantifizieren. In Zukunft könnte die Verbesserung von Sensortechnik bei der Datengenerierung der dreidimensionalen Oberflächenmodelle helfen, einige Limitationen der Forschungsarbeit zu umgehen, wie beispielsweise die Lokalisation von feineren Dachaufbauten, Lichtmasten oder Ampeln. Weiterhin könnte die Bereitstellung und Veröffentlichung von zusätzlichen Attributen beim Gebäudebestand eingesetzt werden, um fehlende Faktoren einzubeziehen, die eine Hinderung für die PV-Dachinstallation darstellen. Ein bedeutendes Beispiel hierfür wären Angaben zu Dachlastreserven der einzelnen Gebäude. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit sind keine Bestrebungen bekannt, die ein solches Vorgehen in Zukunft umsetzen wollen.

Weiterhin soll im Hinblick auf den Abschluss der Forschungsarbeit auf die Forschungsfragen aus Kapitel 1 eingegangen werden und abschließende Antworten gegeben werden. Diese wurden im Detail bereits in den vorangegangenen Kapiteln beantwortet, sollen an dieser Stelle zusammenfassend erneut aufgegriffen werden:

- 1. Welche PV-Potentialstudien gibt es bereits im deutschsprachigen Raum und im Besonderen für das Land NRW? Welche Techniken werden für die Ermittlung genutzt und welche Potentiale postuliert?**

Die Forschungslandschaft im Allgemeinen bezogen auf Solarpotential-Studien und im Speziellen auf PV-Potentialstudien im deutschsprachigen Raum ist vielfältig aufgestellt. In diesem Kontext liegen unterschiedliche Formate und Methodiken vor. Einige führen statistische Auswertungen auf Basis der Gebäudebestände durch. Wiederum andere fokussieren die Nutzung von Prozessen zur Geoinformationsverarbeitung mit entsprechenden Daten, um über geografisch referenzierte Daten genauere Erkenntnisse zu erlangen und die spezifischen Situationen in den Untersuchungsregionen mit einzubeziehen. Vorzufinden sind drei Potentialstudien, die dabei Potentiale für das Bundesland NRW vorlegen. Diese Werte wurden innerhalb dieser Forschungsarbeit mit den eigenen Simulationsergebnissen verglichen und interpretiert. Dabei lag der Fokus auf dem Vergleich mit den Ergebnissen vom LANUV, da diese Potentialstudie explizit das Landesgebiet NRW untersucht hat.

2. Wie können standardisierte, vorhandene Daten effizient genutzt werden, um ein verwendbares Gebäudemodell mit möglichst zahlreichen relevanten Details zu generieren?

Die 3D-Messdaten in Form von Punktwolken, welche vom Land NRW über OpenNRW und GeoportalNRW bereitgestellt werden, können als Basis genutzt werden, um über planare Polygonrekonstruktion [148] ein effizientes Gebäudemodell zu erstellen. Dieses hat im Gegensatz zu den LoD2 Gebäudemodellen keine standardisierten Dachformen, sondern orientiert sich an den originalen Neigungen der Dächer und beinhaltet ebenso Dachaufbauten. Zudem ist es möglich über Algorithmen, welche die Verteilung der Punktwolken analysieren, ebenfalls Dachfenster zu identifizieren. Um das erweiterte Gebäudemodell schlussendlich zu erstellen, mussten die Informationen der 3D-Gebäudemodelle, welche bereitgestellt werden, einbezogen werden. Das liegt darin begründet, dass die Laserscanner, welche für die Erstellung der Punktwolken verwendet werden, beim Überfliegen aus einem bestimmten Winkel die Oberfläche aufnehmen und somit die dahinter liegenden Wände ggf. nicht abscannen. Letztendlich ist es möglich ein simples polygonales Gebäudemodell zu erstellen, welches für die Verschattungsanalyse genutzt werden kann.

3. Welche Parameter sind auf Basis aktueller Datenbestände sinnvoll in die Kalkulation einzubeziehen?

Der aktuelle Datenbestand umfasst, in Bezug auf die Zuverlässigkeit, demografische Daten und Daten der Kategorie „Geobasis“. Weiterhin sind open-source Datensätze zum Denkmalbestand verfügbar, die ebenfalls genutzt wurden. Mit den Geobasisdaten und den Informationen, die sich daraus ableiten lassen, können Verschattungen durch andere Gebäude (G2G), Bäume (B2G) oder Dachaufbauten (E2G) ermittelt werden. Der Denkmalstatus eines Gebäudes wurde berücksichtigt, da solche Gebäude grundsätzlich aus rechtlichen (und ggf. bautechnischen Gründen) nicht für die Anbringung von PV-Anlagen auf den Dächern geeignet sind. In der Kategorie der Geobasisdaten finden sich die Gebäudemodelle, welche ebenfalls die Nutzart bzw. Funktion eines Gebäudes beinhalten. Diese werden genutzt, um die ermittelten Effekte ebenso im Kontext der Gebäudefunktion zu betrachten und statistisch zu analysieren.

4. Welche Kreise weisen den besten Wert hinsichtlich von tatsächlich nutzbaren Dachflächen auf?

Die Kreise, welche das beste Ergebnis aller nutzbaren, kumulierten Dachflächen bezüglich der definierten Spezifikationen (schattenfrei während der Zeiten 10:00 Uhr bis 14:00 Uhr, Dachflächen größer als 7 m²) vorweisen, sind in absteigender Reihenfolge:

- Rhein-Erft Kreis: 14,97 km²
- Borken: 14,71 km²
- Köln: 14,63 km²
- Rhein-Sieg Kreis: 13,42 km²
- Wesel: 13,33 km²

Hierbei sind die Daten auf Basis der absolut nutzbaren Dachflächen ermittelt worden. Es ist trivial, dass Kreise, die insgesamt mehr Gebäude besitzen, tendenziell größere Flächen vorweisen.

5. Welche Kreise weisen den schlechtesten Wert hinsichtlich von tatsächlich nutzbaren Dachflächen auf?

Bezüglich aller nutzbaren, kumulierten Dachflächen schneiden die folgenden Kreise am schlechtesten ab. Hierbei gelten wieder dieselben Spezifikationen wie bei der vierten Forschungsfrage. Die Kreise in aufsteigender Reihenfolge der Dachflächen sind:

- Mülheim an der Ruhr: 1,96 km²
- Bottrop: 2,37 km²
- Remscheid: 2,67 km²
- Leverkusen: 2,93 km²
- Oberhausen: 3,19 km²

In Anlehnung zu den besten fünf Kreisen liegt hier ebenfalls ein Zusammenhang zwischen der Gebäudeanzahl und der potentiellen Flächen vor.

6. Wie hoch ist das realisierbare Potential in NRW in Anbetracht der extrahierten Untersuchungsparameter aus der zweiten Forschungsfrage und wie stark wirken sich diese jeweils auf die Reduktion des Dachflächenpotentials aus?

Insgesamt ergibt sich laut aktuellem Stand der Potentialanalyse aus dieser Forschungsarbeit eine total installierbare Modulfläche von 432,97 km² in NRW. Diese teilt sich in 38,80 km² für den Regierungsbezirk Arnsberg, 65,41 km² für den Bezirk Detmold, 70,46 km² im Bezirk Düsseldorf, 103,22 km² für Köln, 54,94 km² in Münster und 100,12 km² in der Planungsregion des Regionalverbands Ruhr auf.

Der im Rahmen dieser Forschungsarbeit ermittelte Stromertrag für die Dachflächen-PV liegt bei ca. 51,38 TWh pro Jahr für das gesamte Landesgebiet von NRW. Dieser Wert weicht um 24,88 % von dem LANUV-Ergebnis ab. Zwei zentrale Hinderungsgründe haben sich auf die Verringerung des Dachflächenpotentials ausgewirkt: die Verschattung und die Dachaufbauten. Die Verschattungseffekte führten zu einer Reduktion der anfänglich vorhandenen Dachflächen von 1.250 km² auf 747 km². Dies entspricht einer Verringerung um 40,24 %. Die weitere Subtraktion der Dachaufbauten liefert ein Ergebnis von 633 km², sodass ein Anteil von 50,64 % von den ursprünglichen Dachflächen übrig bleiben. Die Berücksichtigung der Modulbelegung mit einer Mindestgröße von 7 m² der Dachflächen für eine wirtschaftliche Nutzung führten zu weiterer Reduktion, welche in einem Gesamtergebnis von 432,97 km² münden. Dieser Wert weicht ebenfalls vom LANUV-Ergebnis ab und stellt eine Reduktion um 22,68 % dar. Der Korrekturfaktor, welcher anhand weniger Stichproben ermittelt worden ist und eine bis zu 10 % höhere Modulbelegung ermittelt hat, könnte eine höhere Energieausbeute implizieren. Dennoch wird das reale

PV-Dachflächenpotential mit hoher Wahrscheinlichkeit niedriger als der ermittelte Wert (ausgehend vom aktuellen Gebäudebestand) sein. Dies liegt darin begründet, dass viele relevante Faktoren aufgrund von Datenmangel (beispielsweise sozio-ökonomische Faktoren, Informationen zur Gebäudestatik oder zum Denkmalschutz) noch nicht eingebunden werden konnten oder nach aktuellem Wissensstand nicht quantifizierbar und determinierbar sind. Ebenfalls anzuführen sind die relativ unscharfen LiDAR-Scandaten, welche bei höherer Auflösung signifikantere Ergebnisse gewährleisten könnten. Es bleibt vor diesem Hintergrund kritisch zu hinterfragen, ob mit dem steigenden Energiebedarf das nutzbare Potential in NRW ausreicht, um einen signifikanten Teil der Energieversorgung durch Photovoltaik zu decken und somit eine wesentliche Säule der Energiewende zu bilden.

Die Analyse der Verschattungsursachen lieferte zudem die Erkenntnis, dass die Eigenverschattung (E2G) den größten Anteil an der Verschattung von Dachflächen vorweist, mit einem Durchschnittswert von 57,78 % für alle Kreise in NRW (nicht pro Dach). Der Verschattungsfaktor Gebäude-zu-Gebäude (G2G) belegt den zweiten Platz mit einem Durchschnittswert von 32,80 %, gefolgt von der Verschattung durch Bäume (B2G) mit einem Wert von 9,41 % (vgl. Tabelle 8.6).

7. Welche zukünftigen Forschungsfragen ergeben sich aus dieser Arbeit und welche Methodiken und Daten könnten zu genaueren Ergebnissen beitragen?

Für zukünftige Forschungsvorhaben sollten neue Möglichkeiten der Energieerzeugung und -speicherung fokussiert werden. Die Entwicklung weiterer Materialien mit besseren Wirkungsgraden und neuer Technologien, um eine effizientere Konvertierung der Sonnenenergie zu realisieren, sind ebenso von hoher Bedeutung. Allerdings wird stets ein theoretisches Maximum vorhanden sein, welches nicht für die Energiegewinnung überschritten werden kann. Auf der anderen Seite besteht ein Trend, wie in Kapitel 1 und 2 angeschnitten, zur weiteren Bebauung. Dies impliziert prinzipiell weitere Potentialflächen für PV-Dachanlagen und ebenso potentielle PV-Fassadeninstallationen. In Abhängigkeit davon, wie sich die Situation in den nächsten Jahrzehnten entwickelt, kann aufgrund von vermehrt verfügbaren Flächen, ein höheres Potential erreicht werden. In diesem Kontext bleibt allerdings im Hinblick auf das Erreichen der Klimaziele für 2050 die Frage offen, ob der Prozess „mehr Bebauung“ schnell genug ablaufen kann, da rechtliche und bautechnische Limitationen vorhanden sind (Planung und Bau von neuen Gebäuden erstreckt sich im Allgemeinen über mehrere Jahre für jedes einzelne Gebäude, auch bei kleinen Einfamilienhäusern). Zudem bleibt kritisch zu hinterfragen, ob und wann der CO₂ Ausstoß, welcher mit einer steigenden Bebauungsrate einhergeht, sinnvoll durch erneuerbare Energien, insbesondere durch die PV-Dachanlagen, kompensiert werden kann.

Die Grundlage weiterer Forschungsvorhaben bildet die Verfügbarkeit von zusätzlichen Daten. Die Verwendung von open-source Daten ist vorteilhaft, da eine effizientere Einbindung dieser ermöglicht wird. Zu diesen zählen u.a. Daten zum Denkmalschutz und zur Tragfähigkeit von Dächern, insbesondere bei Industriegebäuden. Des Weiteren wäre ein Baum- und Laternenkataster von Vorteil zur effizienten Modellierung und Untersuchung

von Verschattungseffekten. In dieser Arbeit fanden sozio-ökonomische Daten keine Berücksichtigung. Zu diesen zählen u.a. Faktoren wie das Alter der Mieter/Hauseigentümer, deren Einkommen oder der Anreiz der Eigenversorgung aufgrund steigender Energiekosten. Sinkende Einspeisevergütung und die damit einhergehende längere Amortisationsdauer spielen eine wesentliche Rolle bei der Entscheidungsfindung zur Anbringung einer PV-Dachanlage.

Bei weiterhin fehlenden oder unzugänglichen Daten sind zur Analyse verbesserte Methodiken für zukünftige Forschungsvorhaben von besonderer Bedeutung. Dahingehend können genauere 3D-Algorithmen zur Rekonstruktion von Gebäuden entwickelt und verwendet werden, welche feinere Strukturen wie beispielsweise Antennen erkennen und rekonstruieren können. Weiterhin könnte zur Steigerung der Effizienz ein neuronales Netzwerk entwickelt und dahingehend trainiert werden, dass aus den Analysen der vorliegenden Forschungsarbeit Rückschlüsse auf weitere Modellregionen gezogen werden können. Schlüsselparameter bei der Rekonstruktion eines Gebäudes und dessen Umgebungsparameter könnten dem neuronalen Netzwerk antrainiert werden, sodass bei gleichen Rahmenbedingungen ein Gebäude oder beispielsweise ein gesamter Stadtteil in Berlin unter Umständen nicht rekonstruiert werden muss und die Ergebnisse dynamisch ausgegeben werden können. In diesem Kontext wären beispielsweise Live-Analysen von Standorten möglich. Einbezogen werden könnten in diese Live-Analysen ebenfalls die Wetterdaten, welche in einer 15-minütigen Auflösung verfügbar sind.

Das Zusammentragen der genannten Daten und Methodiken würde aus Sicht der Energieversorger im Hinblick auf die Energiewende einen interessanten Analysehorizont ermöglichen. Für Netzplaner in urbanen Gebieten wäre es von Vorteil eine realistische Wahrscheinlichkeit zur Nutzung von PV-Dachflächenanlagen zu ermitteln, um zukünftige Be- und Entlastungen der Netze steuern und überwachen zu können. Anreize zur Installation von Anlagen könnten somit zielorientierter an die Bewohner von Wohnhäusern mit besonders hohem Potential gerichtet werden. Mieterstrom für Bewohner von Mehrfamilienhäusern oder das Laden des eigenen Elektro-Autos für Eigenheimbesitzer könnten dahingehend stärker in den Vordergrund rücken und gezielt gefördert werden. Diese Anstrengungen sind dringend notwendig, um das Ziel der Energiewende noch erreichen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Umwelt Bundesamt. *Treibhausgasminderungsziele Deutschlands*. 9. Feb. 2022. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#internationale-vereinbarungen-weisen-den-weg> (besucht am 01.03.2022).
- [2] Ausfelder et al. (Hrsg.) *Sektorkopplung - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft*. München, 2017. ISBN: 978-3-9817048-9-1.
- [3] Bundesregierung. *Klimaschutz - CO2-Emissionen 2019 deutlich gesunken*. 17. März 2020. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/bilanz-umweltbundesamt-1730880> (besucht am 16.06.2021).
- [4] Die Bundesregierung. *Deutschland bleibt im Klimaschutz auf Kurs*. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/klimaschutzziel-2020-erreicht-1876954> (besucht am 20.03.2021).
- [5] Umwelt Bundesamt. *Projektionsbericht 2021 für Deutschland*. 13. Okt. 2021. URL: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht_2021_bf.pdf (besucht am 01.11.2021).
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Energieprognosen und -szenarien*. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energieprognosen.html> (besucht am 12.10.2021).
- [7] esri. *ArcGIS Pro - The world's leading GIS software*. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview> (besucht am 2021).
- [8] esri ArcGIS Online. *Use Development Impact Analysis*. URL: <https://doc.arcgis.com/en/arcgis-solutions/latest/reference/use-development-impact-analysis.htm> (besucht am 17.10.2021).
- [9] esri ArcGIS Pro 2.8. *Sun Shadow Volume (3D Analyst)*. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/sun-shadow-volume.htm> (besucht am 17.10.2021).
- [10] Drury B. Crawley u. a. "EnergyPlus: Energy Simulation Program". In: *ASHRAE Journal* 42 (2000), S. 49–56.
- [11] Jianming Liang. *SURSUN3D Github Repository*. URL: <https://github.com/ljm355/SURSUN3D> (besucht am 17.10.2021).
- [12] Jianming Liang u. a. "An open-source 3D solar radiation model integrated with a 3D Geographic Information System". In: *Environmental Modelling & Software* 64 (2015), S. 94–101. ISSN: 1364-8152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.019>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815214003454>.

- [13] GRASS Development Team. *Geographic Resources Analysis Support System Software, Version 7.2*. Open Source Geospatial Foundation. 2017. URL: <http://grass.osgeo.org> (besucht am 17.10.2021).
- [14] QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. 2009. URL: <http://qgis.osgeo.org> (besucht am 17.10.2021).
- [15] Michael Dorman. *R shadow package Github repository*. URL: <https://github.com/michaeldorman/shadow/> (besucht am 04.12.2021).
- [16] Tyler Morgan-Wall. *rayshader package official webpage*. URL: <https://www.rayshader.com/> (besucht am 04.12.2021).
- [17] Georg Ludes, Björn Siebers und Thorsten Stock. “Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW - Teil 2 - Solarenergie”. In: *LANUV-Fachbericht 40* (2013).
- [18] Volker Quaschning. *Renewable Energy and climate change*. Wiley, 2020.
- [19] M.C. Brito u. a. “Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data”. In: *Solar Energy* 86.1 (2012), S. 283–288. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.09.031>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11003574>.
- [20] Volker Quaschning. “Simulation der Abschattungsverluste bei solarelektrischen Systemen”. Diss. Berlin, Deutschland: Technische Universität TU Berlin, Sep. 1996. ISBN: 3-89574-191-4. URL: <https://www.volker-quaschning.de/downloads/abschattungsverluste.pdf>.
- [21] Ana Paula de Almeida Rocha, Ricardo C.L.F. Oliveira und Nathan Mendes. “Experimental validation and comparison of direct solar shading calculations within building energy simulation tools: Polygon clipping and pixel counting techniques”. In: *Solar Energy* 158 (2017), S. 462–473. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17308769>.
- [22] Umwelt Bundesamt. *Indikator: Energieverbrauch für Gebäude*. 24. Apr. 2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-energieverbrauch-fuer-gebaeude#die-wichtigsten-fakten> (besucht am 05.10.2021).
- [23] Harry Wirth. *Integrierte Photovoltaik – Flächen für die Energiewende. Positionspapier*. 2021. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/infomaterial/brochures/photovoltaik/21_dt_ISE_Flyer_Integrierte_PV_Positionspapier.pdf.
- [24] Trimble Inc. *SketchUp official website*. URL: <https://www.sketchup.com> (besucht am 17.10.2021).

-
- [25] Harry Wirth. *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. 2021. URL: <http://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>.
- [26] BMWi auf Basis AGEE. *Entwicklung der Stromerzeugung und der installierten Leistung von Photovoltaikanlagen*. 1. Sep. 2021. URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Textbausteine/Banner/banner_photovoltaik.html (besucht am 17.01.2022).
- [27] Julian Brandes u. a. *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen*, Freiburg, 2021. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>.
- [28] *Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften (EEG 2021)*. Dez. 2020. URL: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*/%5b@attr_id=%27bgbl120s3138.pdf%27%5d%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s3138.pdf%27%5D_1624966847941.
- [29] *Stromnetze für 65 Prozent Erneuerbare bis 2030. Zwölf Maßnahmen für den synchronen Ausbau von Netzen und Erneuerbaren Energien*. Juli 2018.
- [30] *BEE-Szenario 2030 - 65% Erneuerbare Energien bis 2030*. Mai 2019.
- [31] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. 1. Feb. 2022. URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2021.pdf;jsessionid=5D59125E1693412C7C2A158796A9A61F?__blob=publicationFile&v=35 (besucht am 01.03.2022).
- [32] Bundesnetzagentur. *Zahlen, Daten und Informationen zum EEG*. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/start.html (besucht am 06.10.2021).
- [33] “Prognos (2016): Eigenversorgung aus Solaranlagen. Das Potenzial für Photovoltaik-Speicher-Systeme in Ein- und Zweifamilienhäusern, Landwirtschaft sowie im Lebensmittelhandel”. In: *AGORA Energiewende* (2016). URL: https://www.agora-energiawende.de/fileadmin/Projekte/2016/Dezentralitaet/Agora_Eigenversorgung_PV_web-02.pdf.
- [34] Martin Kaltschmitt, Wolfgang Streicher und Andreas Wiese. *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 978-3-540-28204-4.

- [35] Martin Kaltschmitt, Wolfgang Streicher und Andreas Wiese. *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2020. ISBN: 978-3-662-61190-6. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61190-6>.
- [36] Karoline Fath. "Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings". In: *KITopen* (2018). DOI: <http://dx.doi.org/10.5445/KSP/1000081498>.
- [37] Volker Quaschning. *Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe – Techniken – Anlagenplanung – Wirtschaftlichkeit*. Düsseldorf, 2010.
- [38] Tobias Kelm u. a. *Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie*. 2019. URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.pdf?__blob=publicationFile&v=7 (besucht am 01. 10. 2019).
- [39] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Erneuerbare Energien in Zahlen*. Okt. 2020. URL: <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/erneuerbare-energien-in-zahlen-2019.pdf> (besucht am 06. 10. 2021).
- [40] *Gesetz zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien (EEG 2017)*. Juli 2017.
- [41] Volker Quaschning. *Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert*. Düsseldorf, 2000.
- [42] Martin Kaltschmitt, Wolfgang Streicher und Andreas Wiese. *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 1993.
- [43] Martin Kaltschmitt und Jürgen Neubarth. *Erneuerbare Energien in Österreich. Systemtechnik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Wien, 2000.
- [44] *Vorstudie zur Integration großer Anteile Photovoltaik in die elektrische Energieversorgung – Studie im Auftrag des BSW - Bundesverband Solarwirtschaft e.V. – ergänzte Fassung vom 29.05.2012*. zuletzt besucht am 2021-06-17. 2012. URL: https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/IWES_Netzintegration_lang.pdf.
- [45] *Regionalisierung der dezentralen Stromerzeugung im Netzentwicklungsplan 2025 - Methodik und Ergebnisse*. zuletzt besucht am 2021-06-17. 2015. URL: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/regionalisierungsmethodik_nep_2025.pdf.

-
- [46] BMVI. *Räumlich differenzierte Flächenpotenziale für erneuerbare Energien in Deutschland*. 2015. URL: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvi/bmvi-online/2015/BMVI_Online_08_15.html (besucht am 17.06.2021).
- [47] Anneliese Kapfenberger-Pock. *Technischer Bericht Solardachkataster Graz*. 2013. URL: https://www.graz.at/cms/dokumente/10295935_7536053/ac3d8439/SOLAR_INFO_aktuell.pdf.
- [48] Niccolò Moro u. a. “Das Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern - Eine Analyse anhand von Sonnendach.ch”. In: *Schriftenreihe Erneuerbare Energien, Bodenökologie, Ökobilanzierung, Ökotechnologie und Aquakultur* (2021). URL: <https://doi.org/10.21256/zhaw-2652>.
- [49] DESTATIS Statistisches Bundesamt. *Tabelle Wohngebäude, Wohnungen, Wohnfläche: Deutschland, Stichtag, Anzahl der Wohnungen*. URL: <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=31231-0001&bypass=true&levelindex=0&levelid=1643123171552#abreadcrumb> (besucht am 17.06.2021).
- [50] Michael Metzger u. a. “Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland”. In: *11. Symposium Energieinnovation „Alte Ziele – Neue Wege“* (Jan. 2010).
- [51] Jörg Scheffler. “Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten”. Diss. Chemnitz, Germany: Technische Universität Chemnitz, Nov. 2002. ISBN: 9789461868008. DOI: 10.4233/uuid:f12931b7-5113-47ef-bfd4-688aae3be248.
- [52] *Fachserie 5 Heft 1 Gebäude und Grundstücke - Struktur und Nutzung*. Wiesbaden, 1995.
- [53] K. Ahner. “Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen Bebauungsstruktur und verkehrlicher Erschließung in Umgestaltungsgebieten”. Diss. Weimar, 1986.
- [54] K. Duwendag. “Die Aachener Wohnsiedlungsgebiete seit dem Zweiten Weltkrieg”. Diss. Aachen, 1985.
- [55] W. Reinhardt und H. Trudel. *Wohndichte und Bebauungsformen*. Stuttgart, 1979.
- [56] W. Müller und M. Korda. *Städtebau*. Stuttgart, 1999.
- [57] M Kleemann und M Meliß. *Regenerative Energiequellen*. Berlin, 1993.
- [58] Frithjof Staiß. *Photovoltaik*. Wiesbaden, 1996.
- [59] I. Pontenagel. *Das Potential erneuerbarer Energien in der Europäischen Union*. Berlin, 1995.
- [60] LANUV. *Download Daten und Hintergrundinformationen*. URL: https://www.energieatlas.nrw.de/site/service/download_daten (besucht am 16.01.2022).

- [61] LANUV. <https://www.energieatlas.nrw.de/site/werkzeuge/energiestatistik>. 2020. URL: <https://www.energieatlas.nrw.de/site/werkzeuge/energiestatistik> (besucht am 17. 10. 2021).
- [62] BauNetz Wissen. *Baugenehmigung für PV-Anlagen*. URL: <https://www.baunetzwissen.de/solar/fachwissen/solarstrom/baugenehmigung-fuer-pv-anlage-n-165788>.
- [63] Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft. “Montage und Instandhaltung von Photovoltaik-Anlagen”. In: *DGUV Information 203-080* (1. Apr. 2015). URL: https://www.bgbau.de/fileadmin/Medien-Objekte/Medien/DGUV-Informationen/203_080/203_080.pdf (besucht am 06. 10. 2021).
- [64] Filip Biljecki. “Level of detail in 3D city models”. Diss. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, Mai 2017. ISBN: 9789461868008. DOI: 10.4233/uuid:f12931b7-5113-47ef-bfd4-688aae3be248.
- [65] Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). *Produktstandard für 3D-Messdaten. Version 1.0*. 6. März 2020. URL: <https://www.adv-online.de/icc/exteng/binarywriterservlet?imgUid=16419114-249e-4711-1fea-f5203b36c4c2&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111> (besucht am 12. 10. 2021).
- [66] Bezirksregierung Köln. *3D-Messdaten Produktbeschreibung*. URL: https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoeihenmodelle/3d-messdaten/index.html (besucht am 12. 10. 2021).
- [67] Christian Märkel. *Photovoltaik und die verschiedenen Dacharten*. 20. Sep. 2021. URL: <https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/voraussetzung/dach> (besucht am 14. 06. 2021).
- [68] Joseph Bergner, Bernhard Siegel und Volker Quaschnig. *Hemmnisse und Hürden für die Photovoltaik*. Jan. 2020. URL: https://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2020_01-HTW_Berlin_PV2City_Hemmnisse_und_Huerden_fuer_die_Photovoltaik.pdf (besucht am 09. 08. 2021).
- [69] *Eine Frage der Statik: Trägt jedes Dach eine Photovoltaikanlage?* 7. Okt. 2016. URL: <https://elektro-plaggenborg.de/eine-frage-der-statik-traegt-jedes-dach-eine-photovoltaikanlage/> (besucht am 14. 06. 2021).
- [70] *Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003 + AC:2009*. Berlin.
- [71] Cedrik Zapfe. *Statische Anforderungen für Dach- und Freiflächenmontagen*. URL: <http://www.ing-zapfe.com/pdf/publikationen/Dr.\%20Zapfe-Statische\%20Anforderungen\%20f%C3%BCr\%20Dach-\%20und\%20Freiflaechenmontagen.pdf> (besucht am 01. 10. 2020).
- [72] Peter Schmidt. *Lastannahmen - Einwirkungen auf Tragwerke. Grundlagen und Anwendung nach EC 1*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.

-
- [73] DIN 1055-4:2005-03 Windlasten. URL: https://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/asib/normung/din1055_ch_260608.pdf (besucht am 08.10.2021).
- [74] Peter Schmidt. *Einwirkung auf Tragwerke - IV Windlasten*. URL: https://www.reguvis.de/fileadmin/BIV-Portal/Bautechnik_WKD/Schneider-Bautabellen/Ingenieure/LP_BTI_2014_03_024-047.pdf (besucht am 09.10.2021).
- [75] Bau und Gleichstellung des Landes Nordrhein-Westfalen Ministerium für Heimat Komunales. *Denkmalschutz und -pflege*. URL: <https://www.mhkgb.nrw/themen/bau/denkmalschutz/denkmalschutz-und-pflege> (besucht am 09.10.2021).
- [76] André Caffier (Leiter des IMA GDI.NRW) und Burkhard Schlegel (Leiter der Geschäftsstelle des IMA GDI.NRW). *GEOportal.NRW*. URL: <https://www.geoportal.nrw/> (besucht am 07.10.2021).
- [77] X2 Energy. *Brandschutz bei PV-Anlagen: Löscht die Feuerwehr im Brandfall mein Haus?* URL: <https://x2energy.de/ratgeber/fachwissen/photovoltaik-solaranlage/im-brandfall-loescht-die-feuerwehr-mein-haus-mit-photovoltaikanlage> (besucht am 08.10.2021).
- [78] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. *Photovoltaik und Brandschutz*. URL: <https://www.febs.de/planen-umsetzen/gebaeudetechnik/photovoltaik-und-brandschutz> (besucht am 22.06.2021).
- [79] Annett Sepanski u. a. *Leitfaden: Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaik-Anlagen und Erstellung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung*. URL: http://www.pv-brandsicherheit.de/fileadmin/downloads_fe/Leitfaden_Brandrisiko_in_PV-Anlagen_V02.pdf.
- [80] Land NRW. *Landesbauordnung*. URL: https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_bes_detail?sg=0&menu=0&bes_id=39224&anw_nr=2&aufgehoben=N&det_id=524053 (besucht am 01.03.2022).
- [81] John H. Reif, J. Doug Tygar und A. Yoshida. "Computability and complexity of ray tracing". In: *Discrete & Computational Geometry* 11 (1994), S. 265–288.
- [82] Bernadette Kreuzer. *Der Solardachkataster der Steiermark*. Okt. 2016. URL: https://www.technik.steiermark.at/cms/dokumente/12756734_99241573/67e8e63e/SDK-2016-Online-Kurzinfo-2016-10-20.pdf.
- [83] Varun Sivaram. *Taming the Sun - Innovations to Harness Solar Energy and Power the Planet*. MIT Press, 2018. ISBN: 9780262037686.
- [84] Daniel Klauser. *Solarpotentialanalyse für Sonnendach.ch - Schlussbericht*. 2016.
- [85] Volker Quaschnig und Rolf Hanitsch. "Irradiance calculation on shaded surfaces". In: *Solar Energy* 62.5 (1998), S. 369–375. ISSN: 0038-092X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00018-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X98000188>.

- [86] Stefan Roth und Achim Stahl. *Optik. Experimentalphysik - anschaulich erklärt*. Berlin: Springer Spektrum, 2019. ISBN: 978-3-662-59336-3. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59337-0>.
- [87] Klaus Lüders und Robert Otto Pohl. *Einführung in die Physik. Band 2: Elektrizitätslehre und Optik*. 23. Aufl. Wiesbaden: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN: 978-3-642-01627-1. DOI: 10.1007/978-3-642-01628-8.
- [88] URL: <https://www.leifiphysik.de/sites/default/files/images/fbcb4012600ac06c3f4c57622c1bf06f/992schatten-ausgedehnte-lichtquelle-beschriftet.webp> (besucht am 07. 10. 2021).
- [89] LEIFI Physik. *Lichtausbreitung - Versuche Schattenarten*. URL: <https://www.leifiphysik.de/optik/lichtausbreitung/versuche/schattenarten> (besucht am 08. 10. 2021).
- [90] Jean H. Meeus. *Astronomical Algorithms*. Willmann-Bell, Incorporated, 1991. ISBN: 0943396352.
- [91] *Tageslicht in Innenräumen - Teil 2: Grundlagen*. 2019. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/3257252> (besucht am 30. 01. 2020).
- [92] Robert Walraven. "Calculation the position of the sun". In: *Solar Energy* (1978), S. 393–397.
- [93] Joseph J. Michalsky. "The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050)". In: *Solar Energy* 40.3 (1988), S. 227–235. ISSN: 0038-092X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90045-X). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X8890045X>.
- [94] ArcGIS for denfense. *References*. URL: <https://solutions.arcgis.com/defense/help/sun-position-analysis/resources/references.htm> (besucht am 02. 01. 2022).
- [95] P.C. Grindley, W.J. Batty und S.D. Probert. "Mathematical model for predicting the magnitudes of total, diffuse, and direct-beam insolation". In: *Applied Energy* 52.2 (1995). Fifth Arab International Solar Energy Conference, S. 89–110. ISSN: 0306-2619. DOI: [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(95\)00065-Z](https://doi.org/10.1016/0306-2619(95)00065-Z). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030626199500065Z>.
- [96] Ibrahim Reda und Afshin Andreas. "Solar position algorithm for solar radiation applications". In: *Solar Energy* 76.5 (2004), S. 577–589. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0300450X>.
- [97] GRASS GIS Documentation. *r.sunhours - Calculates solar elevation, solar azimuth, and sun hours*. URL: <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.sunhours.html> (besucht am 07. 10. 2021).

-
- [98] Jianming Liang u. a. “Solar3D: An Open-Source Tool for Estimating Solar Radiation in Urban Environments”. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9.9 (2020). ISSN: 2220-9964. DOI: 10.3390/ijgi9090524. URL: <https://www.mdpi.com/2220-9964/9/9/524>.
- [99] Philippe Blanc und Lucien Wald. “The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period”. In: *Solar Energy* 86 (Aug. 2012), S. 3072–3083. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.018.
- [100] Thomas Lung. “Prognose von Verschattungen im Umfeld komplexer Bebauung”. In: *Bauphysik* 37.5 (2015), S. 268–272. DOI: <https://doi.org/10.1002/bapi.201510029>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/bapi.201510029>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bapi.201510029>.
- [101] Richard Perez u. a. “Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance”. In: *Solar Energy* 44.5 (1990), S. 271–289. ISSN: 0038-092X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9090055H>.
- [102] Die Landesregierung Nordrhein-Westfalen. *Open.NRW*. URL: <https://open.nrw/> (besucht am 21.01.2022).
- [103] für Bau und Heimat Bundesministerium des Innern. *In Deutschland wird so viel gebaut wie seit 20 Jahren nicht mehr*. URL: <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/kurzmeldungen/DE/2021/05/zahl-der-fertigen-wohnungen-gestiegen.html> (besucht am 07.10.2021).
- [104] DESTATIS Statistisches Bundesamt. *Stadtbevölkerung steigt bis 2030 weltweit um 700 Millionen Menschen*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/bevoelkerung-arbeit-soziales/bevoelkerung/Stadtbevoelkerung.html> (besucht am 07.10.2021).
- [105] *Tageslicht in Innenräumen - Teil 1: Begriffe und Mindestanforderungen*. 2021. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/3257247>.
- [106] Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen. *Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (Landesbauordnung 2018 – BauO NRW 2018)*. 21. Juli 2018. URL: https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_text_anzeigen?v_id=74820170630142752068 (besucht am 07.10.2021).
- [107] Sandeep Gupta. “Single Tree Detection and Modeling Using Airborne Laser Scanner Data”. Diss. Freiburg im Breisgau, Deutschland: Albert-Ludwigs-Universität, Dez. 2010. URL: <https://d-nb.info/1009602349/34> (besucht am 07.10.2021).
- [108] Zhizhong Kang u. a. “Voxel-Based Extraction and Classification of 3-D Pole-Like Objects From Mobile LiDAR Point Cloud Data”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11.11 (2018), S. 4287–4298. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2869801.

- [109] Beril Sirmacek und Roderik Lindenbergh. “Automatic classification of trees from laser scanning point clouds”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II-3/W5 (Aug. 2015), S. 137–144. DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-137-2015.
- [110] Dr. David R. Williams. *Earth Fact Sheet*. 21. Dez. 2021. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html> (besucht am 12.01.2022).
- [111] Claire L. Stevenson und Philip W. Suckling. “A computer algorithm for calculating shadow amounts on flat urban rooftops”. In: *Solar Energy* 32.1 (1984), S. 145–147. ISSN: 0038-092X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90059-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90059-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X84900598>.
- [112] Ana Paula de Almeida Rocha, Ricardo C.L.F. Oliveira und Nathan Mendes. “Experimental validation and comparison of direct solar shading calculations within building energy simulation tools: Polygon clipping and pixel counting techniques”. In: *Solar Energy* 158 (2017), S. 462–473. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17308769>.
- [113] Ana Paula de Almeida Rocha u. a. “A pixel counting technique for sun patch assessment within building enclosures”. In: *Solar Energy* 184 (2019), S. 173–186. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.081>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19303093>.
- [114] Lance Williams. “Casting Curved Shadows on Curved Surfaces”. In: *Proceedings of the 5th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH ’78. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1978, 270–274. ISBN: 9781450379083. DOI: 10.1145/800248.807402. URL: <https://doi.org/10.1145/800248.807402>.
- [115] Tessman T. *Casting shadows on flat surfaces*. 1989.
- [116] Paul S. Heckbert und M. Herf. “Simulating Soft Shadows with Graphics Hardware”. In: *Michael Herf and Paul S. Heckbert, FastSoft Shadows, Visual Proceedings, SIGGRAPH 96, Aug. 1996, p. 145* (1997).
- [117] Arno Smets u. a. *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*. English. UIT Cambridge Limited, 2016. ISBN: 978-1-906860-32-5.
- [118] Rüdiger Glaser u. a. *Physische Geographie*. Springer, 2016. ISBN: 978-3-662-50461-1.
- [119] Deutscher Wetterdienst. *Strahlung - Solarenergie*. URL: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/solarenergie.html> (besucht am 07.10.2021).
- [120] URL: <https://pvlpy-python.readthedocs.io/en/stable/index.htm> (besucht am 07.10.2021).

-
- [121] Brian Goss u. a. "Irradiance modelling for individual cells of shaded solar photovoltaic arrays". In: *Solar Energy* 110 (2014), S. 410–419. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.037>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14004770>.
- [122] Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen. *Open Data*. URL: <https://www.im.nrw/themen/vermessung/open-data> (besucht am 31.10.2021).
- [123] Ulrike Schulz-Rostock, Matthias Stolz und Breitband und Vermessung Landesamt für Digitalisierung. URL: https://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/1269/Preisliste_aktuell.pdf (besucht am 30.11.2021).
- [124] Bezirksregierung Köln. *3D-Messdaten*. URL: https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoeihenmodelle/3d-messdaten/index.html (besucht am 17.10.2021).
- [125] Pinliang Dong und Qi Chen. *LiDAR Remote Sensing and Applications*. Boca Raton: CRC, 2017, S. 220. ISBN: 9781351233354. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781351233354>.
- [126] *Nutzerinformationen für die 3D-Messdaten aus dem Laserscanning für NRW*. Feb. 2020. URL: https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoeihenmodelle/nutzerinformationen.pdf.
- [127] Paul McManamon. *LiDAR Technologies and Systems*. Bellingham: SPIE, 2019, S. 523. ISBN: 9781510625396.
- [128] W. Linder. *Geo-Informationssysteme. Ein Studien- und Arbeitsbuch*. 1. Aufl. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999, S. IX, 170. ISBN: 978-3-642-58465-7. DOI: 10.1007/978-3-642-58465-7.
- [129] *LAS Specification Version 1.2*. 2008. URL: https://www.asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v12.pdf.
- [130] Bezirksregierung Köln. *Normalisiertes Digitales Oberflächenmodell*. URL: https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoeihenmodelle/digitale_oberflaechenmodelle/normalisiertes_digitales_oberflaechenmodell/index.html (besucht am 31.10.2021).
- [131] Zhilin Li, Christopher Zhu und Chris Gold. *Digital Terrain Modeling. Principles and Methodology*. 1. Aufl. Boca Raton: CRC Press, 2005, S. 323. ISBN: 978-0429205071. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203357132>.
- [132] URL: <https://www.earthdatascience.org/courses/use-data-open-source-python/intro-raster-data-python/fundamentals-raster-data/open-lidar-raster-python-xarray/> (besucht am 07.10.2021).
- [133] Gerhard Gröger u. a. *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. 2012. URL: www.opengis.net/spec/citygml/2.0.

- [134] Hugo Ledoux und Balázs Dukai. *CityJSON Specifications 1.1.0*. URL: <https://www.cityjson.org/specs/1.1.0/> (besucht am 03.12.2021).
- [135] citygml4j. *GitHub Repository zu citygml-tools*. URL: <https://github.com/citygml4j/citygml-tools> (besucht am 16.01.2022).
- [136] AdV, Sandra Schlueter und Ulrich Gruber. *GitHub Repository zu citygml-tools*. 25. Feb. 2010. URL: <http://repository.gdi-de.org/schemas/adv/citygml/Codelisten/RoofTypeTypeAdV.xml> (besucht am 16.01.2022).
- [137] AdV, Sandra Schlueter und Ulrich Gruber. *GitHub Repository zu citygml-tools*. 16. März 2020. URL: <http://repository.gdi-de.org/schemas/adv/citygml/Codelisten/BuildingFunctionTypeAdV.xml> (besucht am 16.01.2022).
- [138] *Denkmalförderprogramm 2021 gemeinsam das historisch-kulturelle Erbe Nordrhein-Westfalens bewahren*. Mai 2020. URL: https://www.bezreg-detmold.nrw.de/system/files/media/document/file/3.35_Programmaufruf-Denkmalfoerderung-Land-NRW-2021.pdf (besucht am 15.06.2020).
- [139] *Unterstützung für Denkmäler in Nordrhein-Westfalen. Finanzielle Förderung, Darlehen und Steuererleichterungen*. 2019. URL: https://www.mhkgb.nrw/sites/default/files/media/document/file/Broschuere_Foerderung_von_Baudenkmalen.pdf (besucht am 15.01.2020).
- [140] Bau und Gleichstellung des Landes Nordrhein-Westfalen Ministerium für Heimat Kommunales. *Denkmäler digital erfassen*. URL: <https://www.mhkgb.nrw/themen/bau/denkmalerschutz/denkmalnrw-denkmaeler-digital-erfassen> (besucht am 12.04.2021).
- [141] Deutscher Wetterdienst. *Wetter und Klima aus einer Hand*. URL: <https://www.dwd.de> (besucht am 03.12.2021).
- [142] The CGAL Project. *CGAL User and Reference Manual*. 5.3. CGAL Editorial Board, 2021. URL: <https://doc.cgal.org/5.3/Manual/packages.html>.
- [143] J. Siek, L.Q. Lee und A. Lumsdaine. *The Boost Graph Library: User Guide and Reference Manual*. Addison-Wesley, 2002.
- [144] Boris Schäling. *The boost C++ libraries*. XML Press, 2014. ISBN: 9781937434366 1937434362.
- [145] Gerald Gamrath u. a. *The SCIP Optimization Suite 7.0*. Technical Report. Optimization Online, März 2020. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2020/03/7705.html.
- [146] et al. Botsch M. *Polygon mesh processing*. AK Peters, 2010. ISBN: 1568814267; 9781568814261.
- [147] David Stutz. *A Formal Definition of Watertight Meshes*. 24. Jan. 2018. URL: <http://davidstutz.de/a-formal-definition-of-watertight-meshes/> (besucht am 12.10.2021).

-
- [148] Liangliang Nan und Peter Wonka. “PolyFit: Polygonal Surface Reconstruction from Point Clouds”. In: *ICCV* (2017).
- [149] David Goldberg. “What Every Computer Scientist Should Know about Floating-Point Arithmetic”. In: *ACM Comput. Surv.* 23.1 (März 1991), 5–48. ISSN: 0360-0300. DOI: 10.1145/103162.103163. URL: <https://doi.org/10.1145/103162.103163>.
- [150] Statistische Ämter des Bundes und der Länder. *Fläche und Bevölkerung nach Ländern*. 28. Jan. 2020. URL: <https://www.statistikportal.de/de/bevoelkerung/flaeche-und-bevoelkerung> (besucht am 12.10.2021).
- [151] Information und Technik Nordrhein-Westfalen. *Waldfläche Nordrhein-Westfalens ist mehr als doppelt so groß wie Mallorca*. 11. Sep. 2020. URL: <https://www.it.nrw/node/100851/pdf> (besucht am 16.01.2022).
- [152] Martin Isenburg. *las2las official README*. URL: https://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/download/las2las_README.txt (besucht am 12.10.2021).
- [153] Martin Isenburg. *LAStools*. URL: <https://rapidlasso.com/lastools/> (besucht am 12.10.2021).
- [154] Martin Isenburg. *LAStools: award-winning software for rapid LiDAR processing*. URL: <https://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/> (besucht am 12.10.2021).
- [155] Martin Isenburg. *LAStools LICENSE AGREEMENT*. URL: <https://lastools.github.io/LICENSE.txt> (besucht am 12.10.2021).
- [156] PostgreSQL 13.0. *PostgreSQL 13.0*. 24. Sep. 2020. URL: <https://www.postgresql.org/> (besucht am 12.10.2021).
- [157] PostGIS 3.0.2. *PostGIS 3.0.2*. 24. Sep. 2020. URL: <https://postgis.net/docs/manual-3.0/> (besucht am 12.10.2021).
- [158] de By R.A. *Principles of Geographical Information Systems*. 2001. ISBN: 978-9061642008.
- [159] Wencheng Wang, Jing Li und Enhua Wu. “2D point-in-polygon test by classifying edges into layers”. In: *Computers & Graphics* 29.3 (2005), S. 427–439. ISSN: 0097-8493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2005.03.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849305000403>.
- [160] Eric Haines. *Point in Polygon Strategies*. 31. Juli 2001. URL: <https://erich.realtimerendering.com/ptinpoly/> (besucht am 12.10.2021).
- [161] PhD Daniel Sunday. *Practical Geometry Algorithms: With C++ Code*. Independently Published, 2021.

- [162] Hugues Hoppe u. a. “Surface Reconstruction from Unorganized Points”. In: *Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '92. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1992, 71–78. ISBN: 0897914791. DOI: 10.1145/133994.134011. URL: <https://doi.org/10.1145/133994.134011>.
- [163] Mariano M. Moscato u. a. “Provably Correct Floating-Point Implementation of a Point-in-Polygon Algorithm”. In: *Formal Methods – The Next 30 Years*. Hrsg. von Maurice H. ter Beek, Annabelle McIver und José N. Oliveira. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 21–37. ISBN: 978-3-030-30942-8.
- [164] Google Maps Platform. *Reverse geocoding (address lookup)*. URL: <https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/overview#ReverseGeocoding> (besucht am 15.10.2021).
- [165] Xiaobai A. Yao. “Georeferencing and Geocoding”. In: *International Encyclopedia of Human Geography (Second Edition)*. Hrsg. von Audrey Kobayashi. Second Edition. Oxford: Elsevier, 2020, S. 111–117. ISBN: 978-0-08-102296-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10548-7>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081022955105487>.
- [166] Google Maps Platform. *Geocoding API Usage and Billing*. URL: <https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/usage-and-billing> (besucht am 15.10.2021).
- [167] Sarah Hoffmann. *Nominatim - Open-source geocoding with OpenStreetMap data*. URL: <https://nominatim.org/> (besucht am 15.10.2021).
- [168] Josef Kallrath. *Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis: mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Papierindustrie, Metallgewerbe, Produktion und Logistik*. Wiesbaden: Springer Spektrum, 2013. ISBN: 978-3658006893658006897. URL: http://www.worldcat.org/search?qt=worldcat_org_all&q=9783658006891.
- [169] Liangliang Nan. “Polygonal Surface Reconstruction”. In: *CGAL User and Reference Manual*. 5.3. CGAL Editorial Board, 2021. URL: <https://doc.cgal.org/5.3/Manual/packages.html#PkgPolygonalSurfaceReconstruction>.
- [170] Martin A. Fischler und Robert C. Bolles. “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography”. In: *Commun. ACM* 24.6 (Juni 1981), 381–395. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/358669.358692. URL: <https://doi.org/10.1145/358669.358692>.
- [171] Liangliang Nan. *Official Github Repository of PolyFit*. URL: <https://github.com/LiangliangNan/PolyFit> (besucht am 15.10.2021).

-
- [172] Liangliang Nan. *Polygonal Surface Reconstruction Github, examples section for compilation*. URL: https://github.com/CGAL/cgal/tree/master/Polygonal_surface_reconstruction/examples/Polygonal_surface_reconstruction (besucht am 15.10.2021).
 - [173] Zhimin Xu, Li Zhang und Rui Ma. “An Algorithm to Generate Random Points in Polygon Based on Triangulation”. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 428 (Jan. 2020), S. 012064. DOI: 10.1088/1755-1315/428/1/012064. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/428/1/012064>.
 - [174] Robert Osada u. a. “Shape Distributions”. In: *ACM Trans. Graph.* 21.4 (Okt. 2002), 807–832. ISSN: 0730-0301. DOI: 10.1145/571647.571648. URL: <https://doi.org/10.1145/571647.571648>.
 - [175] Taisuke Hashimoto und Masaki Saito. *Normal Estimation for Accurate 3D Mesh Reconstruction with Point Cloud Model Incorporating Spatial Structure*. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPRW_2019/papers/DeepVisionWorkshop/Hashimoto_Normal_Estimation_for_Accurate_3D_Mesh_Reconstruction_with_Point_Cloud_CVPRW_2019_paper.pdf (besucht am 01.02.2020).
 - [176] Zhiqiang Yu u. a. “Robust point cloud normal estimation via neighborhood reconstruction”. In: *Advances in Mechanical Engineering* 11.4 (2019). DOI: 10.1177/1687814019836043. eprint: <https://doi.org/10.1177/1687814019836043>. URL: <https://doi.org/10.1177/1687814019836043>.
 - [177] URL: <https://github.com/hhoppe/Mesh-processing-library> (besucht am 15.10.2021).
 - [178] Ruwen Schnabel, Roland Wahl und Reinhard Klein. “Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection”. In: *Computer Graphics Forum* 26.2 (Juni 2007), S. 214–226.
 - [179] Thien Hoang u. a. *A brief overview of Generalized Region Growing*. URL: <https://www.tvhoang.com/articles/2018/08/grg-intro> (besucht am 15.10.2021).
 - [180] Haileleol Tibebu u. a. “LiDAR-Based Glass Detection for Improved Occupancy Grid Mapping”. In: *Sensors* 21.7 (2021). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21072263. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/7/2263>.
 - [181] Van Sinh Nguyen, Trong Hai Trinh und Manh Ha Tran. “Hole Boundary Detection of a Surface of 3D Point Clouds”. In: *2015 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP)*. 2015, S. 124–129. DOI: 10.1109/ACOMP.2015.12.
 - [182] Subhasree Methirumangalath u. a. “Hole detection in a planar point set: An empty disk approach”. In: *Comput. Graph.* 66 (2017), S. 124–134. DOI: 10.1016/j.cag.2017.05.006. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.05.006>.

- [183] Gerhard H. Bendels, Ruwen Schnabel und Reinhard Klein. “Detecting Holes in Point Set Surfaces”. In: *Journal of WSCG* 14 (Feb. 2006). Hrsg. von V. Skala. ISSN: 1213-6972.
- [184] *Baumkataster Koeln*. 15. Juni 2020. URL: <https://open.nrw/dataset/baumkataster-koeln-k> (besucht am 13.10.2021).
- [185] *Digitales Baumkataster Münster*. 7. Okt. 2020. URL: <https://open.nrw/dataset/digitales-baumkataster-muenster-ms> (besucht am 13.10.2021).
- [186] Beril Sirmacek und Roderik Lindenbergh. “AUTOMATIC CLASSIFICATION OF TREES FROM LASER SCANNING POINT CLOUDS”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II-3/W5 (Aug. 2015), S. 137–144. DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-137-2015.
- [187] Lessie M. Ortega Córdova. “Urban Vegetation Modeling 3D Levels of Detail”. TU Delft, 2018. URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid/%3A8b8967a8-0a0f-498f-9d37-71c6c3e532af> (besucht am 13.10.2021).
- [188] Geert Jan (Rob) de Groot. “Automatic construction of 3D tree models in multiple levels of detail from airborne LiDAR data”. Magisterarb. Delft, the Netherlands: TU Delft, 2020.
- [189] Guangpeng Fan u. a. “A New Quantitative Approach to Tree Attributes Estimation Based on LiDAR Point Clouds”. In: *Remote Sensing* 12.11 (2020). ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs12111779. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/11/1779>.
- [190] Matti Maltamo, Erik Næsset und Jari Vauhkonen. *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies*. Jan. 2014. ISBN: 978-94-017-8662-1. DOI: 10.1007/978-94-017-8663-8.
- [191] Jie Shan und Charles K. Toth. *Topographic Laser Ranging and Scanning*. 2009.
- [192] Harri Kaartinen u. a. “An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning”. In: *Remote Sensing* 4.4 (2012), S. 950–974. ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs4040950. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/4/4/950>.
- [193] National Renewable Energy Laboratory. *NREL transforming energy*. URL: <https://midcdmz.nrel.gov/spa/> (besucht am 05.12.2021).
- [194] Rita Machete u. a. “The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings’ solar energy potential”. In: *Energy and Buildings* 177 (2018), S. 290–302. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.064>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818309587>.
- [195] Ivan E. Sutherland und Gary W. Hodgman. “Reentrant Polygon Clipping”. In: *Commun. ACM* 17.1 (Jan. 1974), 32–42. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/360767.360802. URL: <https://doi.org/10.1145/360767.360802>.

-
- [196] Bentley und Ottmann. “Algorithms for Reporting and Counting Geometric Intersections”. In: *IEEE Transactions on Computers* C-28.9 (1979), S. 643–647. DOI: 10.1109/TC.1979.1675432.
- [197] Joseph O’Rourke. *Computational Geometry in C*. 2. Aufl. Cambridge University Press, 1998. DOI: 10.1017/CB09780511804120.
- [198] Thomas H. Cormen u. a. *Introduction to Algorithms, Third Edition*. 3rd. The MIT Press, 2009. ISBN: 0262033844.
- [199] R.A. Jarvis. “On the identification of the convex hull of a finite set of points in the plane”. In: *Information Processing Letters* 2.1 (1973), S. 18–21. ISSN: 0020-0190. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-0190\(73\)90020-3](https://doi.org/10.1016/0020-0190(73)90020-3). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0020019073900203>.
- [200] R.L. Graham. “An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set”. In: *Information Processing Letters* 1.4 (1972), S. 132–133. ISSN: 0020-0190. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-0190\(72\)90045-2](https://doi.org/10.1016/0020-0190(72)90045-2). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0020019072900452>.
- [201] C. Bradford Barber, David P. Dobkin und Hannu Huhdanpaa. “The Quickhull Algorithm for Convex Hulls”. In: *ACM Trans. Math. Softw.* 22.4 (Dez. 1996), 469–483. ISSN: 0098-3500. DOI: 10.1145/235815.235821. URL: <https://doi.org/10.1145/235815.235821>.
- [202] F. P. Preparata und S. J. Hong. “Convex Hulls of Finite Sets of Points in Two and Three Dimensions”. In: *Commun. ACM* 20.2 (Feb. 1977), 87–93. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/359423.359430. URL: <https://doi.org/10.1145/359423.359430>.
- [203] David G Kirkpatrick und Raimund Seidel. “The Ultimate Planar Convex Hull Algorithm”. In: *SIAM J. Comput.* 15.1 (Feb. 1986), 287–299. ISSN: 0097-5397. DOI: 10.1137/0215021. URL: <https://doi.org/10.1137/0215021>.
- [204] Mary M McQueen und Godfried T Toussaint. “On the ultimate convex hull algorithm in practice”. In: *Pattern Recognition Letters* 3.1 (1985), S. 29–34. ISSN: 0167-8655. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(85\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0167-8655(85)90039-X). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016786558590039X>.
- [205] T. M. Chan. “Optimal Output-Sensitive Convex Hull Algorithms in Two and Three Dimensions”. In: *Discrete Comput. Geom.* 16.4 (Apr. 1996), 361–368. ISSN: 0179-5376. DOI: 10.1007/BF02712873. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02712873>.
- [206] Frank Nielsen. “Algorithmes géométriques adaptatifs”. Theses. Université Nice Sophia Antipolis, Sep. 1996. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00832414>.

- [207] M. Rivero und F.R. Feito. “Boolean operations on general planar polygons”. In: *Computers & Graphics* 24.6 (2000). Calligraphic Interfaces: towards a new generation of interactive systems, S. 881–896. ISSN: 0097-8493. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(00\)00090-X](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(00)00090-X). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009784930000090X>.
- [208] Efi Fogel u. a. “2D Regularized Boolean Set-Operations”. In: *CGAL User and Reference Manual*. 5.3. CGAL Editorial Board, 2021. URL: <https://doc.cgal.org/5.3/Manual/packages.html#PkgBooleanSetOperations2>.
- [209] Joseph Begner und Volker Quaschnig. *Kurzstudie. Sinnvolle Dimensionierung von Photovoltaikanlagen für Prosumer*. März 2019. URL: https://pvspeicher.haw-berlin.de/wp-content/uploads/HTW_2019_Sinnvolle_Dimensionierung.pdf (besucht am 14.10.2021).
- [210] Bernhard Korte und Jens Vygen. *Kombinatorische Optimierung Theorie und Algorithmen*. Berlin: Springer, 2012. ISBN: 9783642254017 3642254012 9783642254000 3642254004. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:1111-2012050500>.
- [211] Ernesto G. Birgin und Rafael D. Lobato. “Orthogonal packing of identical rectangles within isotropic convex regions”. In: *Computers & Industrial Engineering* 59.4 (2010), S. 595–602. ISSN: 0360-8352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.07.004>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835210001695>.
- [212] Eunice Lopez u. a. “An effective heuristic for the two-dimensional irregular bin packing problem”. In: *Annals of Operations Research* 206 (Juli 2013), S. 241–264. DOI: 10.1007/s10479-013-1341-4.
- [213] V. S. Anil Kumar und H. Ramesh. “Covering Rectilinear Polygons with Axis-Parallel Rectangles”. In: *Proceedings of the Thirty-First Annual ACM Symposium on Theory of Computing*. STOC ’99. Atlanta, Georgia, USA: Association for Computing Machinery, 1999, 445–454. ISBN: 1581130678. DOI: 10.1145/301250.301369. URL: <https://doi.org/10.1145/301250.301369>.
- [214] Robert J. Fowler, Michael S. Paterson und Steven L. Tanimoto. “Optimal packing and covering in the plane are NP-complete”. In: *Information Processing Letters* 12.3 (1981), S. 133–137. ISSN: 0020-0190. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-0190\(81\)90111-3](https://doi.org/10.1016/0020-0190(81)90111-3). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0020019081901113>.
- [215] Arindam Khan und Eklavya Sharma. *Tight Approximation Algorithms for Geometric Bin Packing with Skewed Items*. 2021. arXiv: 2105.02827 [cs.CG].
- [216] Claire Kenyon und Richard Kenyon. “Tiling a Polygon with Rectangles”. In: *Proc. 33rd Symp. Foundations of Computer Science*. 1992, S. 610–619.

-
- [217] E.G. Birgin u. a. “Orthogonal packing of rectangular items within arbitrary convex regions by nonlinear optimization”. In: *Computers & Operations Research* 33.12 (2006). Part Special Issue: Recent Algorithmic Advances for Arc Routing Problems, S. 3535–3548. ISSN: 0305-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.031>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054805001267>.
- [218] Danny H.W. Li, S.W. Lou und Joseph C. Lam. “An Analysis of Global, Direct and Diffuse Solar Radiation”. In: *Energy Procedia* 75 (2015). Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015), S. 388–393. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.399>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215011674>.
- [219] R. Perez u. a. “An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: Description, performance validation, site dependency evaluation”. In: *Solar Energy* 36.6 (1986), S. 481–497. ISSN: 0038-092X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90013-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90013-7). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X86900137>.
- [220] Harry Schüle. *Stromproduktion und Stromverbrauch im Jahre 2020 in der Bundesrepublik Deutschland. Auswertung von Daten der Bundesnetzagentur Im Hinblick auf die Erzeugung von erneuerbarem Wind- und Solarstrom*. März 2021. URL: https://www.nablaenergy.de/images/Downloads/20210123_Auswertung_Wind_SonnenDaten2020_V2.pdf (besucht am 20.06.2021).
- [221] Jan-Bleicke Eggers u. a. “PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland”. In: 35. PV-Symposium (Sep. 2020).
- [222] LANUV NRW. *Solarkataster NRW*. URL: https://www.energieatlas.nrw.de/site/karte_solarkataster# (besucht am 07.10.2021).
- [223] Jaroslav Hofierka, Marcel Suri und Thomas Huld. *r.sun manual page*. 2007. URL: <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.sun.html> (besucht am 07.12.2021).

Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
AGEE	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien
ALS	Airborne Laser Scanning
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
BG BAU	Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BIPV	Bauwerksintegrierte-Photovoltaik
B2G	Baum-zu-Gebäude
BEE	Bundesverband Erneuerbare Energie e.v
CAD	computer-aided design
CityGML	City Geographic Markup Language
DGM	digitales Geländemodell
DOM	digitales Oberflächenmodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
E2G	Eigenverschattung
FfE	Forschungsstelle für Energiewirtschaft
ISE	Institut für Solare Energiesysteme
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme
G2G	Gebäude-zu-Gebäude
GW_p	Gigawatt-Peak
GWh	Gigawatt Stunde
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LiDAR	Light detection and ranging
LoD	Level-of-Detail
LoD0	Level-of-Detail 0
LoD1	Level-of-Detail 1
LoD2	Level-of-Detail 2
LoD3	Level-of-Detail 3

LoD4	Level-of-Detail 4
MIP	Mixed-Integer-Programming
MW_p	Megawatt-Peak
MWh	Megawatt Stunde
nDOM	normalisiertes digitales Oberflächenmodell
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OSM	OpenStreetMaps
PV	Photovoltaik
SPA	Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications
TWh	Terrawatt Stunde

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht der Komponenten der Forschungsarbeit und ihres Aufbaus. . . .	8
1.2	Punktwolken von mehreren gescannten Häusern. Sichtbar sind die fehlenden Hausseiten aufgrund des Winkels der Laserscanner an dem Flugzeug. .	9
2.1	Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland von 2003 bis 2020. Eigene Abbildung aus den Daten der Bundesnetzagentur.	13
2.2	Entwicklung der EEG-Vergütung bis 2020 aus [25].	14
2.3	Verschachtelung der unterschiedlichen Potentialbegriffe und ihrer Relationen zueinander, i.A.a. [41].	15
3.1	Darstellung eines Schornsteins auf Dach mit Schatten	26
3.2	Bedeutung des Umgebungskoeffizienten C_e für verschiedene Geländesituationen, i.A.a. [72].	31
3.3	Karte mit Übersicht der Schneelastzonen Deutschlands, gemäß DIN 1055-3 Norm. Abbildung aus [72].	32
3.4	Deutschlandkarte mit Markierungen der Windlastzonen. Abbildung aus [74].	33
3.5	Schattenanalyse des Grazer Solardachkatasters	36
4.1	Darstellung von Kernschatten und Halbschatten	41
4.2	Darstellung von Übergangsschatten	42
4.3	Abbildung mit Azimut und Höhenwinkel	44
4.4	Sonnenstand Verlauf in Köln	47
4.5	Verlauf des Sonnenstandes in NRW.	48
4.6	Ansichten NRWs mit äußersten Referenzpunkten.	49
4.7	Polarkoordinaten im dreidimensionalen Raum.	55
4.8	Geometrische Berechnung des auf den Boden projizierten Schattens. . . .	56
4.9	Berechnung des Einfallwinkels der Sonnenstrahlung auf geneigte Flächen .	57
4.10	Sonnenbahndiagramm für einen festgelegten Referenzpunkt auf einem Dach. Die direkte Umgebung wurde ebenfalls mit in das Diagramm aufgenommen um eine vereinfachte Schattenanalyse durchzuführen. Abbildung aus [20]. .	60
4.11	Schematische Darstellung der Berechnungsgrundlagen zur Inklusion von Hindernissen in der Umgebung, i.A.a. [20].	60
4.12	Vogelperspektive des Sonnenbahndiagramms zur direkten Ansicht der umliegenden Gebäude und Bäume, i.A.a [20].	61

5.1	Übersicht der Flugsfans NRW	67
5.2	Funktionsweise der Airborne LiDAR-Messung und Punkt-Klassifizierung F = <i>First Return</i> , L = <i>Last Return</i> , M = <i>Medium Return</i> , i.A.a. [126].	69
5.3	Ansicht der Anzahl reflektierter Laserpulse beim Auftreffen auf das Blätterdach von Bäumen. Es werden durch die Blätter mehrere Reflektionen zurückgesendet, i.A.a. [126].	70
5.4	Punktdichte und entsprechende Verteilung der Punktdichte für exemplarische Regionen in NRW.	74
5.5	Darstellung des elektromagnetischen Spektrums und des Teils, der zum sichtbaren Licht gehört, i.A.a. [125].	75
5.6	Grafische Darstellung von DGM, DOM und nDOM, i.A.a. [132].	78
5.7	übersicht der LoDs	80
5.8	Punktwolke eines Gebäudes mit entsprechender Überlagerung des CityGML Gebäudemodells.	82
6.1	Übersicht der Prozessschritte der vier Hauptmodule des Algorithmus.	88
6.2	Übersicht der Arbeitsschritte zur Vorbereitung der Datensätze für die Rekonstruktion der Gebäude und anschließenden Schattenanalyse.	89
6.3	Spezifikation des Datenbankschemas inklusive entsprechender Primär- und Fremdschlüssel, die bei der Implementierung des Algorithmus eingesetzt werden.	92
6.4	Darstellung eines Polygons mit Löchern und dessen Definition.	94
6.5	Mesh eines Gebäudes aus Punktwolke	96
6.6	Ansicht einer missglückten Gebäuderekonstruktion aufgrund mangelnder Punkte an den Wänden.	98
6.7	Ansichten einer exemplarischen, zufällig ausgewählten Gebäudepunktwolke aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln.	100
6.8	Ansicht einer Punktwolke inklusive berechneter Normalenvektoren mit falscher Ausrichtung.	101
6.9	Ansicht der während der Gebäuderekonstruktion generierten potentiellen Polygonflächen.	103
6.10	Ansicht der erlaubten 2-er Polygonflächenverbindungen, i.A.a. [148].	104
6.11	Vorher-Nachher Vergleich von Punktwolke vor der Rekonstruktion und fertig rekonstruiertem Gebäude.	106
6.12	Ansicht einer exemplarischen Punktwolke an der TU Dortmund mit Punkten farblich nach <i>Number of Returns</i> Werten eingefärbt.	109

6.13	Ansicht einer exemplarischen Teilmenge der LiDAR Punktwolke aus einem der neuesten Datensätze (2020) mit farblich markierter Klassifizierung der Punkte.	110
6.14	Prozessübersicht des Programmablaufs mit Filterung der Baumpunkte über die <i>Return</i> -Werte der Punkte.	111
6.15	Ergebnis der exemplarischen Vegetationsklassifizierung der Punktwolken von der Region an der TU Dortmund mit dem Algorithmus der TU Delft. .	113
6.16	Übersicht der kompletten Vegetationsmodellierung.	113
6.17	Übersicht des Vorgehens beim klassischen Raytracing und bei dem in dieser Arbeit verwendeten umgekehrten Prozess (<i>reverse Raytracing</i>).	115
6.18	Verschattungseffekt in der Region um die TU Dortmund exemplarisch am 21.06. (links) und 21.12. (rechts).	116
7.1	Modulablauf der Schattenanalyse und Einstrahlungssimulation.	120
7.2	Schematische Skizzierung von L-förmigem Gebäude aus der Vogelperspektive mit einfallendem Schatten, der von einer anderen Dachfläche desselben Gebäudes generiert wird.	121
7.3	Verschattungseffekt auf nördlich ausgerichteten Dach- und Fassadenseiten. .	121
7.4	Übersicht der Komponenten und Programmablauf von Phase 1 der Schattenanalyse.	122
7.5	Visualisierung der Anpassung von Schattenpolygonen auf den Dachflächen, wenn diese über das Dachflächenpolygon hinausragen.	123
7.6	Visuelle Darstellung der Polygon-Operationen Vereinigung, Durchschnitt und (symmetrische) Differenz.	124
7.7	Ansicht der Reduktion der Schattenpolygone, die exemplarisch über den Verlauf des 21.12. generiert werden.	126
7.8	Ansicht einer zufällig ausgewählten Dachfläche und der Verteilung der schattenfreien Dachflächen, welche auf dieser zu finden sind.	127
7.9	Übersicht der Komponenten und Programmablauf von Phase 2 der Schattenanalyse.	127
7.10	Kombination von Polygonen bei vorhandener Überschneidung.	128
7.11	Fehlerhaftes Resultat von naiver Polygonvereinigung.	129
7.12	Schematische Darstellung einer Dachfläche inklusive Markierung der verschatteten Dachfläche und Dachgauben sowie Dachaufbauten.	130
7.13	Draufsicht einer Dachfläche mit optimaler Modulbelegung.	132
7.14	Draufsicht einer Dachfläche mit visueller Darstellung der Raster-Heuristik. .	133

7.15	Verteilung der Messtationen des Deutschen Wetterdienstes in Deutschland (Grenzdaten von OpenNRW [102]).	134
8.1	Aufteilung NRWs in Bezirksregierungszone, nach Kreise und Gemeinden (Grenzdaten von OpenNRW [102]).	139
8.2	Verteilung der einzelnen Verschattungsarten in allen Kreisen NRWs.	144
8.3	Grafische Übersicht der Verluste auf Kreisebene durch Verschattungseffekte auf Dachflächen. Die spezifischen Werte aller Kreise können dem Anhang C.3 entnommen werden.	148
8.4	Visuelle Darstellung der Verteilung von Gebäudekategorien von ausgewähl- ten Kreisen in NRW.	149
8.5	Solarstromertrag in Deutschland im Tagesverlauf an drei Beispieltagen. Grafik entnommen aus [220].	151
9.1	Ermittelter Verschattungsanteil pro Dach für alle Gebäude der Stadt Köln.	159

Tabellenverzeichnis

2.1	Überblick der PV-Potentiale in Deutschland, i.A.a. [38].	17
2.2	Dachflächenpotentiale nach [34–36, 41, 42, 46, 50]	20
2.3	Übersicht der ermittelten Potentiale für die Jahre 2013 und 2018 auf Bezirksregierungsebene (zum Aufzeigen der Unterschiede, die innerhalb von fünf Jahren auftreten). Daten für das Jahr 2013 basieren auf eigenen Berechnungen auf Basis der Kreisdaten.	21
2.4	Entwicklung der Dachflächen-PV in NRW seit 2010 (Daten des LANUV [61]).	22
2.5	PV-Potentiale nach Gebäudetyp und Sektor für NRW in GW_p , i.A.a. [45]. .	23
3.1	Definitionen der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ und des Basisgeschwindigkeitsdrucks $q_{b,0}$ nach Windlastzone. Werte aus [74].	34
5.1	Auflistung der LiDAR-Klassen, wie sie durch die Flüge in NRW aufgezeichnet wurden, i.A.a. [126].	68
6.1	Laufzeit der einzelnen Solver bei der Lösung der Optimierungsgleichungen pro Modell, i.A.a [169].	104
7.1	Koeffizienten der solaren Strahlung aus dem Perez-Modell (Tabelle 6 aus [101]).	136
7.2	Kategorien der Himmelsklarheit (aus Tabelle 1 in [101]).	137
8.1	Übersicht aller signifikanten Faktoren und ihrer Datengrundlage sowie Bezug in der Forschungsarbeit.	140
8.2	Übersicht Top5-Kreise in NRW bezüglich der absoluten Dachflächen, ohne Modulbelegung.	142
8.3	Auflistung der Modulbelegung für die Top5-Kreise, Verschattung und Dachaufbauten ausgefiltert.	142
8.4	Top-5 sortiert nach mittlerer nutzbarer Dachfläche pro Gebäude.	143
8.5	Verteilung der Verschattungsarten in den Top5-Kreisen.	143
8.6	Beschreibende Werte zu Abbildung 8.2 in Prozent.	144
8.7	Übersicht Flop5-Kreise in NRW bezüglich der absoluten Dachflächen, ohne Modulbelegung.	145
8.8	Auflistung der Modulbelegung für die Flop5-Kreise, Verschattung und Dachaufbauten ausgefiltert.	146

8.9	Flop-5 sortiert nach mittlerer nutzbarer Dachfläche pro Gebäude.	146
8.10	Verteilung der Verschattungsarten in den Flop5-Kreisen.	147
8.11	Verteilung der Gebäudekategorien für die Top-5- und Flop-5-Kreise in Prozent.	148
8.12	Flächenverfügbarkeit in NRW nach unterschiedlichen Kriterien und Filterungen der Dachflächengrößen – relative Werte zu total verfügbaren Dachflächen in eckigen Klammern.	150
8.13	Flächenverfügbarkeit in NRW nach unterschiedlichen Kriterien und Filterungen der Dachflächengrößen – relative Werte zu schattenfreien Flächen ohne Dachaufbauten in eckigen Klammern.	150
8.14	Kumulierte, durch Sonneneinstrahlung einfallende Energiemenge pro Top-5 und Flop-5 Kreis.	152
9.1	Installierbare Modulfläche, Leistung und möglicher Stromertrag nach Verwaltungsregion in NRW, ermittelt durch die vorliegende Forschungsarbeit (Heuristik, $>7 \text{ m}^2$) – im direkten Vergleich mit den 2018-Daten vom LANUV (in eckigen Klammern).	156
9.2	Zustand des PV-Ausbaus in NRW seit 2016 inklusive Energieerzeugung und installierter Leistung (Daten des LANUV [61]).	156
A.1	LAS 1.2 Point Data Record Format 0 (nach [129]).	200
A.2	LAS 1.2 Point Data Record Format 1 (nach [129]).	200
A.3	LAS 1.2 Point Data Record Format 2 (nach [129]).	201
A.4	LAS 1.2 Point Data Record Format 3 (nach [129]).	201
A.5	Klassencodes der LAS 1.2 Spezifikation.	202
A.6	Rohdaten der Schattenanalyse für alle Kreise (Werte in km^2).	203
A.6	Rohdaten der Schattenanalyse für alle Kreise (Werte in km^2).	204
A.6	Rohdaten der Schattenanalyse für alle Kreise (Werte in km^2).	205
A.6	Rohdaten der Schattenanalyse für alle Kreise (Werte in km^2).	206
A.6	Rohdaten der Schattenanalyse für alle Kreise (Werte in km^2).	207
A.7	Übersicht der Gebäudeverteilung für alle Kreise in NRW.	208
A.7	Übersicht der Gebäudeverteilung für alle Kreise in NRW.	209
A.7	Übersicht der Gebäudeverteilung für alle Kreise in NRW.	210
A.8	Übersicht der Gruppierung aller ursprünglichen Funktionscodes.	210

Anhänge

A Algorithmen

A.1 DIN 5034, Teil 2

Dieser Abschnitt umfasst nicht die komplette DIN 5034 Norm, sondern widmet sich spezifisch dem dort beschriebenen Algorithmus zur Ermittlung des Sonnenstandes [91]. Der Sonnenstand wird beschrieben durch den Winkel der Sonnenhöhe γ_S und den Winkel des Sonnenazimuts α_S . Diese sind abhängig von der Tages- und Jahreszeit sowie der geografischen Breite. Es wird mit der Wahren Ortszeit (*WOZ*) gerechnet. Falls Angaben in Mitteleuropäischer Zeit (*MEZ*) gemacht werden sollen, muss folgend der Gleichung A.1 umgerechnet werden.

$$MEZ = MOZ + 4 \cdot (15^\circ - \lambda) \cdot \text{min}/^\circ \quad (\text{A.1})$$

wobei

MOZ Mittlere Ortszeit

λ geographische Länge des Ortes, gemessen östlich des Greenwich Nullmeridians

Die Mittlere Ortszeit *MOZ* wird mit Hilfe der folgenden Gleichung A.2 berechnet.

$$MOZ = WOZ - Zgl \quad (\text{A.2})$$

wobei

Zgl Zeitgleichung in min

Die Zeitgleichung ist ebenfalls eine Funktion. Sie verwendet einen Parameter, *J*, welcher den Tag des Jahres repräsentiert. Die Zeitgleichung ist in Gleichung A.3 dargestellt.

$$Zgl(J) = 0,0066 + 7,3525 \cdot \cos(J' + 85,9^\circ) \quad (\text{A.3})$$

$$+ 9,9359 \cdot \cos(2 \cdot J' + 108,9^\circ) \quad (\text{A.4})$$

$$+ 0,3387 \cdot \cos(3 \cdot J' + 105,2^\circ) \quad (\text{A.5})$$

wobei

J der Tag des Jahres ist, z. B. 1. Januar: *J*=1, 31. Dezember: *J*=365 bzw. 366.

J' steht für $360^\circ \cdot \frac{J}{365}$ bzw. $360^\circ \cdot \frac{J}{366}$

Für die Berechnung der Sonnenwinkel γ_S und α_S werden die Gleichungen A.6 und A.7 herangezogen.

$$\gamma_S = \arcsin (\cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \quad (\text{A.6})$$

$$\alpha_S = 180^\circ - \arccos \frac{\sin \gamma_S \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_S \cdot \cos \varphi} \quad \text{für } WOZ \leq 12.00 \text{ Uhr}$$

bzw. (A.7)

$$\alpha_S = 180^\circ + \arccos \frac{\sin \gamma_S \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_S \cdot \cos \varphi} \quad \text{für } WOZ > 12.00 \text{ Uhr}$$

wobei

- ω der Stundenwinkel ist, berechnet durch $(12.00 \text{ h} - WOZ) \cdot 15^\circ/\text{h}$
- φ die geographische Breite des Ortes
- $\delta(J)$ den Winkel der Sonnendeklination darstellt. Die Funktion hierfür findet sich in Gleichung A.8.

$$\delta(J) = \{0,3948 - 23,2559 \cdot \cos (J' + 9,1^\circ) - 0,3915 \cdot \cos (2 \cdot J' + 5,4^\circ) - 0,1764 \cdot \cos (3 \cdot J' + 26^\circ)\}^\circ \quad (\text{A.8})$$

B Implementierungen und Pseudocode

B.1 Pseudocode zum Winding Number Algorithmus

Input: Knotenpunkte v_i ($i = 1$ bis n) von Polygon C ,
Punkt x

Output: Winding Number w von Polygon C mit Bezug zu Punkt x

0.) ersetze alle Knoten v_i mit $(v_i - x)$

1.) initialisiere $w = 0$

2.) für jeden Knoten v_i ($i = 1$ bis n) in Polygon C :

wenn $(y_i y_{i+1} < 0)$ dann
[kreuzt $\overline{v_i v_{i+1}}$ die x-Achse]

Setze $r = x_i + \frac{y_i(x_{i+1} - x_i)}{(y_i - y_{i+1})}$

[r ist die x-Koordinate der Überschneidung
von $\overline{v_i v_{i+1}}$ mit der x-Achse]

wenn $(r > 0)$ dann
[$\overline{v_i v_{i+1}}$ schneidet die positive x-Achse]

wenn $(y_i < 0)$ dann $w = w + 1$ sonst $w = w - 1$

sonst wenn $((y_i = 0) \text{ und } (x_i > 0))$ dann
[v_i liegt auf der positiven x-Achse]

wenn $(y_{i+1} > 0)$ dann $w = w + \frac{1}{2}$ sonst $w = w - \frac{1}{2}$

sonst wenn $((y_{i+1} = 0) \text{ und } (x_{i+1} > 0))$ dann
[v_{i+1} liegt auf der positiven x-Achse]

wenn $(y_i < 0)$ dann $w = w + \frac{1}{2}$ sonst $w = w - \frac{1}{2}$

3.) Gib $w = \text{Winding Number von } C \text{ mit Bezug zu } x$ zurück

C Rohdaten und Spezifikationen

C.1 LAS 1.2 Punktspezifikation

Die LAS Spezifikation in der Version 1.2 definiert vier verschiedene Punktformate. Diese unterscheiden sich hauptsächlich in der Anzahl Felder, die bei einem Punkt noch zusätzlich abgespeichert werden und gliedern sich in die *Point Data Record* Formate 0 bis 3.

Tabelle A.1: LAS 1.2 Point Data Record Format 0 (nach [129]).

Feld	Datentyp		Datengröße	Notwendig
X	long		4 Bytes	Ja
Y	long		4 Bytes	Ja
Z	long		4 Bytes	Ja
Intesity	unsigned short		2 Bytes	Nein
Return Number	unsigned char	3 bits	1 Byte	Ja
Number of Returns (given pulse)		3 bits		Ja
Scan Directin Flag		1 bit		Ja
Edge of Flight Line		1 bit		Ja
Classification	unsigned char		1 Byte	Ja
Scan Angle Rank	char		1 Byte	Ja
User Data	unsigned char		1 Byte	Nein
Point Source ID	unsigned short		2 Bytes	Ja

Tabelle A.2: LAS 1.2 Point Data Record Format 1 (nach [129]).

Feld	Datentyp		Datengröße	Notwendig
X	long		4 Bytes	Ja
Y	long		4 Bytes	Ja
Z	long		4 Bytes	Ja
Intesity	unsigned short		2 Bytes	Nein
Return Number	unsigned char	3 bits	1 Byte	Ja
Number of Returns (given pulse)		3 bits		Ja
Scan Directin Flag		1 bit		Ja
Edge of Flight Line		1 bit		Ja
Classification	unsigned char		1 Byte	Ja
Scan Angle Rank	char		1 Byte	Ja
User Data	unsigned char		1 Byte	Nein
Point Source ID	unsigned short		2 Bytes	Ja
GPS Time	double		8 Bytes	Ja

Tabelle A.3: LAS 1.2 Point Data Record Format 2 (nach [129]).

Feld	Datentyp		Datengröße	Notwendig
X	long		4 Bytes	Ja
Y	long		4 Bytes	Ja
Z	long		4 Bytes	Ja
Intensity	unsigned short		2 Bytes	Nein
Return Number	unsigned char	3 bits	1 Byte	Ja
Number of Returns (given pulse)		3 bits		Ja
Scan Directin Flag		1 bit		Ja
Edge of Flight Line		1 bit		Ja
Classification	unsigned char		1 Byte	Ja
Scan Angle Rank	char		1 Byte	Ja
User Data	unsigned char		1 Byte	Nein
Point Source ID	unsigned short		2 Bytes	Ja
Red	unsigned short		2 Bytes	Ja
Green	unsigned short		2 Bytes	Ja
Blue	unsigned short		2 Bytes	Ja

Tabelle A.4: LAS 1.2 Point Data Record Format 3 (nach [129]).

Feld	Datentyp		Datengröße	Notwendig
X	long		4 Bytes	Ja
Y	long		4 Bytes	Ja
Z	long		4 Bytes	Ja
Intensity	unsigned short		2 Bytes	Nein
Return Number	unsigned char	3 bits	1 Byte	Ja
Number of Returns (given pulse)		3 bits		Ja
Scan Directin Flag		1 bit		Ja
Edge of Flight Line		1 bit		Ja
Classification	unsigned char		1 Byte	Ja
Scan Angle Rank	char		1 Byte	Ja
User Data	unsigned char		1 Byte	Nein
Point Source ID	unsigned short		2 Bytes	Ja
Point Source ID	unsigned short		2 Bytes	Ja
Red	unsigned short		2 Bytes	Ja
Green	unsigned short		2 Bytes	Ja
Blue	unsigned short		2 Bytes	Ja

C.2 LAS 1.2 Punktklassen

Tabelle A.5: Klassencodes der LAS 1.2 Spezifikation.

Classification Wert	Bedeutung
0	erstellt, nie klassifiziert
1	unklassifiziert
2	Bodenpunkt
3	niedrige Vegetation
4	mittlere Vegetation
5	hohe Vegetation
6	Gebäude
7	niedriger Punkt (Rauschen)
8	Model Key-point (mass point)
9	Water
10	Reserviert für ASPRS Definitionen
11	Reserviert für ASPRS Definitionen
12	Overlap Punkte
13-31	Reserviert für ASPRS Definitionen

C.3 Ergebnisse der Analyse

Tabelle A.6: Rohdaten der Schattenanalyse für alle Kreise (Werte in km²).

Kreise	Dachfläche (vor Analyse)	Schatten- frei G2G	Schatten- frei B2G	Schatten- frei E2G	Schatten- frei gesamt ohne Dachauf- bauten	Nutzbar mit Modulheu- ristik	Größer als 7m ²	Nutzbar mit Heuristik Korrektur- faktor
Bielefeld	19,69	18,29	17,68	12,14	9,73	7,04	6,55	7,72
Bochum	19,75	15,11	15,08	8,56	7,43	4,64	4,32	5,09
Bonn	16,02	12,20	11,69	8,88	6,73	4,62	4,30	5,07
Borken	39,10	35,47	32,73	28,12	24,10	15,82	14,72	17,36
Bottrop	7,88	6,35	6,23	3,92	3,01	2,55	2,37	2,80
Coesfeld	23,30	18,79	18,45	15,92	14,11	10,48	9,75	11,50
Dortmund	28,06	25,31	24,92	16,79	15,83	11,30	10,51	12,40
Duisburg	26,36	23,24	23,19	14,36	12,18	8,28	7,70	9,08
Düren	22,46	20,95	20,71	15,61	14,53	10,83	10,07	11,88
Düsseldorf	28,32	23,59	22,29	17,55	12,62	8,61	8,01	9,44
Ennepe-Ruhr- Kreis	21,69	18,08	16,87	12,65	11,26	8,01	7,45	8,79
Essen	25,76	20,18	19,96	12,86	12,18	10,30	9,58	11,30
Euskirchen	18,29	16,46	15,57	12,20	10,75	8,43	7,84	9,25
Gelsenkirchen	13,96	12,68	12,01	7,97	6,61	4,38	4,07	4,80
Gütersloh	35,57	31,50	30,00	19,02	16,04	13,01	12,10	14,27

Tabelle A.6: Rohdaten der Schattenanalyse für alle Kreise (Werte in km²).

Kreise	Dachfläche (vor Analyse)	Schatten- frei G2G	Schatten- frei B2G	Schatten- frei E2G	Schatten- frei gesamt ohne Dachauf- bauten	Nutzbar mit Modulheu- ristik	Größer als 7m ²	Nutzbar mit Heuristik Korrektur- faktor
Hagen	11,23	10,30	9,98	7,14	6,60	4,78	4,44	5,24
Hamm	12,93	10,99	10,55	7,88	6,62	5,04	4,68	5,53
Heinsberg	22,56	18,23	17,12	14,24	11,88	8,11	7,55	8,90
Herford	23,93	22,40	21,79	13,95	12,18	10,03	9,33	11,01
Herne	8,77	7,39	7,35	4,33	4,10	3,55	3,31	3,90
Hochsauer- landkreis	24,39	21,63	19,26	15,00	11,85	7,62	7,09	8,36
Höxter	15,86	14,17	13,18	10,71	8,69	5,20	4,83	5,70
Kleve	38,04	34,49	33,07	21,50	16,58	9,33	8,68	10,23
Köln	45,95	31,77	31,05	23,06	19,06	15,37	14,30	16,86
Krefeld	15,05	14,43	14,06	9,15	7,98	5,80	5,39	6,36
Leverkusen	8,53	8,12	7,87	4,97	4,14	3,15	2,93	3,46
Lippe	29,40	28,38	26,82	20,03	18,59	11,50	10,70	12,62
Märkischer Kreis	29,04	26,25	24,44	17,63	15,75	10,89	10,13	11,95
Mettmann	30,94	29,91	29,20	21,68	16,99	10,68	9,93	11,71

Tabelle A.6: Rohdaten der Schattenanalyse für alle Kreise (Werte in km²).

Kreise	Dachfläche (vor Analyse)	Schatten- frei G2G	Schatten- frei B2G	Schatten- frei E2G	Schatten- frei gesamt ohne Dachauf- bauten	Nutzbar mit Modulheu- ristik	Größer als 7m ²	Nutzbar mit Heuristik Korrektur- faktor
Minden- Lübbecke	31,73	27,95	25,88	18,59	16,29	13,24	12,31	14,52
Mönchen- gladbach	16,78	14,96	14,32	10,42	7,82	5,89	5,47	6,46
Mülheim a.d. Ruhr	8,96	7,51	7,24	4,46	3,64	2,11	1,96	2,31
Münster	16,52	15,25	14,94	10,79	8,38	6,35	5,91	6,97
Oberbergischer Kreis	20,89	17,87	17,48	13,13	12,57	9,80	9,11	10,75
Oberhausen	13,06	9,85	9,67	5,50	4,27	3,43	3,19	3,76
Olpe	11,51	8,91	8,29	6,37	4,87	4,23	3,93	4,64
Paderborn	25,98	23,49	22,92	14,75	13,49	10,32	9,60	11,33
Recklinghausen	40,18	35,86	34,68	24,15	18,28	13,54	12,59	14,85
Remscheid	6,72	6,08	5,75	5,06	4,19	2,87	2,67	3,15
Rhein-Erft- Kreis	31,92	29,34	28,70	20,04	18,77	16,10	14,98	17,67

Tabelle A.6: Rohdaten der Schattenanalyse für alle Kreise (Werte in km²).

Kreise	Dachfläche (vor Analyse)	Schatten- frei G2G	Schatten- frei B2G	Schatten- frei E2G	Schatten- frei gesamt ohne Dachauf- bauten	Nutzbar mit Modulheu- ristik	Größer als 7m ²	Nutzbar mit Heuristik Korrektur- faktor
Rheinisch- Bergischer Kreis	17,83	16,18	15,23	11,28	9,87	6,75	6,28	7,41
Rhein-Kreis Neuss	34,32	28,32	26,36	17,80	14,25	12,18	11,33	13,36
Rhein-Sieg- Kreis	42,61	31,96	28,01	19,28	17,00	14,44	13,43	15,84
Siegen- Wittgenstein	20,93	17,58	17,19	12,66	11,57	8,41	7,82	9,23
Soest	27,63	25,54	24,60	18,16	15,16	10,57	9,83	11,59
Solingen	9,48	8,60	8,51	7,55	6,61	4,96	4,61	5,44
Städteregion Aachen	32,72	24,42	23,81	18,88	15,47	13,38	12,44	14,68
Steinfurt	43,32	38,93	35,98	27,14	22,97	14,21	13,22	15,59
Unna	27,83	23,05	22,06	16,06	13,51	11,42	10,62	12,53
Viersen	25,31	22,86	21,74	18,12	14,74	11,31	10,52	12,40
Warendorf	27,97	26,18	24,87	19,03	14,91	12,20	11,35	13,39
Wesel	36,32	30,79	29,36	22,47	19,90	14,33	13,33	15,72

Tabelle A.6: Rohdaten der Schattenanalyse für alle Kreise (Werte in km²).

Kreise	Dachfläche (vor Analyse)	Schatten- frei G2G	Schatten- frei B2G	Schatten- frei E2G	Schatten- frei gesamt ohne Dachauf- bauten	Nutzbar mit Modulheu- ristik	Größer als 7m ²	Nutzbar mit Heuristik Korrektur- faktor
Wuppertal	16,65	12,07	11,53	8,01	6,84	4,14	3,85	4,54

C.4 Gebäudeverteilung für alle Kreise NRWs

Tabelle A.7: Übersicht der Gebäudeverteilung für alle Kreise in NRW.

Kreis	Wohnen	Garage	Industrie & Gewerbe	Landwirt- schaft	Geschäft	Freizeit	Andere
Bielefeld	42%	0%	5%	2%	0%	1%	50%
Bochum	45%	26%	5%	5%	2%	7%	12%
Bonn	53%	1%	35%	0%	0%	0%	10%
Borken	37%	25%	7%	17%	1%	1%	14%
Bottrop	36%	30%	4%	11%	1%	6%	13%
Coesfeld	30%	22%	4%	21%	1%	3%	19%
Dortmund	51%	29%	6%	5%	0%	1%	7%
Duisburg	45%	23%	16%	3%	2%	5%	8%
Düren	37%	25%	15%	11%	0%	3%	10%
Düsseldorf	47%	15%	15%	1%	0%	7%	15%
Ennepe- Ruhr-Kreis	47%	1%	28%	2%	0%	4%	18%
Essen	47%	20%	13%	1%	1%	8%	11%
Euskirchen	36%	23%	5%	18%	2%	3%	15%
Gelsenkirchen	46%	25%	9%	2%	1%	10%	8%
Gütersloh	33%	24%	4%	15%	1%	2%	23%
Hagen	38%	23%	7%	4%	1%	15%	13%
Hamm	35%	25%	5%	13%	2%	7%	15%
Heinsberg	38%	24%	7%	19%	0%	1%	11%
Herford	35%	23%	4%	12%	1%	4%	23%
Herne	40%	27%	5%	7%	1%	13%	8%
Hochsauer- landkreis	36%	25%	6%	9%	0%	8%	15%
Höxter	35%	5%	5%	12%	0%	1%	42%
Kleve	32%	20%	4%	20%	0%	2%	21%
Köln	53%	22%	12%	1%	2%	1%	11%

Tabelle A.7: Übersicht der Gebäudeverteilung für alle Kreise in NRW.

Kreis	Wohnen	Garage	Industrie & Gewerbe	Landwirt- schaft	Geschäft	Freizeit	Andere
Krefeld	43%	22%	7%	7%	0%	7%	15%
Leverkusen	42%	27%	5%	6%	0%	2%	17%
Lippe	40%	4%	34%	3%	0%	1%	17%
Märkischer Kreis	40%	4%	21%	4%	1%	3%	28%
Mettmann	42%	18%	17%	3%	1%	1%	19%
Minden- Lübbecke	37%	24%	4%	12%	1%	2%	22%
Mönchen- gladbach	44%	6%	4%	3%	1%	3%	40%
Mülheim a.d. Ruhr	53%	30%	5%	7%	0%	1%	4%
Münster	42%	25%	8%	7%	0%	3%	14%
Oberber- gischer Kreis	40%	20%	16%	11%	1%	3%	10%
Oberhausen	36%	21%	7%	6%	1%	16%	14%
Olpe	41%	26%	5%	6%	1%	2%	21%
Paderborn	40%	28%	6%	9%	0%	6%	11%
Reckling- hausen	39%	32%	6%	11%	1%	4%	8%
Remscheid	42%	27%	9%	4%	1%	7%	12%
Rhein-Erft- Kreis	44%	30%	7%	9%	1%	1%	9%
Rheinisch- Bergischer Kreis	44%	8%	5%	3%	0%	1%	38%
Rhein-Kreis Neuss	38%	27%	5%	3%	0%	1%	26%

Tabelle A.7: Übersicht der Gebäudeverteilung für alle Kreise in NRW.

Kreis	Wohnen	Garage	Industrie & Gewerbe	Landwirt- schaft	Geschäft	Freizeit	Andere
Rhein-Sieg- Kreis	43%	15%	19%	5%	2%	2%	16%
Siegen- Wittgen- stein	39%	28%	5%	8%	1%	3%	17%
Soest	38%	28%	5%	13%	2%	2%	13%
Solingen	48%	18%	12%	3%	1%	5%	14%
Städteregion Aachen	38%	23%	7%	10%	1%	8%	15%
Steinfurt	35%	25%	4%	10%	0%	11%	15%
Unna	41%	36%	5%	4%	1%	2%	12%
Viersen	50%	28%	5%	7%	0%	0%	9%
Warendorf	33%	24%	4%	15%	0%	1%	23%
Wesel	43%	29%	5%	14%	0%	2%	7%
Wuppertal	40%	18%	11%	6%	1%	2%	23%

D Kategorisierung der Gebäude-Funktionscodes

Tabelle A.8: Übersicht der Gruppierung aller ursprünglichen Funktionscodes.

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	1010	Wohnhaus	Wohnen
31001	1020	Wohnheim	Wohnen
31001	1021	Kinderheim	Wohnen
31001	1022	Seniorenheim	Wohnen
31001	1023	Schwesternwohnheim	Wohnen
31001	1024	Studenten-, Schülerwohnheim	Wohnen
31001	1025	Schullandheim	Wohnen

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	1100	Gemischt genutztes Gebäude mit Wohnen	Wohnen
31001	1110	Wohngebäude mit Gemeinbedarf	Wohnen
31001	1120	Wohngebäude mit Handel und Dienstleistungen	Wohnen
31001	1121	Wohn- und Verwaltungsgebäude	Wohnen
31001	1122	Wohn- und Bürogebäude	Wohnen
31001	1123	Wohn- und Geschäftsgebäude	Wohnen
31001	1130	Wohngebäude mit Gewerbe und Industrie	Wohnen
31001	1131	Wohn- und Betriebsgebäude	Wohnen
31001	1210	Land- und forstwirtschaftliches Wohngebäude	Landwirtschaft
31001	1220	Land- und forstwirtschaftliches Wohn- und Betriebsgebäude	Landwirtschaft
31001	1221	Bauernhaus	Landwirtschaft
31001	1222	Wohn- und Wirtschaftsgebäude	Wohnen
31001	1223	Forsthaus	Landwirtschaft
31001	1310	Gebäude zur Freizeitgestaltung	Freizeit
31001	1311	Ferienhaus	Freizeit
31001	1312	Wochenendhaus	Freizeit
31001	1313	Gartenhaus	Freizeit
31001	2000	Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe	Industrie & Gewerbe
31001	2010	Gebäude für Handel und Dienstleistungen	Industrie & Gewerbe
31001	2020	Bürogebäude	Geschäft
31001	2030	Kreditinstitut	Geschäft
31001	2040	Versicherung	Geschäft
31001	2050	Geschäftsgebäude	Geschäft
31001	2051	Kaufhaus	Geschäft
31001	2052	Einkaufszentrum	Geschäft

List of tables

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	2053	Markthalle	Geschäft
31001	2054	Laden	Geschäft
31001	2055	Kiosk	Geschäft
31001	2056	Apotheke	Geschäft
31001	2060	Messehalle	Freizeit
31001	2070	Gebäude für Beherbergung	Freizeit
31001	2071	Hotel, Motel, Pension	Freizeit
31001	2072	Jugendherberge	Freizeit
31001	2073	Hütte (mit Übernachtungsmöglichkeit)	Freizeit
31001	2074	Campingplatzgebäude	Freizeit
31001	2080	Gebäude für Bewirtung	Freizeit
31001	2081	Gaststätte, Restaurant	Freizeit
31001	2082	Hütte (ohne Übernachtungsmöglichkeit)	Freizeit
31001	2083	Kantine	Freizeit
31001	2090	Freizeit- und Vergnügungsstätte	Freizeit
31001	2091	Festsaal	Freizeit
31001	2092	Kino	Freizeit
31001	2093	Kegel-, Bowlinghalle	Freizeit
31001	2094	Spielkasino	Freizeit
31001	2100	Gebäude für Gewerbe und Industrie	Industrie & Gewerbe
31001	2110	Produktionsgebäude	Industrie & Gewerbe
31001	2111	Fabrik	Industrie & Gewerbe
31001	2112	Betriebsgebäude	Industrie & Gewerbe
31001	2113	Brauerei	Industrie & Gewerbe

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	2114	Brennerei	Industrie & Gewerbe
31001	2120	Werkstatt	Industrie & Gewerbe
31001	2121	Sägewerk	Industrie & Gewerbe
31001	2130	Tankstelle	Industrie & Gewerbe
31001	2131	Waschstraße, Waschanlage, Waschhalle	Industrie & Gewerbe
31001	2140	Gebäude für Vorratshaltung	Industrie & Gewerbe
31001	2141	Kühlhaus	Industrie & Gewerbe
31001	2142	Speichergebäude	Industrie & Gewerbe
31001	2143	Lagerhalle, Lagerschuppen, Lagerhaus	Industrie & Gewerbe
31001	2150	Speditiionsgebäude	Industrie & Gewerbe
31001	2160	Gebäude für Forschungszwecke	Bildung
31001	2170	Gebäude für Grundstoffgewinnung	Industrie & Gewerbe
31001	2171	Bergwerk	Industrie & Gewerbe
31001	2172	Saline	Industrie & Gewerbe
31001	2180	Gebäude für betriebliche Sozialeinrichtung	Industrie & Gewerbe
31001	2200	Sonstiges Gebäude für Gewerbe und Industrie	Industrie & Gewerbe
31001	2210	Mühle	Industrie & Gewerbe

List of tables

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	2211	Windmühle	Industrie & Gewerbe
31001	2212	Wassermühle	Industrie & Gewerbe
31001	2213	Schöpfwerk	Industrie & Gewerbe
31001	2220	Wetterstation	Sonstige
31001	2310	Gebäude für Handel und Dienstleistung mit Wohnen	Geschäft
31001	2320	Gebäude für Gewerbe und Industrie mit Wohnen	Geschäft
31001	2400	Betriebsgebäude zu Verkehrsanlagen (allgemein)	Verkehr
31001	2410	Betriebsgebäude für Straßenverkehr	Verkehr
31001	2411	Straßenmeisterei	Sonstige
31001	2412	Wartehalle	Sonstige
31001	2420	Betriebsgebäude für Schienenverkehr	Verkehr
31001	2421	Bahnwärterhaus	Verkehr
31001	2422	Lokschuppen, Wagenhalle	Verkehr
31001	2423	Stellwerk, Blockstelle	Verkehr
31001	2424	Betriebsgebäude des Güterbahnhofs	Industrie & Gewerbe
31001	2430	Betriebsgebäude für Flugverkehr	Verkehr
31001	2431	Flugzeughalle	Verkehr
31001	2440	Betriebsgebäude für Schiffsverkehr	Verkehr
31001	2441	Werft (Halle)	Verkehr
31001	2442	Dock (Halle)	Verkehr
31001	2443	Betriebsgebäude zur Schleuse	Verkehr
31001	2444	Bootshaus	Verkehr
31001	2450	Betriebsgebäude zur Seilbahn	Verkehr

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	2451	Spannwerk zur Drahtseilbahn	Verkehr
31001	2460	Gebäude zum Parken	Verkehr
31001	2461	Parkhaus	Verkehr
31001	2462	Parkdeck	Verkehr
31001	2463	Garage	Garage
31001	2464	Fahrzeughalle	Verkehr
31001	2500	Gebäude zur Versorgung	Industrie & Gewerbe
31001	2501	Gebäude zur Energieversorgung	Industrie & Gewerbe
31001	2510	Gebäude zur Wasserversorgung	Industrie & Gewerbe
31001	2511	Wasserwerk	Industrie & Gewerbe
31001	2512	Pumpstation	Industrie & Gewerbe
31001	2513	Wasserbehälter	Industrie & Gewerbe
31001	2520	Gebäude zur Elektrizitätsversorgung	Industrie & Gewerbe
31001	2521	Elektrizitätswerk	Industrie & Gewerbe
31001	2522	Umspannwerk	Industrie & Gewerbe
31001	2523	Umformer	Industrie & Gewerbe
31001	2527	Reaktorgebäude	Industrie & Gewerbe
31001	2528	Turbinenhaus	Industrie & Gewerbe
31001	2529	Kesselhaus	Industrie & Gewerbe

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	2540	Gebäude für Fernmeldewesen	Industrie & Gewerbe
31001	2560	Gebäude an unterirdischen Leitungen	Industrie & Gewerbe
31001	2570	Gebäude zur Gasversorgung	Industrie & Gewerbe
31001	2571	Gaswerk	Industrie & Gewerbe
31001	2580	Heizwerk	Industrie & Gewerbe
31001	2590	Gebäude zur Versorgungsanlage	Industrie & Gewerbe
31001	2591	Pumpwerk (nicht für Wasserversorgung)	Industrie & Gewerbe
31001	2600	Gebäude zur Entsorgung	Industrie & Gewerbe
31001	2610	Gebäude zur Abwasserbeseitigung	Industrie & Gewerbe
31001	2611	Gebäude der Kläranlage	Industrie & Gewerbe
31001	2612	Toilette	Sonstige
31001	2620	Gebäude zur Abfallbehandlung	Industrie & Gewerbe
31001	2621	Müllbunker	Industrie & Gewerbe
31001	2622	Gebäude zur Müllverbrennung	Industrie & Gewerbe
31001	2623	Gebäude der Abfalldeponie	Industrie & Gewerbe
31001	2700	Gebäude für Land- und Forstwirtschaft	Landwirtschaft
31001	2720	Land- und forstwirtschaftliches Betriebsgebäude	Landwirtschaft
31001	2721	Scheune	Landwirtschaft

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	2723	Schuppen	Landwirtschaft
31001	2724	Stall	Landwirtschaft
31001	2726	Scheune und Stall	Landwirtschaft
31001	2727	Stall für Tiergroßhaltung	Landwirtschaft
31001	2728	Reithalle	Landwirtschaft
31001	2729	Wirtschaftsgebäude	Geschäft
31001	2732	Almhütte	Landwirtschaft
31001	2735	Jagdhaus, Jagdhütte	Landwirtschaft
31001	2740	Treibhaus, Gewächshaus	Landwirtschaft
31001	2741	Treibhaus	Landwirtschaft
31001	2742	Gewächshaus, verschiebbar	Landwirtschaft
31001	3000	Gebäude für öffentliche Zwecke	Öffentlich
31001	3010	Verwaltungsgebäude	Öffentlich
31001	3011	Parlament	Öffentlich
31001	3012	Rathaus	Öffentlich
31001	3013	Post	Öffentlich
31001	3014	Zollamt	Öffentlich
31001	3015	Gericht	Öffentlich
31001	3016	Botschaft, Konsulat	Öffentlich
31001	3017	Kreisverwaltung	Öffentlich
31001	3018	Bezirksregierung	Öffentlich
31001	3019	Finanzamt	Öffentlich
31001	3020	Gebäude für Bildung und Forschung	Bildung
31001	3021	Allgemein bildende Schule	Bildung
31001	3022	Berufsbildende Schule	Bildung
31001	3023	Hochschulgebäude (Fachhochschule, Universität)	Bildung
31001	3024	Forschungsinstitut	Bildung
31001	3030	Gebäude für kulturelle Zwecke	Bildung

List of tables

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	3031	Schloss	Denkmal
31001	3032	Theater, Oper	Freizeit
31001	3033	Konzertgebäude	Freizeit
31001	3034	Museum	Freizeit
31001	3035	Rundfunk, Fernsehen	Freizeit
31001	3036	Veranstaltungsgebäude	Freizeit
31001	3037	Bibliothek, Bücherei	Bildung
31001	3038	Burg, Festung	Denkmal
31001	3040	Gebäude für religiöse Zwecke	Religion
31001	3041	Kirche	Religion
31001	3042	Synagoge	Religion
31001	3043	Kapelle	Religion
31001	3044	Gemeindehaus	Religion
31001	3045	Gotteshaus	Religion
31001	3046	Moschee	Religion
31001	3047	Tempel	Religion
31001	3048	Kloster	Religion
31001	3050	Gebäude für Gesundheitswesen	Gesundheit
31001	3051	Krankenhaus	Gesundheit
31001	3052	Heilanstalt, Pflegeanstalt, Pflegestation	Gesundheit
31001	3053	Ärztehaus, Poliklinik	Gesundheit
31001	3060	Gebäude für soziale Zwecke	Soziales
31001	3061	Jugendfreizeitheim	Freizeit
31001	3062	Freizeit-, Vereinsheim, Dorfgemeinschafts-, Bürgerhaus	Freizeit
31001	3063	Seniorenfreizeitstätte	Freizeit
31001	3064	Obdachlosenheim	Soziales
31001	3065	Kinderkrippe, Kindergarten, Kindertagesstät- te	Soziales

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	3066	Asylbewerberheim	Soziales
31001	3070	Gebäude für Sicherheit und Ordnung	Soziales
31001	3071	Polizei	Soziales
31001	3072	Feuerwehr	Soziales
31001	3073	Kaserne	Soziales
31001	3074	Schutzbunker	Soziales
31001	3075	Justizvollzugsanstalt	Soziales
31001	3080	Friedhofsgebäude	Soziales
31001	3081	Trauerhalle	Soziales
31001	3082	Krematorium	Soziales
31001	3090	Empfangsgebäude	Soziales
31001	3091	Bahnhofsgebäude	Verkehr
31001	3092	Flughafengebäude	Verkehr
31001	3094	Gebäude zum U-Bahnhof	Verkehr
31001	3095	Gebäude zum S-Bahnhof	Verkehr
31001	3097	Gebäude zum Busbahnhof	Verkehr
31001	3098	Empfangsgebäude Schifffahrt	Verkehr
31001	3100	Gebäude für öffentliche Zwecke mit Wohnen	Wohnen
31001	3200	Gebäude für Erholungszwecke	Freizeit
31001	3210	Gebäude für Sportzwecke	Freizeit
31001	3211	Sport-, Turnhalle	Freizeit
31001	3212	Gebäude zum Sportplatz	Freizeit
31001	3220	Badegebäude	Freizeit
31001	3221	Hallenbad	Freizeit
31001	3222	Gebäude im Freibad	Freizeit
31001	3230	Gebäude im Stadion	Freizeit
31001	3240	Gebäude für Kurbetrieb	Freizeit
31001	3241	Badegebäude für medizinische Zwecke	Freizeit

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
31001	3242	Sanatorium	Freizeit
31001	3260	Gebäude im Zoo	Freizeit
31001	3261	Empfangsgebäude des Zoos	Freizeit
31001	3262	Aquarium, Terrarium, Voliere	Freizeit
31001	3263	Tierschauhaus	Freizeit
31001	3264	Stall im Zoo	Freizeit
31001	3270	Gebäude im botanischen Garten	Freizeit
31001	3271	Empfangsgebäude des botanischen Gartens	Freizeit
31001	3272	Gewächshaus (Botanik)	Freizeit
31001	3273	Pflanzenschauhaus	Freizeit
31001	3280	Gebäude für andere Erholungseinrichtung	Freizeit
31001	3281	Schutzhütte	Freizeit
31001	3290	Touristisches Informationszentrum	Freizeit
31001	9998	Nach Quellenlage nicht zu spezifizieren	Sonstige
51001	1001	Wasserturm	Turm
51001	1002	Kirchturm	Religion
51001	1003	Aussichtsturm	Turm
51001	1004	Kontrollturm	Turm
51001	1005	Kühlturm	Turm
51001	1006	Leuchtturm	Turm
51001	1007	Feuerwachturm	Turm
51001	1008	Sende-, Funkturm	Turm
51001	1009	Stadt-, Torturm	Turm
51001	1010	Förderturm	Turm
51001	1011	Bohrturm	Turm
51001	1012	Schloss-, Burgturm	Denkmal
51001	9998	Nach Quellenlage nicht zu spezifizieren	Sonstige
51001	9999	Sonstiges	Sonstige

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
51002	1215	Biogasanlage	Industrie & Gewerbe
51002	1220	Windrad	Industrie & Gewerbe
51002	1230	Solarzellen	Industrie & Gewerbe
51002	1250	Mast	Sonstige
51002	1260	Funkmast	Sonstige
51002	1280	Radioteleskop	Sonstige
51002	1290	Schornstein	Sonstige
51002	1330	Kran	Sonstige
51002	1331	Drehkran	Industrie & Gewerbe
51002	1332	Portalkran	Industrie & Gewerbe
51002	1333	Laufkran	Industrie & Gewerbe
51002	1350	Hochofen	Industrie & Gewerbe
51002	1400	Umformer	Sonstige
51002	9999	Sonstiges	Sonstige
51003	1201	Silo	Landwirtschaft
51003	1205	Tank	Sonstige
51003	1206	Gasometer	Sonstige
51003	9999	Sonstiges	Sonstige
51006	1430	Zuschauertribüne	Freizeit
51006	1431	Zuschauertribüne, überdacht	Freizeit
51006	1432	Zuschauertribüne, nicht überdacht	Freizeit
51006	1440	Stadion	Freizeit
51006	1470	Sprungschanze (Anlauf)	Freizeit

List of tables

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
51006	1490	Gradierwerk	Sonstige
51006	9999	Sonstiges	Sonstige
51007	1210	Wachturm	Sonstige
51007	1400	Befestigung (Burgruine)	Denkmal
51007	1500	Historische Mauer	Denkmal
51007	1510	Stadtmauer	Denkmal
51007	1520	Sonstige historische Mauer	Denkmal
51007	9999	Sonstiges	Sonstiges
51009	1610	Überdachung	Sonstiges
51009	1611	Carport	Sonstiges
51009	1750	Denkmal	Denkmal
51009	9999	Sonstiges	Sonstiges
51001	1001	Wasserturm	Sonstiges
51001	1002	Kirchturm	Religion
51001	1003	Aussichtsturm	Sonstiges
51001	1004	Kontrollturm	Sonstige
51001	1005	Kühlturm	Sonstige
51001	1006	Leuchtturm	Sonstige
51001	1007	Feuerwachturm	Sonstige
51001	1008	Sende-, Funkturm	Sonstige
51001	1009	Stadt-, Torturm	Sonstige
51002	1220	Windrad	Industrie & Gewerbe
51002	1251	Freileitungsmast	Industrie & Gewerbe
51002	1260	Funkmast	Industrie & Gewerbe
51002	1280	Radioteleskop	Industrie & Gewerbe

Objektart	Wert	Bezeichnung	Gruppierung
51002	1290	Schornstein	Industrie & Gewerbe
51002	1340	Trockendock	Industrie & Gewerbe
51006	1430	Zuschauertribüne	Freizeit
51006	1440	Stadion	Freizeit
51006	1470	Sprungschanze	Freizeit
51006	1490	Gradierwerk	Freizeit
51007	1100	Historische Wasserleitung	Denkmal
51007	1110	Aquädukt	Denkmal
51007	1210	Wachturm (römisch), Warte	Denkmal
51007	1410	Burg (Fliehburg, Ringwall)	Denkmal
51009	1700	Mauer	Sonstige
52003	1010	Schiffshebewerk	Sonstige
52003	1020	Kammerschleuse	Sonstige
53001	1800	Brücke	Verkehr
53001	1830	Hochbahn, Hochstraße	Verkehr
53001	1880	Schutzgalerie, Einhausung	Verkehr
53001	1890	Schleusenkammer	Verkehr
53009	2030	Staumauer	Sonstige
53009	2050	Wehr	Sonstige
53009	2060	Sicherheitstor	Sonstige
53009	2070	Siel	Sonstige
53009	2080	Sperrwerk	Sonstige
53009	2090	Schöpfwerk	Sonstige