

Smartphonegestützte Analyse von siedlungsökologischen Risiko- und Potenzialflächen

vom Fachbereich Raum- und Umweltplanung der Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von

Diplom-Ingenieur Martin Fabisch

Mündliche Prüfung am: 03. August 2017

Dekan: **Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Sascha Henninger**

Vorsitzende der Prüfungskommission: **Univ.-Prof. Dr. habil. Gabi Troeger-Weiß**

1. Berichterstatter: **Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Sascha Henninger**

2. Berichterstatter: **Univ.-Prof. Dr. agr. Kai Tobias**

Technische Universität Kaiserslautern

D386

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein Verfahren entwickelt, das es kleinen Gemeinden erlaubt, selbstständig die siedlungsökologische Situation innerhalb ihrer Siedlung zu analysieren. Das entwickelte Matrix-Verfahren beruht dabei nicht auf der Messung oder Simulation der Klimaparameter, sondern auf der Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von verschiedenen siedlungsklimarelevanten Indikatoren. Dabei werden die Indikatoren nicht isoliert betrachtet, sondern paarweise in einer Matrix gegenübergestellt. Anhand der Ausprägungsintensität der Indikatoren kann aus dieser Matrix die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Stadtklimaphänomens abgeschätzt werden. Durch Anwendung des entwickelten Verfahrens können die für kleine Siedlungen relevanten Themenbereiche „urbane Überwärmung“, „urbane Frisch- und Kaltluftversorgung“ und „urbaner Wasserhaushalt“ untersucht werden.

Eng mit der Entwicklung der Matrix-Methode verknüpft, wurde parallel ein Bestandsaufnahmeverfahren entwickelt, das für die Erfassung der Indikatoren genutzt wird. Für die Bestandsaufnahme vor Ort wurde die Android-App „ÖkoHaSie“ entwickelt, die den Anwender Schritt-für-Schritt durch die Bestandsaufnahme leitet.

Die Kombination aus den beiden entwickelten Komponenten „Matrix-Methode“ und „ÖkoHaSie“ ermöglicht es Gemeinden schnell und selbstständig siedlungsökologische Risiko- und Potenzialflächen zu identifizieren. Durch den im Vergleich zu anderen Siedlungsklimaanalysemethoden geringen Arbeitsaufwand und die deutlich günstigeren Anschaffungskosten von technischen Geräten und Softwarelizenzen kann die Matrix-Methode als einzige „low-cost“-Lösung angesehen werden, die es Gemeinden ermöglicht, selbstständig die siedlungsökologische Situation vor Ort zu analysieren.

Inhaltverzeichnis

Kurzfassung	III
Inhaltverzeichnis	IV
1. Einleitung	1
1.1. Ziel.....	1
1.2. Forschungsleitende Fragestellungen	2
1.3. Methodische Vorgehensweise.....	3
2. Stand der Forschung.....	5
2.1. Stadtklima / Siedlungsökologie	5
2.1.1. Begriffsdefinition.....	5
2.1.2. Einfluss der Stadtgröße auf die urbane Wärmeinsel.....	11
2.1.3. Kleine Siedlungen	12
2.1.4. Auswirkungen der urbanen Überwärmung.....	13
2.1.5. Klimatope	15
2.2. Erfassungsmethoden Siedlungsklima	18
2.2.1. Auswertung vorliegender Daten	18
2.2.2. Empirische Erhebung.....	19
2.2.3. Modellsimulationen	25
2.2.4. Ökologische Kennwerte zur Siedlungsklimabewertung	29
2.3. Bewertung der relevanten Erfassungsmethoden.....	30
2.3.1. Sondermessnetze.....	30
2.3.2. Horizontale Messprofile.....	32
2.3.3. Numerische Modellsimulationen	33
2.3.4. Gesamtbewertung	35
3. Notwendigkeit eines Untersuchungsverfahrens für kleine Siedlungen	37
4. Konzeptionelle Methodenentwicklung.....	39
4.1. Ansatz	39
4.2. Indikatorklassifizierung	42
4.3. Untersuchungsfelder.....	43
4.3.1. Urbane Überwärmung.....	43
4.3.2. Urbane Frisch- und Kaltluftversorgung.....	49
4.3.3. Urbaner Wasserhaushalt.....	51

4.4.	Auswertung	53
5.	Bestandsaufnahmearten.....	56
5.1.	Vor Ort.....	56
5.2.	Fernerkundung.....	57
5.2.1.	Manuelle Fernerkundung	58
5.2.2.	GIS-basierte Fernerkundung.....	58
5.2.3.	Automatische Fernerkundung	60
5.3.	Verfügbare Daten nutzen.....	60
5.4.	Bewertung Bestandsaufnahmeverfahren.....	61
5.4.1.	Vor-/Nachteile	61
5.4.2.	Validierung Schätzverfahren	63
6.	Anwendung und Validierung der Matrix Methode.....	71
6.1.	Indikatorbasierte Bestandsaufnahme.....	71
6.1.1.	Anforderungsprofil	71
6.1.2.	Theoretische Umsetzung.....	71
6.2.	Smartphone- oder tabletgestützte Bestandsaufnahme	72
6.2.1.	Online	72
6.2.2.	Webapplikation.....	75
6.2.3.	Native App.....	76
6.3.	Umsetzung/Workflow	85
6.3.1.	Vorbereitung	85
6.3.2.	Bestandsaufnahme	88
6.3.3.	Nachbereitung	92
6.3.4.	Auswertung.....	94
6.3.5.	Visualisierung	98
6.4.	Alex-Müller-Straße Kaiserslautern.....	103
6.4.1.	Anwendung der Matrix Methode.....	104
6.4.2.	Vergleich mit durchgeführter numerischen Simulation	107
6.5.	Kaiserslautern Dansenberg	111
6.5.1.	Untersuchungsraum	111
6.5.2.	Matrix Methode.....	112
6.5.3.	Vergleich mit durchgeführter mobiler Messung	117
6.6.	Innenstadt Kaiserslautern.....	123
7.	Diskussion der Ergebnisse	126

7.1.	Nummerische Simulation.....	126
7.2.	Mobile Messung	127
7.3.	Gesamtbetrachtung	129
8.	Fazit und Ausblick	135
8.1.	Fazit.....	135
8.2.	Ausblick.....	136
	Literaturverzeichnis.....	138
	Internetquellen.....	147
	Abbildungsverzeichnis	152
	Tabellenverzeichnis.....	155
	Codeverzeichnis.....	156
	Lebenslauf	157
	Anhang	159

1. Einleitung

1.1. Ziel

Die Auswirkungen des globalen Klimawandels wurden in den letzten Jahren öffentlichkeitswirksam in Szene gesetzt. Neben dem globalen Klimawandel kommt es aber auch auf lokaler Ebene zu Klimaveränderungen. Diese Veränderungen treten immer dann auf, wenn die natürlichen Gegebenheiten durch den Menschen verändert werden. Besonders ausgeprägt sind solche lokalen Klimamodifikationen in Städten. Neben der Beeinflussung des lokalen Windfelds, der Lufthygiene und des urbanen Wasserhaushalts kann eine urbane Wärmeinsel entstehen, die in großen Städten bis zu 10 K betragen kann [KUTTLER 2013, 213].

Vor dem Hintergrund der weltweit zunehmenden Urbanisierung und Überalterung der Gesellschaft sind diese Klimaveränderungen von besonders hoher Relevanz. Das Wachstum der Städte führt dazu, dass die Intensität des Stadtklimaeffekts zunimmt und gleichzeitig die Anzahl der betroffenen Einwohner steigt. Besonders das Herz-Kreislauf-System von Kleinkindern und Senioren reagiert empfindlich auf die erhöhten Lufttemperaturen in den Siedlungen.

In Deutschland ist eine nachhaltige und damit auch klimaorientierte Planung im Raumordnungsgesetz §1 Absatz 2 verankert. In der Realität von knappen öffentlichen Kassen wird dieser Aspekt allerdings oft im Abwägungsprozess vernachlässigt. Um eine ökologische Siedlungsentwicklung betreiben zu können, müssen zunächst die lokalen Gegebenheiten analysiert werden. Doch der flächendeckende Nachweis dieses Stadtklimaeffekts ist nur durch aufwändige und in der Regel kostenintensive empirische Erhebungen oder komplexe Modellierungen möglich. Für einzelne Stadtteile oder kleine Gemeinden, die oft ebenfalls von negativen Klimaveränderungen betroffen sind, sind diese Untersuchungsverfahren meist zu teuer, sodass die meisten Stadtklimagutachten in großen Städten durchgeführt werden [SCHÖNWIESE 2008, 340]. Die zurzeit üblicherweise verwendeten Verfahren (z.B.: einfache Simulationsverfahren oder kleinräumige empirische Erhebungen) können keine kostengünstige Lösung liefern, die hinsichtlich Detaillierung und Aktualität ausreichende und belastbare Ergebnisse liefert.

Im Rahmen der Dissertation soll ein Verfahren entwickelt werden, das es ermöglicht, siedlungsklimatische Risiko- und Potenzialflächen in kleinen Siedlungen oder Stadtteilen schnell und wissenschaftlich fundiert zu identifizieren. Diese vollständig neu entwickelte Methode wird Matrix-Verfahren genannt. Dabei soll

besonders Wert darauf gelegt werden, dass das Verfahren durch die zuständige Planungsbehörde selbstständig durchgeführt werden kann, um Kosten durch einen externen Klimagutachter zu vermeiden.

1.2. Forschungsleitende Fragestellungen

Die forschungsleitenden Fragen können in zwei unterschiedliche Bearbeitungsphasen eingeteilt werden. In der ersten Phase dienen die Fragen zur Erarbeitung der für dieses Dissertationsprojekt benötigten Grundlagen. Im Vordergrund stehen dabei die Entstehung des Stadtklimaeffekts und dessen Untersuchungsmöglichkeiten.

- Welche natürlichen und anthropogenen Faktoren beeinflussen das Klima in Siedlungsräumen?
- Welche Methoden zur Siedlungsklimaanalyse werden zurzeit angewendet?
- Was sind die Vor- und Nachteile der eingesetzten Methoden?
- Sind Stadtklimauntersuchungen auch für kleine Siedlungen bzw. einzelne Stadtteile sinnvoll?
- Gibt es kostengünstige Verfahren, die für die Stadtplanung verwendbare Ergebnisse liefern?

In der zweiten Bearbeitungsphase werden die forschungsleitenden Fragen beantwortet, die bei der Entwicklung der Matrix-Methode entstanden sind. Diese umfassen neben der Entwicklung der Methode auch deren fortlaufende Verbesserung und die abschließende Validierung der Ergebnisse.

- Auf welche Art und Weise lassen sich möglichst kostengünstige aber dennoch wissenschaftlich belastbare Siedlungsklimaanalysen erstellen?
- Welche Methoden eignen sich am besten zur Erfassung der natürlichen und anthropogenen Indikatoren im Siedlungsraum?
- Sind die Ergebnisse der Matrix-Methode deckungsgleich mit denen der klassischen Untersuchungsmethoden?
- Kann die Matrix-Methode die bestehenden Stadtklimaanalysen ersetzen?

1.3. Methodische Vorgehensweise

Diese Arbeit ist in acht Kapitel unterteilt und orientiert sich dabei an den Verfahrensschritten zur Entwicklung der Matrix-Methode und der App „ÖkoHaSie“. Zunächst wird der Stand der Forschung untersucht. Dieser umfasst eine Auseinandersetzung mit den Begriffen Stadtklima und Siedlungsökologie. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Betrachtung von kleinen Siedlungen bzw. Untersuchungsräumen bis 10.000 Einwohnern gelegt. Zusätzlich wird eine Analyse der Erfassungsmethoden zur siedlungsklimatischen Bewertung von Untersuchungsräumen vorgenommen. Neben der Beschreibung der wichtigsten Methoden erfolgt ebenfalls eine Bewertung der für die räumliche Planung relevanten Verfahren.

Aus dieser Methodenbewertung wird im nächsten Schritt die Notwendigkeit einer neuartigen Erfassungsmethode speziell für kleine Siedlungen entwickelt. Dabei wird ein Anforderungsprofil erstellt, welches sicherstellen soll, dass das neuartige Verfahren auf die Bedürfnisse von Gemeinden in der beschriebenen Größenordnung zugeschnitten ist.

Im folgenden Kapitel wird zunächst der theoretische Ansatz der Matrix-Methode erläutert. Im weiteren Verlauf des Kapitels erfolgt eine Konkretisierung dieses Ansatzes durch die Festlegung der Untersuchungsgegenstände urbane Überwärmung, urbane Frisch- und Kaltluftversorgung und urbaner Wasserhaushalt. Insgesamt umfasst die Matrix-Methode sechs unterschiedliche Matrizen. Der für die jeweilige Matrix zugrundeliegende Wirkungszusammenhang wird in den Unterkapiteln beschrieben. Innerhalb dieses Kapitels erfolgt ebenfalls eine Erläuterung der Klassifizierungskriterien für die einzelnen Indikatoren.

Im fünften Kapitel werden verschiedene Bestandsaufnahmeverfahren beschrieben, die zur Datenerhebung für die Anwendung der Matrix-Methode nutzbar sind. Dabei werden sowohl Bestandsaufnahmeverfahren vor Ort, wie auch fernerkundungsbasierte Verfahren berücksichtigt. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Bewertung der untersuchten Verfahren und die Validierung des eingesetzten Schätzverfahrens.

Der Entwicklungsprozess der App „ÖkoHaSie“ wird im sechsten Kapitel der Arbeit beschrieben. Nach der Definition eines Anforderungsprofils und der theoretischen Umsetzung erfolgt die Darstellung von drei verschiedenen Ansätzen zur smartphone- bzw. tabletgetützten Bestandsaufnahme. Da die Lösung über eine native App als einziger Ansatz alle Punkte des Anforderungsprofils erfüllt,

wird dieser durch die Programmierung der App umgesetzt. Zur Verdeutlichung der Verfahrensschritte für die Anwendung der Matrix-Methode werden diese von der Vorbereitung der Bestandsaufnahme bis zur abschließenden Visualisierung erläutert. Zur Validierung der Matrix-Methode wird diese auf drei verschiedene Untersuchungsräume angewendet und mit den Ergebnissen von mobilen Messungen und einer numerischen Simulation verglichen.

Im siebten Kapitel der Arbeit werden die Ergebnisse der Validierung zusammengefasst. Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung der Matrix-Methode und ein Vergleich mit den für die räumliche Planung relevanten siedlungsklimatischen Erfassungsmethoden.

Den Abschluss der Arbeit bilden das Fazit und ein Ausblick. Hier werden die zentralen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und die forschungsleitenden Fragen abschließend beantwortet. Darüber hinaus werden Weiterentwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt, die zur Verbesserung der Matrix-Methode im Gesamten, wie auch für die Bestandsaufnahmeapp „ÖkoHaSie“ im Speziellen genutzt werden können.

2. Stand der Forschung

2.1. Stadtklima / Siedlungsökologie

2.1.1. Begriffsdefinition

Das Stadtklima ist das durch die Wechselwirkung mit der Bebauung und deren Auswirkungen (einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen) modifizierte Klima [WMO 2014, o. S.].

Die Definition des Begriffs Stadtklima ist ohne eine Definition des Begriffes Stadt nicht möglich. Aus politischer und rechtlicher Perspektive wird eine Siedlung durch die Vergabe der Stadtrechte zu einer Stadt. Der Begriff des Stadtklimas ist allerdings nicht an diese Definition gebunden. Auswirkungen der anthropogenen Überformung der Landschaft auf das lokale Klima können auch durch kleine Siedlungen oder Stadtteile entstehen. Von daher würden die Begriffe Siedlungs- oder Quartiersklima die Veränderungen der natürlichen Gegebenheiten besser beschreiben. Darüber hinaus ist der Begriff „Klima“ in Zusammenhang mit Stadtklima anders zu verstehen als in der allgemeingültigen Definition. Normalerweise wird unter Klima der Zustand der Atmosphäre über einen Zeitraum von 30 Jahren verstanden. Stadtklimaphänomene bestehen in der Regel allerdings über einen deutlich kürzeren Zeitraum, sodass hier der Begriff Stadtmeteorologie aus fachlicher Sicht richtig wäre. Da sich in der Praxis die Begriffe Stadtklima bzw. Stadtklimatologie durchgesetzt haben, werden sie in dieser Arbeit verwendet.

Die Faktoren, die die urbane Klimaveränderung beeinflussen, sind sowohl auf mikro- und mesoskaliger Ebene wie auch auf makroskaliger Ebene zu finden. Zu den makroskaligen Einflüssen zählen die Klimazone, die Breitenlage und die Entfernung zu großen Wasserflächen der Stadt. Diese Faktoren besitzen in der Regel nur einen geringeren Einflussfaktor auf das urbane Klima, da sie sowohl innerhalb der Stadt, wie auch im Stadtumland wirken [HUPFER & KUTTLER 2006, 372]. Die mikro- und mesoskaligen Einflüsse, zu denen

- die urbane und rurale Topographie,
- die Größe bzw. Einwohnerzahl der Stadt,
- die urbane und rurale Flächennutzungstypen,
- der Versiegelungsgrad,
- die dreidimensionale Strukturierung des Stadtkörpers,
- die Emissionsart und -stärke gasförmiger, fester und flüssiger Luftbeimengungen und
- die Abwärme aus technische Prozessen

zählen, haben hingegen einen deutlich stärkeren Einfluss auf das Stadtklima [HUPFER & KUTTLER 2006, 372]. Der Mensch als Bewohner der Städte wird durch das Stadtklima beeinflusst. In der Biometeorologie werden vier verschiedene atmosphärische Wirkungskomplexe unterschieden. Diese sind der thermische, der aktinische, der chemische bzw. lufthygienische und der neurotrophe Wirkungskomplex (Abb. 1) [EISENHARDT 2008, 114].

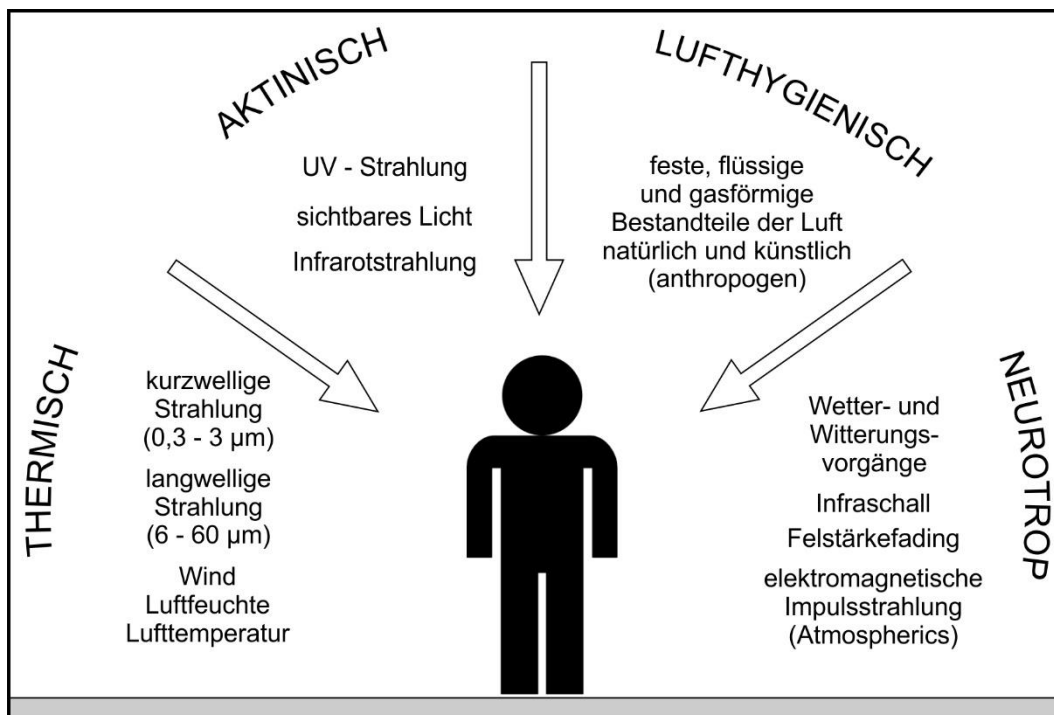


Abb. 1: Atmosphärische Wirkungskomplexe [EISENHARDT 2008, 114; verändert]

Für die planungsbezogene Anwendung der Stadtklimatologie kann das Stadtklima in zwei Hauptkomponenten unterteilt werden [Mayer 1992, 200 ff.]:

- thermische Komponente:
Strahlungshaushalt, fühlbare und latente Wärme, Gebäudewärme, Bodenwärme und anthropogen erzeugte Wärme
- lufthygienische Komponente:
Emission, Transmission, Immission und Deposition von Luftverunreinigungen

Die thermische Komponente und die lufthygienische Komponente sollten allerdings nie komplett unabhängig voneinander betrachtet werden, da zwischen beiden Komponenten Wechselwirkungen bestehen.

In Industrienationen wird die urbane Luftqualität hauptsächlich durch Emittenten wie Kfz-Verkehr, Industrie, Gewerbe, Kraftwerke und den privaten Hausbrand

beeinflusst. Die niedrige Quellhöhe des Kfz-Verkehrs führt dazu, dass dieser über 50 % der Stickoxide, knapp 50 % des Kohlenmonoxids und knapp 20 % der flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (engl. non methane volatile organic compounds – kurz NMVOC) verantwortlich ist. In Schwellen- und Entwicklungsländern wird die urbane Luftqualität oft zusätzlich durch den Eintrag von Luftbeimengungen aus ruralen Flächen negativ beeinflusst [HENNINGER 2011, 86]. In den Industriestaaten stellt die Belastung der Stadtatmosphäre durch bodennahe Ozon und Stäube (z. B.: Feinstaub und Ruß) das größte Problem dar. Die Belastung durch Stickstoffdioxid, Kohlenmonoxid und Schwefeldioxid ist in den letzten Jahren durch den Einsatz von verbesserten technischen Lösungen (z. B.: Katalysatoren, Filteranlagen, schwefelarme Brennstoffe) und der Anwendung von Luftreinhalteplänen deutlich zurückgegangen [SCHREIBER 2012, 75 FF.]. In den Schwellen- und Entwicklungsländern stellt die Konzentration dieser Spurenstoffe hingegen ein großes Problem dar und steigt seit mehreren Jahren an [GAUR ET AL. 2014, 295].

Eine der bekanntesten und für die Industriestaaten bedeutendsten lufthygienischen Phänomene des Stadtklimas ist die Belastung durch Feinstaub. Als Feinstaub werden sowohl feste, wie auch flüssige luftgetragene Partikel definiert. Im besonderen Fokus stehen dabei Partikel, deren Größe weniger als 10 µm (PM₁₀) beträgt, da diese lungengängig sind und sich somit direkt auf die Gesundheit des Menschen auswirken. Erstmals wurde im Jahr 2005 ein für alle EU-Mitgliedsstaaten gültiger Grenzwert für PM₁₀ festgelegt. Eine weitere Klassifizierung der Feinstäube wird für die Größen 2,5 µm und 0,1 µm durchgeführt. Partikel mit einer Größe von unter 2,5 µm (PM_{2,5}) können bereits in die Lungenbläschen vordringen und zu erheblichen Atemwegserkrankungen führen. Seit dem Jahr 2015 gilt in Deutschland ein Grenzwert von 25 µg PM_{2,5} m⁻³, der im Jahresmittel nicht überschritten werden soll [UMWELTBUNDESAMT (ÖSTERREICH) 2016, O. S.]. PM_{0,1} kann aufgrund der sehr geringen Größe über die Atemwege in die Blutbahn gelangen und so nahezu jede Stelle im Körper erreichen. Bisher gibt es für die Europäische Union oder Deutschland noch keine festgelegten PM_{0,1} Grenzwerte.

Das bodennahe Ozon hat anders als Ozon der Ozonschicht eine negative Auswirkung auf die menschliche Gesundheit. Durch eine erhöhte Konzentration von bodennahem Ozon kann die Lungenfunktion des Menschen beeinträchtigt werden, was zu einer erhöhten Sterblichkeit führt. Aus Stickstoffdioxid entsteht unter intensiver Sonneneinstrahlung und hohen Temperaturen atomarer Sauerstoff (O), der sich mit Sauerstoff (O₂) verbindet und so Ozon bildet. Ein Teil des

entstandenen Ozons wird durch das Stickstoffmonoxid der urbanen Atmosphäre wieder in Sauerstoff (O₂) und Stickstoffdioxid (NO₂) umgewandelt. Auf diese Weise bildet sich ein fotochemisches Gleichgewicht zwischen O, O₂ und O₃. Durch die Einwirkung von weiteren in der Atmosphäre vorhandenen Gasen wie Kohlenmonoxid und NMVOCs kann dieses Gleichgewicht gestört werden, sodass es zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration kommt. Besonders in den Sommermonaten kann dieses Gleichgewicht zusätzlich durch die Produktion von biogenen Kohlenwasserstoffen (u. a.: Isopren und Terpene) gestört werden [HENNINGER 2011, 87]. Nach Angaben des Umweltbundesamts steigt die mittlere Konzentration von bodennahen Ozon im städtischen Umwelt seit Jahren tendenziell an (vgl. Abb. 2) [UMWELTBUNDESAMT 2016, o. S.].

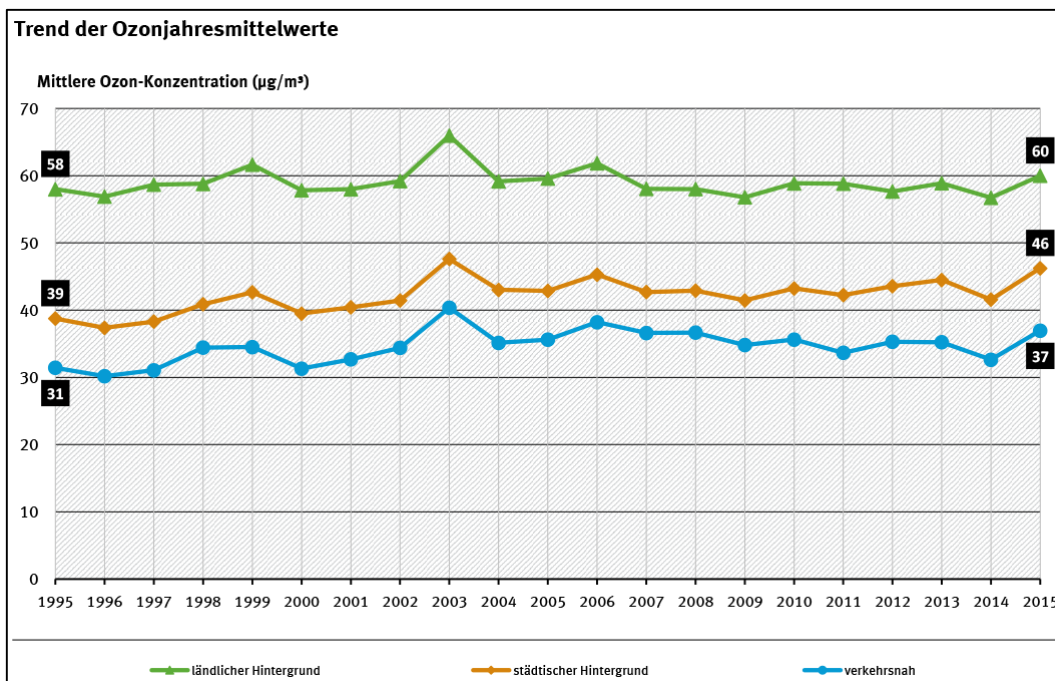


Abb. 2: Trend der Ozonjahresmittelwerte [UMWELTBUNDESAMT 2016, o. S.]

Als wichtigstes Element der thermischen Komponente des Stadtklimas gilt die urbane Überwärmung. Zusammengefasst wird dieses Phänomen der erhöhten Lufttemperatur innerhalb der Stadt gegenüber des Stadtumlands als urbane Wärmeinsel bezeichnet. In Städten mit einer besonders heterogenen Siedlungsstruktur kann es zu einer Ausbildung von mehreren Wärmeezellen kommen [OKE & EAST 1971, 418]. Die Gesamtheit der Wärmeezellen einer Stadt wird unter den Begriffen Wärmearchipel [ERIKSEN 1976, 369] oder Wärmemosaik zusammengefasst [AHRENS 1981, 30 ff.]. Die Kennzeichen einer Stadt, die zur Ausbildung einer

urbanen Wärmeinsel führen, lassen sich in den Kategorien Straßenschlucht-Geometrie, Luftverunreinigungen, Wärmeemission und Baumaterialien zusammenfassen [OKE 1982, 17].

Tab. 1: Energetische Ursachen der urbanen Wärmeinsel [OKE 1982, 17; verändert]

Stadt-Kennzeichen	Energetische Auswirkung
I. Straßenschlucht-Geometrie	
a) größere Oberfläche	Mehrfachreflexion von kurzwelliger Strahlung → größere Absorption von kurzwelliger Strahlung
b) verringerter Sky-View-Faktor	verringerte effektive Ausstrahlung
c) verringerte Windgeschwindigkeit	verringertes turbulenter Wärmetransport
II. Luftverunreinigung	größere atmosphärische Gegenstrahlung
III. Wärmeemission (Gebäude und Verbrennungsprozesse)	anthropogen erzeugte Wärme
IV. Baumaterialien	
a) erhöhte Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität	erhöhte Wärmespeicherung
b) verringerte Wasserdurchlässigkeit	geringere Verdunstung

Die zunächst nur quantifiziert erfassten Kennzeichen haben Oke et al. im Jahr 1991 durch Modellrechnungen quantifiziert. Diese Untersuchungen zeigen, dass sowohl die Straßenschlucht-Geometrie, wie auch die verwendeten Baumaterialien einen so erheblichen Einfluss auf den urbanen Energiehaushalt besitzen, dass jedes dieser Kennzeichen zur Ausbildung einer urbanen Wärmeinsel führen kann. Die Wärmeemission von Gebäuden und aus Verbrennungsprozessen, sowie der lokale Treibhauseffekt, der durch Luftverunreinigungen entsteht, sind für die Ausbildung einer urbanen Überwärmung nur von untergeordneter Bedeutung [OKE ET AL. 1991, 356].

Die mittlere jährliche Wärmeinselintensität liegt meist zwischen 1 und 3 K [LANDSBERG 1981, 85 ff.]. Dieser Wert ist allerdings sehr stark abhängig von den zuvor beschriebenen Faktoren und den Messstandorten für die ruralen Vergleichswerte. Tabelle 2 zeigt die mittlere Intensität der urbanen Wärmeinsel (UHI_{mit}) für verschiedene Städte.

Tab. 2: UHI_{mit} in verschiedenen Städten [Eigene Darstellung 2017]

Stadtname	Messzeitraum	UHI _{mit} [°C]	Quelle
Ankara	1955 - 1990	2,6	Karaca et al. (1995)
Barcelona	1970 - 1984	1,4	Moreno-Carcia (1994)
Krakau	1961 - 1990	0,9	Kozuchowski et al. (1994)
London	1931 - 1960	1,4	Chandler (1965)
Mexiko City	1896 - 1980	3,5	Jauregui (1993)
München	1982 - 1984	1,9	Bründl et al. (1987)
Washington, DC	1945 - 1979	1,6	Feng und Petzold (1998)
Wien	1986 - 1995	1,5	Böhm (1998)

Die Intensität der urbanen Wärmeinsel unterliegt sehr starken Schwankungen. Diese Schwankungen unterliegen sowohl einem Jahres- wie auch einem Tagesgang. Die höchsten Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Stadtumland werden im Sommer während autochthonen Strahlungswetterlagen erreicht [OKE & MAXWEL 1975, 192]. An diesen Tagen erreicht die urbane Wärmeinsel in Städten mittlerer geographischer Breite ihre maximale Intensität etwa 3 bis 5 Stunden nach Sonnenuntergang [HAEGER-EUGENSSON & HOLMER 1999, 975]. Ein Überblick über die maximale Wärmeinselintensität in verschiedenen Städten ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Tab. 3: UHI_{max} in verschiedenen Städten [VAN HOVE ET AL.2017, 22; verändert]

Stadtname	UHI _{max} [°C]	Quelle
Athen	4,6	Livada et al. (2002)
Barcelona	8,2	Moreno-Garcia (1994)
London	8,6	Kolokonitroni und Giridharan (2008)
Moskau	9,8	Shahgedanova et al. 1997)
München	8,2	Mayer und Höppe 1987)
Paris	8,0	Lemonsu und Masson (2002)
Rom	5,0	Bonacquisti et al. (2006)

2.1.2. Einfluss der Stadtgröße auf die urbane Wärmeinsel

Die Stadtgröße wird in Literaturquellen oft als ein zentraler Einflussfaktor auf die urbane Wärmeinsel genannt. Dabei wird in der Regel nicht die flächige Ausdehnung der Stadt, sondern die Einwohnerzahl als maßgeblicher Faktor verwendet [OKE 1973, 769; GARSTANG ET AL. 1975, 140; OKE 1976, 268; KATSOLIS UND THEOHRATOS 1985, 1296].

Erste Untersuchungen zur Abhängigkeit zwischen der maximalen Wärmeinselintensität und der Einwohnerzahl der Stadt führte Oke im Jahr 1973 durch. Dazu analysierte er Wärmeinseln in verschiedengroßen nordamerikanischen und westeuropäischen Städten und erkannte auf diese Weise eine lineare Beziehung zwischen der Einwohnerzahl (P) und der maximalen Wärmeinselintensität UHI_{max} (in K). Seine zunächst durchgeführten Analysen korrigierte Oke im Jahr 1976 unter der Berücksichtigung von zusätzlich durchgeführten Messungen.

- Nordamerika: $UHI_{max} = 3,06 \log(P) - 6,79$ ($R^2 = 0,96$)
- Westeuropa: $UHI_{max} = 2,01 \log(P) - 4,06$ ($R^2 = 0,74$)

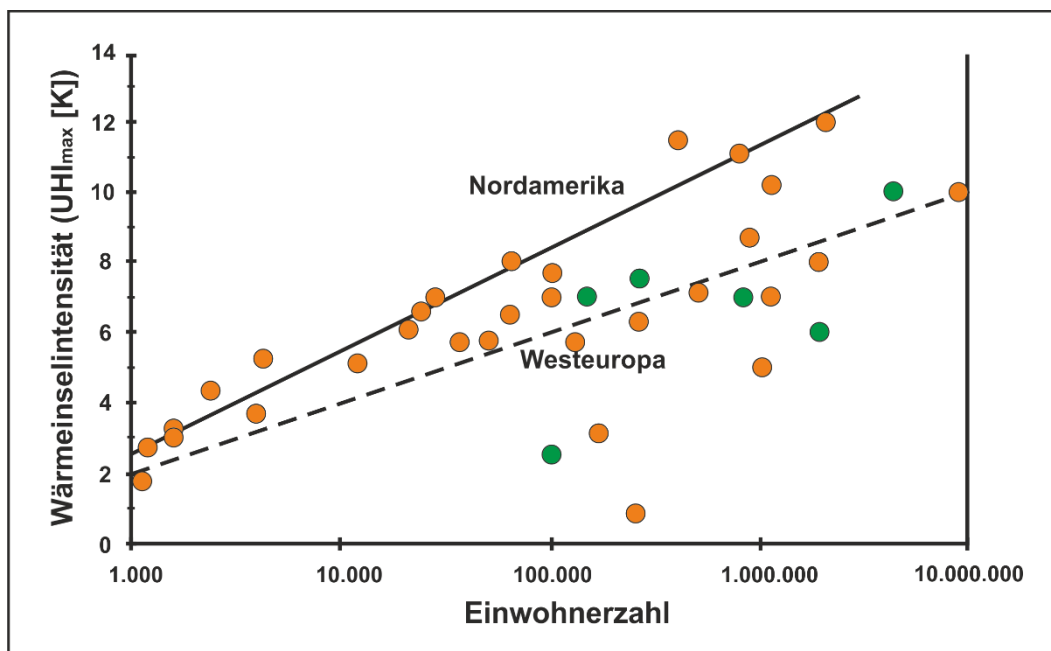


Abb. 3: Wärmeinselintensität in Abhängigkeit der Einwohnergröße (grün = deutsche Städte; orange = weltweite Städte) [SPEKTRUM 2012, o. S.; OKE 1982, 6; verändert]

Die Beobachtungen zwischen den westeuropäischen und amerikanischen Städten unterscheiden sich hinsichtlich der Steigung der Regressionsgraden und dem Bestimmtheitsmaß (R^2). Die unterschiedlichen Charakteristika der nordamerikanischen und europäischen Städte führen dazu, dass trotz einer höheren Einwohnerdichte die maximale Wärmeinselintensität in westeuropäischen Städten geringer ist, als die Wärmeinselintensität in nordamerikanischen Städten mit der gleichen Einwohnerzahl. Dieser Effekt kann auf die höhere Verdunstung, die niedrigere anthropogene Energieflussdichte und die geringere Wärmespeicherkapazität der untersuchten europäischen Städte zurückgeführt werden. Zusätzlich wird in nordamerikanischen Städten durch den verbreiteten Einsatz von Klimaanlage mehr anthropogene Abwärme produziert, als dies in Europa der Fall ist. Das geringere Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang in den westeuropäischen Städten kann vermutlich auf die über lange Zeit gewachsenen Städte zurückgeführt werden. Das führt dazu, dass sich die Siedlungsstruktur zwischen den europäischen Städten deutlicher unterscheidet als die der nordamerikanischen Städte [OKE 1973, 772 ff.].

Die Bevölkerungszahl sollte allerdings nicht als alleiniger Indikator zur Abschätzung der Wärmeinselintensität einer Stadt verwendet werden. Die Bevölkerungszahl lässt keine direkten Rückschlüsse auf den thermischen Energiehaushalt der Stadt zu. Aus diesem Grund sollten auch die stadtspezifischen Faktoren wie Bebauungsdichte, Grünflächen- und Versiegelungsgrad und Baukörpervolumen berücksichtigt werden [BÖHM 1998, 125].

2.1.3. Kleine Siedlungen

Oft werden Stadtklimaphänomene wie die urbane Überwärmung nur Großstädten zugeordnet. Zwar sind die Phänomene in diesen Städten meist stärker ausgeprägt, aber auch kleine anthropogene Veränderungen der natürlichen Gegebenheiten haben einen Einfluss auf das lokale Klima. Als kleine Siedlung werden im Rahmen dieser Arbeit Gemeinden, Stadtteile oder Stadtrandquartiere bis zu einer Einwohnerzahl von etwa 10.000 Einwohnern definiert. In den Jahren zwischen 2005 und 2015 stieg der Urbanisierungsgrad in Deutschland um 1,9 Prozent auf 75,3 Prozent an [STATISTA 2017a, o. S.]. Dennoch lebten 2015 noch immer 26,0 Prozent der deutschen Bevölkerung in einer Gemeinde mit unter 10.000 Einwohnern [STATISTA 2017b, o. S.]. Da im Rahmen der Volkszählung im Jahr 2015 nur eine Klassifizierung nach Gemeindegröße durchgeführt wurde, ist eine weitere Differenzierung nicht möglich. Personen, die im Rahmen der Volkszählung einer Stadt zugeordnet wurden, aber nicht im Kernbereich der Stadt,

sondern in einem Stadtteil wohnen, werden von dieser Statistik nicht erfasst. Die Analyse der Einwohnerzahlen von Kaiserslautern zeigt, dass etwa 28 Prozent der Einwohner in einem Ortsbezirk mit unter 10.000 Einwohner leben [STADT KAISERSLAUTERN 2017a, o. S.]. Es ist also davon auszugehen, dass ein deutlich größerer Teil als die 26,0 Prozent der Menschen in Deutschland in einer Siedlung unter 10.000 Einwohner leben.

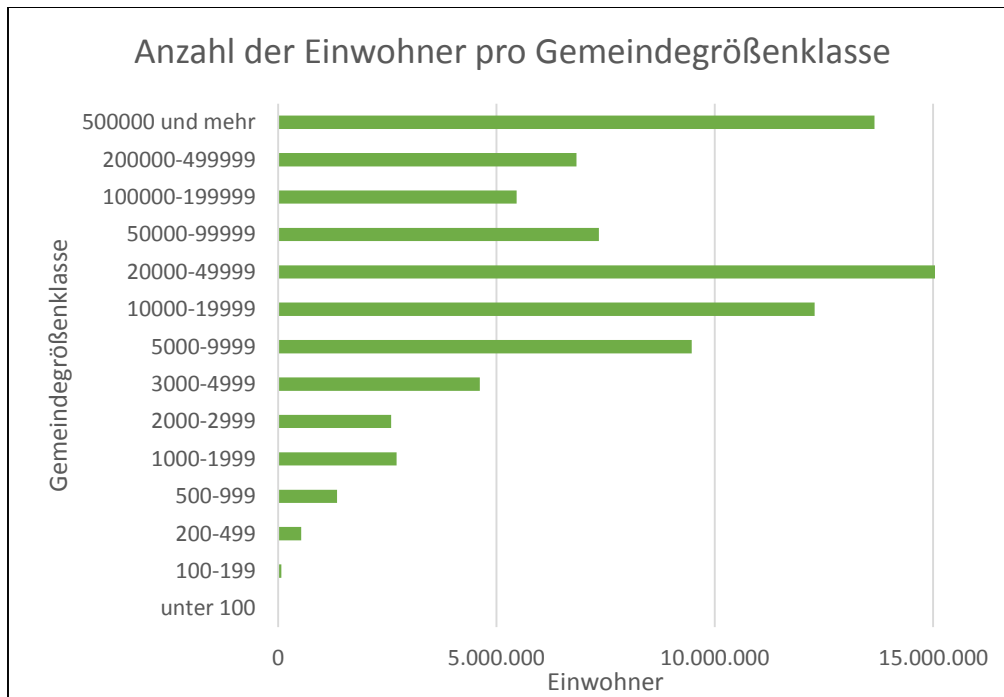


Abb. 4: Einwohner nach Gemeindegrößenklasse [Eigene Darstellung 2017; Grundlage: STATISTA 2017b, o.S.]

Die von Oke aufgestellte Gleichung kann genutzt werden, um eine erste Abschätzung über die zu erwartende maximale Wärmeinselintensität zu erhalten. Für eine westeuropäische Siedlung mit 5.000 Einwohnern ergibt sich nach Oke eine maximale Wärmeinselintensität von 3,8 K. Dieser Maximalwert für die urbane Wärmeinselintensität kann durch Messwerte aus der Literatur bestätigt werden. Durchgeführte Messfahrten von Danzeisen und eine Zusammenstellung von Schlünzen zeigen für Siedlungen zwischen 1.000 und 10.000 Einwohnern eine maximale Wärmeinselintensität zwischen 1,9 K und 5,2 K [SCHLÜNZEN 2012, o. S.; DANZEISEN 1983, 7 ff.].

2.1.4. Auswirkungen der urbanen Überwärmung

Die Auswirkungen der urbanen Überwärmung auf den Menschen stellen vor dem Hintergrund des Klimawandels ein intensiv diskutiertes Thema dar. Dabei müssen sowohl die positiven, wie auch die negativen Aspekte berücksichtigt

werden. Diese Analyse kann mit Hilfe von klimatologischen Kenntagen durchgeführt werden (z. B.: Frosttag, Schneedeckentag, Heißer Tag oder Tropennacht) [DWD 2017b, o. S.]. Grundsätzlich lässt sich dabei sagen, dass sich in den Wintermonaten die urbane Überwärmung meist positiv auswirkt, während in den Sommermonaten die erhöhten Temperaturen im Vergleich zum Umland vorwiegend negative Auswirkungen auf den Menschen und die Lebensqualität in den Städten besitzen.

In den Wintermonaten kommt es durch die urbane Überwärmung zu einer Verkürzung der Frostperiode. Damit einhergehend reduziert sich die Anzahl der Heiztage, wodurch die Luftschadstoffimmission durch Hausbrand verringert wird und die Heizkosten reduziert werden können [KUTTLER 1998, 144 f.]. Einen weiteren ökonomischen Vorteil der urbanen Wärmeinsel stellt im Winter der Rückgang der Schneedeckendauer dar [Kuttler 2013, 213]. Die erhöhten Temperaturen führen durch den verringerten Einsatz von Streusalz zu einer Reduzierung der Kosten. Dadurch wird ebenfalls die Belastung der Natur durch das Streusalz verringert und eine Entstehungsquelle von Feinstaub reduziert. Die Verkürzung der Frostperiode und der Schneedeckendauer im urbanen Raum führt zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode. Somit wird ebenfalls die Pollensaison verlängert, was dazu führen kann, dass Allergien zunehmen oder intensiver auftreten. Darüber hinaus kann es zu einer Veränderung des Allergenspektrums kommen [EIS ET AL. 2010, 85].

In den Sommermonaten führt die urbane Überwärmung zu einer Beeinflussung der Lebensqualität und der menschlichen Gesundheit [KOPPE ET. AL. 2004, 17 ff.]. Die Lebensqualität wird sowohl positiv, wie auch negativ beeinflusst. Auf der einen Seite gibt es in den Städten durch die erhöhten Temperaturen eine erhöhte Anzahl von Grillparty- bzw. Biergartentagen. Auf der anderen Seite führen die erhöhte Lufttemperatur und die reduzierte nächtliche Auskühlung zu einer Verringerung der Schlafqualität, da der menschliche Organismus durch die erhöhten Temperaturen nicht zur Ruhe kommen kann. [HENNINGER 2011, 70]. Die Kombination aus sommerlichen Hitzewellen und der urbanen Überwärmung kann zu einer erheblichen Belastung des Herz-Kreislauf-Systems führen. Dabei sind besonders Risikogruppen wie Senioren, Kinder und Kranke von einer erhöhten Gefahr von Herz-Kreislauf-Problemen betroffen [SCHERER ET AL. 2013, 238 ff.; FENNER ET AL. 2015, o. S.].

2.1.5. Klimatope

Eine erste Klassifikation von städtischen Räumen anhand ihrer klimatischen Wirkung erfolgte durch Richard Ellefsen im Jahr 1987. Als Parameter für die Abgrenzung der „Urban Terrain Zones“ werden Bebauungsart bzw. -dichte, Geschossigkeit, Gebäudealter und Nutzungsstruktur der Fläche verwendet. Auf diese Weise werden vier Hauptklassen und 24 Unterklassen definiert [ELLEFSEN 1987, 14 ff]. Frei-, Wald- oder Wasserflächen stellen keine eigene Klasse dar, sondern werden nur indirekt berücksichtigt. Die von Ellefsen vorgenommene Unterteilung in „Urban Terrain Zones“ findet heute in Deutschland in der Praxis keine Anwendung mehr.

Stattdessen hat sich in Deutschland eine Unterteilung in Klimatope durchgesetzt. Klimatope sind räumliche Einheiten, die eine relativ homogene Struktur der mikroklimapragenden Elemente aufweisen. Diese Elemente umfassen das Relief, die reale Flächennutzung, die Oberflächenstruktur, die Bodenart sowie Vegetationseigenschaften (Art und Zustand). Anders als bei Ellefsen werden nicht nur besiedelte Räume berücksichtigt, sondern auch Frei-, Wald- und Wasserflächen, da diese Flächen einen erheblichen Einfluss auf das Mikroklima besitzen. Nach VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 werden elf verschiedene Klimatoptypen unterschieden (vgl. Tabelle 4) [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 1 2015, 14 ff.].

Tab. 4: Klimatoptypen [VDI-RICHTLINIE 3783 BLATT 1 2015, 14 ff.; verändert]

Klimatop	Kurzbeschreibung
Gewässer-Klimatop	Thermisch ausgeglichen; hohe Luftfeuchtigkeit
Freiland-Klimatop	Ungestörter stark ausgeprägter Tagesgang von Temperatur und Feuchte; windoffen; starke Frisch- und Kaltluftproduktion
Wald-Klimatop	Stark gedämpfter Tagesgang von Temperatur und Feuchte; Frisch-/Kaltluftproduktion; Filterfunktion
Grünanlagen-Klimatop	Ausgeprägter Tagesgang von Temperatur und Feuchte; klimatische Ausgleichsfläche in der Bebauung
Gartenstadt-Klimatop	Geringer Einfluss auf Temperatur, Feuchte und Wind
Stadtrand-Klimatop	Wesentliche Beeinflussung von Temperatur, Feuchte und Wind; Störung lokaler Windsysteme
Stadt-Klimatop	Starke Veränderung aller Klimaelemente gegenüber dem Freiland; Ausbildung einer Wärmeinsel; Schadstoffbelastung der Luft
Stadtkern-Klimatop	Intensiver Wärmeinseleffekt, geringe Feuchte, starke Windfeldstörung, problematischer Luftaustausch; Schadstoffaustausch der Luft
Gewerbe-Klimatop	Starke Veränderung aller Klimaelemente; Ausbildung des Wärmeinseleffekts; teilweise hohe Schadstoffbelastung der Luft
Industrie-Klimatop	Intensiver Wärmeinseleffekt; z. T. starke Windfeldstörung; problematischer Luftaustausch; hohe Schadstoffbelastung der Luft (großräumig bedeutend)
Bahnanlagen-Klimatop	Extremer Temperaturtagesgang, trocken, windoffen, Luftleitbahn

Die Abgrenzung eines Klimatops kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Als minimale Erfassungsart wird nach VDI-Richtlinie die Interpretation von Karten und Luftbildern empfohlen. Zur weiteren Validierung der Luftbild- und Karteninterpretation können Thermalbildinformationen und mobile oder stationäre Messungen verwendet werden. Eine parzellenscharfe Abgrenzung der Klimatope ist besonders im Siedlungsraum in der Regel nicht möglich. Von daher

sollte sich der Maßstab einer Klimatopkartierung am Maßstab eines Flächennutzungsplans orientieren und 1:10.000 nicht überschreiten [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 1 2015, 45 ff.; BOEDDINGHAUS 2014, 102].

Anders als in Deutschland wird international meist eine Unterteilung in „urban climate zones“ (kurz: UCZs) [OKE 2008, 571] oder „local climate zones“ (kurz: LCZs) [STEWART & OKE 2012, 1884] vorgenommen. Der Ansatz der UCZs sieht eine Klassifizierung in neun Zonen nach den vorherrschenden Bebauungstypen vor. Die Unterteilung in LCZs erweitert den Ansatz der UCZs um einen weiteren Bebauungstyp (dichtes Industriegebiet) und sechs Landnutzungstypen, sodass insgesamt 17 Grundklassen definiert sind. Durch die Kombination von zwei Grundklassen können weitere Unterklassen definiert werden, um die lokalen Gegebenheiten möglichst zutreffend zu beschreiben (vgl. Abb. 5).

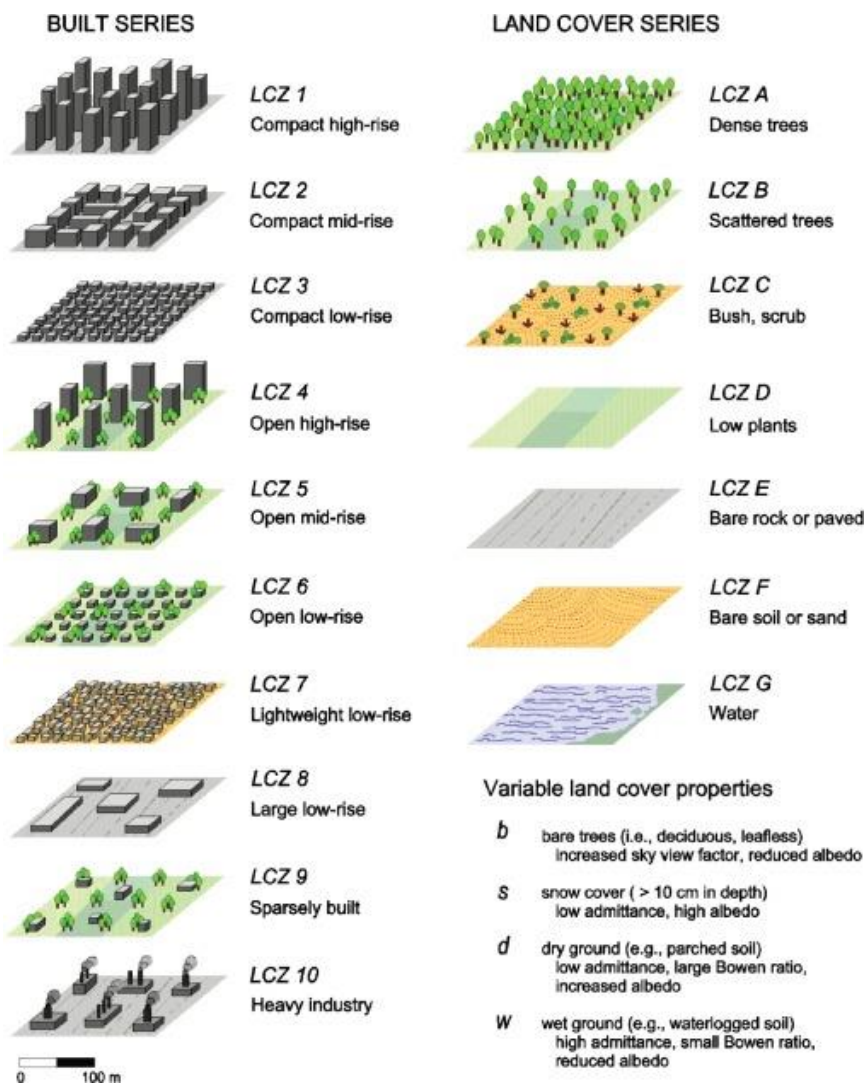


Abb. 5: Local Climate Zones [STEWART & OKE 2012, 1885]

2.2. Erfassungsmethoden Siedlungsklima

Die Berücksichtigung von klimatischen Belangen in der räumlichen Planung setzt eine Analyse der lokalen Gegebenheiten voraus. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Untersuchungsmethoden die für die Raumplanung relevanten Wirkungsgefüge abdecken. Zurzeit werden drei verschiedene Untersuchungsansätze (vgl. Abb. 6) verfolgt, um die Wirkungszusammenhänge zu analysieren. Der erste Themenbereich ist die Auswertung vorhandener Daten. Dieser umfasst die Analyse von Routinemesswerten und die Auswertung von Kartenmaterial und Luftbildaufnahmen. Der zweite Untersuchungsansatz ist die empirische Erhebung von Daten im Gelände. Die dazu eingesetzten Verfahren richten sich dabei nach dem zu analysierenden Untersuchungsgegenstand. Die Modellsimulationen bilden den dritten Untersuchungsansatz. Dabei wird zwischen physikalischen und numerischen Simulationen unterschieden.

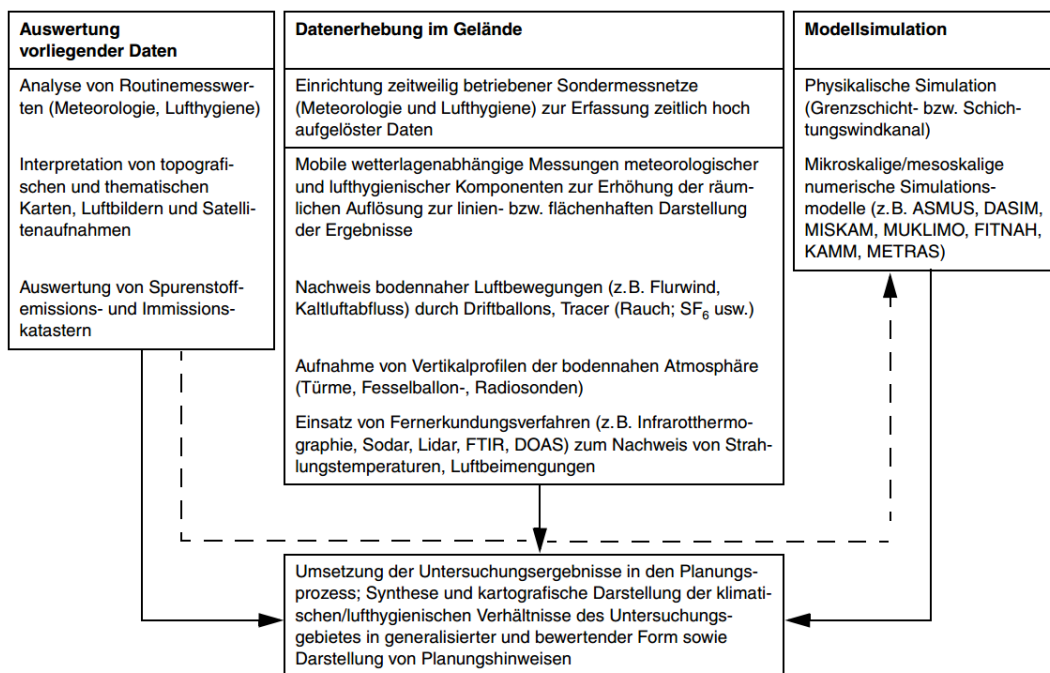


Abb. 6: Klimatische und lufthygienische Untersuchungsmethoden für die räumliche Planung [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 9 2004, 59]

2.2.1. Auswertung vorliegender Daten

In Deutschland betreibt der Deutsche Wetterdienst (DWD) ein Messnetz mit 711 Station zur Erfassung von klimatischen Belangen [DWD 2017c, o. S.]. Zielsetzung dieses stationären Messnetzes ist die Erfassung der für die Wettervorhersage und Wetteranalyse benötigten Daten. Abbildung 7 zeigt das vom DWD betriebene Messfeld „Fichtelberg“.



Abb. 7: Messfeld Fichtelberg [SCHAPPERT 2015, o. S.]

Die Erfassung der Klimaparameter, zu denen unter anderem Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Niederschlagsparameter und Strahlungshaushaltsgrößen zählen, erfolgt entweder durch Fachpersonal, voll- oder halbautomatisch [DWD 2017d, o. S.]. Aufgrund der kontinuierlich verfügbaren Daten eignen sich die durch die DWD-Station erfassten Daten besonders gut für Beobachtungen über lange Zeiträume [OTTE 1999, 289]. Darüber hinaus wird das nationale Messnetz durch Messnetze auf Landesebene ergänzt. Diese, durch die Landesumweltämter betriebenen Messnetze, sind in der Regel allerdings auf luftthygienische Fragestellungen ausgelegt und erfassen nur teilweise die für die räumliche Planung relevanten Klimafaktoren [LANDESAMT FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ 2017, o. S.]. Durch die anthropogene Überformung der Landschaft im Siedlungsbereich entsteht ein sehr heterogenes Verteilungsmuster der zu beobachtenden Klimaparameter. Die schlechte räumliche Auflösung der dauerhaften Messstationen sorgt dafür, dass die von diesen Stationen gewonnenen Daten nur bedingt für die Untersuchung von Siedungsklimaeffekten genutzt werden können [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 9 2004, 60].

2.2.2. Empirische Erhebung

2.2.2.1. Sondermessnetze

Die räumliche Auflösung der bestehenden Messnetzwerke kann durch die Installation von zusätzlichen Messstationen verbessert werden. Die Komplexität dieser Sondermesswerte wird maßgeblich durch die Raumstruktur, die Größe des Untersuchungsraums und der zu untersuchenden Klimaparameter bestimmt.

Bei der Planung der Stationsstandorte sollten die vorhandenen Klimatope berücksichtigt werden, um so eine Analyse der unterschiedlichen Flächennutzungen zu erhalten. Zur Datenerfassung können mobile Klimamessstationen eingesetzt werden. Diese können, mit den entsprechenden Messgeräten ausgestattet, dieselben Klimaparameter erfassen wie die durch den DWD betriebenen Stationen.



Abb. 8: Mobile Klimamessstation [Eigene Aufnahme 2017]

Wenn möglich sollten diese Sondermessnetze mit dauerhaft betriebenen Messnetzen verknüpft werden, um auf diese Weise die räumliche Auflösung und die Ergebnisqualität der Messungen zu verbessern. Diese Art von Messnetzen erlaubt eine kontinuierliche Erfassung von Klimaparametern mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung. Um saisonale Schwankungen in den Untersuchungsgegenständen zu vermeiden wird eine Mindestmessdauer von 12 Monaten empfohlen [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 9 2004, 61].

2.2.2.2. Horizontale Messprofile

Da die räumliche Auflösung von Sondermessnetzen durch die Anzahl der Messstationen bestimmt wird, können mit diesem Verfahren in der Praxis meist keine flächendeckenden Untersuchungen durchgeführt werden. Um eine ausreichende hohe Messpunktdichte für die heterogene Struktur innerhalb einer Siedlung zu erreichen, werden bei der Untersuchung von Stadtklimaphänomenen mobile Messungen durchgeführt [VDI RICHTLINIE 3787 BLATT 9 2004, 61 FF.]. Dabei

werden die zu beobachtenden Parameter wie Lufttemperatur oder Luftschadstoffe mit Hilfe einer mobilen Messeinheit erfasst.



Abb. 9: Messfahrzeug für mobile Klimamessungen [DWD 2017, o. S.]

Das Hauptkriterium zur Auswahl des am besten geeigneten Geräteträgers ist die Größe des Untersuchungsgebiets. Aber auch räumliche Gegebenheiten, wie nicht für den KFZ-Verkehr freigegebene Wege, können die Wahl des Geräteträgers beeinflussen. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht über typische Geräteträger, die dazugehörige Geschwindigkeit und die in 2,5 Stunden erfassbare Streckenlänge.

Tab. 5: Einsatzbereiche verschiedener Geräteträger bei einer Messdauer von 2,5 Stunden [VDI-RICHTLINIE 3785 BLATT 2 2011, 31; verändert]

Geräteträger	Typische Gebietsgröße [km]	Typische Geschwindigkeit [km*h ⁻¹]	Streckenlänge [km]
Tragegestell, Handwagen	0,1 x 0,1 bis 2 x 5	3 bis 5	10
Fahrrad	1 x 1 bis 5 x 10	10 bis 15	ca. 25
Kraftfahrzeug	2 x 5 bis 10 x 20	25 bis 40	ca. 50

Mit dem gewählten Geräteträger wird eine im Vorfeld festgelegte Route abgelaufen bzw. abgefahren während die integrierten Messgeräte eine kontinuierliche Messung durchführen. Die Abtastrate der Messgeräte sollte so gewählt werden, dass die Frequenz der Abtastrate doppelt so hoch ist, wie die des abzutastenden Signals [VDI-RICHTLINIE 3785 BLATT 2 2011, 30 ff.]. Durch die Integration eines GPS-Sensors in die Messeinheit können die aufgenommenen Messdaten mit

räumlichen Bezugsdaten verknüpft werden [HELBIG 1999, 292]. Dieses Messverfahren bietet den Vorteil, dass innerhalb eines kurzen Messzeitraums sehr viele Daten mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung erhoben werden können [KUTTLER 1997, 87].

Die Messfahrten sollten möglichst während autochthonen Wetterlagen durchgeführt werden, sodass die lokalen Besonderheiten nicht durch großräumige Wetterphänomene überlagert werden. Für den Nachweis einer urbanen Überwärmung sollten die Messfahrten in den Abend- bzw. Nachstunden durchgeführt werden, da zu dieser Zeit die größte Temperaturdifferenz zwischen urbanen und ruralen Flächen besteht.

Bei der Durchführung von mobilen Messungen mit einer Messdauer über 30 Minuten sollten zusätzlich stationäre Messungen durchgeführt werden oder auf bestehende Daten im Untersuchungsraums (z. B. Messstation des DWD) zurückgegriffen werden. Diese Bezugsmessstationen können dazu genutzt werden, um Schwankungen im Tagesgang der mobil aufgenommenen Daten zu korrigieren. Sollte die Nutzung solche Korrekturdaten nicht möglich sein, sollte die Messroute so gewählt werden, dass mehrere Punkte zu unterschiedlichen Zeiten mehrfach angefahren werden und aus der Differenz der Messungen ein Korrekturfaktor errechnet werden kann. Neben der zeitlichen Korrektur sollte in Untersuchungsräumen mit für die Lufttemperatur relevanten Höhenunterschieden auch eine Höhenkorrektur durchgeführt werden [VDI-RICHTLINIE 3785 BLATT 2 2011, 15 ff.].

Die Erfassung von Luftbewegungen ist mit Hilfe von mobilen Messungen nicht möglich. Um eine ausreichende Ergebnisqualität zu erreichen muss der Einfluss von möglichen kurzzeitigen Fluktuationen ausgeschlossen werden. Die benötigte Messdauer pro Messpunkt liegt bei mindestens 10 Minuten [HELBIG 1999, 294].

2.2.2.3. Nachweis bodennaher Luftbewegungen

Die Veränderung der bodennahen Luftbewegungen (z. B. Frisch- und Kaltluft) während autochthonen Wetterlagen nimmt bei siedlungsklimatischen Untersuchungen einen zentralen Bestandteil ein. Diese Luftströme haben einen erheblichen Einfluss auf das lokale Klima der Städte. Durch die geringe Geschwindigkeit dieser Luftströme ist der Nachweis mit mechanischen Messgeräten nicht zuverlässig möglich. Die Trägheit der Messgeräte führt bei Windgeschwindigkeiten

unter 0,5 m/s zu nicht belastbaren Ergebnissen. Durch den Einsatz von Hitzdraht- bzw. Ultraschallanemometer können auch Windgeschwindigkeiten ab 0,01 m/s gemessen werden. Für den dauerhaften Einsatz sind diese Messgeräte aufgrund des hohen Wartungsaufwands und Energieverbrauchs nicht geeignet [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 9, 62; VDI-RICHTLINIE 3786 BLATT 12 2008, 23].



Abb. 10: Rauchschwadenexperiment zum Kaltluftnachweis [UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN 2017, O. S.]

Bei Rauchschwadenexperimenten wird am Ausgangspunkt einer vermuteten Luftströmung eine Rauchpatrone bzw. Rauchpulver gezündet. Dieses Rauchpulver vermischt sich mit der Luft, sodass deren Driftgeschwindigkeit und -richtung sichtbar gemacht werden kann (Abb. 10). Die Ableitung von quantitativen Ergebnissen ist aus diesem Verfahren nur bedingt möglich. Zwar kann durch eine umfangreiche Dokumentation des Ausbreitungsverhaltens die Luftgeschwindigkeit abgeschätzt werden, eine Bestimmung des Volumenstroms, des Verdünnungsverhaltens von Luftschadstoffen und der Eindringungstiefe in den Siedlungskörper lassen sich allerdings nur quantitativ beobachten [HELBIG 1999, 298].

Um einen qualitativen Nachweis von bodennahen Luftbewegungen durchzuführen werden Tracerexperimente eingesetzt. Hierzu wird ein Tracergas mit einem definierten Volumenstrom in den bodennahen Luftstrom emittiert. Im stromabwärts liegenden Untersuchungsgebiet können an verschiedenen Entnahmepunkten Proben zur Analyse der Tracerkonzentration entnommen werden. Aus diesen Konzentrationswerten können die Eindringungstiefe in den Siedlungsraum, der Volumenstrom und die Frischluftwirksamkeit der bodennahen Luftströmung berechnet werden [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 5 2003, 60 FF.].

Für Tracerexperimente werden chemisch einfach zu handhabende Gase eingesetzt, die in der Atmosphäre nur in sehr geringer Konzentration vorkommen. Das am häufigsten eingesetzte Gas zum Nachweis von Kaltluftströmungen ist Schwefelhexafluorid (SF_6). Dieses Gas eignet sich für Tracerexperimente, da es geruchs- und farblos ist und in der natürlichen Atmosphäre nicht vorkommt.

Dadurch können mit Gaschromatographen bereits sehr geringe Konzentrationen nachgewiesen werden, sodass nur eine sehr geringe Menge des klimaschädlichen SF₆ emittiert werden muss [VDI-RICHTLINE 3787 BLATT 5 2003, 60 FF.].

2.2.2.4. Vertikalprofile

Die Auswirkungen von Städten auf das lokale Klima beschränken sich nicht nur auf Veränderungen der Klimaparameter auf Bodenniveau. In Abhängigkeit der Stadtgröße und der dreidimensionalen Gliederung des Siedlungskörpers sind die Veränderungen bis in eine Höhe von 500 Meter [HELBIG ET AL. 1999, 49] messbar. Zum Nachweis dieser Klimamodifikationen kommen Messsonden an Ballons oder auch Fernmessverfahren zum Einsatz, die auf der Ausbreitung von Schallwellen (SODAR) oder elektromagnetischen Wellen (RADAR) beruhen. Messtürme, die ebenfalls zur Erstellung von vertikalen Messprofilen genutzt werden können, werden in der Praxis nicht mehr eingesetzt, da diese im Gegensatz der anderen vertikalen Messverfahren nicht mobil sind und nur in Ausnahmefällen Messebenen in über 200 Meter über Grund besitzen. Üblicherweise werden bei Vertikalprofilen die thermische Schichtung der unteren Atmosphäre sowie die Auswirkungen des Siedlungskörpers auf die vertikalen Feuchte- und Windverhältnisse gemessen [VDI-RICHTLINE 3787 BLATT 9 2009, 63 f.].

Zum Nachweis von stadt- und geländeklimatologischen Phänomenen werden meist Fesselballons eingesetzt. Diese erreichen eine Höhe von bis zu 1.000 Meter und können eine sehr hohe räumliche Auflösung erreichen. Zum Nachweis der meisten Stadtklimaphänomene, wie zum Beispiel zur Messung der Mächtigkeit von Kaltluftströmen, ist diese maximale Höhe ausreichend. Frei fliegende Ballone können zwar deutlich höhere Atmosphärenschichten erreichen, werden für die Untersuchung von stadtklimatologischen Besonderheiten allerdings meist nicht eingesetzt [VDI-RICHTLINE 3787 BLATT 9 2009, 64].

2.2.2.5. Infrarotthermographie

Zur Messung der Oberflächentemperaturen im Siedlungskörper kann die Infrarotthermographie eingesetzt werden. Bei diesem Verfahren wird die langwellige emittierte Strahlung der Oberflächen nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz durch einen Sensor, der an einer fliegenden Plattform (z. B.: Flugzeug oder Satellit) angebracht ist, erfasst. Bei diesem Verfahren werden meist zunächst punktförmige Ziele vermessen, die durch Scanner- und Bildaufbereitungsverfahren in Rasterbilder umgewandelt werden [HELBIG ET AL. 1999, 299].

2.2.3. Modellsimulationen

Neben den in den Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.2.5 vorgestellten Methoden werden in den letzten Jahren vermehrt Modellsimulationen eingesetzt. Diese Modellsimulationen können nicht nur Aufschluss über die aktuell im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Bedingungen geben, sondern ermöglichen auch den Vergleich zwischen der Ist-Situation und einer möglichen Neuplanung. Für siedlungs- und geländeklimatologische Untersuchungen können physikalische oder numerische Modelle eingesetzt werden [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 9 2009, 64 f.]

2.2.3.1. Physikalische Modelle

Unter physikalischen Modellen versteht man reale Modelle, die im Windkanal untersucht werden (Abb. 11). Diese werden eingesetzt, um die Veränderung von Windströmungen im Siedlungskörper durch die Bebauung zu untersuchen. Physikalische Modelle erlauben darüber hinaus auch die Analyse von Kaltluftflüssen und die Ausbreitung von Emissionen in Siedlungsgebieten.

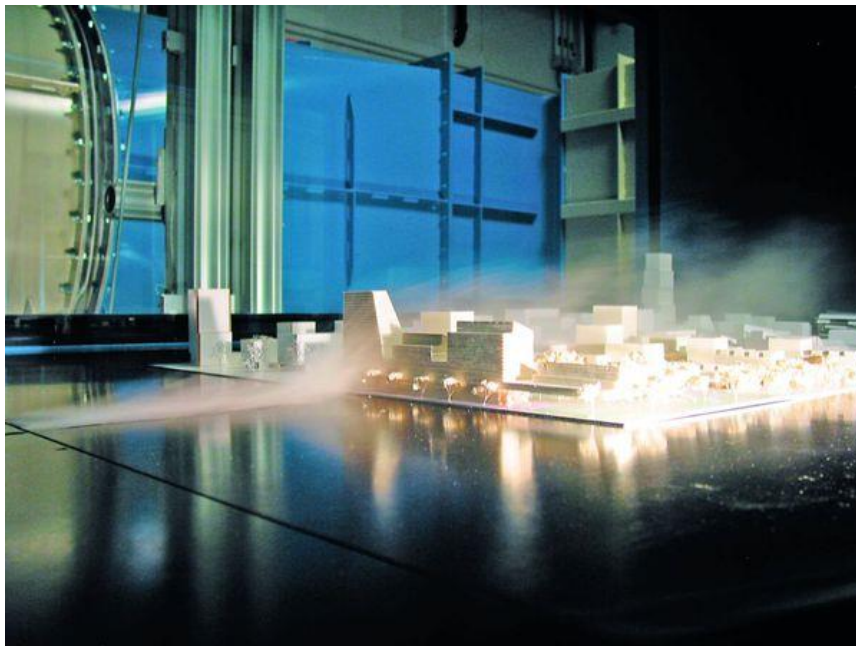


Abb. 11: Physikalisches Stadtmodell im Windkanal [TASPO 2012, o. S.]

Die Kosten für die Durchführung einer Windkanaluntersuchung sind allerdings sehr hoch. Diese setzen sich zum einen aus dem Arbeitsaufwand für die Erstellung eines möglichst detailgetreuen Stadtmodells und zum anderen aus den Kosten für einen Windkanal zusammen. Aus diesem Grund werden physikalische Modelle nur sehr selten eingesetzt.

2.2.3.2. Numerische Modelle

Deutlich differenziertere Aussagen über die mikroskaligen Auswirkungen auf das lokale Klima lassen sich durch numerische Modelle treffen. Die Modelle nutzen mathematische Gleichungssysteme, um Aussagen über die Verteilung der physikalischen Größen (z. B.: Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Schadstoffkonzentration) zu treffen. Innerhalb der numerischen Modelle erfolgt eine weitere Klassifizierung in diagnostische und prognostische Modelle. Während diagnostische Modelle nur die dreidimensionale Verteilung der physikalischen Größen zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnen können, nutzen prognostische Modelle komplexere Gleichungssysteme, um die Prozessabläufe innerhalb des Modells abbilden zu können. Auf diese Weise kann durch prognostische Modelle nicht nur die räumliche, sondern auch die zeitliche Verteilung bzw. Entwicklung der Parameter abgebildet werden.

Um eine umfassende Stadtklimaanalyse mit Hilfe einer Modellsimulation zu erstellen, muss das Simulationsprogramm mehrere Anforderungen erfüllen. Um die heterogenen Strukturen innerhalb eines Siedlungsraums berücksichtigen zu können, sollte die räumliche Auflösung des Modells mindestens zehn Meter betragen. Alle in einer Stadt vorkommenden Oberflächentypen und die dazugehörigen Energieeigenschaften müssen in dem Modell abgebildet werden können. Da die vorherrschende Vegetation eines Siedlungsraums erheblichen Einfluss auf das Mikroklima besitzt, müssen sowohl die physikalischen, wie auch die physiologischen Eigenschaften der Vegetation in die Modellberechnung mit einfließen [HUTTNER 2012, 1].

Zurzeit werden im Planungsprozess und der Forschung eine Vielzahl von verschiedenen Modellen eingesetzt. Oft sind diese Modelle allerdings nur auf einen Aspekt des Stadtklimas ausgelegt. Die Modelle MISKAM [EICHHORN 1989, 75 ff.] und das in der Novellierung der TA Luft empfohlene AUSTAL 2000 setzen den Schwerpunkt auf der Berechnung des lokalen Windfelds und der Ausbreitung von Luftbeimengungen und Gasen. Modelle wie Rayman [MATZARAKIS ET AL. 2007, 323] oder Solweig [LINDBERG ET AL. 2008, 698] dienen hingegen in erster Line zur Berechnung der urbanen Strahlungsflüsse.

In den Simulationsmodellen Envi-met 4.2 (Summer17) [ENVI-MET 2017a, o. S.] und MUKLIMO_3 (Thermodynamikversion) [SIEVERS 1995, 3 ff. & SIEVERS 2016, 13] werden Strömungsmodelle, der urbane Strahlungshaushalt und die Auswirkungen

der Vegetation auf das Mikroklima berücksichtigt. Für Envi-met wird eine räumliche Auflösung zwischen 0,5 und 10 Metern empfohlen. In Verbindung mit der maximalen Modellgröße von 250x250x25 Zellen ergibt sich damit eine maximale Größe des Untersuchungsgebiets von 6,25 km². Durch diese hohe räumliche Auflösung ermöglicht Envi-met die Berücksichtigung eines Großteils der urbanen Strukturen (z. B.: Gebäude, Einzelbäume). MUKLIMO_3 wurde hingegen entwickelt, um gesamtstädtische Klimaanalysen durchzuführen. Dazu erfolgt eine Klassifizierung der Stadt in 13 verschiedene Nutzungsklassen. Diese Nutzungsklassen enthalten generalisierte Werte für die relevanten Indikatoren (z. B.: Versiegelungsgrad, Bebauungsdichte, Vegetationsform). Hochauflösende Simulationen können mit diesem Modell zwar auch realisiert werden, doch liegt die empfohlene Auflösung des Modells bei etwa 5 Meter, sodass der maximale Detaillierungsgrad deutlich unter dem des Envi-met Modells liegt.

Im Folgenden wird zur Veranschaulichung von numerischen Simulationsmodellen das Envi-met Modell beschrieben, da diese Software im weiteren Verlauf der Arbeit für den Vergleich der Erfassungsmethoden und die Validierung der Ergebnisse eingesetzt wird. Die Funktionsweise ist allerdings in der Regel auf andere Simulationsprogramme übertragbar.

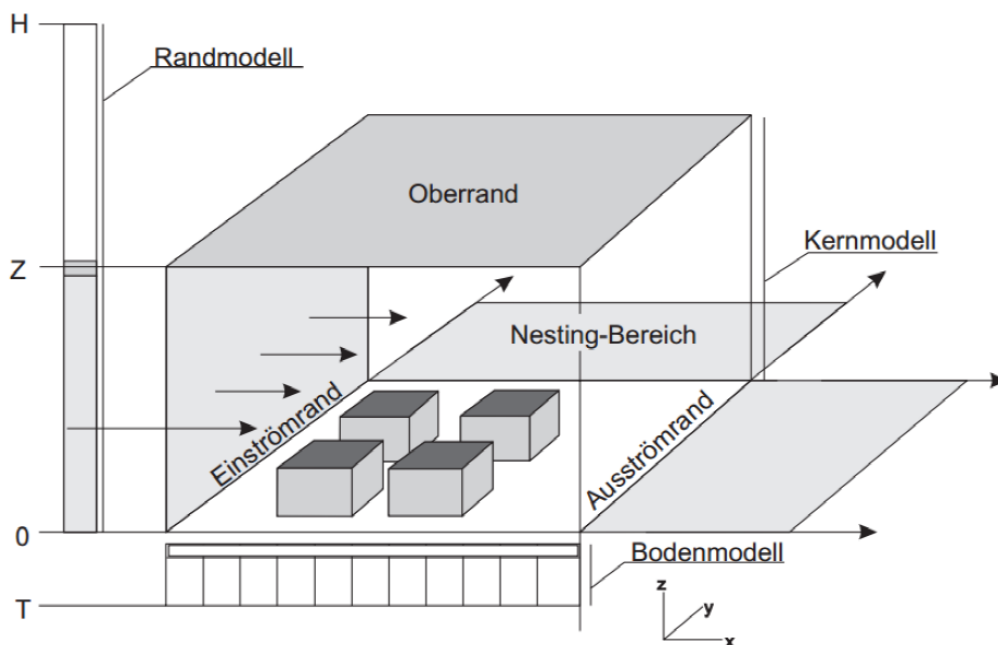


Abb. 12: Envi-met Modellkonzept [ENVI-MET 2017b, o.S.]

Das Kernmodell wird durch eine rechtwinklige Gitterstruktur abgebildet. Innerhalb dieser Gitterstruktur werden die Modellelemente (Gebäude, Vegetation)

inkl. ihrer Höhe verortet. Dieses dreidimensionale Modell wird durch die Höhe Z begrenzt. Oberhalb des Kernmodells erstreckt sich ein eindimensionales Randmodell mit der Höhe H, das die Prozesse innerhalb der planetaren Grenzschicht bis in eine Höhe von 2500 Meter abbildet. Der Boden des Untersuchungsraums ist nicht Teil des Kernmodells, dieser wird in einem darunterliegenden Bodenmodell berechnet. Dieses Modell besitzt dieselbe räumliche Ausdehnung wie das Kernmodell und reicht bis in eine Tiefe von 1,75 Meter. Dieses Modell berechnet unter Berücksichtigung der Eigenschaften der verschiedenen Bodenmaterialien den Wärmefluss und den Feuchtehaushalt, die zur Berechnung der Atmosphärenparameter des Kernmodells benötigt werden. Umgeben wird das Kernmodell von Nesting-Zellen, die zur Minimierung von numerischen Randeffekten verwendet werden. Innerhalb dieser Zellen erfolgt eine vollständige Berechnung der Austauschvorgänge ohne dreidimensionale Objekte, um für das Kernmodell ein ungestörtes Vertikalprofil der Prognosegrößen entlang der Ein- und Ausströmränder zu erhalten [BRUSE 1999, 8]. Zur Berechnung der Einströmparameter verwendet Envi-met die geographische Lage des Modells, die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, die Oberflächenrauigkeit, die spezifische Luftfeuchte und die Lufttemperatur in 2 m Höhe und Luftfeuchte in 2500 m Höhe [SIMON 2016, 10].

Abbildung 13 zeigt die verschiedenen Prozesse, die zur Berechnung des Kernmodells von Envi-met berücksichtigt werden:

- Lang- und Kurzwellige Strahlungsflüsse mit Berücksichtigung von Schattierung, Reflexionen und Gegenstrahlung
- Transpiration, Evaporation und sensible Wärmeströme zwischen Vegetation und Luft
- Dynamische Oberflächen- Wandtemperaturberechnung von Fassaden und Dachelementen
- Wasser- und Wärmeaustausch des Bodenmodells

Darüber hinaus erfolgt eine Berechnung des lokalen Windfelds mit einem numerischen Strömungsmodell. Diese Prozesse werden mit Hilfe von Gleichungen für jede der betroffenen Zellen berechnet. Zur Abbildung von Tagesgängen wird üblicherweise ein Simulationszeitraum zwischen 24 und 48 Stunden genutzt. Um auch kurzzeitige Veränderungen innerhalb des Modells berücksichtigen zu können, liegt die zeitliche Auflösung zwischen einer und fünf Sekunden [ENVI-MET 2017a, o. S.]. Durch diese Berechnungen liefert Envi-met eine große Anzahl

von Ausgabeparametern mit einer sehr hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung. Diese Parameter umfassen u.a. Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Oberflächentemperatur.

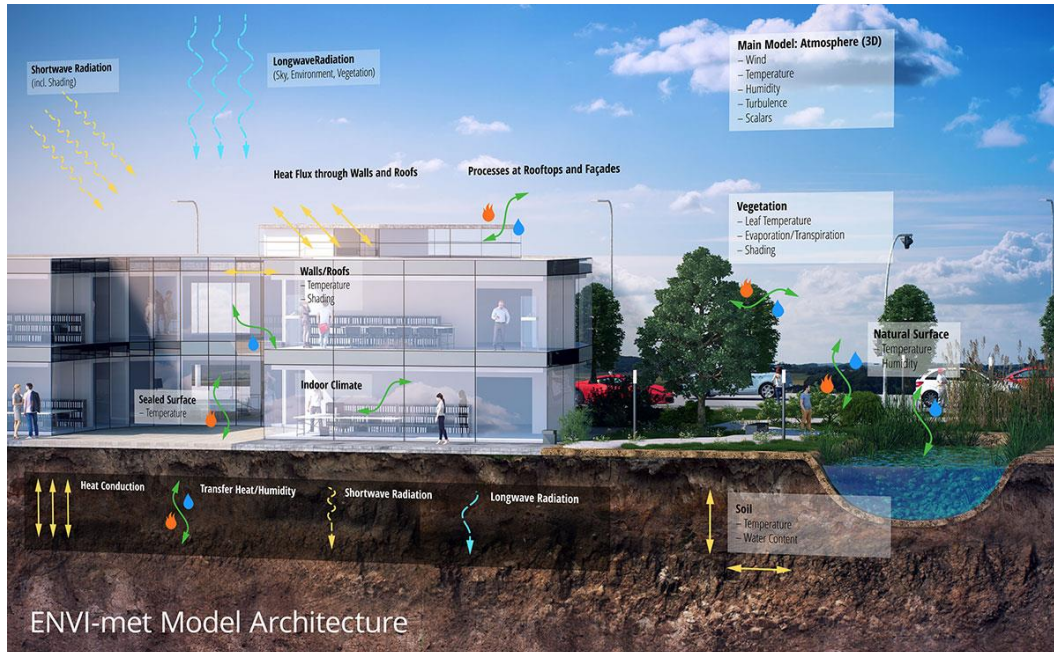


Abb. 13: Envi-met Model Architecture [ENVI-MET 2017a, o. S.]

2.2.4. Ökologische Kennwerte zur Siedlungsklimabewertung

Mit dem zunehmenden Bewusstsein der positiven Wirkung von Grünflächen auf die Siedlungsstruktur wurden Mitte der 1980er Jahre Kennwerte entwickelt, die das Verhältnis von Vegetation zur Grundfläche eines Grundstücks beschreiben. Die ersten entwickelten Kennwerte waren die Grünvolumenzahl (kurz: GVZ) und die Bodenfunktionszahl (kurz: BFZ) [POHL ET AL. 1984, 10 ff.]. Darüber hinaus wurde eine große Vielzahl weitere Kennwerte definiert, die verschiedene Teilbereiche des Siedlungsökosystems beschreiben [BECKMANN 1993, 41]. Im heutigen Planungsprozess sind die GVZ und die BFZ die am häufigsten eingesetzten ökologischen Kennwerte [MEINEL ET AL. 2006, 685]. Die Grünvolumenzahl gibt das Volumen aller auf einer Grundfläche stehenden Pflanzen an. Dabei wird nicht unterschieden, ob diese Pflanzen natürlich auf der Fläche wachsen oder ob sie durch den Menschen angepflanzt wurden [RICHTER ET AL. 2003, 17]. Zur Bestimmung der Bodenfunktionszahl eines Gebiets müssen zunächst die Bodenkennwerte (kurz: BKW) der einzelnen Teilflächen ermittelt werden. Die Bodenkennwertskala reicht von 0 für vollständig versiegelten Boden, bis hin zu 1 für natürlichen Boden. Dabei werden Kriterien wie die Gas- und Wasserkapazität, die Lebensmöglichkeit

für Tiere und Pflanzen, das biologische Leistungspotenzial und das mikroklimatische Leistungspotenzial berücksichtigt. Die BFZ des Untersuchungsgebietes setzt sich aus dem gewichteten Mittelwert der einzelnen Teilflächen zusammen [BECKMANN 1993, 47]. Ziel bei der Entwicklung der ökologischen Kennwerte war das Festlegen von ökologischen Standards bzw. von Grenzwerten in der Siedlungsentwicklung. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf die ökologische Funktion der Flächen gelegt. Die Auswirkungen der Flächen auf das Siedlungsklima standen bei der Entwicklung der Kennwerte nicht im Vordergrund. Sehr wohl können diese Indikatoren allerdings für die Abschätzung von einzelnen Klimaparametern genutzt werden. Eine hohe GVZ kann beispielsweise darauf hindeuten, dass in einem Gebiet eine erhöhte Evapotranspiration stattfindet, was zu einer erhöhten Luftfeuchte und einer reduzierten Lufttemperatur führt. Eine umfassende Stadtklimaanalyse kann durch die Nutzung von Kennwerten allerdings nicht durchgeführt werden.

2.3. Bewertung der relevanten Erfassungsmethoden

Die in Kapitel 2.2 vorgestellten Erfassungsmethoden unterscheiden sich hinsichtlich vieler unterschiedlicher Kriterien. Ein grundlegendes Kriterium ist dabei der Umfang der erfassbaren Stadtklimaphänomene. Während Methoden wie mobile oder stationäre Messungen ein sehr breites Spektrum an Parametern erfassen und so umfangreiche Aussagen über die lokalen Klimaverhältnisse zulassen, werden andere Untersuchungsmethoden nur für den Nachweis von speziellen Stadtklimaphänomenen eingesetzt. Ein Vergleich aller vorgestellten Methoden ist aus diesem Grund nicht möglich. Die für die Raumplanung bedeutendsten Erfassungsmethoden sind stationäre Messungen mit Hilfe von Sondermessnetzen, horizontale Messprofile und numerische Modellsimulationen. In diesem Kapitel werden die Vor- und Nachteile dieser Methoden beschrieben. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Komplexität der Methode und den entstehenden Kosten, da diese für eine selbstständige Durchführung der Untersuchung durch die Gemeinde von entscheidender Bedeutung sind.

2.3.1. Sondermessnetze

Die Größe und die räumliche Auflösung von Untersuchungsgebieten bei der Durchführung einer Stadtklimauntersuchung mit stationären Messstationen ist theoretisch nahezu unbegrenzt. In der Praxis werden diese Parameter allerdings durch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Messstationen und die nutzbaren Messstandorte bestimmt. Die Anschaffungskosten einer professionellen Messstation inkl. Datenlogger liegen etwa zwischen 4.000 und 5.000 Euro (z. B.:

Young Modell 92000) [SCIENTIFIC SALES 2017, O. S.]. In der Regel ist die Anschaffung einer ausreichenden Stationsanzahl für eine großflächige Siedungsklimaanalyse durch eine Gemeinde nicht realisierbar. Als Alternative zum Kauf bieten einige Anbieter Messstationen zur Miete an. Die Tagesmiete wird dabei meist in Abhängigkeit der Stationsanzahl und der Mietdauer berechnet [DRIESEN & KERN 2017, O. S.]. Als Mindestmessdauer wird nach VDI-Richtlinie ein Zeitraum von 12 Monaten empfohlen, sodass auch die Nutzung von Mietmessstationen zu erheblichen Kosten führt. Als dritte Möglichkeit zur Nutzung von stationären Messstationen zur Erstellung einer Stadtklimaanalyse bietet sich die Übertragung der Messaufgabe an ein externes Unternehmen an. Da diese Unternehmen wirtschaftlich arbeiten und die Anschaffung der Messstationen refinanzieren müssen, kann durch diese Auslagerung keine Kostenersparnis erreicht werden.

Die üblicherweise in Sondermessnetzen eingesetzten Messgeräte und Datenlogger ermöglichen eine kontinuierliche Messung über einen langen Zeitraum mit einer guten zeitlichen Auflösung. So können sowohl der Tages- wie auch der Jahresgang der gemessenen Parameter untersucht werden. Durch die kontinuierliche Messung werden sowohl Tage mit einer autochthonen wie auch Tage mit einer allochthonen Wetterlage erfasst.

Die Messnetzeinrichtung und -betreuung ist bei den meisten eingesetzten Messstationen nach kurzer Einarbeitungsphase möglich. Ein planerischer Hintergrund oder stadt- bzw. geländeklimatologisches Grundwissen ist für die Auswahl der Stationsstandorte notwendig, da dazu die vorhandenen Klimatoparten identifiziert werden müssen. Darüber hinaus muss darauf geachtet werden, dass die Messstationen nicht durch punktuelle Besonderheiten am Stationsstandort, wie beispielsweise Wärmequellen, beeinflusst werden.

Die flächendeckende Darstellung von Messwerten aus Sondermessnetzen ist nur eingeschränkt möglich. Die an den Stationsstandorten gemessenen Werte können in geographischen Informationssystemen genutzt werden, um Werte zwischen den Standorten zu interpolieren. Dazu stehen unterschiedliche Verfahren mit verschiedenen Berechnungsmodellen zur Verfügung. Diese Verfahren beruhen allerdings alle auf einem mathematischen Ansatz, der den zu interpolierenden Punkt unter Gewichtung der nächsten Messpunkte berechnet. Die Gegebenheiten vor Ort werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt, sodass die Aussagekraft der interpolierten Werte sehr gering ist. Abbildung 14 zeigt ein durch den DWD errichtetes Sondermessnetz, das zur Erstellung einer Stadt-

klimaanalyse der Stadt Leipzig errichte wurde. Trotz der Hinzunahme von dauerhaft installierten Messstationen wird deutlich, dass durch den großen Abstand zwischen den Messstationen eine Interpolation der Messwerte keine belastbaren Ergebnisse liefern kann.

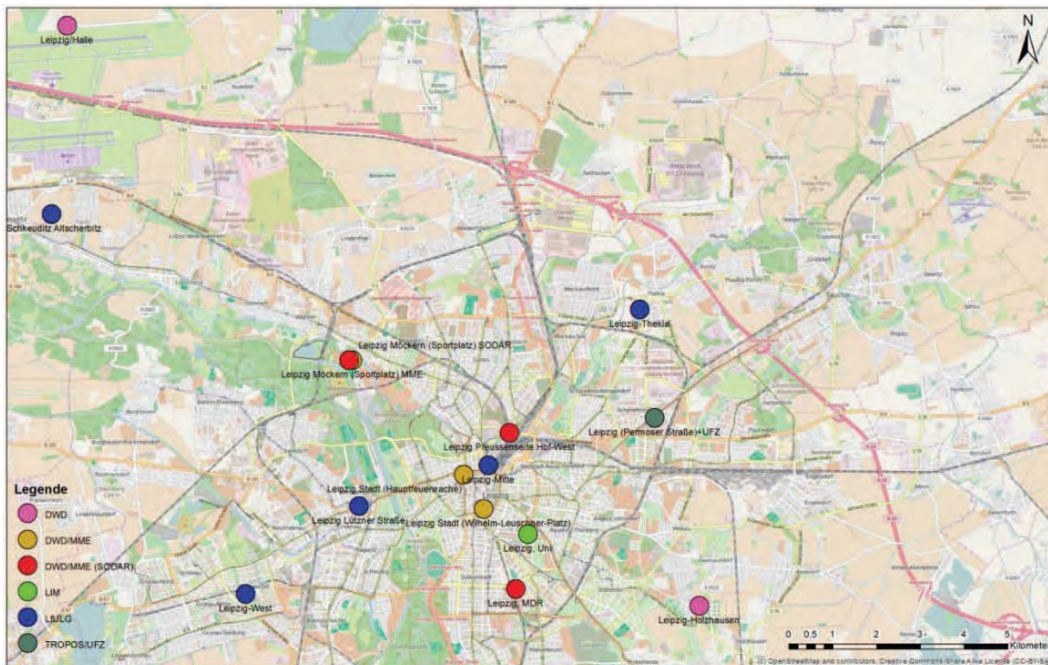


Abb. 14: Sondermessnetz Stadtklimauntersuchung Leipzig [DWD 2017a, o. S.]

2.3.2. Horizontale Messprofile

Die Hauptunterschiede zwischen mobilen und stationären Messungen liegen in der räumlichen und der zeitlichen Auflösung. Durch mobile Messungen kann innerhalb eines Untersuchungsgebiets eine sehr hohe räumliche Auflösung erreicht werden. Die während einer mobilen Messung verwendeten Messgeräte besitzen zwar üblicherweise eine hohe Erfassungsfrequenz, allerdings wird die maximale Messdauer durch den Einfluss des Tagesganges auf etwa 2,5 Stunden begrenzt. Zu Erhöhung der zeitlichen Repräsentativität können die Messfahrten zu verschiedenen Tageszeiten wiederholt werden.

Die Kostenabschätzung für die zur Durchführung von mobilen Messungen benötigten Geräte ist abhängig von dem eingesetzten Geräteträger und den aufzunehmenden Messgrößen. Die günstigste Lösung ist die mobile Messung mit Hilfe eines Messrucksacks bzw. eines Handwagens. Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit eignet sich dieses Verfahren allerdings nur für sehr kleine Untersuchungsräume. Die Durchführung der Messung mit einem Messwagen (PKW)

ermöglicht ein deutlich größeres Untersuchungsgebiet, ist allerdings auch deutlich teurer in der Anschaffung der benötigten Messutensilien. Für die meisten Gemeinden rentiert sich die Anschaffung der benötigten Messgeräte nicht. Ähnlich wie bei den stationären Messstationen gibt es auch für mobile Messgeräte Mietmodelle. Da zur Durchführung einer mobilen Messung nur ein Gerätesatz benötigt wird, sind die Kosten deutlich geringer als für die Miete mehrerer Messstationen. Der Mietzeitraum der Messgeräte für eine Gemeinde beschränkt sich meist nur auf wenige Wochen oder Monate, da mobile Messungen üblicherweise während der Sommermonate durchgeführt werden.

Die Abhängigkeit von autochthonen Wetterlagen führt dazu, dass mobile Messungen meist nur kurzfristig angesetzt werden können. Für die Planung einer Messung ist allerdings ein langer Vorbereitungszeitraum notwendig. Zunächst muss für die Messroutenplanung eine Kartierung aller klimatisch bedeutsamen Strukturen im Untersuchungsgebiet durchgeführt werden. Dabei müssen sowohl die Landnutzungstypen wie auch bedeutsame Geländestrukturen berücksichtigt werden. Im Prozess der Messroutenplanung wird eine Strecke festgelegt, die alle klimatischen Strukturen abdeckt. Klimatisch besonders bedeutsame oder heterogene Strukturgebiete sollen nach VDI Richtlinie 3785 Blatt 2 mehrfach erfasst werden. Dieser komplizierte Prozess der Vorbereitung führt dazu, dass die Messroutenplanung durch die Gemeinden nicht selbstständig durchgeführt werden kann.

Durch die hohe räumliche Auflösung können die aus mobilen Messungen erfassten Daten sehr gut genutzt werden, um flächenhafte Darstellungen zu berechnen bzw. Aussagen zu treffen.

2.3.3. Numerische Modellsimulationen

Anders als die empirischen Erfassungsmethoden werden, mit Ausnahme der Initialisierungsdaten, bei den Modellsimulationen keine realen Werte erfasst. Das Ergebnis der Modellsimulationen beruht auf den numerischen Gleichungen, die die Modellierungssoftware verwendet. Das Ergebnis spiegelt also nicht die Realität zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder, sondern zeigt, welche Verhältnisse sich unter idealisierten Bedingungen an einem Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt einstellen würden. Die Ergebnisqualität ist dabei zum einen von dem Rechenmodell der Modellierungssoftware und zum anderen vom Detaillierungsgrad des Modells abhängig. Der Detaillierungsgrad des Modells ist von drei verschiedenen Faktoren abhängig. Die Modellgröße ist in der Regel durch die

Modellierungssoftware vorgegeben. In Abhängigkeit der Untersuchungsraumgröße kann so die maximale räumliche Auflösung bestimmt werden. Für ein Untersuchungsgebiet mit einer Größe von 1x1 km ergibt sich beispielsweise für die Modellierungssoftware Envi-met mit einer maximalen Modellgröße von 250x250x25 Zellen eine maximale räumliche Auflösung von vier Metern. Details unterhalb dieser Grenze können in dem Modell nicht realitätsgetreu abgebildet werden. Als weiterer limitierender Faktor für den Detaillierungsgrad einer Modellsimulation sind die in dem Modell zur Verfügung stehenden Elemente und Materialien. Diese Elemente können zwar theoretisch bis auf eine sehr niedrige Ebene durch den Nutzer modifiziert und ergänzt werden, eine Modellrechnung mit einem maximalen Detaillierungsgrad würde allerdings bedeuten, dass jedes Element des Untersuchungsraums aufwendig angepasst werden müsste. Der dritte Einflussfaktor auf den Detaillierungsgrad einer numerischen Modellierung liegt in der Erfassungsqualität der relevanten Elemente im Untersuchungsgebiet. Meist werden zunächst während einer Bestandsaufnahme vor Ort Fotos erstellt, die dann bei der Digitalisierung auf Luftbildbasis in der Modellierungssoftware als ergänzendes Informationsmaterial genutzt werden. Die Größe bzw. Höhe von Objekten kann so nur subjektiv durch den Erfasser abgeschätzt werden, was zu einer Verringerung des Detaillierungsgrads führt. Die messtechnisch exakte Erfassung (z. B.: durch Laserscanner) von Lage und Größe der relevanten Objekte führt zu einem so großen Zusatzaufwand, dass dieser in der Regel nicht betrieben wird.

Der Digitalisierungsaufwand zur Erstellung einer numerischen Simulation ist in Relation zur Untersuchungsgebietsgröße sehr hoch. Die meisten Modellierungsprogramme unterstützen keinen Import von CAD-Plänen und GIS-Daten, sodass bestehende Datensätze (z. B.: Gebäudeinformationen) nicht genutzt werden können. Während der Digitalisierung des Untersuchungsgebiets und der Einrichtung der Simulationsdatei treten viele potenzielle Fehlerquellen auf, sodass dieser Schritt nur von Fachkräften oder nach einer intensiven Einweisung selbstständig durch die Gemeinde erfolgen sollte. In Kombination mit den hohen Lizenzkosten der Modellierungssoftware (ca. 2.900 € pro Jahr) und der erforderlichen Hardware entstehen hohe Kosten für die Durchführung einer numerischen Modellsimulation [ENVI-MET 2017, o. S.].

Gegenüber den horizontalen Messprofilen bieten die numerischen Simulationsmodelle die Möglichkeit, ein Untersuchungsgebiet unabhängig der Wetterlage zu analysieren. Darüber hinaus können Simulationen für unterschiedliche

Zeitpunkte mit demselben Modell durchgeführt werden, sodass einfache Vergleiche zwischen Tag und Nacht oder Sommer und Winter möglich sind. Die zeitliche Auflösung von numerischen Modellen unterliegt nur praktischen Beschränkungen. Diese Beschränkungen beruhen auf der zur Verfügung stehenden Rechenleistung und der Speicherkapazität der eingesetzten Simulationsrechner. Die Simulationsdauer eines 1x1 km großen Untersuchungsgebiets mit einer räumlichen Auflösung von vier Metern kann auf einem leistungsstarken Home-/Office-Computer für einen Simulationstag bis zu eine Woche betragen.

Als einziges der untersuchten Verfahren bieten Modelle nicht nur die Möglichkeit, die aktuell bestehende Situation zu analysieren, sondern darüber hinaus auch zukünftige Entwicklungen zu simulieren. Aus planerischer Sicht sind dabei besonders zwei Ansätze von Bedeutung. Zum einen können durch Anpassung der Initialisierungsdaten Szenarien über die potentiellen Auswirkungen des Klimawandels in dem jeweiligen Untersuchungsgebiet erstellt werden. Zusätzlich können numerische Modellsimulationen dazu genutzt einen Vergleich bzw. eine Bewertung von verschiedenen Planungsalternativen durchzuführen.

2.3.4. Gesamtbewertung

Tabelle 6 zeigt die Bewertung für die untersuchten Erfassungsmethoden. Auf die Bewertung nach einem Punkte- oder Notenschema wurde bewusst verzichtet, da einige der Faktoren abhängig vom jeweiligen Untersuchungsgebiet bzw. Untersuchungsgegenstand sind. Die Bewertung zeigt, dass besonders bei der räumlichen und zeitlichen Auflösung erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Methoden bestehen. Daraus lassen sich spezifische Einsatzfelder für die jeweiligen Untersuchungsmethoden ableiten. Während mobile Messungen und numerische Modellierungen sich für den Einsatz von kleinen und mittleren Untersuchungsräumen mit einem kurzen Untersuchungszeitraum eignen, ermöglichen stationäre Messungen einen Langzeitvergleich von einzelnen Standorten. Zur Ableitung von konkreten Handlungsempfehlungen eignen sich stationäre Messungen in der Regel nicht.

Alle drei untersuchten Verfahren weisen einige Gemeinsamkeiten auf. Die Kosten, die für die Gemeinden für die Durchführung einer solchen Untersuchung entstehen, sind sehr hoch. Dies ist zum einen auf die hohen Anschaffungs- bzw. Mietkosten für die technische Ausrüstung (u. a. Messgeräte, Software) und zum anderen auf den hohen Aufwand bei der Durchführung der untersuchten Methoden zurückzuführen. Durch Beauftragung eines externen Auftragnehmers

können die Kosten ebenfalls nicht signifikant reduziert werden, da die Material- und Personalkosten an den Auftraggeber weitergegeben werden.

Ein wichtiger Faktor bei der Durchführung einer Stadtklimauntersuchung ist das benötigte Vorwissen. Alle drei bewerteten Verfahren setzen ein grundlegendes Verständnis über die siedlungsklimatischen Vorgänge im Untersuchungsraum voraus. Dieses wird sowohl in der Vorbereitungsphase der Untersuchung, wie auch für die Auswertung der Ergebnisse benötigt. Da die meisten Modellierungsanwendungen nicht intuitiv zu bedienen sind, sollte für die Nutzung einer numerischen Modellierungssoftware neben dem klimatologischen Grundwissen auch ein hohes technisches Grundverständnis vorhanden sein.

Tab. 6: Bewertung relevanter Siedlungsklimaerfassungsmethoden [Eigene Darstellung 2017]

	Stationäre Messungen	Mobile Messungen	Numerische Modellierungen
Erfassbare Klimafaktoren	viele	mittel	sehr viele
Ergebnisqualität	sehr gut	gut	Abhängig von Modell
Max. Räumliche Auflösung	sehr schlecht	sehr gut	sehr gut
Größe des Untersuchungsgebiets	groß	mittel	klein
Witterungsabhängigkeit	-	sehr hoch	-
Zeitliche Auflösung	sehr gut	gut	gut
Vorwissen	erforderlich (klimatologisch)	erforderlich (klimatologisch)	erforderlich (klimatologisch & technisch)
Kosten (Geräte bzw. Software)	sehr hohe Gerätekosten	hohe Gerätekosten	Lizenzgebühren und leistungsstarker PC
Vorbereitungsaufwand	mittel	sehr hoch	sehr hoch
Durchführungsaufwand	gering	hoch	mittel
Optimales Einsatzfeld	Langzeitmessungen zur Bewertung von Stadtteilen	kleine bis mittelgroße Untersuchungsräume	Alternativen Bewertung / Prognosen

3. Notwendigkeit eines Untersuchungsverfahrens für kleine Siedlungen

Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben ist es unumstritten, dass es auch in kleinen Siedlungen zu Veränderungen des Klimas durch den anthropogenen Einfluss des Menschen kommt. Dieser Effekt wird allerdings sowohl in der Öffentlichkeit wie auch bei den zuständigen Planungsämtern meist nicht wahrgenommen, da für solche Räume nur in den seltensten Fällen Siedlungsklimaanalysen durchgeführt werden. Diese mangelnde Problemwahrnehmung kann nur durch den Einsatz von wissenschaftlich fundierten Untersuchungsmethoden in den betroffenen Gebieten nachhaltig beeinflusst werden. Wissenschaftliche Studien über die Auswirkungen von kleinen Siedlungen auf das lokale Klima werden bei den betroffenen Stellen entweder nicht wahrgenommen oder führen zu keinem Umdenkungsprozess, da der Bezug zur eigenen Siedlung fehlt.

Die Beschreibung und Bewertung der bestehenden Untersuchungsmethoden hat gezeigt, dass es in der Praxis eine Vielzahl von verschiedenen Untersuchungsmethoden gibt, die ein breites Spektrum an Untersuchungsgegenständen abdecken. Allerdings erfordern alle untersuchten Methoden ein siedlungsklimatisches Grundverständnis, um die korrekte Durchführung des Verfahrens zu gewährleisten. Aus diesem Grund ist es den meisten Planungsämtern nicht möglich, eine Siedlungsklimaanalyse in Eigenregie durchzuführen. Besonders kleine Gemeinden sind davon betroffen. In diesen Gemeinden reicht die Anzahl der Planungsvorhaben in der Regel nicht aus, um neben den Planungsspezialisten einen Experten für die ökologische bzw. klimatologische Baubegleitung zu beschäftigen.

Die hohen Kosten, die eine Siedlungsklimaanalyse verursacht, haben auf die Gemeinden eine abschreckende Wirkung. Ohne die Problemwahrnehmung für die siedlungsklimatischen Vorgänge in der Siedlung werden in den Gemeinden keine Mittel für eine Siedlungsklimaanalyse zur Verfügung gestellt. Durch die hohe Verschuldung der meisten Gemeinden wird dieser Effekt noch weiter verstärkt.

Um eine langfristige Verbesserung der klimatischen Situation in den betroffenen Gemeinden zu erreichen, muss den Entscheidungsträgern ein Instrument an die Hand gegeben werden, dass es ihnen ermöglicht, eine eigene wissenschaftlich fundierte Siedlungsklimaanalyse zu erstellen. Um die Akzeptanz und Anwendung des neuen Instruments in den Gemeinden sicherzustellen sind einige Anforderungen zu beachten. Bei der Definition der Anforderungen wird der Grundgedanke des Technology Acceptance Modell (TAM) aufgegriffen. Dieses Modell

besagt, dass eine neue Technologie nur dann genutzt wird, wenn diese eine hohe wahrgenommenen Nützlichkeit und eine hohe Benutzerfreundlichkeit aufweist [DAVIS 1986, 24 f.]. Das komplette Verfahren sollte durch die Gemeinde in Eigenregie durchgeführt werden können, sodass keine Kosten durch einen externen Auftragnehmer bzw. Gutachter entstehen. Zur weiteren Kosteneinsparung ist darauf zu achten, dass das neue Instrument mit möglichst wenig Zeitaufwand angewendet werden kann. Dabei ist sowohl die Einarbeitungsphase in die Verfahrensschritte, die Vorbereitung, die Bestandsaufnahme sowie die Auswertung zu berücksichtigen. Die Mitarbeiter der Planungsämter sind dabei als Zielgruppe für das neu zu entwickelnde Verfahren anzusehen, da diese Personen die räumliche Entwicklung maßgeblich mitbestimmen. Um die Ergebnisse der Öffentlichkeit zu präsentieren, muss das angewendete Verfahren möglichst transparent sein. Nur wenn der Grundgedanke und die wesentlichen Verfahrensschritte von Laien nachvollzogen werden können eignet sich das Verfahren, um auch der Öffentlichkeit die Notwendigkeit und die Ergebnisse der Untersuchung bewusst zu machen.

4. Konzeptionelle Methodenentwicklung

4.1. Ansatz

Die Bewertung der Untersuchungsmethoden zur Erfassung von siedlungsklimatischen Besonderheiten hat gezeigt, dass weder der Einsatz von Messgeräten noch die Verwendung von numerischen Modellsimulationen die siedlungsklimatische Situation in kleinen Siedlungen kostengünstig und einfach erfassen können. Statt die Klimaparameter direkt zu erfassen oder zu simulieren, werden beim Einsatz des neuen Instruments die Faktoren erfasst, die zur Ausbildung von Stadtklimaeffekten beitragen. Zu diesen siedlungsökologisch relevanten Indikatoren zählen Kennwerte wie der Versiegelungsgrad, die auch in der Bauleitplanung eingesetzt werden. Ergänzt werden diese Kennwerte durch weitere einfach zu erfassende Faktoren, die das Siedlungsklima beeinflussen. Diese Mischung aus bekannten und einfach zu erfassenden Indikatoren soll dafür sorgen, dass die Einarbeitungsphase in die neue Untersuchungsmethode für die Planungsamtmitarbeiter möglichst kurz ist. Kennwerte wie die Bodenkennzahl oder die Grünvolumenzahl können zwar auch für Rückschlüsse auf das vermutlich vorherrschende lokale Klima ermöglichen, eignen sich aufgrund der aufwendigen Bestimmung aber nicht für die Anwendung in einer möglichst einfachen und schnell durchzuführenden Methode. Die isolierte Betrachtung von einzelnen Indikatoren führt allerdings nicht zwangsläufig zu belastbaren Ergebnissen. Viele Indikatoren entfalten ihre volle siedlungsklimatische Wirkung erst durch Wechselwirkungen mit anderen Faktoren [ADAM & GROHÉ 1984, 122]. Um wissenschaftlich fundierte und möglichst belastbare Ergebnisse zu erhalten werden diese Wechselwirkungen in einer Matrix abgebildet. Häufig werden Matrizen zur Risikoabschätzung verwendet. Dabei werden die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkungen eines Ereignisses gegenübergestellt (vgl. Abb. 15). Auf diese Weise kann der Schadenserwartungswert eines Ereignisses bestimmt werden [DIEDRICHS, 2012, 93 ff.].

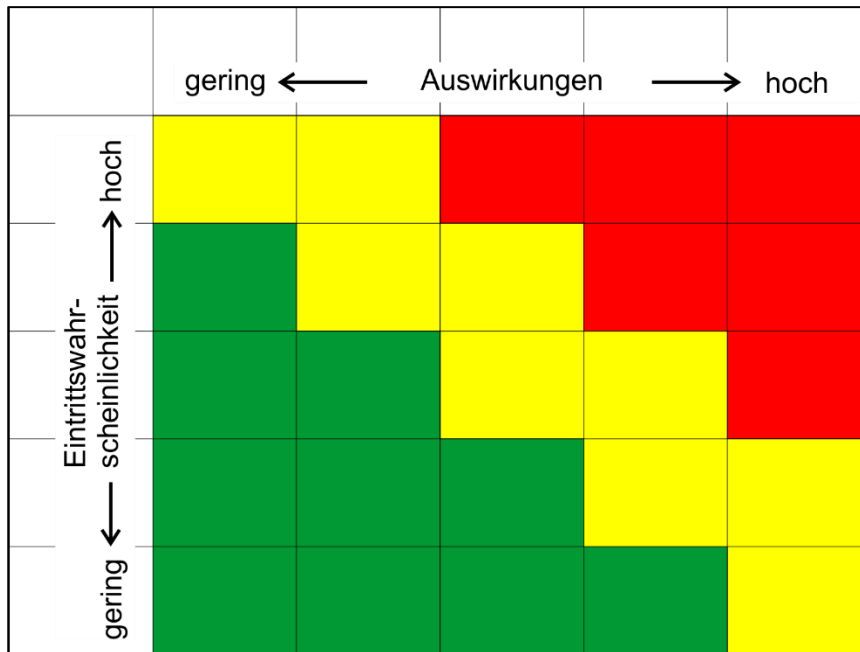


Abb. 15: Risikomatrix (grün = akzeptabel; gelb = akzeptabel mit Schadensminderung; rot = unakzeptabel) [Eigene Darstellung 2017]

Anders als in der Risikomatrix werden für die siedlungsklimatische Analyse nicht die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkungen, sondern zwei siedlungsklimarelevante Faktoren gegenübergestellt. In Abhängigkeit von der Ausprägungsintensität kann so die Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Stadtklimaphänomens bewertet werden. Abbildung 16 zeigt die schematische Darstellung der verwendeten Matrix für zwei Indikatoren mit jeweils fünf Ausprägungsklassen. Eine solche Matrix-Analyse ist nur möglich, wenn die einzelnen Indikatoren mindestens ein ordinales Skalenniveau besitzen [BÜNING & TRENKLER, 1994, 8 f.]. Da die Bewertung von siedlungsklimarelevanten Faktoren ein zentrales Element in der Anwendung des neuentwickelten Instruments darstellt, wird dieses Instrument „Matrix-Methode“ genannt. In Abhängigkeit der Auswirkungen des jeweiligen Untersuchungsgegenstands auf den Menschen wird innerhalb der Matrizen eine Bewertung der einzelnen Rasterfelder vorgenommen. Dazu wird eine fünfstufige Skala mit den Abstufungen „sehr schlecht“ (--), „schlecht“ (-), „neutral“ (~), „gut“ (+) und „sehr gut“ (++) verwendet.

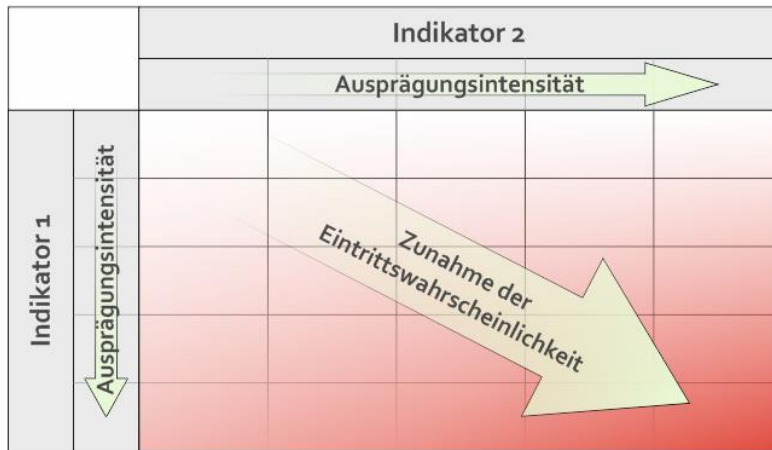


Abb. 16: Schematische Matrix-Darstellung [Eigene Darstellung 2017]

Die flächendeckende Erfassung der Indikatoren erfolgt anhand eines im Vorfeld festgelegten Rasters. Die räumliche Auflösung dieses Rasters kann individuell auf den jeweiligen Untersuchungsraum angepasst werden. Im Entwicklungsprozess der Matrix-Methode wurden Rastergrößen zwischen 25 und 100 Metern getestet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich der Erfassungsaufwand bei einer Halbierung der Rastergröße um den Faktor vier erhöht. Durch den sehr hohen Erfassungsaufwand eignet sich eine Rastergröße von 25 Metern nur bei sehr kleinen Untersuchungsgebieten oder Gebieten mit einer sehr heterogenen Siedlungsstruktur. Auf der anderen Seite sorgt eine Rastergröße von 100 Meter für einen sehr geringen Erfassungsaufwand, allerdings wird die Ergebnisqualität durch die schlechte räumliche Auflösung verschlechtert. Eine Auflösung von 100 Metern kann nur für sehr homogene Räume, wie an die Siedlung angrenzende Frei- oder Waldflächen, empfohlen werden. Während der Entwicklung und der Testphase der Matrix-Methode hat sich eine Rastergröße von 50 Metern als optimaler Kompromiss zwischen Erfassungsaufwand und Detaillierungsgrad herausgestellt.

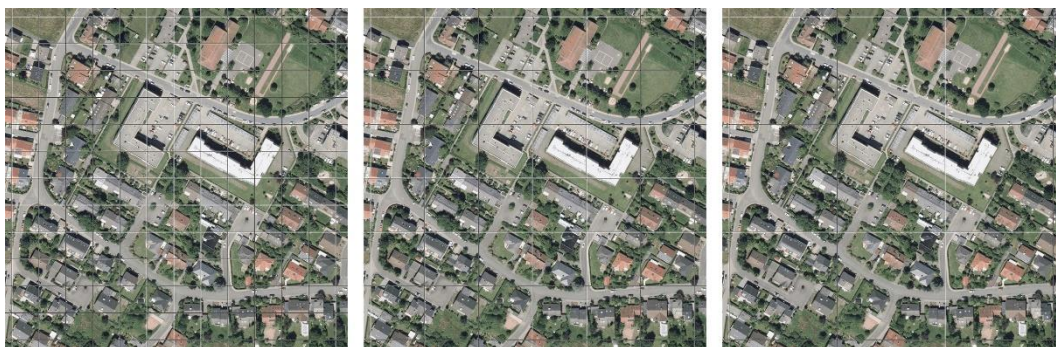


Abb. 17: Vergleich Rastergröße zur Bestandsaufnahme (links = 25 Meter; Mitte = 50 Meter; rechts = 100 Meter) [Eigene Darstellung 2017]

Im Rahmen der Entwicklung der Matrix-Methode wurden mehrere unterschiedliche Matrizen entwickelt und in verschiedenen Untersuchungsräumen getestet. Aus diesen Matrizen wurden sechs Matrizen ausgewählt, die für die meisten Siedlungsräume in Deutschland empfohlen werden können. Die Auswahl der Matrizen ermöglicht eine Betrachtung der Themenfelder „urbane Überwärmung“, „urbane Frisch- und Kaltluftversorgung“ und „urbaner Wasserhaushalt“. Diese Themenbereiche stellen die zentralen Handlungsfelder für kleine Siedlungsräume dar. Die Oberflächenrauigkeit und die horizontale Ausdehnung von kleinen Siedlungen ist meist nicht so hoch, dass es während allochthonen Wetterlagen zu relevanten Modifikationen des urbanen Windfelds kommt. Der Themenbereich der urbanen Lufthygiene spielt für die meisten kleinen Siedlungen ebenfalls nur eine untergeordnete Rolle. Die Schadstoffbelastung in diesen Siedlungen ist in der Regel nicht so hoch, dass die festgesetzten Grenzwerte überschritten werden. Abbildung 18 zeigt die für die Matrix-Methode empfohlenen Matrizen und ihre Zuordnung zu den Themenfeldern. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Grenzen zwischen den Themenfeldern nicht starr sind. Das Verdunstungspotenzial, das beispielsweise in der Matrix „Vegetationsdichte und Topographie“ ermittelt wird, ist nicht nur für den urbanen Wasserhaushalt von Bedeutung, sondern ebenfalls für die urbane Überwärmung, da durch die Verdunstung von Wasser die Oberflächentemperatur eines Gebiets und die Lufttemperatur reduziert werden.

Urbane Überwärmung
<i>Bebauungsdichte und Versiegelungsgrad</i>
<i>Oberflächenfarbe und Versiegelungsgrad</i>
<i>Oberflächenmaterial und Versiegelungsgrad</i>
Urbane Frisch- und Kaltluftversorgung
<i>Vegetationsform und Vegetationsanteil</i>
<i>Topographie und Oberflächenrauigkeit</i>
Urbaner Wasserhaushalt
<i>Vegetationsanteil und Topographie</i>

Abb. 18: Empfohlene Themenbereiche und Matrizen zur Anwendung der Matrix-Methode [Eigene Darstellung 2017]

4.2. Indikatorklassifizierung

Für die Anwendung der Matrix-Methode werden acht verschiedene Indikatoren verwendet. Sieben dieser Indikatoren müssen während der Bestandsaufnahme erfasst werden. Der achte Indikator, die Oberflächenrauigkeit, muss nicht während der Bestandsaufnahme aufgenommen werden, da dieser aus den Indikato-

ren Bebauungsdichte und Vegetationsform abgeleitet werden kann. Zur Reduzierung des Erfassungsaufwands werden einige der Indikatoren für mehrere Matrizen verwendet.

Die Klassifizierung der Indikatoren erfolgt in einem ordinalen Skalenniveau. Tabelle 7 eine Übersicht über die für das Matrix-Verfahren verwendeten Indikatoren und die jeweilige Klassenanzahl. Eine ausführliche Beschreibung der Indikatorklassifizierung erfolgt in Kapitel 4.3. Das Hauptkriterium bei der Klassifizierung der Indikatoren sind die Auswirkungen des jeweiligen Indikators auf die siedlungsökologischen Gegebenheiten. Dabei werden sowohl wissenschaftliche Untersuchungen, wie auch die Klimatopabgrenzungen nach VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 berücksichtigt. Zusätzlich werden im Rahmen der Indikatorklassifizierung städtebauliche Orientierungswerte verwendet. Die Verwendung dieser Orientierungswerte trägt zur Vereinfachung der Bestandsaufnahme (vgl. Kapitel 5) bei und stellt gleichzeitig für die potenziellen Anwender in den Planungsämtern eine Verknüpfung zu ihrem täglichen Arbeitsfeld dar.

Tab. 7: Indikatoren zu Anwendung der Matrix-Methode [Eigene Darstellung 2017]

Indikator	Klassen
Versiegelungsgrad	4
Bebauungsdichte	5
Oberflächenfarbe	7
Oberflächenmaterial	5
Vegetationsanteil	4
Vegetationsform	4
Topographie	5
Oberflächenrauigkeit	3

4.3. Untersuchungsfelder

4.3.1. Urbane Überwärmung

4.3.1.1. Versiegelungsgrad und Bebauungsdichte

In der ersten Matrix werden der Versiegelungsgrad und die Bebauungsdichte gegenübergestellt (Abb. 19). Die Versiegelung hat einen erheblichen Einfluss auf die Wärmeinselintensität einer Siedlung. Durch die veränderten Oberflächeneigenschaften der versiegelten Flächen wird die Ausbildung einer urbanen Wärmeinsel begünstigt. Dabei gilt, umso höher der Versiegelungsgrad, umso höher das Wärmeinselpotenzial [BAUMGARTNER ET AL. 1985; FOKAIDES ET AL. 2016, 1196 f.]. Der Versiegelungsgrad wird in vier Klassen zu jeweils 25 Prozent unterteilt. Die

erste Versiegelungsklasse umfasst demnach Flächen mit einem Versiegelungsgrad zwischen 0 und 25 Prozent. Dieser Versiegelungsklassen können innerhalb der Siedlung Parks, Friedhöfe und Kleingartenanlagen zugeordnet werden. Frei- und Waldflächen, die an den Siedlungskörper, angrenzen weisen in der Regel ebenfalls einen Versiegelungsgrad zwischen 0 und 25 Prozent auf. Die anthropogene Überformung der Landschaft in dieser Klasse ist so gering, dass die siedlungsökologischen Eigenschaften als positiv einzustufen sind [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 1 2015, 15f.; BONGARDT, 2006, 156 ff.]. Die Versiegelung dieser Flächen ist meist auf Erschließungsflächen zurückzuführen [BLUME ET AL. 2011, 156 ff.]. Mit zunehmender Bebauungsdichte steigt auch der Versiegelungsgrad an, da Gebäude ebenfalls als versiegelte Flächen (mit Ausnahme begrünte Dächer) gelten. Die zweite Versiegelungsklasse umfasst Gebiete mit einem Versiegelungsgrad zwischen 26 und 50 Prozent. Diese Klasse kann meist in Gebieten mit Einzel-, Doppel- oder Reihenhausbauung gefunden werden [MESSER 1997, 217]. Durch den erhöhten Eintrag von anthropogenem Material kommt es zu einer Verschlechterung der siedlungsökologischen Eigenschaften. Die verringerte Verdunstung und die erhöhte Wärmespeicherkapazität der Materialien begünstigen die Ausbildung einer urbanen Wärmeinsel. Diese Versiegelungsklasse entspricht den Klimatotypen Vorstadt- und Stadtrandklimatop. Die dritte Versiegelungsklasse (51 - 75 Prozent) wird in Gebieten mit einer geschlossenen Zeilen- oder Blockrandbauung erreicht (Stadtklimatop). Diese Flächen weisen ein sehr hohes Potenzial für eine urbane Überwärmung auf. Diese tritt sowohl in austauscharmen Strahlungsnächten, wie auch tagsüber durch hohe strahlungsbeeinflusste Lufttemperaturen auf. Die vierte Versiegelungsklasse (76 – 100 Prozent) wird in kleinen Siedlungen nur sehr selten erreicht. Die Struktur ist sehr stark von versiegelten Flächen geprägt. Unversiegelte Flächen wie Straßenbegleitgrün oder kleine Gärten treten nur vereinzelt auf und haben nur einen geringen Einfluss auf die siedlungsökologischen Bedingungen. In diesen Gebieten kann davon ausgegangen werden, dass es zu einer sehr starken Überwärmung kommt [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 1 2015, 20 f.].

Die Bebauungsdichte wird in fünf Klassen unterteilt, die von den unterschiedlichen Bebauungsformen abgeleitet werden. Die Klimawirksamkeit der Bebauung liegt in der durch die Baumasse erhöhten Wärmespeicherkapazität und durch die dreidimensionale Strukturierung des Siedlungskörpers erhöhte Oberflächenrauigkeit [HELBIG 1999, 8 ff.]. Diese Bebauungstypen sind bebauungsfrei (0 %), Punktbebauung (1-25 %), aufgelockerte Bebauung (26-50 %), dichte Be-

bauung (51-75 %), sehr hohe Baudichte (76-100 %) [BLUME ET AL. 2011, 156 ff.]. Unbebaute Flächen finden sich meist nur in den an den Siedlungskörper angrenzenden Freiflächen. Eine Bebauungsdichte von 1 bis 25 Prozent entspricht Kleingartenanlagen mit Lauben und freistehenden Einfamilienhäusern. Die Gebäude in dieser Bebauungsklasse sind in der Regel 1 - 2,5-geschossig. Eine etwas höhere Bebauungsdichte weisen Flächen mit Doppelhaus- oder Zeilenbebauung auf. Diese können der dritten Bebauungsklasse zugeordnet werden. Mit einer typischen Gebäudehöhe zwischen 2 und 2,5 Geschossen und einer dichteren Bebauung ist die Baumasse im Vergleich zu Bebauungsklasse zwei etwas erhöht. Für kleine Siedlungen ist die dritte Bebauungsklasse nur teilweise von Bedeutung. Üblicherweise ist eine Bebauung zwischen 51 und 75 Prozent nur in Innenstadtbereichen zu finden. In Stadtrandbereichen treten solche dichte Bebauungsstrukturen nur selten auf. In kleinen Siedlungen können stark verdichtete Ortskerne nur in Ausnahmefällen solch hohe Bebauungsdichten erreichen. Die fünfte Bebauungsklasse (76 – 100 %) kommt nur in sehr stark verdichteten Stadtkernen oder Industrie- bzw. Gewerbegebieten vor. Durch den sehr starken Eintrag von anthropogenen Baumaterialien und durch die hohe Oberflächenrauigkeit bedingte schlechte Durchlüftung besitzen diese Flächen ein sehr hohes Potenzial zur Ausbildung einer urbanen Wärmeinsel.






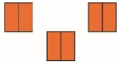


Baudichte in %-Flächenanteil		Versiegelungsgrad in %-Flächenanteil			
		0 – 25 % 	26 – 50 % 	51 – 75 % 	76 – 100% 
bebauungsfrei		++	+	~	-
Punktbebauung (1-25 %)		++	+	-	-
aufgelockerte Bebauung (26-50 %)			~	-	--
dichte Bebauung (51-75 %)				--	--
sehr hohe Baudichte (76-100 %)					--

Abb. 19: Matrix "Versiegelungsgrad / Bebauungsdichte" [Eigene Darstellung 2017]

4.3.1.2. Versiegelungsgrad und Oberflächenfarbe

Die zweite Matrix wird genutzt, um das Erwärmungsverhalten der versiegelten Flächen abzuschätzen. Dazu wird der Versiegelungsgrad und die überwiegende Oberflächenfarbe der versiegelten Flächen in einer Matrix gegenübergestellt (Abb. 20). Die Klassifizierung des Versiegelungsgrads wird analog zur ersten Matrix durchgeführt. Eine entscheidende Eigenschaft für das Erwärmungsverhalten einer Oberfläche ist die Albedo [BALDINELLI ET AL. 2015, 281 f.]. Die Albedo beschreibt das Rückstrahlvermögen einer Fläche und gibt das Verhältnis zwischen rückgestrahltem und einfallendem Licht an. Die Albedo kann theoretisch Werte zwischen 1 (totale Reflexion) und 0 (totale Absorption) annehmen [HAIDER 1997, 100 f.]. Als Faustformel lässt sich festhalten, dass helle Flächen eine höhere Albedo als dunkle Flächen aufweisen. Dunkle Flächen nehmen also einen größeren Teil der Sonneneinstrahlung auf und erwärmen sich dadurch stärker [Kappas 2009, 81]. Die abgestrahlte Leistung eines idealen schwarzen Körpers kann nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnet werden. Dieses gibt an, wie viel Strahlungsleistung ein Körper in Abhängigkeit der Oberfläche und der absoluten Temperatur aussendet [HANTEL 2016, 16]. Für die Indikatorklassifizierung und -bewertung bedeutet das, dass Raster mit einer dunklen Oberflächenfarbe ein höheres Potenzial zur Ausbildung einer urbanen Wärmeinsel besitzen.

Die Klassifizierung der städtischen Oberflächen erfolgt anhand der Albedowerte für typische Materialien mit der entsprechenden Oberflächenfarbe. Weiße Oberflächen reflektieren im Vergleich zu den anderen künstlichen Materialien im Siedlungsraum die meiste einfallende Strahlung. Aus diesem Grund nehmen diese Materialien weniger Energie auf und tragen damit weniger zur Bildung einer urbanen Wärmeinsel bei. Die Albedo von typischen blauen, grünen, roten und braunen Oberflächen (z. B.: Dachziegel) liegt sehr dicht beieinander. Diese Materialien reflektieren einen kleineren Teil der einfallenden Strahlung und können sich aus diesem Grund stärker erwärmen. Die häufigste Oberflächenfarbe in mitteleuropäischen Städten ist „Grau“, da Beton als Baustoff sehr weit verbreitet ist. Die Albedo für solche Flächen liegt zwischen 0,65 und 0,9. Diese Flächen nehmen einen Großteil der einfallenden Strahlung auf und tragen so sehr stark zur urbanen Überwärmung bei. Die höchste Albedo der städtischen Oberflächen ist den schwarzen Materialien zuzuweisen (z. B.: Asphalt). Diese Flächen besitzen ein hohes Überwärmungspotenzial und bilden die siebte Klasse [HUPFER & KUTTLER 2006, 384].

Neben der Oberflächenfarbe ist das Material ein weiterer wichtiger Faktor bei der Erwärmung. Bei dieser Matrix wird nur die überwiegende Oberflächenfarbe bewertet, sodass es an dieser Stelle zu einer Verfälschung der Ergebnisse kommen kann. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse dieser Matrix nur ein Anhaltspunkt und benötigen bei der Feststellung von Belastungsbereichen einer detaillierteren Überprüfung vor Ort.


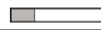
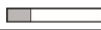
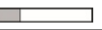
Überwiegende Oberflächenfarbe	Versiegelungsgrad in %-Flächenanteil			
	0 – 25 % 	0 – 25 % 	0 – 25 % 	0 – 25 % 
weiß	++	++	+	-
blau	++	+	~	-
grün	++	+	~	-
rot	++	+	~	--
braun	+	~	-	--
grau	+	~	--	--
schwarz	+	-	--	--

Abb. 20: Matrix "Versiegelungsgrad / Oberflächenfarbe" [Eigene Darstellung 2017]

4.3.1.3. Versiegelungsgrad und Oberflächenmaterial

Die dritte Matrix kann sowohl dem Themenbereich der urbanen Überwärmung wie auch dem urbanen Wasserhaushalt zugeordnet werden. Diese Matrix umfasst die Indikatoren Versiegelungsgrad und Oberflächenmaterial (Abb. 21). Die verwendeten Materialien in Siedlungen unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer Wärmeleitfähigkeit, Wärmespeicherkapazität und dem Abflussverhalten bei Niederschlag [ZMARSLY ET AL. 2007, 169; DIN 2016, 61]. Die große Vielfalt aller in einer Siedlung vorkommenden Oberflächenmaterialien verhindert eine detaillierte Erfassung aller Flächen im Rahmen der Matrixmethode. Stattdessen werden die Materialien in fünf verschiedene Klassen unterteilt, die Materialien mit ähnlichen siedlungsökologischen Eigenschaften zusammenfassen. Die versickerungsfähigen Materialien besitzen einem niedrigen Abflussbeiwert und im Vergleich zu versiegelten Flächen eine hohe Versickerungs- und Verdunstungsrate.

Das Erwärmungsverhalten von diesen Flächen ist zwar ähnlich wie das anderer versiegelter Flächen, durch die Verdunstung von Wasser entsteht allerdings ein Kühlungseffekt. Damit weisen diese Materialien die besten siedlungsökologischen Eigenschaften unter den anthropogenen Materialien in einer Siedlung auf. Schotter- und Kiesflächen weisen einen ähnlich niedrigen Abflussbeiwert auf wie die Materialien der ersten Materialklasse. Allerdings ist die Verdunstungsrate bei diesen Flächen geringer, sodass der Kühlungseffekt durch Verdunstung schwächer ausgebildet ist. Die wassergebundenen Decken, die die dritte Materialklasse bilden, können stark unterschiedliche Abflussbeiwerte besitzen. Während locker verdichtete einen hohen Versickerungsanteil (ca. 60 %) besitzen, nimmt dieser mit zunehmender Verdichtung ab (15 % bei hoch verdichteten wassergebundenen Decken) [BMRBS, 1988, 98 ff.]. Da die thermischen Eigenschaften dieser Flächen im trockenen Zustand allerdings ähnlich sind, können diese Flächen trotz eines unterschiedlichen Abflussbeiwertes in einer Materialklasse kombiniert werden. Die vierte Versiegelungsklasse umfasst Pflaster und Plattenbeläge. Diese Materialien tragen durch ihre thermischen Eigenschaften und den hohen Abflussbeiwert zur Ausbildung einer urbanen Überwärmung bei. Beton- und Asphaltflächen besitzen von den fünf Materialklassen den höchsten Abflussbeiwert und die schlechtesten thermischen Eigenschaften [ILLGEN 2009, 65].

überwiegendes Oberflächenmaterial		Versiegelungsgrad in %-Flächenanteil			
		0 – 25 %	0 – 25 %	0 – 25 %	0 – 25 %
versickerungsfähiges Material	z.B.: Rasengittersteine, Schotterrasen, Porenpflaster	++	++	+	~
Schotter- und Kiesflächen	z.B.: Schotterböden auf Parkplätzen	++	+	~	-
wassergebundene Decken	z.B.: Parkplätze, Stellplätze, Gehwege	+	~	-	--
Pflaster- und Plattenbeläge	z.B.: Kopfsteinpflaster, Gehwege, Einfahrten	+	-	--	--
Asphalt- und Betonflächen	z.B.: Fahrbahnen, Parkplätze, Gehwege	+	-	--	--

Abb. 21: Matrix "Versiegelungsgrad / Oberflächenmaterial" [Eigene Darstellung 2017]

4.3.2. Urbane Frisch- und Kaltluftversorgung

Das urbane Windfeld in Siedlungen stellt ein komplexes Thema dar. Zum einen können durch lokale Luftdruckunterschiede Winde zwischen Siedlung und Umland (Flurwinde) entstehen. Zum anderen führt die Bebauung zu einer Erhöhung der Oberflächenrauigkeit, was meist eine Verringerung der Windgeschwindigkeit zur Folge hat [LESER & CONRADIN 2008, 244 F.]. Durch die erhöhte Oberflächenrauigkeit wird die Kalt- und Frischluftversorgung der urbanen Flächen verringert. So kommt es besonders in den Nachtstunden zu einer Erhöhung der urbanen Wärmeinselintensität.

4.3.2.1. Vegetationsform und Vegetationsanteil

Die Lage von Kalt- und Frischluftgebieten ist für die siedlungsökologische Situation einer Siedlung von besonderer Bedeutung. Eine umfangreiche Kaltluftuntersuchung kann mit den erfassten Indikatoren nicht durchgeführt werden. Die Indikatoren können allerdings genutzt werden, um das Kaltluftentstehungspotenzial einer Fläche abzuschätzen. Das Kaltluftentstehungspotenzial wird maßgeblich durch die thermischen Eigenschaften der Oberflächenmaterialien und der vorhandenen Vegetation bestimmt [SONG 2003, 25].

Für die Kaltluftproduktion eignen sich nur unversiegelte Flächen. Als erster Indikator für die Abschätzung des Kaltluftentstehungspotenzials wird der Vegetationsanteil verwendet. Dieser Indikator erlaubt eine Abschätzung, wie viel Prozent des Rasters für die Kaltluftproduktion in Frage kommen. Der Vegetationsanteil wird analog zum Versiegelungsgrad in 25 Prozent Schritte unterteilt. Dabei gilt, je höher der Vegetationsanteil ist umso besser ist das Kaltluftentstehungspotenzial zu bewerten. Dem Vegetationsgrad wird in der Matrix die überwiegende Vegetationsform gegenübergestellt (Abb. 22). Dazu werden für die Vegetationsform vier Klassen gebildet. Freiflächen wie Wiesen oder Felder kühlen in der Nacht sehr schnell aus, sodass diese Flächen ein sehr hohes Kaltluftpotenzial besitzen. Diese Flächen bilden die erste Vegetationsklasse. Mit zunehmender Vegetationshöhe verringert sich das Kaltluftentstehungspotenzial. Freiflächen mit einzelnen Strauch- und Gehölzgruppen bilden die zweite Vegetationsgruppe. Diese Flächen weisen gegenüber den reinen Freiflächen eine leicht reduzierte Kaltluftproduktion auf. Die dritte Vegetationsform stellen Wälder dar. Die Kaltluftproduktion in Wäldern findet fast ausschließlich oberhalb der Baumkronen statt und ist deutlich geringer als die der beiden anderen Vegetationsklassen [GERST ET AL. 2011, 59]. Die vierte Vegetationsform sind Einzelpflanzungen im

Siedlungskörper. Diese besitzen für die Entstehung von Kaltluft keine Auswirkungen.





Vegetationsform		Vegetationsanteil in %-Flächenanteil			
		100 – 76 % 	75 – 51 % 	50 – 26 % 	25 – 0% 
Freifläche	Wiese, Rasen	++	++	+	~
Gehölzgruppen	Bäume, Sträucher, Stauden	+	+	~	-
Wald	Laub-. Nadel oder Mischwald	+	~	-	--
Einzel-pflanzung	Bsp.: Straßenbegleitgrün			--	--

Abb. 22: Matrix "Vegetationsanteil / Vegetationsform" [Eigene Darstellung 2017]

4.3.2.2. Topographie und Oberflächenrauigkeit

Der positive Effekt von Kaltluftentstehungsgebieten auf die Siedlung kann sich nur entfalten, wenn die entstandene Kaltluft in die Siedlung eindringen kann. Ohne einen Kaltluftabfluss in Richtung Siedlung ist die räumliche Wirkung der Kaltluft deutlich eingeschränkt. Um als Kaltluftbahn zu fungieren, sollte eine Fläche in der Nacht nur wenig Wärme abgeben, ein Gefälle in Richtung Siedlung besitzen und eine möglichst geringe Oberflächenrauigkeit aufweisen. So wird die Kaltluft während dem Abfluss nicht erwärmt oder abgebremst [WEBER 2004, 30]. Als Indikatorpaar zur Identifizierung einer potenziellen Kaltluftleitbahn werden die Topographie und die Oberflächenrauigkeit verwendet (Abb. 23). Die Oberflächenrauigkeit wird in die Klassen gering, mittel und hoch unterteilt. Anders als die bisher betrachteten Faktoren muss die Oberflächenrauigkeit nicht bei der Bestandsaufnahme aufgenommen werden, sondern wird aus den Indikatoren Vegetationsform und Bebauungsdichte abgeleitet [FABISCH & HENNINGER 2015, 567].

Die Topographie wird in fünf Klassen unterteilt. Dabei wird nicht nur das Relief, sondern ebenfalls die Ausrichtung zur Siedlung bewertet. Die besten Topographiebedingungen für den Kaltlufttransport zu einer Siedlung bieten Raster mit einem Gefälle in Richtung Siedlungskern. Dabei sind Flächen mit einem starken

Gefälle etwas positiver zu bewerten als Flächen mit einem leichten Gefälle. Flächen mit einem ebenen bzw. leicht bewegten Gelände können nur unter sehr eingeschränkten Bedingungen als Kaltluftleitbahn fungieren. Raster, die ein Gefälle besitzen, dass nicht in Richtung Siedlung geneigt ist, können zwar ebenfalls als Kaltluftleitbahn fungieren, sind für die Versorgung der Siedlung mit Kaltluft allerdings nicht relevant [GASSNER & WINKELBRANDT 2010, 154].

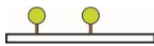

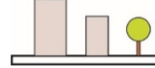

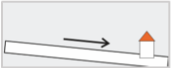



Topographie		Oberflächenrauigkeit		
		 gering	 mittel	 hoch
starkes Gefälle zum Siedlungskörper		++	~	--
leichtes Gefälle zum Siedlungskörper		++	-	--
bewegtes Gelände		+	--	--
ebenes Gelände		+	--	--
Gefälle weg vom Siedlungskörper		--	--	--

Abb. 23: Matrix "Oberflächenrauigkeit / Topographie" [Eigene Darstellung 2017]

4.3.3. Urbaner Wasserhaushalt

Der urbane Wasserhaushalt wird durch den Eintrag von künstlichen Materialien in die Landschaft massiv beeinflusst. Durch den erhöhten Oberflächenabfluss und die geringere Speicherkapazität von Niederschlägen kommt es in Siedlungen zu einer verringerten Verdunstung und zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels [PAUL & MEYER 2001, 335 f.]. In der dritten Matrix (Kapitel 4.3.1.3) wird bereits die Abhängigkeit zwischen Versiegelungsgrad und Oberflächenmaterial untersucht. Die gebildeten Materialklassen unterscheiden sich alle hinsichtlich ihres Abflussbeiwertes. Dieser steigt von der ersten Materialklasse („versickerungsfähiges Material“) bis zur fünften Materialklasse („Asphalt- und Betonflächen“) an. Mit einem zunehmenden Versiegelungsgrad steigt der Anteil der

künstlichen Materialien an der Gesamtfläche. Damit wird bei Niederschlagsereignissen ein großer Teil des Wassers abgeleitet und kann nicht verdunsten oder im Boden versickern.

4.3.3.1. Vegetationsanteil und Topographie

In der letzten Matrix werden der Vegetationsanteil und die Topographie ausgewertet (Abb. 24). Beide Indikatoren wurden bereits für andere Matrizen aufgenommen, sodass diese nicht zusätzlich erfasst werden müssen. Der Abflussbeiwert einer Fläche wird durch die Neigung einer Fläche mitbestimmt. Mit zunehmender Steigung nimmt der Abflussbeiwert zu [LEIBUNDGUT 2007, 143 f.]. Die Klassifizierung der Topographie wird für diese Matrix in vier Klassen durchgeführt. Da die Ausrichtung der Hangneigung für den Abflussbeiwert nicht von Bedeutung ist, wird die Klasse „Gefälle weg vom Siedlungskörper“ für diese Matrix in die anderen Klassen übertragen.

Bei Niederschlagsereignissen fungiert die Vegetation und der natürliche Boden darunter als Wasserspeicher. So wird der Oberflächenabfluss durch einen hohen Vegetationsanteil verringert. Tagsüber verdunstet viel Wasser über die Blattoberflächen der Pflanzen. Für diesen Verdunstungsprozess wird Wärme benötigt, die der Umgebung (z. B.: Luft und Boden) entzogen wird. So entsteht ein Kühleffekt, der die urbane Wärmeinselintensität abschwächt [HENNING 1994, 70].









Topographie		Vegetationsdichte in %-Flächenanteil			
		100 – 76 % 	75 – 51 % 	50 – 26 % 	25 – 0% 
starkes Gefälle		++	+	~	--
leichtes Gefälle		++	+	~	--
bewegtes Gelände		+	~	-	--
ebenes Gelände		+	-	--	--

Abb. 24: Matrix "Vegetationsdichte / Topographie" [Eigene Darstellung 2017]

4.4. Auswertung

Die Darstellung und Auswertung der Matrizen kann in jedem CAD-Programm erfolgen. Dazu werden die einzelnen Raster entsprechende der Farbgebung der Matrizen eingefärbt. Auf diese Weise können Gebiete dargestellt werden, die ein erhöhtes Potenzial besitzen, ein bestimmtes Siedlungsklimaphänomen auszubilden.

Eine andere Darstellungs- und Auswertungsmethode bieten Geographische Informationssysteme. Diese erlauben eine tiefergehende Analyse der aufgenommenen Daten. Dazu werden die Ergebnisse der Matrizen in ein Punktesystem umgewandelt. Pro Matrize können für ein Raster bis zu fünf Punkte vergeben werden. Tabelle 8 zeigt die Umrechnung der verbalen Bewertung der Matrizenfelder in das Punktesystem.

Tab. 8: Überführung der verbalen Beschreibung in Punktesystem [Eigene Darstellung 2017]

Eintrittswahrscheinlichkeit des Stadtklimaphänomens	Verbale Bewertung der Auswirkungen	Punktesystem
Sehr gering	Sehr schlecht (--)	1
Gering	Schlecht (-)	2
Mittel	Neutral (~)	3
Hoch	Gut (+)	4
Sehr hoch	Sehr gut (++)	5

Die so umgewandelten Ergebnisse werden mit den Rastern in einem geographischen Informationssystem verknüpft. Auf diese Weise werden schnell und unkompliziert Visualisierungen der einzelnen Matrizen erstellt. Darüber hinaus bieten GI-Systeme die Möglichkeit, verschiedene Matrizen zu kombinieren, räumliche und statistische Analysen durchzuführen und Abfragen gezielt nach einer bestimmten Wertekombination zu stellen. Durch Addition der Punkte der ersten drei Matrizen kann so beispielsweise eine Gesamtbewertung des urbanen Überwärmungspotenzials des Untersuchungsraums erstellt werden. Alternativ können auch alle Raster selektiert bzw. dargestellt werden, die in mindestens einer Matrix mit „schlecht“ oder „sehr schlecht“ bewertet wurden.

Aus der Kombination aller Matrizen wird eine siedlungsökologische Gesamtbewertung des Untersuchungsraums erstellt. Neben Bereichen, die sehr schlechte

siedlungsökologische Rahmenbedingungen aufweisen, werden in nahezu jeder Gemeinde auch Gebiete zu erkennen sein, die gute Rahmenbedingungen besitzen. Aus diesem Grund wird eine Untergliederung in drei verschiedene Zonen vorgenommen.

Potenzialgebiet (27 bis 30 Punkte)

Als Potentialgebiet werden Flächen abgegrenzt, die überwiegend gute bis sehr gute siedlungsökologische Rahmenbedingungen aufweisen. Diese Flächen besitzen ein niedriges Überwärmungspotenzial, sodass die Ausbildung einer urbanen Wärmeinsel für diese Gebiete ausgeschlossen werden kann. Darüber hinaus fungieren diese Flächen als Entstehungsgebiete oder Leitbahnen für Frisch- und Kaltluft, sodass sie das lokale Klima positiv beeinflussen. Die Topographie, der Versiegelungsgrad und die verwendeten Materialien dieser Flächen sorgen dafür, dass ein Großteil des Niederschlagwassers versickern kann. Eingriffe, wie die Versiegelung von Flächen oder die Erhöhung der Oberflächenrauigkeit, die Rahmenbedingungen negativ beeinflussen können, sollten in diesen Zonen vermieden werden.

Übergangszone (10 bis 26 Punkte)

Die Übergangszonen besitzen weder einen deutlich negativen, noch einen starken positiven Effekt auf das Siedlungsklima. Diese Flächen besitzen in der Regel ein mittleres Überwärmungspotenzial und eignen sich nicht als Entstehungsgebiet oder Leitbahn für Frisch- und Kaltluft. Durch die Versiegelung der Flächen wird der natürliche Wasserhaushalt gestört. Da die Einstufung allerdings aufgrund der Gesamtbewertung erfolgt, können einzelne Untersuchungsgegenstände in diesen Zonen dennoch stark positiv bzw. negativ ausgeprägt sein. Eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Untersuchungsgegenstände muss für diese Zonen durchgeführt werden, um mögliche negative Einflüsse zu identifizieren und durch gezielte Maßnahmen zu verbessern.

Risikogebiet (6 bis 9 Punkte)

Der größte Handlungsbedarf besteht in den Risikogebieten. Diese Zonen wurden in allen drei Hauptkategorien (Überwärmung, Wasserhaushalt und Kalt- und Frischluftversorgung) negativ bewertet. Es kann davon ausgegangen werden, dass von diesen Zonen eine erhebliche Verschlechterung des Siedlungsklimas ausgeht [FABISCH, HENNINGER 2014, 599]. Durch den starken Eintrag von künstlichen Materialien mit schlechten siedlungsökologischen Eigenschaften kommt

es in diesen Gebieten mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Ausbildung einer Wärmeinsel. Der hohe Eintrag von anthropogenen Materialien und die hohe Oberflächenrauigkeit sorgen dafür, dass diese Flächen für die Frisch- und Kaltluftversorgung der Siedlung keine Rolle spielen. Durch den geringen Vegetationsanteil mit versickerungsfähigen Böden und die möglicherweise ungünstige Topographie wird ein Großteil des Niederschlags an der Oberfläche abgeleitet.

Zur Verdeutlichung aller für das Matrix-Verfahren notwendigen Schritte wird in Kapitel 6.3 eine exemplarische Durchführung der Matrix-Methode beschrieben.

5. Bestandsaufnahmearten

Zur Bestandsaufnahme der benötigten Daten für die Analyse eines Untersuchungsraums können verschiedene Verfahren angewendet werden. Als Vorbereitung für die Bestandsaufnahme muss zunächst für alle Verfahren das Untersuchungsgebiet abgegrenzt und die Rasterung festgelegt werden. Dieser Schritt kann sowohl mit CAD-Programmen wie auch mit Geographischen Informationssystemen erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, dass die erstellten Raster eine fortlaufende Nummerierung besitzen, da diese Indexnummer in den weiteren Arbeitsschritten benötigt wird.

Die Bestandsaufnahme umfasst den Teil der Matrix-Methode, der nach Festlegung der Untersuchungsrastraster erfolgt. Ebenfalls wird zur Bestandsaufnahme die Nachbereitung der aufgenommenen Daten hinzugezählt, da diese sich teilweise zwischen den einzelnen Bestandsaufnahmeverfahren unterscheiden. Neben der Nachbereitung der Daten unterscheiden sich die potenziellen Bestandsaufnahmeverfahren in erster Linie in der Vorgehensweise, den Anforderungen an den Benutzer und der Ergebnisqualität. Innerhalb dieses Kapitels werden zunächst die möglichen Verfahren beschrieben und bewertet, um daraus die optimale Anwendung abzuleiten.

5.1. Vor Ort

Das erste mögliche Verfahren in der Anwendung der Matrix-Methode ist eine klassische Bestandsaufnahme vor Ort. Diese Bestandsaufnahme beruht auf der Abschätzung der für die Methode benötigten Indikatoren. Die Abschätzung der jeweiligen Indikatoren unterliegt dem subjektiven Eindruck des Erfassers. Als Orientierungshilfen können die in Kapitel 4.3 genannten Beispiele hinzugezogen werden (z. B.: Punkthausbebauung → Bebauungsdichte = 1-25 %). Dabei wird eine Begehung des Untersuchungsgebiets vor Ort durchgeführt, während der die jeweiligen Indikatoren in eine Tabelle eingetragen werden. Zur Reproduzierbarkeit und weiteren Verarbeitung der Daten ist es dabei notwendig, dass alle Indikatoren nach demselben Schlüssel bewertet und erfasst werden. In der praktischen Anwendung hat sich eine Nummerierung der einzelnen Indikatorklassen als praktikable und schnellste Erfassungsvariante herausgestellt. Diese Nummern können einfach tabellarisch dokumentiert werden und ermöglichen darüber hinaus eine weitestgehend automatisierte Auswertung in einem Tabellenkalkulationsprogramm. Neben der Tabelle zur Erfassung der Daten wird zwingend ein Übersichtsplan des Untersuchungsgebiets benötigt, der als Orien-

tierungshilfe dient und Informationen über die Lage und Indexnummer der Raster enthält. Darüber hinaus sollte eine Übersicht über die Indikatorklassifizierungen mitgeführt werden, sodass während der Bestandsaufnahme keine Fehler durch falsche Klassifizierung der Indikatoren entstehen können. Im Anschluss an die Bestandsaufnahme vor Ort müssen die erhobenen Daten, sofern die Bestandsaufnahme analog durchgeführt wurde, zur weiteren Verarbeitung in einem Tabellenkalkulationsprogramm (z. B.: Microsoft Excel) digitalisiert werden.

Die Bestandsaufnahme vor Ort bietet den Vorteil, dass sich das Verfahren nur in geringen Maßen von anderen Bestandsaufnahmen unterscheidet. Die Bestandsaufnahme vor Ort kann aus diesem Grund mit nur einer kurzen Einarbeitungsphase oder Einweisung von den Planungsamtmitarbeitern selbstständig durchgeführt werden. Darüber hinaus ermöglicht dieses Verfahren, die aktuelle Situation vor Ort aufzunehmen. Der Einfluss von veralteten Luftbildern oder Kartengrundlagen auf die Ergebnisqualität kann so minimiert werden. Ein zentrales Problem bei der Bestandsaufnahme vor Ort ist die Einsehbarkeit von Flächen. Besonders in dicht bebauten Gebieten (z. B.: Blockrandbebauung), kann es vorkommen, dass Flächen nicht zugänglich bzw. einsehbar sind, sodass diese bei der Bestandsaufnahme nicht berücksichtigt werden können. Auch Vegetation, wie beispielsweise hohe und dichte Hecken, kann dazu führen, dass einzelne Raster bei einer Begehung vor Ort nicht komplett erfasst werden können.

Um den Schritt der Digitalisierung im Anschluss an die Bestandsaufnahme zu umgehen, wurden während der Entwicklung der Matrix-Methode Versuche durchgeführt, die Bestandsaufnahme vor Ort nicht mit einer ausgedruckten Erfassungstabelle, sondern mit einer digitalen Tabelle auf einem Tabletcomputer durchzuführen. Die Versuche haben dabei gezeigt, dass die analoge Methode deutlich schneller und einfacher umgesetzt werden kann, da die Bedienung von Tabellenkalkulationsprogrammen auf einem Tabletcomputer bei der Eingabe von vielen Werten sehr aufwendig ist.

5.2. Fernerkundung

Neben der Bestandsaufnahme vor Ort besteht die Möglichkeit, die Bestandsaufnahme mit Hilfe von Fernerkundungsverfahren durchzuführen. Die Fernerkundungsverfahren können zur Anwendung der Matrix-Methode in drei Kategorien unterteilt werden.

5.2.1. Manuelle Fernerkundung

Bei der manuellen Fernerkundung wird das Untersuchungsgebiet anhand von Luftbildern untersucht. Dabei können sowohl Schrägluftbilder wie auch Orthofotos eingesetzt werden. Orthofotos aus Flugzeugbefliegungen sind in der Regel gegenüber Satellitenaufnahmen vorzuziehen, da Bilder aus Befliegungen meist aktueller sind und eine deutlich höhere Auflösung besitzen. Über das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz können beispielsweise Luftbilder mit einem Aktualisierungszyklus von zwei Jahren und einer Bodenauflösung von 0,2 Meter bezogen werden [LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION RHEINLAND-PFALZ 2017, o. S.]. Die maximale räumliche Auflösung von zivil verfügbaren Satellitenaufnahmen liegt mit 30 Zentimeter zwar nur knapp über der Auflösung von Befliegungsdaten, ist allerdings nicht flächendeckend verfügbar [DIGITAL GLOBE 2017, o. S.]. Zur Erfassung der Topographie werden neben den Luftbildern auch Höhendaten des Geländes benötigt. Diese können sowohl aus topographischen Karten, wie auch aus digitalen Geländemodellen abgeleitet werden.

Wie bei der Bestandsaufnahme vor Ort werden auch bei dieser Methode die Indikatoren abgeschätzt und in einer Tabelle für die weitere Bearbeitung notiert. Je nach technischer Ausstattung kann die Erfassung entweder analog mit anschließender Digitalisierung oder direkt in einem Tabellenkalkulationsprogramm erfolgen. Gegenüber der Bestandsaufnahme vor Ort bietet dieser Ansatz die Möglichkeit, sichtverschattete Bereiche ebenfalls zu berücksichtigen. Während Indikatoren wie Versiegelungsgrad und Grünflächenanteil durch Luftbilder sehr gut abgeschätzt werden können, können andere Indikatoren durch diese Methode nur unzureichend erfasst werden. Selbst Luftbilder mit einer sehr hohen Auflösung reichen nicht aus, um alle für die Matrix-Methode benötigten Indikatoren (z. B.: Oberflächenmaterial) zu bewerten. Die Analyse des Untersuchungsgebiets kann genauso wie bei der Bestandsaufnahme vor Ort nach einer kurzen Einarbeitung bzw. Einweisung selbstständig durch die Gemeinde durchgeführt werden.

5.2.2. GIS-basierte Fernerkundung

Bei der GIS-basierten Fernerkundung werden die Indikatoren nicht, wie in den beiden zuvor vorgestellten Ansätzen abgeschätzt, sondern mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (z. B.: ArcGis) berechnet. Einzig die beiden Faktoren Vegetationsform und Topographie können auf diese Weise nicht berech-

net werden, sodass diese manuell durch den Anwender bewertet werden müssen. Als Kartengrundlage sollte bei diesem Verfahren ein möglichst hochauflösendes und aktuelles Luftbild verwendet werden. Im Rahmen der Bestandsaufnahme müssen im Untersuchungsgebiet alle Gebäude, Grünflächen und versiegelte Flächen digital als Polygon erfasst werden. Um die weiterführenden Arbeitsschritte zu vereinfachen, sollte für jeden Indikator eine separate Polygone-datei (Shape-Datei) erstellt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die versiegelten Flächen mit unterschiedlichen Eigenschaften (Oberflächenfarbe und -material) separat und nicht als zusammenhängende Fläche digitalisiert werden, da nur so die vollständige Durchführung der Matrix-Methode gewährleistet werden kann. Im Anschluss an die Flächenerfassung werden die Polygoneigenschaften für die Indikatoren Oberflächenfarbe und Oberflächenmaterial in die Datenbank der Shape-Datei eingetragen. Um die digitalisierten Flächen eindeutig den jeweiligen Rastern zuordnen zu können, werden im nächsten Schritt alle erstellten Polygone-dateien mit den vor der Bestandsaufnahme erstellten Rastern verschnitten.

Zur Klassifizierung der Indikatoren wird für alle durch die Verschneidung entstandenen Teilflächen der Flächeninhalt benötigt. Die Berechnung der einzelnen Teilflächen erfolgt in der Datenbank der jeweiligen Shape-Datei. Durch Verwendung der Indexnummern der Rastergrundlage werden die Teilflächen mit der Grundlagendatei verknüpft. Die Klassifizierung der Indikatoren erfolgt in der Datenbank der Grundlagendatei. Dazu werden die Teilflächen mit gleicher Indikatorausprägung zusammengefasst und ins Verhältnis zur Gesamtfläche des Rasters gesetzt.

Gegenüber der Bestandsaufnahme vor Ort und der manuellen Luftbildauswertung, wird bei der GIS-basierten Bestandsaufnahme der subjektive Einfluss durch den Erfasser möglichst weit minimiert. Durch die digitale Erfassung der Flächen entsteht allerdings ein deutlich höherer Arbeitsaufwand als bei den anderen Bestandsaufnahmeverfahren. Darüber hinaus sind für die Anwendung dieses Verfahrens sehr gute GIS-Kenntnisse und Grundkenntnisse der Programmiersprachen VB Script oder Python notwendig. Da die GIS-basierte Bestandsaufnahme ausschließlich auf Fernerkundungsverfahren beruht, treten bei der Anwendung dieselben Probleme hinsichtlich der nicht ausreichenden Luftbildqualität auf wie bei der manuellen Luftbildauswertung.

5.2.3. Automatische Fernerkundung

Die Vorgehensweise der Bildinterpretation der in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 vorgestellten Verfahren stellt ein „typisch menschliches“ Auswerteverfahren dar. Durch den Einsatz von Computern kann dieser Prozess weitgehend automatisiert werden. Vorteile gegenüber der manuellen Luftbildauswertung besitzt die automatisierte Fernerkundung besonders bei der Interpretation von Multispektral-Daten. Dabei werden Objekte und Oberflächen anhand ihres unterschiedlichen Reflexionsverhaltens der Spektralbereiche λ_1 , λ_2 und λ_3 klassifiziert und kartiert [ALBERTZ 2001, 160 ff.]. Das Verfahren der Multispektralanalyse ist sehr komplex und benötigt teure Auswertesoftware, sodass es für den Einsatz in kleinen Siedlungen nicht geeignet ist. Darüber hinaus übersteigt der für die Matrix-Methode benötigte Detaillierungsgrad der Indikatoren die Möglichkeiten der Multispektralanalyse [BOCHOW 2010, 143]. Aus diesen Gründen wird der Einsatz der automatischen Luftbildauswertung nicht weiter untersucht.

5.3. Verfügbare Daten nutzen

Theoretisch können die für die Matrix-Methode benötigten Grundlagen auch aus bereits bestehenden Plänen und Karten übernommen werden. Dabei wird zwischen formellen und informellen Planungsinstrumenten unterschieden. Der Flächennutzungsplan als formelles Instrument bietet mit einem typischen Maßstab von 1:10.000 nicht den für die Erfassung der Indikatoren notwendigen Detaillierungsgrad. Der Maßstab des Bebauungsplans lässt eine detailliertere Analyse des Untersuchungsraums zu. Allerdings enthalten Bebauungspläne in der Regel nicht zu allen für die Matrix-Methode notwendigen Indikatoren umfangreiche Festsetzungen (z. B.: detaillierte Grünstrukturen). Bebauungsstrukturen können, besonders bei einer Abgrenzung der Baufenster durch Baulinien, sehr gut aus einem Bebauungsplan abgeleitet werden. Für die Analyse des Versiegelungsgrads können die Festsetzungen des Bebauungsplans ebenfalls hinzugezogen werden. Materialeigenschaften wie Oberflächenfarbe oder –material werden nur im Ausnahmefall im Bebauungsplan geregelt. Die formellen Planungsinstrumente können demnach nur teilweise oder als ergänzendes Material für die anderen Bestandsaufnahmeverfahren genutzt werden. Bei der Verwendung von Plänen ist ebenfalls drauf zu achten, dass diese nicht immer die Realnutzung darstellen und so zu falschen Ergebnissen führen können (z. B.: ausgewiesene aber noch nicht bebaute Bauflächen in einem Bebauungsplan).

Informelle Planungsinstrumente sind nicht an die Planzeichenverordnung (PlanZV) oder Baunutzungsverordnung (BauNVO) gebunden. Der Inhalt und der

Detailierungsgrad der einzelnen Instrumente ist ebenfalls nicht gesetzlich geregelt, sodass konkrete Aussagen über die Nutzbarkeit dieser Pläne für die Bestandsaufnahme vor dem Hintergrund der Matrix-Methode nicht möglich sind. Instrumente wie der städtebauliche Entwurf besitzen in der Regel einen sehr hohen Detaillierungsgrad mit Aussagen zu den zu verwendenden Materialien, sodass diese das größte Einsatzpotenzial zur Verwendung als Grundlage für die Bestandsaufnahme der Matrix-Methode besitzen.

Der Arbeitsablauf bei der Verwendung von vorhandenen Daten ist stark abhängig vom der vorliegenden Daten. Bei analogen Plänen oder Rasterdaten gleicht der Prozess dem der manuellen Luftbildauswertung. Vektorisierte Daten können hingegen in ein GIS importiert und ähnlich bearbeitet werden wie die erzeugten Polygondateien in der GIS-basierten Bestandsaufnahme.

5.4. Bewertung Bestandsaufnahmeverfahren

5.4.1. Vor-/Nachteile

Die Bestandsaufnahmeverfahren zur Umsetzung unterscheiden sich hinsichtlich verschiedener Faktoren erheblich. Um vergleichbare Ergebnisse zwischen unterschiedlichen Untersuchungsräumen zu erhalten und einen anwenderorientierten Arbeitsablauf zu entwickeln ist es notwendig, ein möglichst standardisiertes Verfahren zu entwickeln. Dazu werden in Tabelle 9 die in der ersten Versuchsphase der Matrix-Methode eingesetzten Verfahren gegenübergestellt und bewertet. Dabei werden die Bewertungskriterien in die Kategorien Allgemein, Umsetzung / Verfahren und Ergebnisse unterteilt.

Die Relevanz der Kriterien unterscheidet sich zwischen der wissenschaftlichen und der anwenderorientierten Betrachtung. Um möglichst belastbare Ergebnisse zu erhalten, sind die Kriterien Ergebnisqualität und erfassbarer Detaillierungsgrad besonders hoch zu bewerten. Für die Anwendung der Matrix-Methode durch die Gemeinden sind die Kriterien Aufwand, technische Anforderungen und Standardisierungspotenzial von entscheidender Bedeutung, da nur so eine schnelle und problemlose Anwendung sichergestellt werden kann.

Tabelle 9 zeigt, dass keins der in der ersten Versuchsphase der Matrixmethode eingesetzten Bestandsaufnahmeverfahren alle gestellten Kriterien optimal abdecken kann. Das Nutzen von vorhandenen Daten ist aufgrund der Vielfalt der potenziellen Daten nicht zur Entwicklung eines standardisierten Verfahrens geeignet. Das Anwendungspotenzial der Fernerkundungsverfahren wird in erster

Linie durch die nicht ausreichende Luftbildqualität zur Erfassung aller benötigten Indikatoren eingeschränkt. Die hohen technischen Anforderungen und der sehr hohe Digitalisierungsaufwand der GIS-basierten Fernerkundung widerspricht dem Ziel, ein einfach und schnell anzuwendendes Verfahren zur Bewertung des Siedlungsklimas zu entwickeln. Das höchste Anwendungspotenzial der untersuchten Verfahren besitzt die Bestandsaufnahme vor Ort. Diese ermöglicht hinsichtlich Aktualität und Detaillierungsgrad die besten Ergebnisse. Das hohe Standardisierungspotenzial und die Möglichkeit, alle notwendigen Indikatoren zu erfassen, führen dazu, dass die Bestandsaufnahme vor Ort als Grundlagungsverfahren der zweiten Anwendungsphase der Matrix-Methode genutzt wird. In dieser Phase wird das Bestandsaufnahmeverfahren weiter optimiert um Probleme, wie die mangelnde Einsehbarkeit von Flächen, zu verbessern.

Tab. 9: Bewertung siedlungsökologischer Bestandsaufnahmeverfahren zur Anwendung der Matrix-Methode [Eigene Darstellung 2017]

Kriterium	Vor-Ort	manuelle Luftbilddauswertung	GIS-basierte Fernerkundung	Vorhandene Daten nutzen
Allgemein				
Vollständigkeit	Alle Indikatoren erfassbar	Topgraphie nur aus zus. Daten	Topgraphie nur aus zus. Daten	Abhängig von Grundlage
Aktualität	Sehr hoch	Abhängig von Erfassungsgrundlage	Abhängig von Erfassungsgrundlage	Abhängig von Grundlage
Umsetzung / Verfahren				
Aufwand	Gering	Gering	Sehr hoch	Abhängig von Grundlage
Technische Anforderung	Sehr gering	Gering	Sehr hoch	Abhängig von Grundlage
Standardisierungspotenzial	Sehr hoch	Sehr hoch	Abhängig von verwendeter Software	Sehr gering

Ergebnisse				
Einsichtbarkeit von Flächen	Nicht flächendeckend gewährleistet	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut
Erfassbarer Detaillierungsgrad	Sehr hoch	Durch Luftbilddauflösung begrenzt	Durch Luftbilddauflösung begrenzt	Abhängig von Grundlage
Ergebnisqualität (vgl. Kapitel 5.4.2)	Abhängig von Schätzverfahren	Abhängig von Schätzverfahren	Sehr präzise Berechnung	Abhängig von Grundlage

5.4.2. Validierung Schätzverfahren

Die Abschätzung der Indikatoren während der Bestandsaufnahme hat erheblichen Einfluss auf die Ergebnisqualität der Matrix-Methode. Durch die Klassifizierung der Indikatoren und Bereitstellung von Orientierungshilfen während der Bestandsaufnahme wird die Indikatorabschätzung erleichtert. In der ersten Versuchsphase der Matrix-Methode hat sich gezeigt, dass sich die verschiedenen Indikatoren unterschiedlich gut vor Ort abschätzen lassen können. Die Abschätzung der quantitativen Indikatoren (z. B.: Versiegelungsgrad und Bebauungsdichte) ist dabei schwieriger als die der relativen Indikatoren (z. B.: vorwiegende Oberflächenfarbe und Vegetationsform). Zu Validierung des Schätzverfahrens werden die Ergebnisse einer Bestandsaufnahme vor Ort unter Zuhilfenahme von Luftbildern mit den Ergebnissen einer GIS-basierten Bestandsaufnahme verglichen. Das für diesen Vergleich ausgewählte Untersuchungsgebiet befindet sich nördlich der Kaiserslauterer Innenstadt in Stadtrandlage. Untersucht wird ein Gebiet mit einer Fläche von ca. 5,7 Hektar. Charakterisiert wird dieses Gebiet durch eine heterogene Siedlungsstruktur, sodass ein breites Spektrum an Indikatorausprägungen abgedeckt werden kann. Aufgrund der heterogenen Siedlungsstruktur wird eine Rastergröße von 50 Meter gewählt. Aus der Flächen- und Rastergröße ergibt sich eine Gesamtrasteranzahl von 91. Diese hohe räumliche Auflösung bietet die Möglichkeit, potenzielle Fehlerquellen in der Indikatorabschätzung räumlich einzugrenzen und nachvollziehen zu können. Zwischen dem Aufnahmedatum der zur Bestandsaufnahme verwendeten Luftbildern und der Bestandsaufnahme vor Ort wurden in dem Untersuchungsgebiet keine baulichen Veränderungen durchgeführt, die Einfluss auf die Indikatoren haben. Die

Validierung des Schätzverfahrens erfolgt anhand der Indikatoren Versiegelungsgrad und Bebauungsdichte.

Die Abschätzung der Indikatoren vor Ort wurde durch eine Versuchsgruppe von 76 Personen durchgeführt. Alle eingesetzten Versuchspersonen besitzen einen Planungshintergrund, da so die Fachkenntnisse der potenziellen Anwender der Matrix-Methode in der Praxis ebenfalls in diesem Feldversuch berücksichtigt werden. Diese Versuchsgruppe wurde im Vorfeld der Bestandsaufnahme in einer etwa 90-minütigen Einweisung mit dem Thema und dem anzuwendenden Verfahren vertraut gemacht. Für die Bestandsaufnahme vor Ort wurde den Personen ein Übersichtsplan mit der Lage der Raster, eine Erfassungstabelle und ein Luftbild des Untersuchungsraums zur Verfügung gestellt. Die Erfassung der Indikatoren erfolgte zunächst in analoger Form und wurde anschließend digitalisiert. In der Nachbearbeitung wurde aus allen erfassten Daten für jedes Raster der Mittelwert gebildet und mathematisch gerundet.

Die GIS-basierte Bestandsaufnahme wurde mit ESRI ArcGIS 10.2 durchgeführt. Als Kartengrundlage wurden digitale Orthophotos des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz mit einer Bodenauflösung von 40 cm verwendet. Zur Verbesserung der Ergebnisqualität wurde nach der ersten Erfassung der Gebäude und der versiegelten Flächen eine Ortsbegehung durchgeführt. Im Rahmen dieser Ortsbegehung wurden auf den Luftbildern nicht eindeutig identifizierbare Objekte überprüft und im Anschluss korrigiert. Durch diese Verfahrensschritte kann davon ausgegangen werden, dass die aus der GIS-basierten Analyse erhaltenen Werte für die Bebauungsdichte und den Versiegelungsgrad die Verhältnisse vor Ort sehr gut abbilden.

Um einen Vergleich zwischen den Werten der Bestandsaufnahme vor Ort und der GIS-basierten Bestandsaufnahme zu ermöglichen müssen die Skalenniveaus angepasst werden. Ein Vergleich der Daten ist nur auf dem niedrigsten erfassten Skalenniveau möglich. Während die Daten der GIS-Analyse auf einer Kardinalskala skaliert sind, sind die Daten der Bestandsaufnahme vor Ort einer Ordinalskala zuzuordnen. Zur Transformation der Daten werden diese anhand derselben Bewertungsklassen wie für die Bestandsaufnahme vor Ort klassifiziert. Der Vergleich erfolgt sowohl mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms zur statistischen Auswertung wie auch durch eine graphische Darstellung in GIS zur räumlichen Verortung der Ergebnisse.

Die statistische Auswertung der 91 untersuchten Raster zeigt, dass für jeweils etwa 2/3 der Raster der Versiegelungsgrad und die Bebauungsdichte korrekt eingeschätzt wird. Der durch die Versuchsgruppe geschätzte Versiegelungsgrad entspricht für 56 der 91 Raster dem durch die GIS-Analyse errechneten Versiegelungsgrad. Für sechs Raster wird der Versiegelungsgrad durch die Testpersonen niedriger eingeschätzt als dies durch die Analyse berechnet wurde. Fünf der sechs falsch eingeschätzten Raster besitzen einen Versiegelungsgrad, der zwischen 25 und 28 bzw. 50 und 53 Prozent liegt. Die Unterschätzung des Versiegelungsgrads ist demnach kein systematischer Fehler, sondern kann auf die Problematik zurückgeführt werden, dass im Bereich der Klassengrenzen geringe Fehlinterpretation bei der Bestandsaufnahme vor Ort zu einem falschen Ergebnis führen. Eine Überschätzung des Versiegelungsgrads erfolgt in 29 der untersuchten 91 Raster. Dabei stechen besonders zwei Raster hervor, bei denen die geschätzte und die berechnete Versiegelungsklasse zwei Klassen auseinander liegen. Diese Raster werden in der graphischen Auswertung auf potenzielle Fehlerquellen untersucht. Ein Großteil der überschätzten Raster (19 von 27) kann Rastern zugeordnet werden, deren berechneter Versiegelungsgrad zwischen 1 und 5 Prozent unter der oberen Klassengrenze liegt. Der berechnete Versiegelungsgrad in den restlichen acht Rastern liegt bis zu 15 Prozent unter dem unteren Grenzwert der geschätzten Klasse. Dieser Trend zur Überschätzung des Versiegelungsgrads ist wahrscheinlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Bestandsaufnahme vor Ort meist von versiegelten Flächen (z. B.: Straßen oder Gehwegen) aus durchgeführt wird und diese so durch den Erfasser stärker wahrgenommen werden als die unversiegelten Flächen.

Bei der Abschätzung des Bebauungsgrads zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie beim Versiegelungsgrad. Eine Unterschätzung der Bebauungsdichte erfolgt nur in einem Raster. In diesem Raster liegt die berechnete Bebauungsdichte bei ca. 2 Prozent. Im Rahmen der Bestandsaufnahme vor Ort wurde von etwa 2/3 der Testpersonen ein kleines Gebäude in dem Raster nicht erfasst, sodass es zu einer Fehleinschätzung kommt. Auch bei der Abschätzung der Bebauungsdichte kommt es bei den Testpersonen eher zu einer Überschätzung als zu einer Unterschätzung. Für das Untersuchungsgebiet bedeutet dies, dass von 91 Rastern 30 als dichter bebaut eingeschätzt werden, als die GIS-Analyse zeigt. Von den 30 falsch eingeschätzten Rastern besitzen 18 eine errechnete Bebauungsdichte, die bis zu 5 Prozent unter der Klassenobergrenze liegt. Die weiteren 12 falsch eingeschätzten Raster sind meist Flächen mit einer hohen Bebauungsdichte. Ein möglicher Erklärungsansatz für die falsche Einschätzung liegt darin, dass in dichter

bebauten Gebieten die Gebäude als sehr dominant wahrgenommen werden und die Bebauungsdichte so überschätzt wird. Dieser Effekt kann zusätzlich verstärkt werden, wenn der Erfasser zuvor die Bestandsaufnahme in einem Raster mit einer niedrigen oder mittleren Bebauungsdichte durchgeführt hat und im Folgenden die Bebauungsdichte nicht absolut bewertet, sondern unterbewusst die höhere Klasse wählt, um den relativen Unterschied zu den zuvor erfassten Werten auszudrücken.

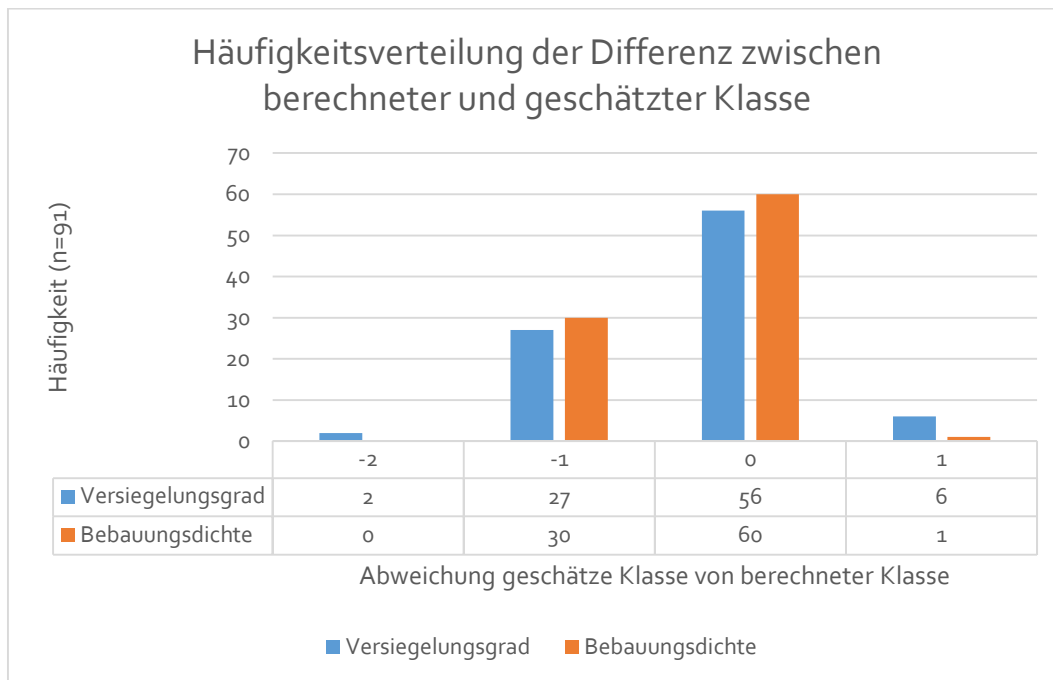


Abb. 25: Statistische Validierung des Schätzverfahrens [Eigene Darstellung 2017]

Abbildung 26 zeigt die räumliche Verteilung der Validierungsergebnisse für den Versiegelungsgrad. So wird deutlich, in welchen Teilbereichen des Untersuchungsgebiets die Testpersonen den Versiegelungsgrad über- bzw. unterschätzt haben. Besonders auffällig ist die Überschätzung des Versiegelungsgrads in den Rastern 4 und 37. Hier liegt der geschätzte Versiegelungsgrad jeweils zwei Klassen über dem berechneten Wert. In Raster 4 ist dieser Fehler auf eine für die Versuchspersonen nicht einheitliche Definition für versiegelte Flächen zurückzuführen. Aus der detaillierten Betrachtung der aufgenommenen Daten lässt sich ableiten, dass die Versuchspersonen den Sportplatz, der nahezu das komplette Raster einnimmt, nicht einheitlich bewerten. 58 Prozent der Testpersonen bewerten dieses Raster mit einer Versiegelungsquote zwischen 76 und 100 Prozent (Versiegelungsklasse 4). 32 Prozent schätzen den Versiegelungsgrad hingegen als Klasse 1 (0-25 Prozent) ein. Nur 10 Prozent der Versuchsperson ordnen dieses Raster den Versiegelungsklassen 2 oder 3 zu. Für die Berechnung der

versiegelten Flächen wurde der Sportplatz als nichtversiegelte Fläche definiert. Während Rasenplätze in den meisten Literaturquellen als unversiegelte Flächen beschrieben werden, ist die Bewertung von Ascheplätzen sehr unterschiedlich. Dabei müssen unterschiedliche Kriterien, wie zum Beispiel der technische Aufbau oder die Verdichtung des Oberflächenmaterials berücksichtigt werden. [WIESE 2004, 82 ff.; STADTENTWICKLUNG BERLIN 2007, 5]. Für die Validierung des Schätzverfahrens ist eine solch detaillierte Analyse allerdings nicht notwendig. Das Beispiel zeigt allerdings, dass solche Sonderfälle möglichst im Vorfeld der Bestandsaufnahme einheitlich definiert werden sollten. Die deutliche Überschätzung des Versiegelungsgrads in Raster 37 kann auf keinen eindeutigen Grund zurückgeführt werden. Für dieses Raster kann eine Kombination aus Klassengrenzwerten und einer sehr schlechten Einsehbarkeit der Fläche vor Ort vermutet werden. Der berechnete Versiegelungsgrad liegt mit 24,95 Prozent sehr nah an der oberen Klassengrenze. Der errechnete Mittelwert der geschätzten Werte liegt bei 2,53 und wird somit auf 3 aufgerundet. Die sehr geringe Unterschreitung der Klassengrenze (berechnete Werte) bzw. Überschreitung der Rundungsgrenze (geschätzte Werte) führt dazu, dass der Fehler größer erscheint, als er in Wirklichkeit ist. Zusätzlich ist dieses Raster das vermutlich am schwersten einsehbare Raster im gesamten Untersuchungsgebiet. Das Raster besitzt keinen Anschluss an öffentlich zugängliche Wege und ist durch die angrenzende geschlossene Bebauung bzw. Vegetation zusätzlich sichtverschattet.

Die weitere räumliche Verteilung der Raster zeigt, dass es in den Bereichen der Kleingartenanlage im Südwesten (Raster 13, 14, 15 und 27) und der dicht bebauten Gebiete (z. B. im Gebiet um Raster 57) zu einer leichten Überschätzung des Versiegelungsgrads kommt. Die Fehleinschätzungen im Bereich der Kleingartenanlage können auf die bereits während der statistischen Auswertung festgestellten Fehleinschätzungen im Bereich um die Klassengrenzen zurückgeführt werden. Die Überschätzung des Versiegelungsgrads im Gebiet um Raster 57 kann auf eine verfälschte Wahrnehmung zurückgeführt werden. Vom Straßenraum aus können in diesem Gebiet fast ausschließlich versiegelte oder bebaute Flächen wahrgenommen werden. Die unversiegelten Gärten hinter der geschlossenen Bebauung können während der Bestandsaufnahme vor Ort nur durch die zur Unterstützung genutzten Luftbilder berücksichtigt werden. Der visuelle Eindruck vor Ort wird von den Versuchspersonen allerdings meist stärker bewertet, sodass es zu einer Überschätzung des Versiegelungsgrads kommt.



Abb. 26: Ergebnisvalidierung Schätzverfahren: Versiegelungsgrad [Eigene Darstellung 2017]

Die räumliche Verteilung der Validierungsergebnisse für die Bebauungsdichte zeigt, dass die Ergebnisqualität für Raster mit einer niedrigen Bebauungsdichte in der Regel besser ist als in Rastern mit einer hohen Bebauungsdichte. Darüber hinaus zeigt die räumliche Verteilung der Fehleinschätzungen, dass häufig aufeinanderfolgende Raster falsch bewertet werden (z. B.: 2 und 3, 20 und 21, 55 bis 57). Die Analyse der geschätzten Daten zeigt, dass diese Raster während der Bestandsaufnahme vor Ort vermutlich als Einheit wahrgenommen werden. Durch eine ähnliche Gebäudetypologie wird dieser Effekt möglicherweise zusätzlich verstärkt, sodass nach einer Fehleinschätzung eines Rasters die darauffolgenden Raster nicht absolut eingeschätzt, sondern in Relation zu dem zuvor aufgenommenen Raster gesetzt werden. Deutlich wird dieser Effekt beispielsweise an den Rastern 49 bis 51. Die Position im Untersuchungsraum legt nahe, dass diese drei Raster in der Reihenfolge entsprechend der Nummerierung durch die Versuchspersonen aufgenommen wurden. Die errechnete Bebauungsdichte für Raster 49 liegt bei 24,4 Prozent und kann somit auf das beschriebene Problem der Klassengrenzen zurückgeführt werden. Die Raster 50 und 51 liegen mit einer Bebauungsdichte von 39,7 bzw. 41,5 Prozent allerdings in einem Wertebereich, der eine Fehleinschätzung aufgrund von Klassengrenzeffekten unwahrscheinlich macht. Für diese Raster ist eher davon auszugehen, dass die Versuchspersonen die Bebauungsdichte in diesen Rastern als dichter wahrgenommen haben als in Raster 49 und aus diesem Grund die nächsthöhere Klasse gewählt haben ohne eine absolute Einschätzung der Bebauungsdichte vorzunehmen.



Abb. 27: Ergebnisvalidierung Schätzverfahren: Bebauungsdichte [Eigene Darstellung 2017]

6. Anwendung und Validierung der Matrix Methode

6.1. Indikatorbasierte Bestandsaufnahme

6.1.1. Anforderungsprofil

Zur Entwicklung eines optimalen Bestandsaufnahmeverfahrens wird zunächst ein Anforderungsprofil für die zu entwickelnde Methode definiert. Damit die Matrix-Methode in der Praxis sinnvoll angewendet werden kann, müssen möglichst belastbare Ergebnisse durch die Bestandsaufnahme aufgenommen werden. Zusätzlich muss das Verfahren soweit standardisiert werden, dass es sowohl auf andere Untersuchungsräume, wie auch durch andere Erfasser anwendbar ist. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse, die im weiteren Verlauf der durch die Matrix-Methode gewonnen Ergebnisse zwischen unterschiedlichen Untersuchungsräumen verglichen werden können. Um eine möglichst hohe Ergebnisqualität zu erreichen, soll das zu entwickelnde Verfahren die Möglichkeit besitzen, hochauflösende und aktuelle Grundlagendaten zu verwenden.

Ein Hauptkriterium bei der Entwicklung der Matrix-Methode ist, dass das Verfahren Gemeinden die Möglichkeit geben soll, die siedlungsklimatischen Gegebenheiten vor Ort selbstständig zu analysieren. Eine selbstständige Anwendung des Verfahrens kann nur dann gewährleistet werden, wenn alle Teilschritte ebenfalls selbstständig durchgeführt werden können. Für die Bestandsaufnahme bedeutet das, dass sowohl die Vorbereitung, die eigentliche Bestandsaufnahme wie auch die Nachbereitung so strukturiert sein müssen, dass diese nach einer kurzen Einarbeitungsphase bzw. einer kurzen Einweisung von den Gemeindefachkräften durchgeführt werden können. Um die Einarbeitungsphase für die Matrix-Methode möglichst gering zu halten, sollten im gesamten Prozess Softwareprodukte eingesetzt werden, die bereits durch die Anwender genutzt werden. Neben einer Verringerung der Einarbeitungszeit wird so auch die meist kostspielige Anschaffung von neuen Programmen bzw. Softwarelizenzen vermieden.

6.1.2. Theoretische Umsetzung

Die Analyse der möglichen Bestandsaufnahmeverfahren für die Anwendung der Matrix-Methode hat gezeigt, dass keines der untersuchten Verfahren alle gewählten Testkriterien optimal abdeckt (Vgl. Tab. 9). Zur Entwicklung eines optimalen Bestandsaufnahmeverfahrens werden Elemente aus den verschiedenen untersuchten Verfahren kombiniert. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Anwenderfreundlichkeit und die Ergebnisqualität gelegt. Die Validierung

des Schätzverfahrens hat gezeigt, dass die Testpersonen die Gegebenheiten vor Ort mit Ausnahme von wenigen Rastern sehr gut abschätzen können. Aus diesem Grund wird dieses Schätzverfahren als Grundlage für die Entwicklung des neuartigen Bestandsaufnahmeverfahrens verwendet. Die analoge Bestandsaufnahme vor Ort, mit Zuhilfenahme von Luftbildern, hat sich in der Praxis als so umständlich gezeigt, dass sie von einer einzelnen Person nur schwer durchführbar ist. Zusätzlich müssen bei diesem Verfahren die aufgenommenen Ergebnisse in der Nachbereitung digitalisiert werden, bevor sie weiterverwendet werden können. Die Stärken der Bestandsaufnahme vor Ort sind der hohe erfassbare Detaillierungsgrad und die hohe Aktualität der erfassten Daten. Diese Eigenschaften können nicht durch die anderen untersuchten Methoden erreicht werden.

Um das Ziel, ein optimales Bestandsaufnahmeverfahren zur Anwendung der Matrix-Methode zu erreichen, wird aus diesem Grund das Bestandsaufnahmeverfahren vor Ort als Grundlage verwendet. Probleme, wie die nicht Einsehbarkeit von Flächen, die umständliche Erfassung vor Ort und die anschließende Digitalisierung, sollen durch den Einsatz von Smartphones bzw. Tablets weitestgehend behoben werden. Für eine mögliche Umsetzung werden drei unterschiedliche Varianten verfolgt. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich der verwendeten Software, der Programmiersprache und den Geräteanforderungen.

6.2. Smartphone- oder tabletgestützte Bestandsaufnahme

6.2.1. Online

Das erste Verfahren, das für die digitale Bestandsaufnahme vor Ort untersucht wird, ist ein reines Onlineverfahren. Dabei wird der Splitscreen-Modus des Tablets genutzt. Diese Funktion erlaubt es, zwei unterschiedliche Webseiten oder Apps gleichzeitig zu öffnen. Der obere Bildschirmteil wird dabei für die Karten- bzw. Luftbilddarstellung des Untersuchungsgebiets genutzt. Die eigentliche Bestandsaufnahme erfolgt im unteren Bildschirmteil mit Hilfe eines Onlinefragebogens.

Für die Erstellung von Online-Fragebögen gibt es eine Vielzahl von Anbietern. In der Funktionsweise und der Bedienung unterscheiden sich die Anbieter in der Regel nur minimal. Da die Anwendung der Matrix-Methode und der dazugehörigen Bestandsaufnahme möglichst unnötige Kosten vermieden soll wird auf einen kostenlosen Anbieter zurückgegriffen. Die kostenpflichtigen Funktionen

der sogenannten Premiumanbieter beziehen sich meist auf die Auswertung der erfassten Daten. Da die Auswertung der Bestandsaufnahme allerdings mit einem Tabellenkalkulationsprogramm bzw. GIS erfolgt, werden diese Funktionen nicht benötigt. Um einem breiten Anwenderkreis eine bekannte Web-Oberfläche zur Konfiguration des Onlinefragebogens zu liefern, wird im Rahmen dieser Arbeit auf die Formular-Funktion von Google Docs (<https://docs.google.com/forms>) zurückgegriffen.

Den Anwendern wird ein vorgefertigter Fragebogen mit acht Fragen zur Verfügung gestellt. In der ersten Frage wird über ein Textfeld die Nummer des Rasterfelds abgefragt, um in der Nachbereitung die Ergebnisse dem jeweiligen Raster zuordnen zu können. Die folgenden sieben Fragen sind als Multiple-Choice-Fragen gestaltet und dienen zur Erfassung der für die Matrix-Methode benötigten Indikatoren. Zur Unterstützung während der Bestandsaufnahme werden, sofern sinnvoll, die Antwortmöglichkeiten durch Piktogramme oder Beispiele visualisiert. Im Vorfeld der Bestandsaufnahme vor Ort muss der Fragebogen an die Rasteranzahl des Untersuchungsgebiets angepasst werden. Aus diesem Grund sind die acht Fragen der Grundversion als Abschnitt definiert. Dieser Abschnitt kann so oft dupliziert werden, bis die für den Untersuchungsraum notwendige Rasteranzahl erfasst werden kann. Um Probleme bei der Bestandsaufnahme vor Ort zu vermeiden ist die Grundversion so konfiguriert, dass jeweils ein Abschnitt (d. h. Raster) abgeschlossen werden muss, bevor der nächste Abschnitt bewertet werden kann. Die erfassten Daten werden nach Abschluss der Bestandsaufnahme in einer Online-Datenbank gespeichert und können als CSV-Datei zur weiteren Auswertung exportiert werden. Bei einer CSV-Datei handelt es sich um eine Textdatei mit durch Zeichen getrennten Werten (Character Separated Values) [LOUIS & MÜLLER 2007, 259].

Für die Karten- bzw. Luftbilddarstellung als Bewertungshilfe für nicht einsehbare Bereiche werden online verfügbare Kartendienste genutzt. Dabei können sowohl die Kartendienste der Landesvermessungsämter (z. B. Geoportal Rheinland-Pfalz) wie auch kommerzielle Dienste (z. B.: Google Maps) genutzt werden. In der Regel bieten die Landesvermessungsämter aktuellere Luftbilder mit einer deutlich höheren Bodenauflösung als die kommerziellen Dienste. Die Navigation innerhalb der Luftbilder ist bei den kommerziellen Anbietern meist deutlich einfacher gelöst und den meisten Anwendern bereits bekannt. Beide Arten von Kartendiensten unterstützen in der mobilen Version keine Integration von selbst

erstellten Karteninhalten. Aus diesem Grund muss während der Bestandsaufnahme eine Übersichtskarte mit der Abgrenzung der Rasterflächen mitgeführt werden.

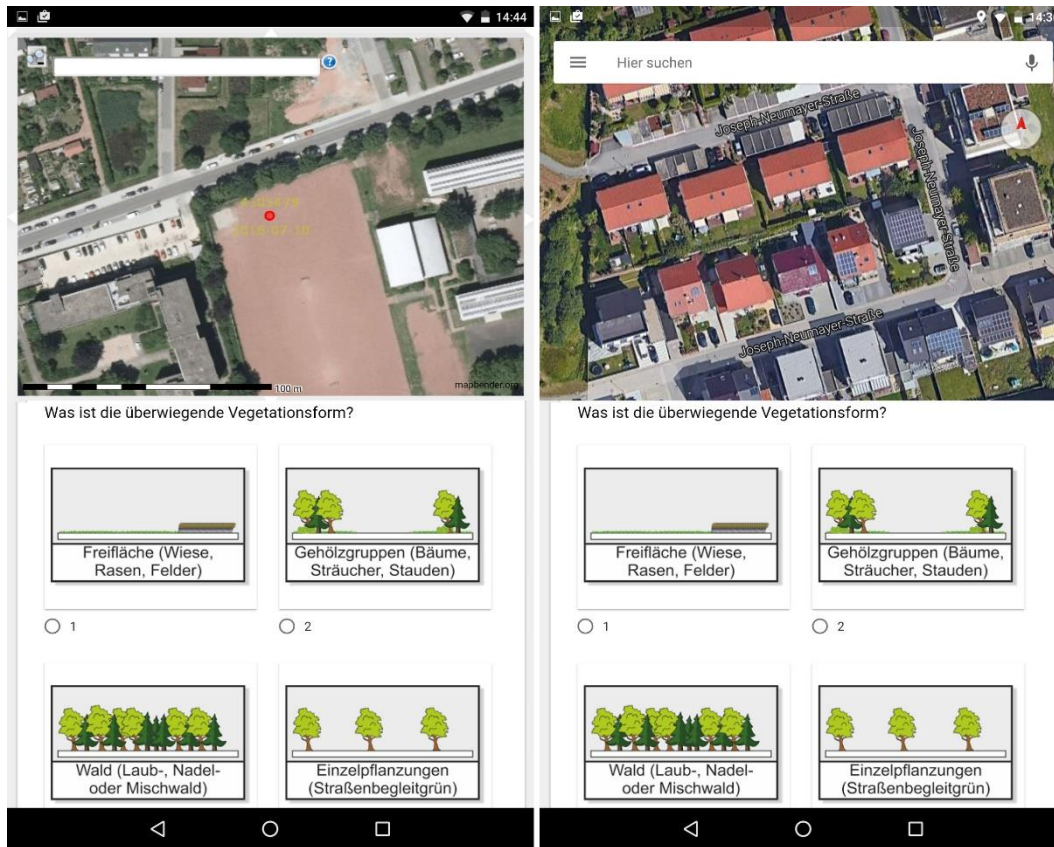


Abb. 28: Onlinebestandsaufnahme mit Luftbildgrundlage Geoportal RLP (links) und Google Earth (rechts) [Eigene Darstellung 2017]

Abbildung 28 zeigt Screenshots der Splitscreen-Ansicht für die Nutzung des Geoportals Rheinland-Pfalz (links) und des Google Maps (rechts), die während einer Testaufnahme im Untersuchungsgebiet „Kaiserslautern – Alex-Müller Straße“ entstanden sind. Da sowohl die Kartendienste, wie auch der Fragebogen zwingend eine Online-Verbindung erfordern, muss diese für das gesamte Untersuchungsgebiet zur Verfügung stehen. Da das bei dieser Testaufnahme eingesetzte Tablet keine direkte Verbindung über das Mobilfunknetz herstellen kann, musste während der Bestandsaufnahme über ein Smartphone ein mobiler Hot-Spot eingerichtet werden. Über das WLAN Signal des Smartphones konnte auf diese Weise eine Internetverbindung hergestellt werden.

Die für diese Methode zwingend erforderliche Internetverbindung stellt in der Praxis ein großes Problem dar. Zum einen verfügen die Planungsämter der Gemeinden, die die potenziellen Anwender der Matrix-Methode sind, meist nicht über die benötigten Mobilfunktarife und Smartphones, um einen mobilen Hot-

Spot einzurichten. Zum anderen gibt es in Deutschland noch keine flächendeckende Netzabdeckung mit schnellem mobilem Internet. Für Untersuchungsgebiete in oder in der Nähe von Städten ist in der Regel eine ausreichend schnelle Internetverbindung zum Laden der Bilddaten vorhanden. Im ländlichen Raum hingegen kann die benötigte Internetverbindung allerdings nicht immer hergestellt werden. Eine Stichprobe im Untersuchungsraum „Frankenstein in der Pfalz“ hat gezeigt, dass in etwa 30 Prozent der Raster keine Internetverbindung hergestellt werden konnte und in weiteren etwa 50 Prozent nur Daten mit dem Mobilfunkstandard 2G übertragen werden konnten. Dieser Mobilfunkstandard erlaubt nur Downloadraten von maximal 220 kbits/s, was zu sehr langen Ladezeiten der Bilddaten geführt hat [TANNENBAUM 2012, 194]. Da die Entwicklung der Matrix-Methode unter besonderer Berücksichtigung von kleinen Gemeinden erfolgt, in denen die Verwendung von mobilen Datenübertragungen nicht sichergestellt werden kann, kann der Einsatz von Online-Diensten nicht als einziges Bestandsaufnahmeverfahren eingesetzt werden.

6.2.2. Webapplikation

Als Webapplikation (Web-App) wird eine Anwendung bezeichnet, die nach dem Client-Server-Modell funktioniert. Bei einer Web-App wird das Programm nicht wie üblich auf dem Endgerät des Nutzers ausgeführt sondern auf einem Webserver. Das Endgerät des Nutzers wird nur als Ein- bzw. Ausgabeschnittstelle der Anwendung genutzt. Üblicherweise erfolgt die Kommunikation zwischen Endgerät und Webserver über das HTTP-Protokoll, sodass die Webapplikation über den Internetbrowser des Endgeräts angezeigt wird [SPINDLER 2014, 11].

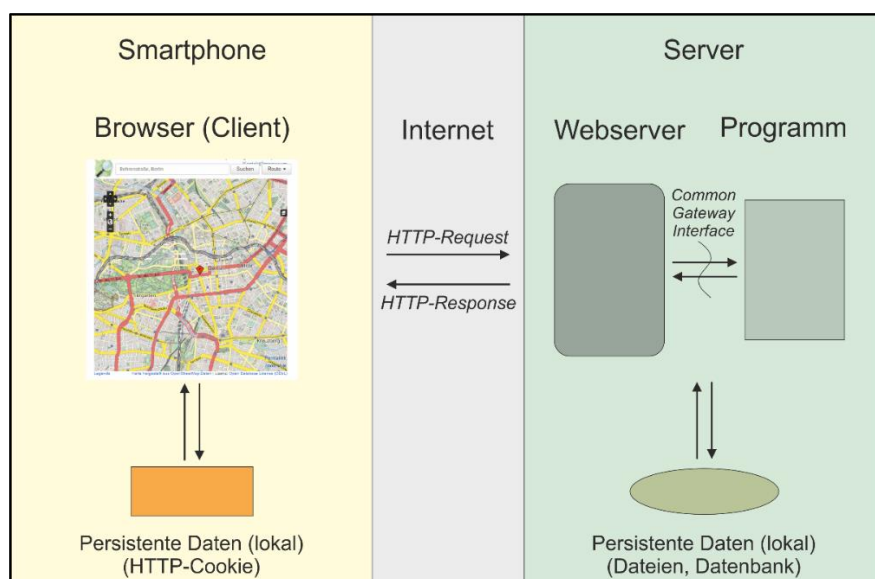


Abb. 29: Funktionsweise Web-App [Eigene Darstellung 2017]

Dieses Anwendungsmodell bietet gegenüber der reinen Online-Bestandsaufnahme (Kapitel 6.2.1) einige Vorteile. Da die Web-App die Daten bereits während der Erfassung in einer Datenbank speichert ist dieses Verfahren gegenüber Verbindungsabbrüchen weniger empfindlich. Der Einsatz von HTTP als Kommunikationsprotokoll ermöglicht die Nutzung von vielen verschiedenen Endgeräten, da HTTP sowohl von Android, iOS wie auch von Windows unterstützt werden kann. Serverseitig kann die Web-App komplexer gestaltet werden als dies über die Kartendienste des Online-Verfahrens möglich ist. So können zusätzliche georeferenzierte Daten mit den Luftbildinformationen überlagert werden. Auf diese Weise kann die Gebiets- und Rasterabgrenzung direkt in den Luftbildern der Web-App dargestellt werden.

Durch den Einsatz einer Single-Page-Web-App (SPA) kann die benötigte Zeit mit einer bestehenden Onlineverbindung minimiert werden [KUUSKERI 2011, 5]. Für eine SPA werden beim ersten Aufruf der App alle benötigten Daten für die gesamte Bestandsaufnahme heruntergeladen, sodass die Bestandsaufnahme komplett offline durchgeführt werden kann. Nach Abschluss der Bestandsaufnahme wird zur Übertragung der Daten an den Webserver wiederum eine Internetverbindung benötigt. Der SPA-Ansatz führt allerdings zu dem Problem, dass sehr viele Daten am Anfang der Bestandsaufnahme heruntergeladen werden müssen, was zu einer langen Ladezeit führt. Für ein Untersuchungsgebiet mit einer Größe von 500 x 500 Metern entsteht ein Downloadvolumen von etwa 150 MB. Zusätzlich kann es bei älteren Endgeräten durch die großen Datenmengen zu einer Überlastung des Prozessors und Arbeitsspeichers kommen, was zum Absturz der Web-App führen kann.

Da sowohl für die klassische Web-App wie auch für die SPA-Lösung davon auszugehen ist, dass in Gebieten mit einer schlechten Internetverbindung keine problemlose Nutzung möglich ist, wird dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

6.2.3. Native App

Allgemein bezeichnet der Begriff App eine Anwendungssoftware (Application Software, App) [ENGESSER 2001, 545]. Im heutigen Sprachgebrauch wird der Begriff der App allerdings als Synonym für eine mobile App bzw. native App verwendet. Während der ursprüngliche Begriff der App plattformunabhängig definiert ist, ist ein notwendiges Kriterium der mobilen App, dass diese auf einem mobilen Endgerät (z. B.: Smartphone oder Tablet) oder unter einem mobilen Betriebssystem, wie iOS oder Android, lauffähig ist. Anders als eine Web-App nutzt eine native App die direkte Programmierschnittstelle (Application Programming

Interface, API) des Endgeräts. Dadurch kann direkt auf plattformspezifische Hard- und Software-Funktionen zurückgegriffen werden. Das Nutzen der endgerätespezifischen API führt dazu, dass eine für ein mobiles Betriebssystem entwickelte App auf einem anderen Endgerät mit einem anderen Betriebssystem bzw. einer anderen API nicht lauffähig ist [AICHELE & SCHÖNBERGER 2016, 54 f.]. Zur Programmierung der nativen Apps werden die spezifischen Software Development Kits der jeweiligen Betriebssysteme genutzt¹. Die zur App-Programmierung genutzten Programmiersprachen unterscheiden sich ebenfalls von Plattform zu Plattform. Die meisten Android-Apps werden in Java geschrieben [BLESKE, 2013, 3 f.]. Für die Programmierung von iOS-Apps werden meist Objective-C oder Swift verwendet [SAUMWEBER, 2016, 10]. Die fertigen Apps können über die digitalen Vertriebsplattformen der Anbieter zum Download angeboten werden. Im Gegensatz zu iOS-Apps können Android-Apps ebenfalls über eine austauschbare Datei installiert werden. So kann die teils langwierige Prüfung der App vor der Veröffentlichung auf der jeweiligen Vertriebsplattform umgangen werden. Aufgrund des höheren Marktanteils und der einfacheren Bereitstellung der fertigen App wird im Rahmen dieser Arbeit die Android-Plattform verwendet.

Die Umsetzung der App-Programmierung erfolgt in der Entwicklungsumgebung MIT App Inventor 2. Die erste Version dieser Entwicklungsumgebung wurde in Kooperation zwischen dem Massachusetts Institute of Technology und Google Labs im Jahr 2009 veröffentlicht. Nach Auflösung der Google Labs wurde die Weiterentwicklung des App Inventors durch das MIT übernommen. Ende 2013 wurde die aktuelle Version „MIT App Inventor 2“ veröffentlicht [POKRESS & VEIGA, 2013, 1]. Die Entwicklungsumgebung ist in einen Design- und einen Blockeditor unterteilt. Der Designeditor ermöglicht, per Drag und Drop verschiedene vorgefertigte oder eigene Elemente in der App anzuordnen. Die Funktionen der App werden im Blockeditor umgesetzt. In diesem wird keine textbasierte Programmiersprache verwendet, sondern grafische Programmierblöcke, die untereinander und mit den grafischen Elementen des Designeditors logisch verknüpft werden [TURBAK ET AL. 2012, 1 f.].

Die entwickelte App „ÖkoHaSie“ (**Ökologische Handlungsempfehlungen zur Siedlungsentwicklung**) benötigt während der Bestandsaufnahme vor Ort keinen Internetzugang. Somit kann die App auch in Gebieten mit schlechter Netzabde-

¹ Aufgrund des hohen Anteils von Android (71 Prozent) und iOS (17,3 Prozent) am europäischen Markt werden die sonstigen mobilen Betriebssysteme (11,7 Prozent) in dieser Arbeit nicht berücksichtigt [T3N DIGITAL PIONEERS 2017, o. S.].

ckung und auf Tablets ohne Mobilfunkmodul eingesetzt werden. Für die Orientierung vor Ort und die Einsehbarkeit von sichtverschatteten Flächen werden keine online Kartendienste, sondern im Vorfeld der Bestandsaufnahme in einem GIS erstellte Luftbildausschnitte verwendet. Die Vorbereitung der Luftbildausschnitte in GIS ermöglicht die Erweiterung der Luftbildinformationen um weitere Datenlayer bzw. benutzerdefinierte Beschriftungen. Die Grundlagendaten können per Datenkabel auf den lokalen Gerätespeicher übertragen werden. Die Übertragung der aufgenommenen Daten erfolgt per E-Mail-App des verwendeten Tablets. Für diesen Schritt ist zwar eine Onlineverbindung notwendig, durch die Möglichkeit, die E-Mail als Entwurf zu speichern, ist diese Onlineverbindung allerdings nicht direkt im Untersuchungsgebiet erforderlich, sondern kann in der Nachbereitung der Bestandsaufnahme per WLAN hergestellt werden.

Das Design und die Funktionsweise der App orientieren sich an dem in Kapitel 6.2.1 vorgestellten online Bestandsaufnahmeverfahren. Der Nutzer wird schrittweise durch die Bestandsaufnahme geleitet. Auf die Möglichkeit, eine vorherige Eingabe anzuzeigen, zu ändern bzw. rückgängig zu machen, wurde bei der Entwicklung der App bewusst verzichtet. Auf diese Weise wird erreicht, dass der Erfasser die Bewertung und die Eingabe bewusster durchführt. Ein Versuch mit einer Testgruppe hat gezeigt, dass so eine Verbesserung der Ergebnisqualität erreicht wird. Da die zuvor eingegebenen Werte nicht in der App einsehbar sind, wird die Wahrscheinlichkeit der relativen Bewertung eines Rasters durch den Vergleich mit dem vorherigen Raster verringert.

6.2.3.1. Design

Das Design der App ÖkoHaSie ist als One-Screen-App umgesetzt. Diese Möglichkeit bietet sich für Apps an, dessen grundlegendes Design während der Nutzung nicht oder nur geringfügig verändert wird. Um eine Startseite unabhängig vom Grunddesign der App gestalten zu können, wird das Design durch zwei Gruppenkomponenten (Arrangements) umgesetzt. Diese Komponenten ermöglichen es, weitere Komponenten wie zum Beispiel Textbausteine, Eingabefelder oder Buttons zu gruppieren und einfach ein- bzw. auszublenden.

Die Gestaltung des Startbildschirms erfolgt als „VerticalArrangement“. Auf diesem ersten virtuellen Bildschirm, der in Abbildung 30 als Designansicht zu sehen ist, werden dem Erfasser kurze Hinweise und Tipps zur Nutzung der App gegeben. In einem Textfeld (TextBox) wird die Anzahl der zu erfassenden Raster abgefragt, die für die Ausstiegsbedingung bzw. das Beenden der App benötigt

wird. In einem weiteren Textfeld werden dem Nutzer Daten zur Kontaktaufnahme bei Problemen oder Fragen zur Anwendung der App bereitgestellt. Durch Eingabe der Anzahl der zu erfassenden Raster und Betätigung des Startbuttons wird diese Komponentengruppe ausgeblendet und die zuvor ausgeblendete zweite Komponentengruppe eingeblendet. So entsteht für den Nutzer der Eindruck eines Bildschirmwechsels, obwohl die App programmiertechnisch nur einen Bildschirm nutzt.

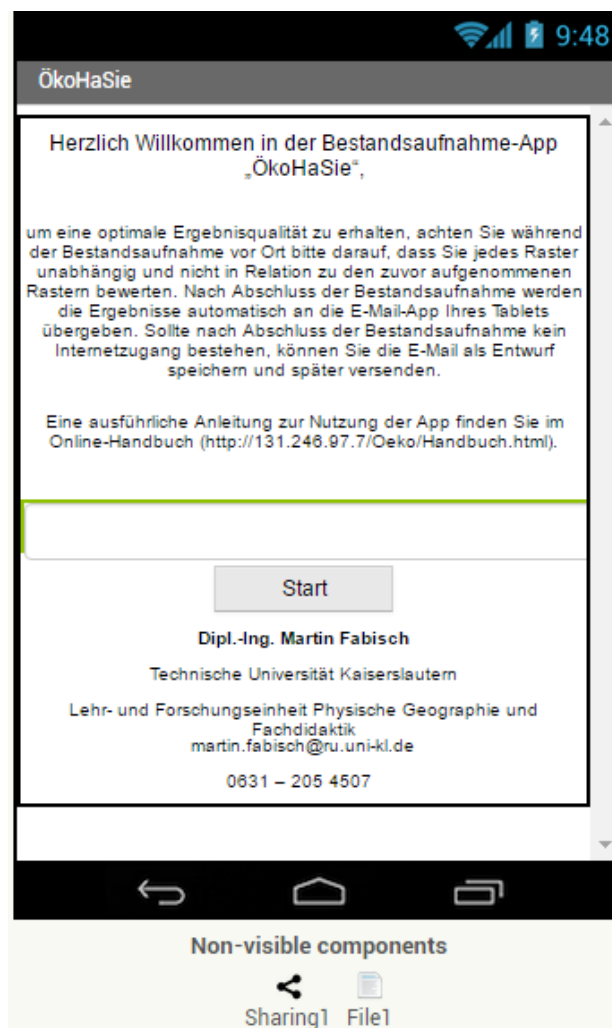


Abb. 30: Designansicht App-Inventor (Startseite „ÖkoHaSie“) [Eigene Darstellung 2017]

Zur Erfassung der Indikatoren wird eine weitere Gruppenkomponente genutzt. Abbildung 31 zeigt den zweiten virtuellen Bildschirm in der Designansicht und die Beschriftung der wichtigsten Komponenten. Die zur Unterstützung der Bestandsaufnahme genutzten Luftbildausschnitte sollen im oberen Teil der App dargestellt werden. In der Designansicht werden diese Luftbildausschnitte nicht

dargestellt, da diese nicht in der App integriert sind, sondern vom Gerätespeicher geladen werden. Nach Erfassung aller Indikatoren für ein Raster wird automatisch der nächste Luftbildausschnitt geladen. In der Mitte des Bildschirms wird die jeweils aktuell zu beantwortende Frage angezeigt. Im unteren Bildschirmteil können die Indikatoren über neun verschiedene Buttons erfasst werden. Im Rahmen der Bestandsaufnahme werden zwar nicht mehr als sieben Buttons gleichzeitig benötigt, aber um das Layout ansprechend gestalten zu können, werden diese neun Buttons benötigt und einzelne Buttons dann, wenn sie bei der jeweilige Frage nicht belegt sind. Der Inhalt der Buttons wird in der Designansicht nicht angezeigt, da dieser für jede Frage verändert wird.

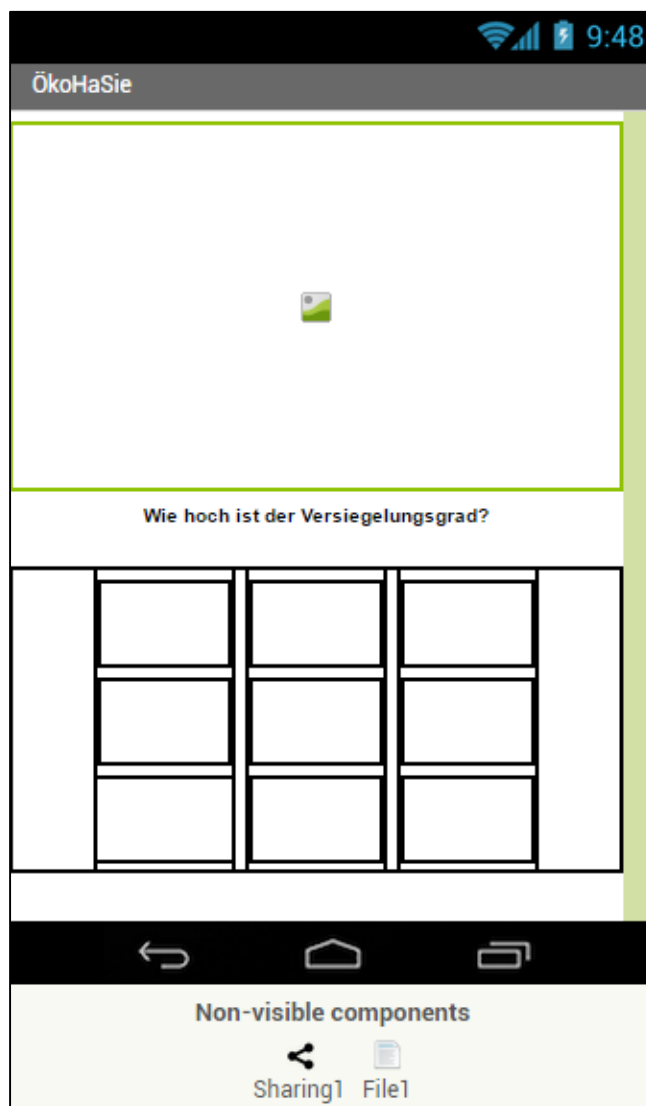


Abb. 31: Designansicht App-Inventor (Erfassungsseite „ÖkoHaSie“) [Eigene Darstellung 2017]

6.2.3.2. Funktion

Für die technische Umsetzung der App werden 15 Variablen benötigt. Tabelle 10 zeigt eine Übersicht über die Namen, den Typ und eine Kurzbeschreibung der Funktion der in der App verwendeten Variablen.

Tab. 10: Variablenübersicht "ÖkoHaSie" [Eigene Darstellung 2017]

Variablenname	Typ	Funktion
AnzahlBilder	Zahl	Gesamtanzahl der Bilder
AnzahlFrage	Zahl	Anzahl der Fragen pro Raster
Auswertung	Liste	Ergebnisliste zur Erfassung der aufgenommenen Daten
BildIndex	Zahl	Festlegung des aktuellen Rasters
Frage	Zahl	Sichtbarkeit von Buttons
Frageindex	Zahl	Darstellung der Buttonbeschriftung
ObenLinks, Oben-Mitte, ...* <small>* sieben weitere</small>	Liste	Listen zur Festlegung der Buttoninhalte

Die Grundfunktionen der App werden durch neun Programmierblöcke umgesetzt. Zusätzlich werden weitere Blöcke für die Variablendefinition, die Definition von Grundeinstellungen und die Anzeige von Appinhalten verwendet. Die neun Hauptblöcke definieren jeweils die Funktion der Buttons im unteren Teil des Bestandsaufnahmebildschirms. Abbildung 32 zeigt die Blockstruktur des „Start“-Buttons auf dem Willkommensbildschirm der App.

Der goldfarbene Rahmen des Blocks umfasst alle Aktionen, die durch Klick auf diesen Button ausgeführt werden. Die orangen Elemente dienen zur Veränderung der Werte der benötigten Variablen. Die Variable „Auswertung“ dient als Liste, in der alle erfassten Daten gespeichert werden. Zu Beginn der Bestandsaufnahme wird diese Liste durch das Element „create empty list“ geleert. Die Werte für „Bildindex“ und „Frageindex“ werden an dieser Stelle auf den Wert 0 gesetzt. Der Variablen „Frage“ wird der Wert 1 zugewiesen. Die Variablen „Frageindex“ und „Frage“ werden im weiteren Verlauf zur Darstellung von Inhalten benötigt. Die Variable „Bildindex“ dient als Zähler der bereits erfassten Bilder und wird für das Beenden der App benötigt. In der Variablen „AnzahlBilder“ wird die vom Nutzer eingegebene Rasteranzahl gespeichert. Da die vorbereiteten Raster in ArcGIS mit der ID 0 beginnen, wird vom eingegebenen Wert 1 subtrahiert.

Das lila und die dunkelgrünen Elemente der Blockstruktur definieren die Inhalte und die angezeigten Elemente der nächsten Ansicht. Das lila Element startet eine Prozedur, die nach Betätigung des Buttons die Tastatur des Tablets ausblendet, da diese im weiteren Verlauf der App nicht mehr benötigt wird. Die ersten

beiden dunkelgrünen Elemente bewirken, dass die in Kapitel 6.2.3.1 beschriebenen virtuellen Bildschirme gewechselt werden. Durch die Eigenschaft „Visible“ werden diese ein- bzw. ausgeblendet. Für Frage 1 werden vier unterschiedliche Antwortbuttons, das Luftbildfenster und das Anzeigefenster der Frage benötigt. Diese werden durch die sechs folgenden Elemente eingeblendet. Die angezeigten Inhalte werden durch die sechs darauffolgenden Elemente definiert. Das erste Element bewirkt, dass das Luftbild für das erste Raster aus dem lokalen Speicher des Tablets geladen wird (In dem Fall: /sdcard/Rastergrundlage/0.jpg). Die Funktion „set Label1.Text to“ weist dem Textfeld in der Mitte des Bildschirms die erste Frage zu. Da die Piktogramme der Buttons unabhängig vom Untersuchungsgebiet sind, können diese anders als die Luftbilder direkt in die App integriert werden und müssen nicht aus dem Gerätespeicher geladen werden. Die Zuweisung der jeweiligen Piktogramme zu den entsprechenden Buttons erfolgt mit dem Befehl „set ButtonX.Image to“. Das letzte Element des Startbutton-blocks ist die Einrichtung eines Hintergrundbildes. Da dieses nicht an das Layout des Willkommensbildschirms angepasst ist, wird es erst beim Öffnen der Bestandsaufnahmeansicht geladen.

```

when Button10 .Click
do
  set global Auswertung to create empty list
  set global Bildindex to 0
  set global Frage to 1
  set global FrageIndex to 0
  set global AnzahlBilder to TextBox1 .Text - 1
  call Screen1 .HideKeyboard
  set VerticalArrangement4 .Visible to false
  set HorizontalArrangement2 .Visible to true
  set Button1 .Visible to true
  set Button3 .Visible to true
  set Button7 .Visible to true
  set Button9 .Visible to true
  set Image1 .Visible to true
  set Label1 .Visible to true
  set Screen1 .BackgroundImage to "Hintergrund.jpg"
  set Image1 .Picture to "/sdcard/Rastergrundlage/0.jpg"
  set Label1 .Text to "Wie hoch ist der Versiegelungsgrad?"
  set Button1 .Image to "1_1.jpg"
  set Button3 .Image to "1_2.jpg"
  set Button7 .Image to "1_3.jpg"
  set Button9 .Image to "1_4.jpg"

```

Abb. 32: Blockansicht App-Inventor (Startbutton „ÖkoHaSie“) [Eigene Darstellung 2017]

Abbildung 33 zeigt einen Ausschnitt der Blockstruktur des ersten Buttons der Bestandsaufnahme für das erste Raster und die erste und einen Teil der zweiten Frage. Die Blockstruktur für die weiteren Buttons und die weiteren Fragen ist analog dazu aufgebaut. Die vollständige Blockstruktur der App kann aufgrund der Komplexität an dieser Stelle nicht abgebildet werden. Die gesamte Übersicht kann auf dem beigelegten Datenträger eingesehen werden. Durch einen Klick auf den Button wird eine Wenn-Dann-Sonst-Anweisung² (innerer goldener Rahmen) gestartet. Diese überprüft zunächst, ob der Wert der Variable „Frage“ gleich 1 ist (IF). Die Überprüfung ist notwendig, da der Wert, der durch Benutzung des Buttons in die Auswertungsliste geschrieben werden soll, für einen Button nicht konstant ist. Der Wert, der an die Liste übergeben wird, entspricht immer der Nummerierung des jeweiligen Buttons ohne die ausgeblendeten Buttons³. Das Hinzufügen der Ziffer zur Auswertungs-Liste erfolgt in dem ersten hellblauen Element durch den Befehl „add item to list“ (in diesem Fall eine „1“). Die folgenden 18 Elemente dienen zur Anpassung der Buttons für die nächste Frage. Zunächst wird jedem Button aus der dazugehörigen Variablenliste ein neues Piktogramm zugewiesen. Die Nutzung von Variablenlisten, anstatt einer direkten Bildverlinkung, ermöglicht eine einfachere Handhabung und Anpassung im Programmierprozess. Die nächsten neun Elemente definieren die Sichtbarkeit der Buttons für die nächste Frage. In diesem Beispiel werden die Buttons 1, 3, 5, 7 und 9 ein- und 2, 4, 6 und 8 ausgeblendet. Die beiden orangen Elemente dienen dazu, die Variablen „Frage“ und „FrageIndex“ jeweils um eins zu erhöhen. Zum Abschluss der THEN-Anweisung wird die Beschriftung des Textfelds für Frage 2 aktualisiert.

Die Funktionen des ersten Buttons für die weiteren sechs Fragen sind dazu analog aufgebaut und werden über die ELSE IF-Anweisung (Wert der Variable „Frage“) angesteuert.

² Bzw. IF-THEN-ELSE-Anweisung

³ z. B.: Buttons 1 bis 3 eingeblendet → Button 3 übergibt eine „3“

Button 1 und 3 eingeblendet, Button 2 ausgeblendet → Button 3 übergibt eine „2“

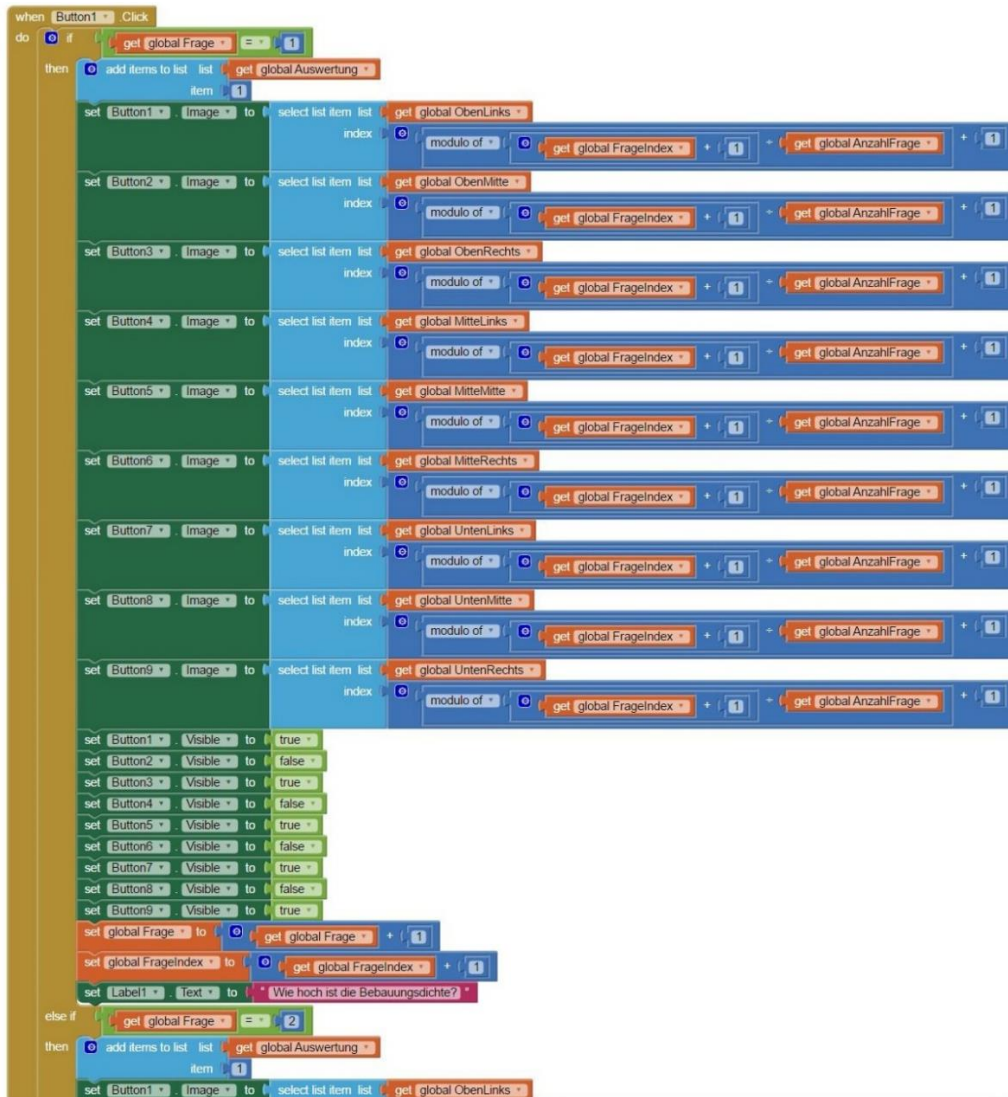


Abb. 33: Blockansicht App-Inventor (Ausschnitt Button 1) [Eigene Darstellung 2017]

In der ELSE-Anweisung für „Frage“=7 wird zusätzlich die Ausstiegsbedingung für die App überprüft. Nachdem der Bildindex um 1 erhöht wurde, wird überprüft, ob dieser kleiner als die Variable „AnzahlBilder“ ist. Wenn dieser am Anfang vom Benutzer eingegebene Wert erreicht wird, wird die Variable „Auswertung“ an die Share-Funktion des Tablets übergeben (lila) und wird dann per E-Mail verschickt oder als E-Mail-Entwurf gespeichert. Zusätzlich werden alle Elemente der App ausgeblendet um dem Nutzer zu signalisieren, dass die Bestandsaufnahme abgeschlossen ist. Wenn die Ausstiegsbedingung nicht erfüllt ist, wird das Textfeld zur ersten Frage geändert und das nächste Luftbild (Dateiname bestimmt über die Variable „Bildindex“) vom Gerätespeicher geladen.

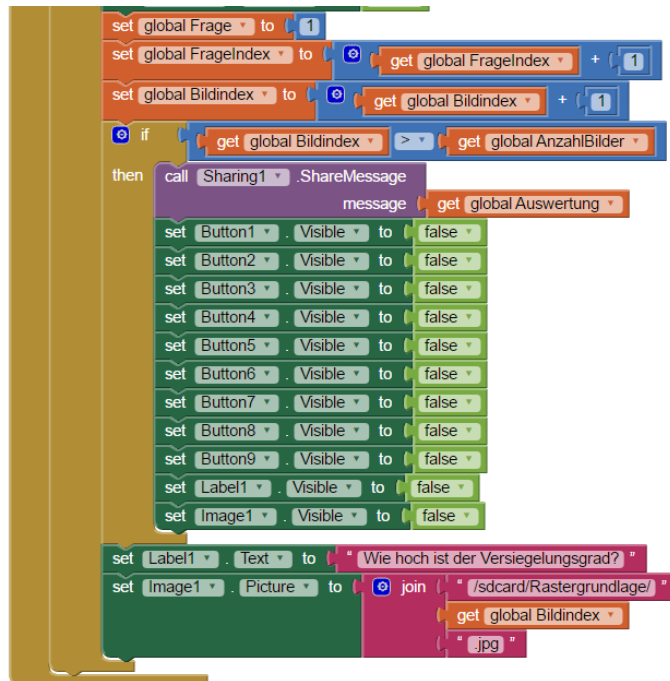


Abb. 34: Blockansicht App-Inventor (Ausgangsbedingung „ÖkoHaSie“) [Eigene Darstellung 2017]

6.3. Umsetzung/Workflow

In den folgenden Kapiteln wird die Vorgehensweise bei der Anwendung der Matrix-Methode inkl. der App-gestützten Bestandsaufnahme beschrieben. Bei der Wahl der verwendeten Software wurde darauf geachtet, dass möglichst die am weitesten verbreiteten Programme zur Anwendung kommen. Benötigt werden im Laufe des Verfahrens ein Tabellenkalkulationsprogramm, eine Bildbearbeitungssoftware und ein geographisches Informationssystem. Die Umsetzung erfolgt in diesem Beispiel mit Microsoft Excel, Adobe Photoshop und ESRI ArcGIS. Die benötigten Softwarefunktionen sind allerdings ebenfalls in frei verfügbaren Programmen wie Apache OpenOffice, GIMP und QGIS verfügbar.

Für die Nutzung der App zur Bestandsaufnahme wird als Mindestanforderung ein Android-Tablet oder Smartphone ab Version 1.6 benötigt. Da durch den größeren Tablet-Bildschirm mehr Details auf den Luftbildern zu erkennen sind, wird empfohlen, ein Tablet der Smartphonennutzung vorzuziehen. Für dieses Beispiel wurde ein Google Nexus 7 Tablet mit Android 6.0.1 eingesetzt. Die Download-links zu der entwickelten App, der vorgefertigten Excel-Datei und dem verwendeten Excel-Makro sind im Anhang dieser Arbeit zu finden.

6.3.1. Vorbereitung

Zu Vorbereitung der Bestandsaufnahme muss zunächst der Untersuchungsraum festgelegt werden. In diesem Beispiel wird der bereits zur Validierung des

Schätzverfahrens genutzte Untersuchungsraum in der Alex-Müller-Straße in Kaiserslautern verwendet (Kapitel 5.4.2). Im ersten Schritt wird in ArcCatalog eine Shape-Datei erstellt, die zur Abgrenzung des Untersuchungsraums und zur Festlegung der Raster genutzt wird. Da die Raster als Flächen dargestellt werden, muss der Feature-Typ der Datei auf „Polygon“ festgelegt werden [ESRI 1998, 8]. Das räumliche Bezugssystem ist abhängig von den Grundlagen, die für die Bestandsaufnahme verwendet werden sollen. Für dieses Beispiel werden die WMS-Luftbilddaten (Bodenauflösung 40 cm) des Geoportals Rheinland-Pfalz verwendet, die als Koordinatensystem das UTM-System verwenden. Um Umrechnungsfehler bei der Transformation zwischen den Koordinatensystemen zu vermeiden, wird als Bezugssystem für die Shape-Datei UTM Zone 32N (ETRS 1989) ausgewählt.

Die Abgrenzung des Untersuchungsgebiets und Festlegung der Raster erfolgt in ArcMap. Zunächst ist durch den Bearbeiter die benötigte Rastergröße festzulegen. Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, können für die Anwendung der Matrix-Methode in Abhängigkeit der Untersuchungsgebietsgröße und Siedlungsstruktur Rastergrößen zwischen 25 und 100 Metern verwendet werden. Eine Rasterauflösung von 50 Metern hat sich in Feldversuchen als der beste Kompromiss zwischen Detaillierungsgrad und Erfassungsaufwand herausgestellt. Für diese Untersuchung wird aufgrund der Siedlungsstruktur eine Rastergröße von 50 Metern verwendet. Bei der Untersuchungsgebietsabgrenzung ist darauf zu achten, dass die Untersuchungsgebietsgröße ein Vielfaches der Rasterauflösung ist, sodass alle Raster dieselbe Größe besitzen und keine Restflächen entstehen. Darüber hinaus sollte das Untersuchungsgebiet in jede Himmelsrichtung mindestens ein Raster größer sein als das zu analysierende Gebiet, sodass angrenzende positive und negative siedlungsökologisch relevante Bereiche ebenfalls erfasst werden.

Das erste in die Shape-Datei einzuzeichnende Raster ist das Raster in der Südwest-Ecke des Untersuchungsgebiets. Das erste Raster wird eingezeichnet mit der Rechteckfunktion des Zeicheneditors. Alle weiteren Raster können über die „Kopieren“ und „Einfügen“ Funktion dupliziert und durch die Fangfunktion ausgerichtet werden. Dabei sollte zunächst von Westen nach Osten und dann von Süden nach Norden vorgegangen werden. So wird den Rastern automatisch eine fortlaufende ID zugeordnet, die im weiteren Verlauf für die Zuordnung der Ergebnisse verwendet wird. Das Untersuchungsgebiet für die beispielhafte Umsetzung besitzt eine Größe von 13 x 7 Rastern (650 x 350 Meter). Abbildung 35 zeigt die Shape-Datei nach Erstellung aller 91 Raster des Untersuchungsgebiets.

Die Nummerierung zeigt die jeweilige ID der Raster die über die automatische Beschriftungsfunktion eingeblendet werden kann und während der Bestandsaufnahme vor Ort als Orientierungshilfe dient.



Abb. 35: Untersuchungsgebietsabgrenzung (Alex-Müller-Straße Kaiserslautern) mit Rasternummerierung [Eigene Darstellung 2017]

Zur Kachelung der Plangrundlage wird diese Gebietsabgrenzung zur Vorbereitung der Bestandsaufnahme exportiert. Dabei ist darauf zu achten, dass die exportierte Karte mindestens eine Auflösung von 300 dpi besitzt. Nur so kann sichergestellt werden, dass keine Details der Luftbildgrundlage verloren gehen. Die Kachelung der exportierten Karte erfolgt in einem Bildbearbeitungsprogramm wie Photoshop oder Gimp.

Abbildung 36 zeigt die Slice-Funktion in Photoshop. Diese ermöglicht es, eine Grafik gleichmäßig horizontal und vertikal zu unterteilen. Die Slice-Anzahl richtet sich dabei nach der Anzahl der Raster im Untersuchungsgebiet. So kann die Gesamtgrundlage in einzelne Kacheln unterteilt werden, die exakt der Größe der einzelnen Raster entspricht. Über die Funktion „Für Web speichern“ können die einzelnen Slices automatisch jeweils als einzelne jpg-Datei exportiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Bildkomprimierung deaktiviert ist, sodass keine Bildinformationen für die weiteren Bearbeitungsschritte verloren gehen. Bei Export ist darauf zu achten, dass der Dateiname der jeweiligen Raster-ID entspricht (z. B.: Raster-ID: „0“ → „0.jpg“). Auf diese Weise wird sichergestellt, dass während der Bestandsaufnahme die Rasterbilder in der richtigen Reihenfolge in der App geladen werden.

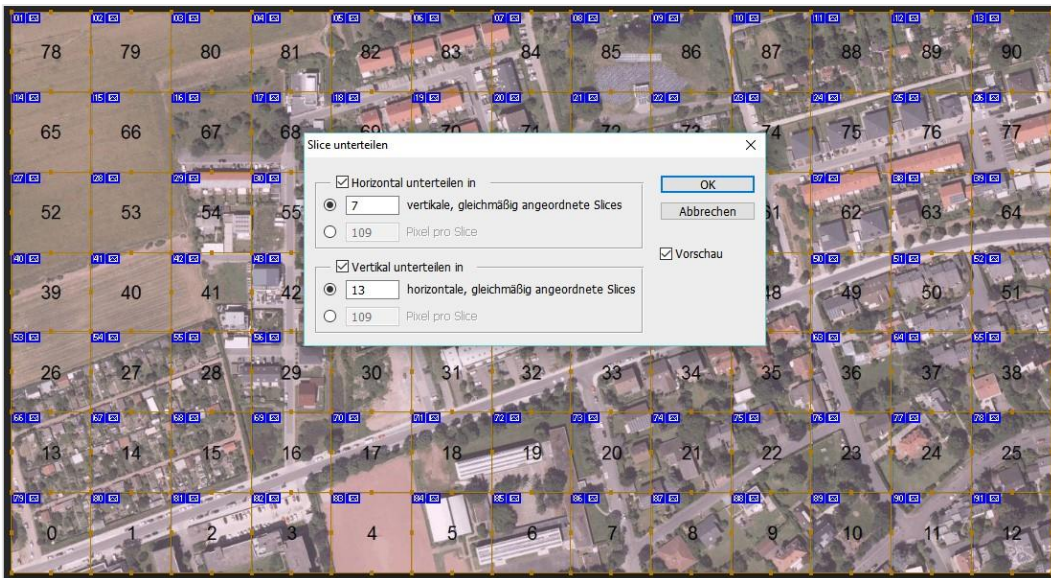


Abb. 36: Slice-Funktion (Photoshop) zur Kachelung der Luftbildgrundlage [Eigene Darstellung 2017]

Als letzter Vorbereitungsschritt vor der Bestandsaufnahme müssen die Bilddaten auf das Tablet übertragen werden und die für das Bestandsaufnahmeverfahren benötigte App auf dem Tablet installiert werden. Der Downloadlink zu der App befindet sich im Anhang dieser Arbeit. Da die App nicht über den Google Play Store bezogen werden kann, muss für die Installation auf dem Tablet die Einstellung „Installation von Apps aus anderen Quellen als dem Play Store zulassen“ aktiviert werden. Als Sicherheitsberechtigung werden für die Installation nur „Lese- und Schreibrechte“ für den internen Speicher benötigt. Diese sind für das Auslesen der Rastergrundlagen und das Zwischenspeichern der Ergebnisse notwendig. Die Übertragung der Rastergrundlage auf das Tablet erfolgt per USB-Kabel. Da der Speicherpfad der Grundlagenbilder im Programmcode der App festgelegt ist, muss zunächst ein neuer Ordner mit dem Namen „Rastergrundlage“ im Root-Verzeichnis der internen Speicher des Tablets erstellt werden. In diesen Ordner können alle Rasterkacheln, in diesem Fall 91, übertragen werden.

6.3.2. Bestandsaufnahme

Die Bestandsaufnahme vor Ort wird unter Verwendung der App „ÖkoHaSie“ durchgeführt. Sollte der Anwender nicht mit dem Untersuchungsgebiet vertraut sein, kann zur Orientierung vor Ort die im Vorbereitungsprozess erstellte Karte (Abb. 35) mitgeführt werden.

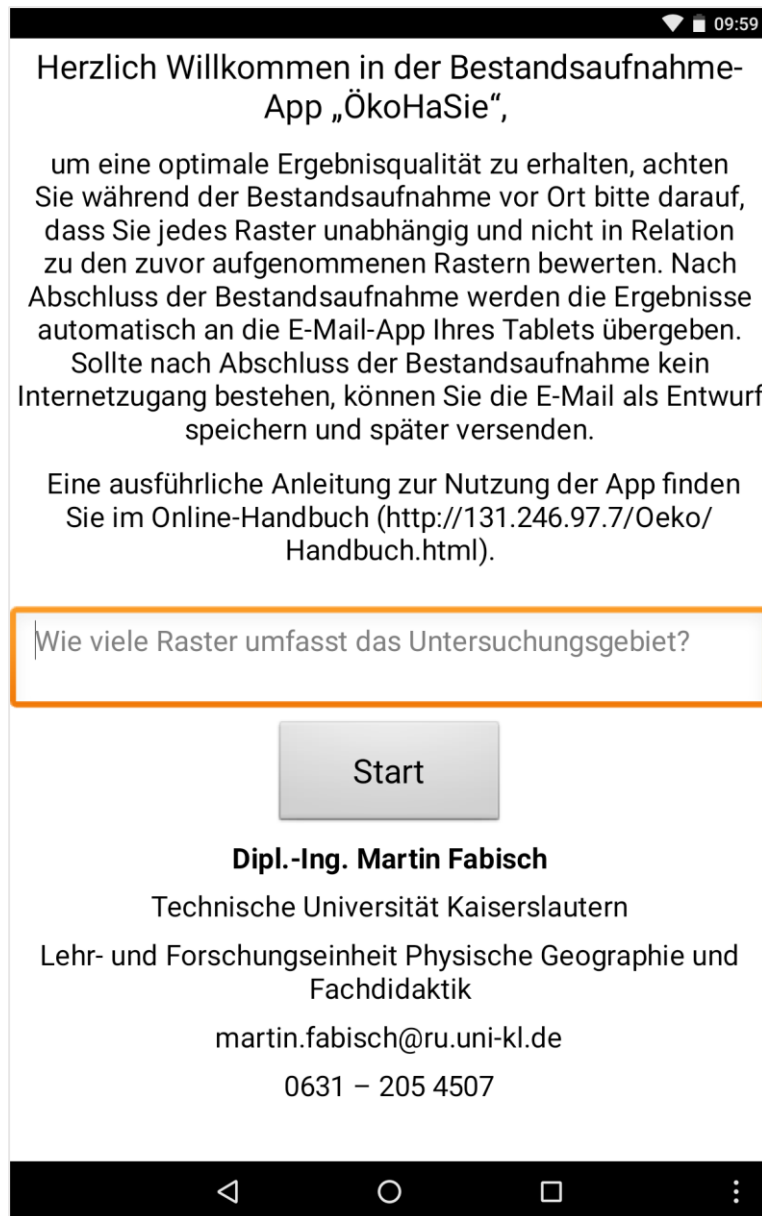


Abb. 37: Startseite der entwickelten ÖkoHaSie-App [Eigene Darstellung 2017]

Zu Beginn der Bestandsaufnahme wird der Erfasser auf dem Startbildschirm (Abb. 37) der App noch einmal darauf hingewiesen, dass die Raster einzeln und nicht in Relation zueinander bewertet werden sollen. Wie in Kapitel 5.4.2 beschrieben hat dies einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisqualität des Schätzverfahrens. Nach Eingabe der Rasteranzahl, in die das Untersuchungsgebiet unterteilt ist, startet die eigentliche Bestandsaufnahme mit dem ersten Indikator für das erste Raster (Raster ID: 0).



Abb. 38: Screenshot Bestandsaufnahme-App (Raster 42, Frage 7) [Eigene Darstellung 2017]

Durch Beantwortung der jeweiligen Frage wird automatisch die nächste Frage für das Raster angezeigt. Nach Beantwortung der siebten Frage zu einem Raster erfolgt automatisch die Weiterleitung zur ersten Frage des nächsten Rasters. Die Reihenfolge der Raster ist dabei aufsteigend entsprechend der Raster ID bzw. dem Dateinamen des Grundlagenrasters. Abbildung 38 zeigt die siebte Frage zu dem Raster mit der ID 42. Bildschirmsichten aller sieben Fragen sind im Anhang dieser Arbeit abgebildet.

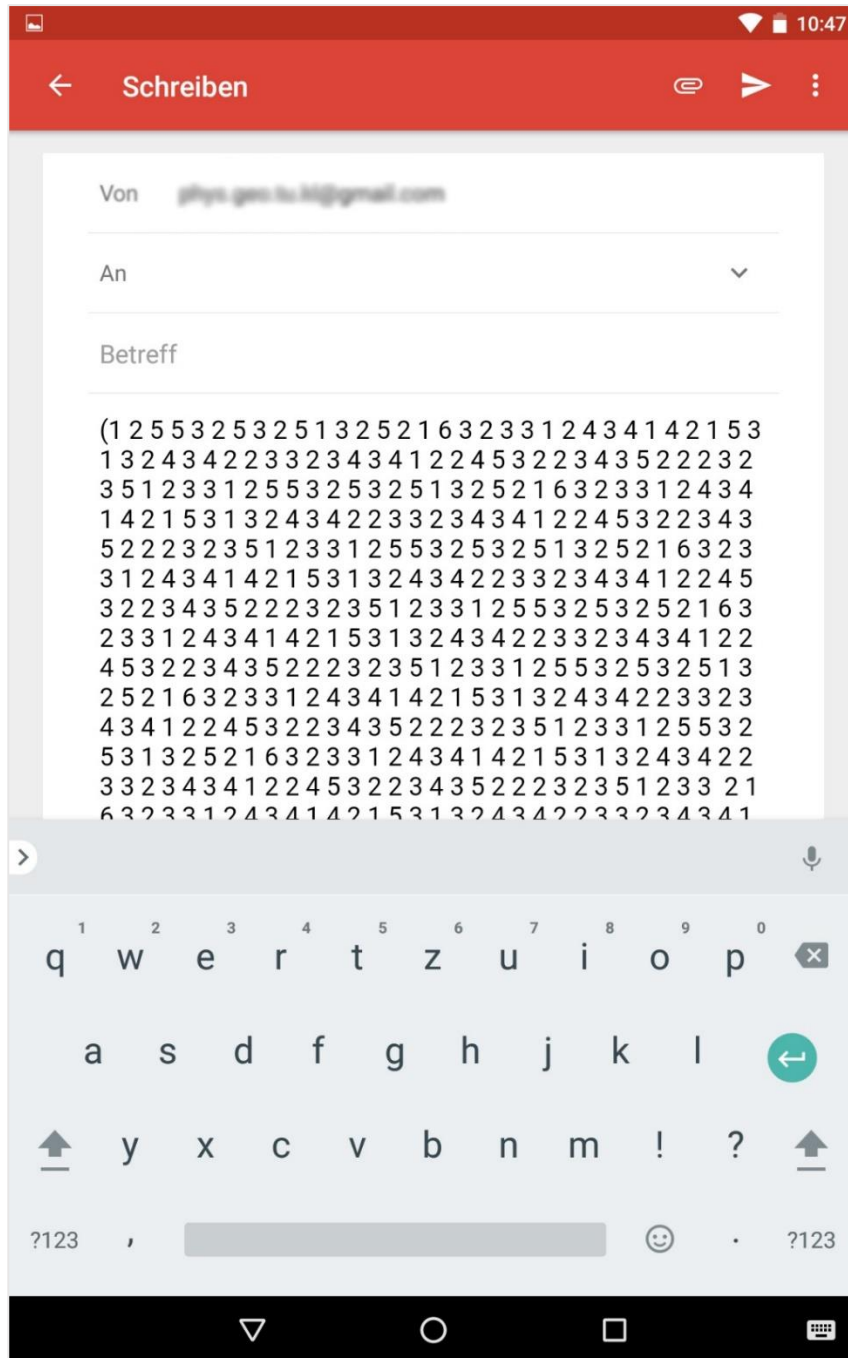


Abb. 39: Datenexport nach Abschluss der Bestandsaufnahme [Eigene Darstellung 2017]

Nach Auswahl der Antwort zur der letzten Frage für das letzte Raster werden die Ergebnisse der Bestandsaufnahme von der App an die E-Mail-App des Tablets übergeben. Abbildung 39 zeigt die übergebenen Ergebnisse der Bestandsaufnahme. Jede Ziffer im Textfeld der E-Mail steht für eine beantwortete Frage. Für das Untersuchungsgebiet Alex-Müller-Straße ergibt sich so eine Gesamtziffernzahl von 637 (91 Raster mit jeweils 7 Fragen).

6.3.3. Nachbereitung

Die Nachbereitung der während der Bestandsaufnahme aufgenommenen Daten erfolgt größtenteils in Microsoft Excel. Einzig für den ersten Schritt wird ein einfaches Textverarbeitungsprogramm (z. B. Windows Editor) verwendet. Für Untersuchungsgebiete, die größer als 36 Raster sind, muss eine Excel-Version höher als 2003 verwendet werden, da ältere Versionen nur 256 Spalten unterstützen und für 37 Raster bereits 259 Spalten benötigt werden.

Im ersten Schritt werden die nach der Bestandsaufnahme per E-Mail verschickten Daten (Abb. 39) im Windows Editor aufbereitet. Dazu wird der gesamte Inhalt der E-Mail in ein neues Dokument kopiert. Das erste und letzte Element der kopierten Ergebnisse ist eine Klammer, die durch die Verwendung einer Variablen mit dem Typ „Liste“ für die Ergebnisspeicherung innerhalb der App erzeugt wird. Für die weitere Verarbeitung der Daten müssen diese Klammern entfernt werden. Im Anschluss kann die Datei unter beliebigen Namen als txt-Datei gespeichert werden.

Im nächsten Schritt werden die Inhalte der txt-Datei mit Hilfe des „Textkonvertierungs-Assistent“ in Microsoft Excel importiert. Dieser ermöglicht es, durch Trennzeichen (z. B.: Semikolon, Leerzeichen, Tab) getrennte Textdateien automatisch in einzelne Spalten zu importieren. Als Trennzeichen der mit der App ÖkoHaSie generierten Textdatei wird ein Leerzeichen verwendet. Nach Abschluss des Imports werden alle 637 aufgenommenen Werte in der ersten Zeile des Dokuments angezeigt. Jeder Wert steht dabei in einer eigenen Spalte. Für den Untersuchungsraum Alex-Müller-Straße bedeutet das, dass die Spalten „A“ bis „XN“ (637. Spalte) Werte enthalten. Für die weiteren Verarbeitungsschritte müssen die Werte für ein Raster jeweils in eine Zeile übertragen werden. Dieser Prozess wird mit Hilfe eines Makros durchgeführt.

Abbildung 40 zeigt schematisch die Ausgangssituation und das benötigte Ergebnis. Das Beispiel entspräche einem Untersuchungsgebiet mit vier Rastern und vier Fragen/Indikatoren. Die Buchstaben in Zeile 2 stehen für die theoretischen Raster, die Zahlen für die jeweilige Frage (z. B.: „B4“ bedeutet 4. Frage zum 2. Raster). Die Funktionsweise des verwendeten Makros wird zur einfacheren Nachvollziehbarkeit anhand der schematischen Darstellung erläutert.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Vorhanden															
2	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
3																
4	Gewünscht															
5	A1	A2	A3	A4												
6	B1	B2	B3	B4												
7	C1	C2	C3	C4												
8	D1	D2	D3	D4												
9																
10																

Abb. 40: Schematische Ausgangssituation Ergebnisaufbereitung [Eigene Darstellung 2017]

Code 1 zeigt den zum Umsortieren verwendeten Visual Basic (VBA) Code. Die Zahlen am Zeilenbeginn sind nicht Teil des Makros, sondern dienen nur als Zeilennummerierung zum Beschreiben der Funktionsweise. Die Zeilen 1 und 15 bilden den Makrorahmen, dieser definiert den Makronamen („Umsortieren“) und das Makroende. In Zeile 2 wird eine Konstante mit dem Namen NO_Col definiert und auf den Wert 4 gesetzt. Dieser Wert gibt an, wie viele Werte in eine Zeile geschrieben werden sollen, bis eine nächste Zeile begonnen wird. Für die Nutzung des Makros für die Anwendung des Matrix-Verfahrens gibt dieser Wert die Anzahl der Fragen pro Raster an. In den Zeilen 3-5 werden insgesamt fünf Variablen definiert, die für die Ausführung des Makros benötigt werden. Den ersten drei Variablen (srcRg, destRg und colCut) wird der Typ „Range“ zugeordnet. Dieser ermöglicht es, den Inhalt mehrerer Zellen in einer Variablen zu speichern. Die anderen beiden Variablen (j und i) werden als Typ „Long“ definiert. Dieser ermöglicht das Speichern von ganzzahligen Werten in der Variablen. In Zeile 7 wird der Bereich der Inputwerte festgelegt. Für das Beispiel entspricht dieser Bereich allen Zellen zwischen „A2“ und „P2“. Für den Untersuchungsraum Alex-Müller-Straße müsste dieser Bereich „A1:XP1“ lauten. Diese Zeile ist die einzige, die durch den Anwender der Matrix-Methode angepasst werden muss, da diese durch die Rasteranzahl bestimmt wird. Die Festlegung von Zelle „A5“ als erste Outputzelle erfolgt in Zeile 7. Der Befehl in Zeile 8 verhindert, dass die Anzeige in Excel bei jedem Verfahrensschritt aktualisiert wird. Für die Funktionsweise des Makros ist dieser Befehl nicht relevant, sondern verhindert nur, dass ein Bildschirmflackern und mögliche Anzeigenfehler während der Makroausführung unterdrückt werden. In Zeile 9 wird die Variable „j“ auf 1 gesetzt. Diese wird während des Sortierprozesses schrittweise erhöht, sodass die umsortierten Werte

nicht nacheinander in die selbe Zeile geschrieben werden, sondern für jedes Raster eine neue Zeile begonnen wird.

Der eigentliche Umsortierungsprozess erfolgt in den Zeilen 11 bis 14. Dieser ist als Schleife programmiert, die so lange durchlaufen wird, bis alle Werte sortiert sind. Vereinfacht beschrieben werden bei jedem Durchlauf die Anzahl an Werten entsprechend der in Zeile 2 definierten Konstanten aus den zu sortierenden Werten kopiert und im Outputbereich eingefügt. Beim ersten Durchlauf werden dabei die Werte in den Zellen A2 bis D2 kopiert. Im nächsten Durchlauf werden durch die Erhöhung der Variablen „j“ die Werte in den Zellen E2 bis H2 kopiert. Nach Ausführung des auf den Untersuchungsraum angepassten Makros sind die Werte der Bestandsaufnahme in der für die Auswertung benötigten Form.

Code 1: VBA-Skript zur Ergebnisaufbereitung

```
1 Sub Umsortieren()  
2 Const NO_COL = 4  
  
3 Dim srcRg As Range, destRg As Range  
4 Dim colCut As Range  
5 Dim j As Long, i As Long  
  
6 Set srcRg = Range("A2:P2")  
7 Set destRg = Range("A5")  
  
8 Application.ScreenUpdating = False  
  
9 j = 1  
10 For i = 1 To srcRg.Columns.Count Step NO_COL  
11 Set colCut = Range(srcRg.Cells(1, i), srcRg.Cells  
12 1, i + NO_COL - 1))  
13 colCut.Copy destRg.Cells(j, 1)  
14 j = j + 1  
15 Next  
  
16 End Sub
```

6.3.4. Auswertung

Die Auswertung erfolgt ebenfalls in Microsoft Excel. Dazu kann eine vorbereitete Excel-Datei über den Downloadlink im Anhang dieser Arbeit heruntergeladen werden. Diese Excel-Datei enthält zwei verschiedene Arbeitsblätter. Das erste Arbeitsblatt („Bestand“) wird für den Import der aufbereiteten Bestandsaufnahme-daten benötigt. Dieses Arbeitsblatt enthält neun vorbeschriftete Spalten. Die erste Spalte „ID“ dient als Rasternummerierung. Diese wird im Visualisierungsprozess für die Zuordnung der Bestandsaufnahmeergebnisse zu den im GIS erstellten Raster genutzt. Für das Gebiet Alex-Müller-Straße werden in dieser

Spalte in aufsteigender Reihenfolge die Zahlen 0 bis 90 eingetragen (91 Raster). Die folgenden sieben Spalten enthalten eine Spaltenüberschrift, die den Namen der aufgenommenen Indikatoren (z. B.: Versiegelungsgrad) entspricht (Abb. 41). Die neunte Spalte wird genutzt, um nach der Übertragung der Daten die Oberflächenrauigkeit zu berechnen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ID	Versiegelungsgrad	Bebauungsdichte	Oberflächenfarbe	Oberflächenmaterial	Vegetationsanteil	Vegetationsform	Topographie	Oberflächenrauigkeit
2	0	2	2	6	4	3	2	1	3
3	1	2	2	6	5	3	2	1	3
4	2	4	2	6	4	1	1	1	1
5	3	3	2	6	4	2	2	1	3
6	4	1	1	4	3	1	1	1	1
7	5	2	3	1	3	3	2	1	3
8	6	3	3	6	4	2	2	1	3
9	7	3	2	6	5	2	1	1	1
10	8	2	2	6	5	3	2	1	3
11	9	2	2	4	4	3	1	1	1
12	10	2	2	6	5	3	2	1	3

Abb. 41: Indikatorenübersicht nach Aufbereitung der Bestandsaufnahmeergebnisse [Eigene Darstellung 2017]

Zum Import der Daten werden diese aus der in Kapitel 6.3.3 erstellten Excel-Datei kopiert und in die Auswertungsdatei eingefügt. Der erste Wert wird dabei in Zelle B2 eingefügt, sodass der letzte übertragene Wert in Zelle H92 steht. Theoretisch könnte dieser Schritt mit den in Kapitel 6.3.3 beschriebenen Schritten kombiniert werden. Allerdings kann es bei der Weiterverarbeitung der Daten in ArcGis mit Excel-Dateien, die Makros enthalten, zu Fehlermeldungen kommen. Durch die Verwendung von zwei Dateien kann diese potenzielle Fehlerquelle in der Anwendung ausgeschlossen werden.

Die Oberflächenrauigkeit wird nach Übertragung der Bestandsaufnahmedaten automatisch berechnet. Als Grundlage werden dazu die Indikatoren Bebauungsdichte und Vegetationsform verwendet, da diese durch ihre Höhe die Oberflächenrauigkeit maßgeblich beeinflussen. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der in Abbildung 42 dargestellten Matrix. Der Programmcode entspricht dem selben Aufbau, der im Folgenden für die Matrix „Versiegelungsgrad und Bebauungsdichte“ erläutert wird.

Vegetationsform		Bebauungsdichte in %-Flächenanteil				
		bebauungs-frei	Punktbebauung (1-25 %)	aufgelockerte Bebauung (26-50 %)	dichte Bebauung (51-75 %)	sehr hohe Bau-dichte (76-100 %)
Freifläche	Wiese, Rasen	niedrig	niedrig	mittel	hoch	hoch
Gehölz-gruppen	Bäume, Sträucher, Stauden	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch
Wald	Laub-, Nadel o-der Misch-wald	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Einzel-pflanzung	Straßen-begleit-grün	niedrig	niedrig	mittel	hoch	hoch

Abb. 42: Berechnungsmatrix Oberflächenrauigkeit [Eigene Darstellung 2017]

Das zweite Arbeitsblatt (Auswertung) der Excel-Datei wird für die Transformation der Bestandsaufnahmeergebnisse in die unterschiedlichen Matrizen verwendet. Dieser Schritt erfolgt durch in der Excel-Datei gespeicherte programmierte Funktionen.

Code 2 zeigt den Zelleneinhalt zur Bestimmung der Matrizenbewertung für das Raster mit ID 0 für die Matrix „Versiegelungsgrad und Bebauungsdichte“. Dabei erfolgt sofort die Umrechnung in das in Kapitel 4.4 beschriebene Punktesystem.

Code 2: VB-Code zur Matrizenbewertung

```
=WENN (Bestand!B2=1; WENN (Bestand!C2=1; 5; WENN (Bestand!C2=2; 5; WENN (Bestand!C2=3; 100; WENN (Bestand!C2=4; 100; WENN (Bestand!C2=5; 100) )))); WENN (Bestand!B2=2; WENN (Bestand!C2=1; 4; WENN (Bestand!C2=2; 4; WENN (Bestand!C2=3; 3; WENN (Bestand!C2=4; 100; WENN (Bestand!C2=5; 100) )))); WENN (Bestand!B2=3; WENN (Bestand!C2=1; 3; WENN (Bestand!C2=2; 2; WENN (Bestand!C2=3; 2; WENN (Bestand!C2=4; 1; WENN (Bestand!C2=5; 100) )))); WENN (Bestand!B2=4; WENN (Bestand!C2=1; 2; WENN (Bestand!C2=2; 2; WENN (Bestand!C2=3; 1; WENN (Bestand!C2=4; 1; WENN (Bestand!C2=5; 1; WENN (Bestand!C2>5; 100) ))))))))
```

Abbildung 43 zeigt die Punktebewertung der einzelnen Rasterfelder für die Matrix „Versiegelungsgrad und Bebauungsdichte“. Die Werte in eckigen Klammern in der ersten Spalte bzw. ersten Zeile stehen für das von der App ausgegebene Ergebnis der Bestandsaufnahme. Die Kombination der Matrizenfelder, die den Wert „100“ enthalten, sind nicht möglich, da diese Indikatorkombination sich ge-

genseitig ausschließt (z. B.: Versiegelungsgrad unter 25 Prozent und Bebauungsdichte über 25 Prozent). Die „100“ wird als Fehlercode genutzt und weist den Nutzer darauf hin, dass die während der Bestandsaufnahme aufgenommenen Werte noch einmal überprüft werden müssen. Eine verbale Fehlerbeschreibung ist hier nicht möglich, da der Code nur einwandfrei funktioniert, wenn die Zellen als „Zahl“ definiert sind.

	Versiegelungsgrad [1]	Versiegelungsgrad [2]	Versiegelungsgrad [3]	Versiegelungsgrad [4]
Bebauungsdichte [1]	5	4	3	2
Bebauungsdichte [2]	5	4	2	2
Bebauungsdichte [3]	100	3	2	1
Bebauungsdichte [4]	100	100	1	1
Bebauungsdichte [5]	100	100	100	1

Abb. 43: Punktauswertung Matrix "Versiegelungsgrad / Bebauungsdichte" [Eigene Darstellung 2017]

Der Code beruht auf einer mehrfach verschachtelten Wenn-Dann-Sonst-Schleife. Die Syntax ist nach dem Schema „=Wenn(Bedingung;Dann; Sonst)“ aufgebaut. Die Überprüfung der Fälle erfolgt Spaltenweise von links nach rechts. Code 3 zeigt den Programmiercode für die erste Spalte, was dem Ergebnis „Versiegelungsgrad zwischen 0 und 25 Prozent“ entspricht. Diese Überprüfung erfolgt in der ersten Zeile des Programmcodes. Die Einstiegsbedingung („Bestand!B2=1“) der Wenn-Prüfung wird in Zeile 1 kontrolliert. Diese wird erfüllt, wenn die Zelle B2 des Arbeitsblatts „Bestand“ den Wert 1 enthält. Das entspricht einem aufgenommenem Versiegelungsgrad zwischen 0 und 25 Prozent für das erste Raster des Untersuchungsgebiets (ID = 0). Wenn diese Einstiegsbedingung erfüllt ist, werden nacheinander die unterschiedlichen Werte für die Zelle „Bestand!C2“ überprüft. Diese enthält die aufgenommenen Daten über die Bebauungsdichte des ersten Rasters. Wenn dieses Raster im Rahmen der Bestandsaufnahme als „bebauungsfrei“ eingestuft wurde (Wert „1“ in Zelle C2), wird als Ergebnis der Wenn-Funktion der Wert „5“ ausgegeben, der der Punktbewertung des Rasters entspricht (Zeile 2). Wird die Bedingung „Bestand!C2=1“ nicht erfüllt, wird die Überprüfung in Zeile 3 auf die Bedingung „Bestand!C2=2“ fortgeführt. Diese Schleife wiederholt sich solange, bis alle möglichen Wertekombinationen überprüft wurden. Die weiteren Spalten werden nach dem selben System überprüft, sodass nach einem kompletten Durchlauf von Code 3 die Zelle B2 des Arbeitsblatts „Auswertung“ den Punktwert für das erste Raster der ersten Matrize enthält.

Code 3: Code zur Berechnung der Bewertungspunkte (Matrix 1- 1. Spalte)

```
1 =WENN (Bestand!B2=1;  
2     WENN (Bestand!C2=1; 5;  
3         WENN (Bestand!C2=2; 5;  
4             WENN (Bestand!C2=3; 100;  
5                 WENN (Bestand!C2=4; 100;  
6                     WENN (Bestand!C2=5; 100) ) ) ) ) )
```

Durch Modifikation des Programmcodes kann die Auswertung für alle Raster und alle Matrizen automatisch durchgeführt werden. Durch den Anwender müssen für die automatische Auswertung nur zwei Arbeitsschritte durchgeführt werden. Zum einen muss mit der Excel-Funktion „Ausfüllkästen“ der Code soweit nach unten gezogen werden, dass die automatische Auswertung für alle Raster des Untersuchungsgebiets angewendet wird. Zum anderen sollte an dieser Stelle durch den Anwender eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse erfolgen. Sollte eine Zelle des Arbeitsblatts „Auswertung“ den Wert 100 enthalten, muss eine Korrektur der Bestandsaufnahmeergebnisse durchgeführt werden. Dazu muss der Anwender die entsprechenden Werte im Arbeitsblatt „Bestand“ durch Überschreiben der jeweiligen Zellen korrigieren. Nach Abschluss dieser beiden Schritte ist die Auswertung abgeschlossen und die Datei kann gespeichert werden.

6.3.5. Visualisierung

Die Visualisierung der Ergebnisse erfolgt in ArcGIS. Dazu wird die zur Abgrenzung der Untersuchungsraaster erstellte Shape-Datei verwendet (Kap. 6.3.1). Zur Visualisierung der Auswertungsergebnisse müssen zunächst die Daten des Excel-Arbeitsblatts mit der Datenbank der Shape-Datei verknüpft werden. Dazu werden die beiden Elemente über die „Join“-Funktion miteinander verbunden. Zur Zuordnung der Matrizen zum dazugehörigen Raster wird das ID-Feld der Auswertungstabelle und das FID-Feld der Shape-Datenbankdatei verwendet. Abbildung 44 zeigt einen Ausschnitt der Shape-Datenbank nach Hinzufügen der Matrizenergebnisse.

FID	Shape *	ID	Matrix1	Matrix2	Matrix3	Matrix4	Matrix5	Matrix6
0	Polygon	0	4	2	2	3	1	2
1	Polygon	1	4	2	2	3	1	2
2	Polygon	2	2	1	1	5	5	5
3	Polygon	3	2	1	1	4	1	3
4	Polygon	4	5	5	4	5	5	5
5	Polygon	5	3	5	3	3	1	2
6	Polygon	6	2	1	1	4	1	3
7	Polygon	7	2	1	1	5	5	4
8	Polygon	8	4	2	2	3	1	2
9	Polygon	9	4	4	2	4	5	3
10	Polygon	10	4	2	2	3	1	2
11	Polygon	11	2	1	1	4	1	3
12	Polygon	12	4	4	2	3	1	2
13	Polygon	13	5	4	4	3	5	1
14	Polygon	14	5	4	4	2	1	1
15	Polygon	15	5	4	4	2	1	1
16	Polygon	16	4	2	2	3	1	3
17	Polygon	17	4	2	2	4	3	4
18	Polygon	18	4	2	2	4	5	3
19	Polygon	19	3	2	2	3	1	2
20	Polygon	20	2	1	1	4	1	3
21	Polygon	21	4	2	2	3	1	2
22	Polygon	22	4	2	2	3	1	2
23	Polygon	23	4	2	2	3	1	2
24	Polygon	24	4	4	4	4	5	3
25	Polygon	25	4	2	2	3	1	2
26	Polygon	26	5	4	4	3	4	1
27	Polygon	27	5	4	4	2	1	1
28	Polygon	28	4	2	2	3	1	2
29	Polygon	29	2	1	1	5	5	4
30	Polygon	30	5	4	4	2	3	1
31	Polygon	31	2	1	1	4	1	3
32	Polygon	32	2	1	1	4	1	3
33	Polygon	33	2	1	1	4	1	3
34	Polygon	34	4	3	2	3	1	2
35	Polygon	35	3	4	2	3	1	2
36	Polygon	36	4	2	2	3	1	2
37	Polygon	37	5	4	4	2	1	1
38	Polygon	38	4	2	2	3	1	2
39	Polygon	39	5	5	5	3	4	1
40	Polygon	40	5	5	5	3	4	1
41	Polygon	41	5	4	4	3	4	1
42	Polygon	42	2	1	1	4	1	3
43	Polygon	43	2	1	1	5	4	4
44	Polygon	44	2	1	1	4	1	3

Abb. 44: Attributtabelle der Rastergrundlage nach Verknüpfung mit Matrizenergebnissen (Ausschnitt) [Eigene Darstellung 2017]

Die Inhalte der Datenbank können genutzt werden, um Visualisierungen der einzelnen Matrizen zu erstellen. Diese Darstellungen dienen dazu, um erste Abschätzungen der siedlungsökologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet zu treffen. Abbildung 45 zeigt die Auswertung der Matrix „Versiegelungsgrad und Bebauungsdichte“. Ein Großteil der Raster besitzen nach dieser Matrix gute oder sehr gute siedlungsökologische Bedingungen. Besonders positiv Eigenschaften besitzen die Flächen im Westen bzw. Nordwesten und im Nordosten des Untersuchungsgebiets. Diese Raster sind geprägt durch einen niedrigen Versiegelungsgrad und eine niedrige Bebauungsdichte. Die vorherrschende Flächennutzung in diesen Rastern sind Kleingartenanlagen und landwirtschaftlich genutzte Freiflächen. Dieser Nutzungstyp entspricht der Realnutzung von Freilandklimatopen. Deckungsgleich zu den Ergebnissen dieser Matrix kann für diesen Klimatoptyp die Gefahr einer urbanen Überwärmung ausgeschlossen werden. Die Flächen, die mit der Matrix als negativ bewertet werden, befinden sich entlang der Nord-Süd-Achse in der Mitte des Untersuchungsgebiets und im Osten im Bereich um Raster 62. Diese Flächen sind sowohl durch eine dichte Bebauung, wie auch durch einen hohen Versiegelungsgrad geprägt. Die Wahrscheinlichkeit einer urbanen Überwärmung ist in diesen Bereichen erhöht, was der Klimatopklassifizierung Stadtklimatop entspricht.

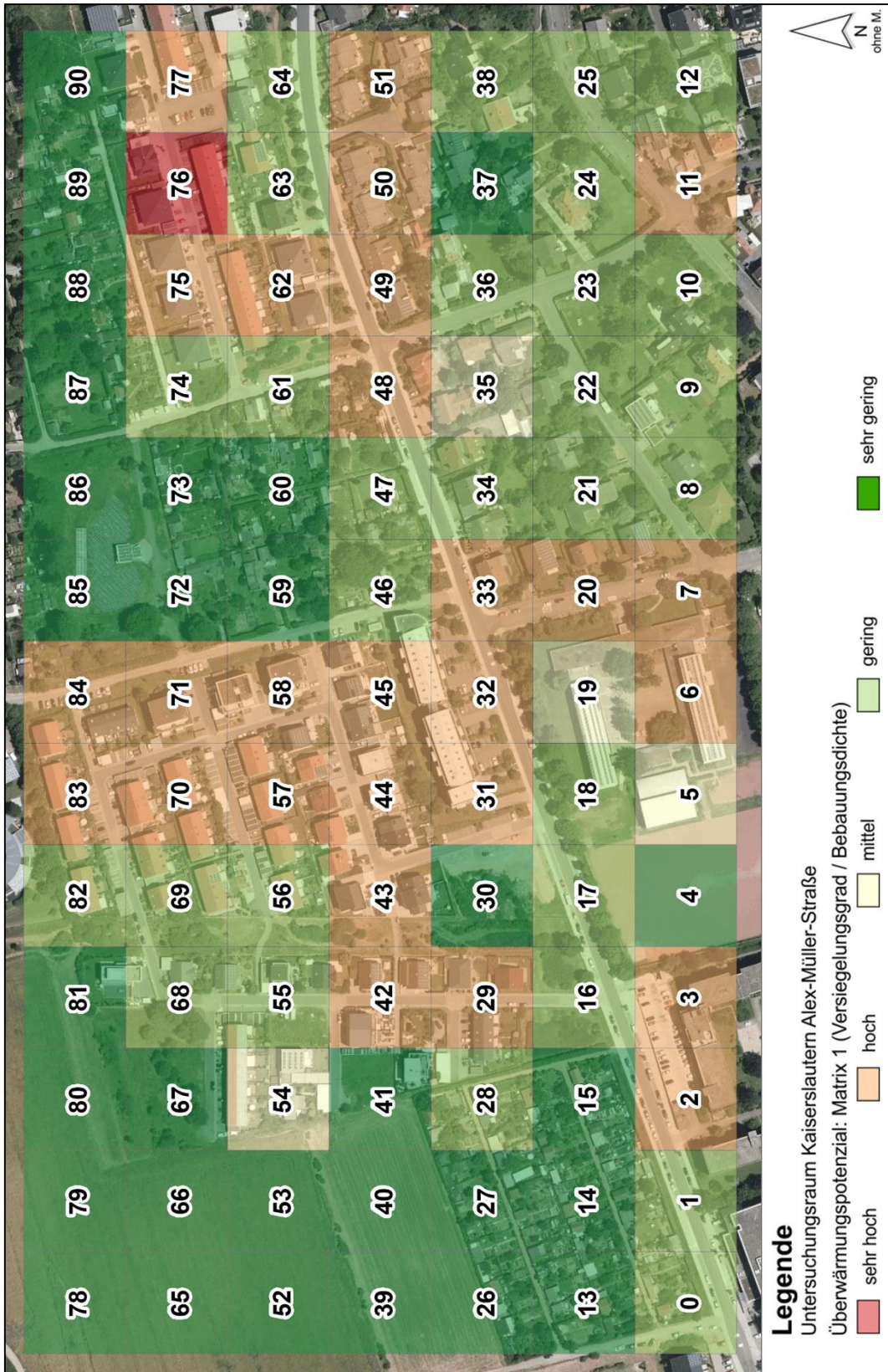


Abb. 45: Überwärmungspotenzial „Versiegelungsgrad / Bebauungsdichte“ (Alex-Müller-Straße)
 [Eigene Darstellung 2017]

Neben der Einzelbetrachtung von Matrizen können ebenfalls kombinierte Analysen durchgeführt werden. Dazu muss zunächst der Shape-Datenbank ein weiteres Feld hinzugefügt werden. Da dieses Feld nur ganzzahlige, maximal zweistellige, Werte enthalten kann, wird dieses als Typ „Short Integer“ definiert. Für die beispielhafte Untersuchung des Gebiets „Alex-Müller-Straße“ wird eine Gesamtbewertung des urbanen Überwärmungspotenzials erstellt. Dafür werden die Punktzahlen der ersten drei Matrizen addiert, sodass ein Raster die Werte zwischen drei (sehr hohes Überwärmungspotenzial) und 15 (sehr geringes Überwärmungspotenzial) annehmen kann. Zur Darstellung werden drei Klassen gebildet, die das Überwärmungspotenzial zusammenfassen:

- „gering“: 12 – 15 Punkte
- „mittel“: 7 - 11 Punkte
- „hoch“: 3 – 6 Punkte

Die Berechnung des Überwärmungspotenzials erfolgt in der Attributtabelle der Rasterdatei. Dazu wird ein einfaches Virtual Basic (VB) Skript verwendet, das ohne Programmierkenntnisse per Drag’n’Drop zusammengestellt werden kann (Abb. 46).

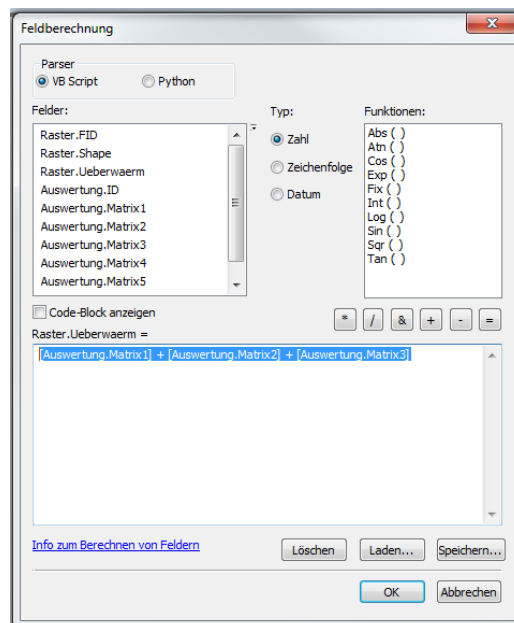


Abb. 46: Berechnung Gesamtbewertung des Überwärmungspotenzial mittels VB-Skript [Eigene Darstellung 2017]

Abbildung 47 zeigt das Überwärmungspotenzial des Untersuchungsgebiets „Alex-Müller-Straße“. Die Analyse dieser Darstellung erfolgt in der Ergebnisvalidierung in Kapitel 6.4.1 im Rahmen eines Vergleichs mit einer durchgeführten numerischen Simulation.

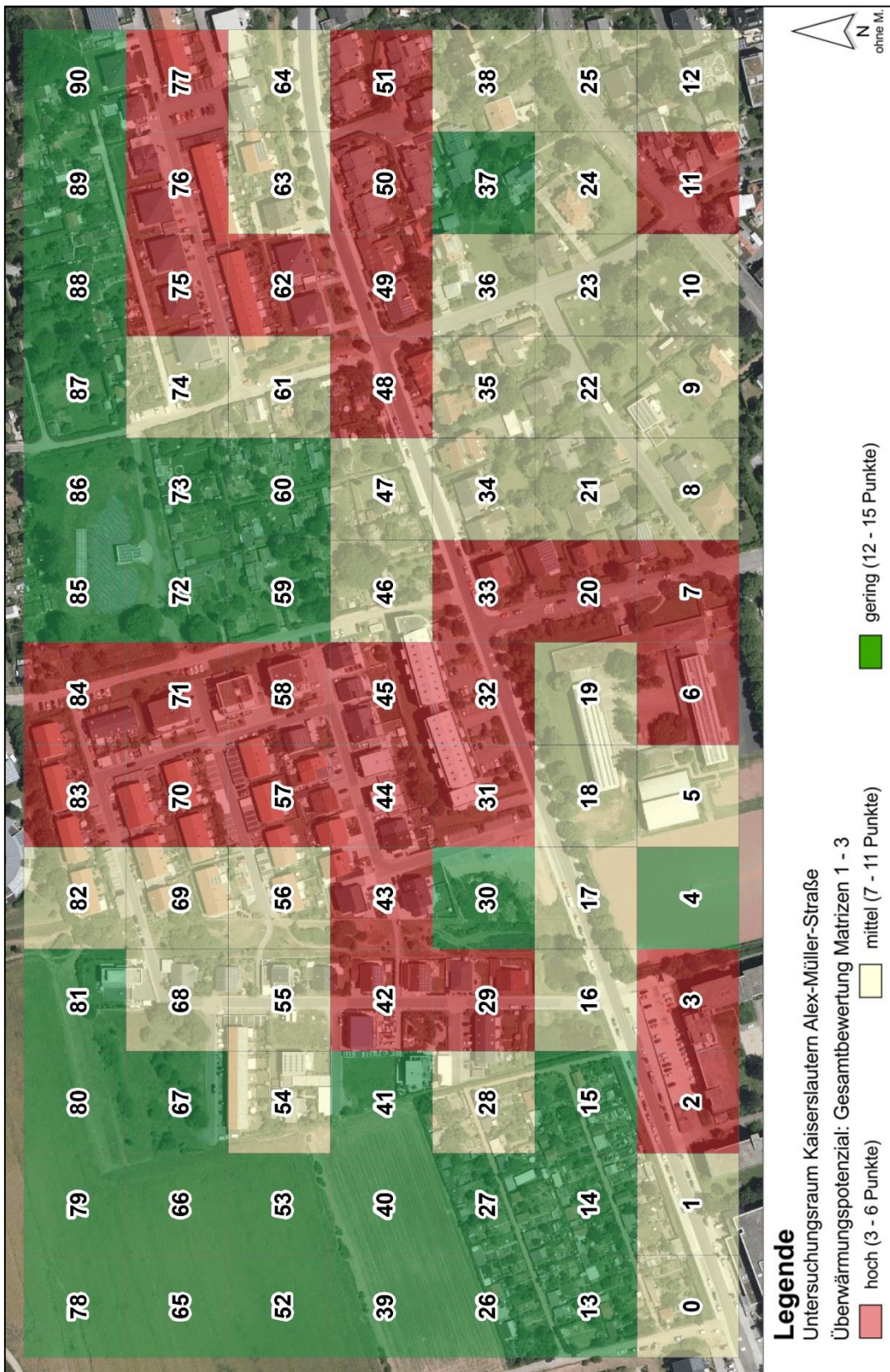


Abb. 47 Überwärmungspotenzial „Gesamtbewertung Matrizen 1 - 3“ (Alex-Müller-Straße) [Eigene Darstellung 2017]

6.4. Alex-Müller-Straße Kaiserslautern

Als erster Untersuchungsraum für die Validierung der Matrix-Methode dient das in Kapitel 5.4.2 beschriebene Untersuchungsgebiet „Alex-Müller-Straße Kaiserslautern“. Als Untersuchungsgegenstände für diesen Teil der Validierung werden die urbane Überwärmung und das Kaltluftentstehungspotenzial verwendet. Die Ergebnisse der Matrix-Methode werden dazu mit Ergebnissen einer in Envi-met 4 durchgeführten numerischen Modell-Simulation verglichen. Das Modell umfasst 217 x 117 Zellen mit einer räumlichen Auflösung von drei Metern. Für die Ausgangsparameter zur Simulation wurde als Simulationstag der 21. Juni gewählt. Die Klimaparameter wurden entsprechend einer autochthonen Tropennacht gewählt⁴. Abbildung 48 zeigt eine 3D-Ansicht des Modells aus südwestlicher Richtung.

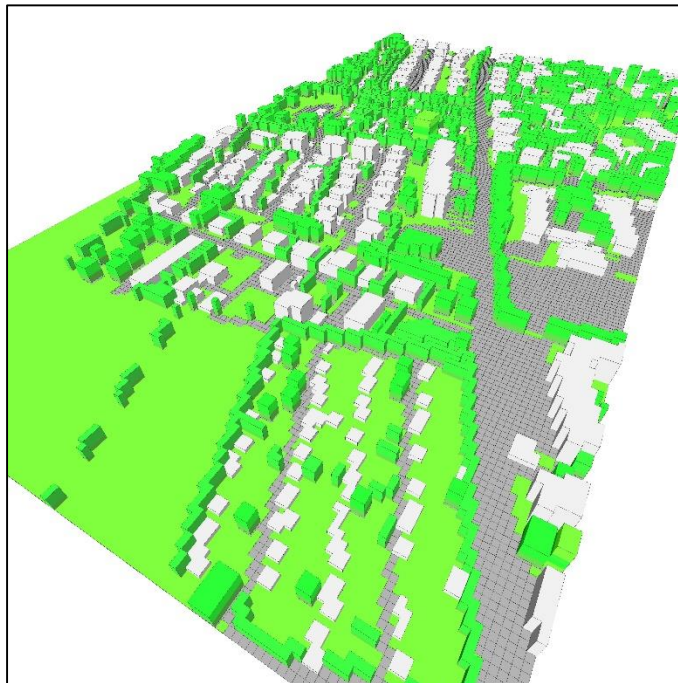


Abb. 48: Modellansicht Untersuchungsgebiet (Alex-Müller-Straße) [Eigene Darstellung 2017]

⁴ Lufttemperatur: 20 °C um 6.00 Uhr; Windgeschwindigkeit in 10 m: 1,0 m/s

6.4.1. Anwendung der Matrix Methode

Abbildung 49 zeigt das durch Anwendung der Matrix-Methode ermittelte Überwärmungspotenzial des Untersuchungsgebiets. Dazu wurden die Punktzahlen der Matrizen „Versiegelungsgrad / Bebauungsdichte“, „Versiegelungsgrad / Oberflächenfarbe“ und „Versiegelungsgrad / Oberflächenmaterial“ addiert. Im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Freiflächen im Nordwesten des Untersuchungsgebiets besteht ein sehr geringes Überwärmungspotenzial. Der Eintrag von anthropogenen Materialien in diesen Flächen ist sehr gering. Der damit verbundene niedrige Versiegelungsgrad sorgt dafür, dass der natürliche Wärmehaushalt des Bodens nicht negativ beeinflusst wird. Es ist davon auszugehen, dass diese Flächen in der Nacht als Kaltluftentstehungsgebiet fungieren. Ebenfalls positiv hervorzuheben sind die beiden Kleingartenanlagen innerhalb des Gebiets (Umgebung von Raster 14 und 73). Durch die nur geringe Bebauungsdichte und den niedrigen Versiegelungsgrad ist das Überwärmungspotenzial für diese Flächen als gering einzustufen. Flächen mit einem mittleren Überwärmungspotenzial sind über das ganze Untersuchungsgebiet verteilt. Diese Flächen sind in der Regel durch freistehende Einfamilienhäuser und Erschließungsstraßen geprägt. Durch den Eintrag der anthropogenen Materialien und deren Eigenschaften kann es in diesen Gebieten besonders während den Nachtstunden zu einer Erhöhung der Lufttemperatur kommen. Sieben der 91 Untersuchungsraaster wurden mit einem hohen Überwärmungspotenzial bewertet. Im Bereich dieser Flächen kann davon ausgegangen werden, dass es durch die erhöhte Wärmespeicherung und die verringerte Verdunstung zu einer Erhöhung der Lufttemperatur kommt. Diese negativen Eigenschaften sind in den Rastern mit einem sehr hohen Überwärmungspotenzial noch stärker ausgeprägt. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass in diesen Bereichen zu einer deutlich erhöhten Lufttemperatur im Vergleich zum unbebauten Umland kommt.

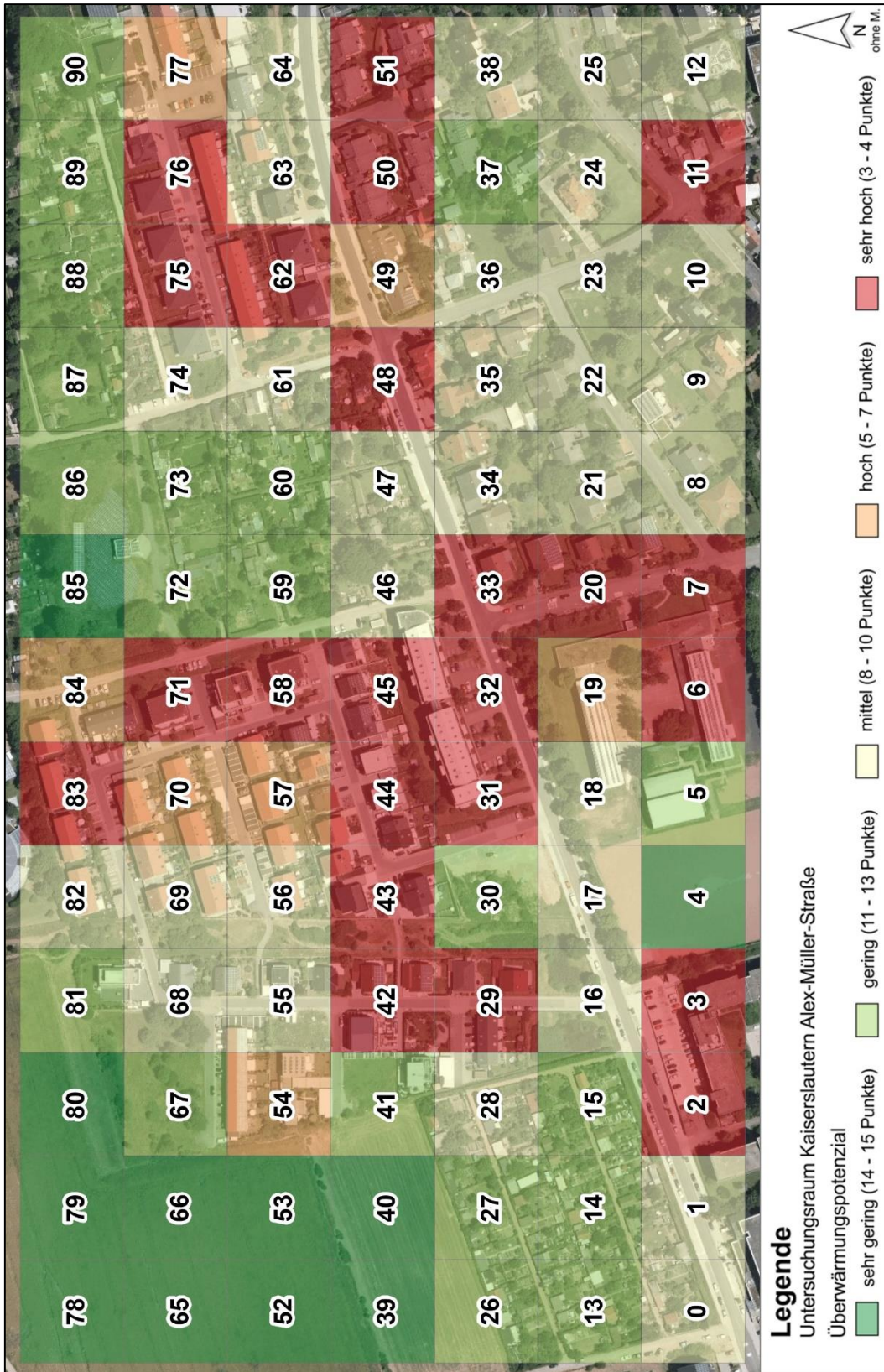


Abb. 49: Überwärmungspotenzial Alex-Müller-Straße Kaiserslautern [Eigene Darstellung 2017]

Durch die Anwendung der Matrix-Methode für den Themenbereich „urbane Überwärmung“ konnte nachgewiesen werden, dass die landwirtschaftlich genutzten Flächen im Nordwesten des Untersuchungsgebiets ein sehr geringes Überwärmungspotenzial besitzen. Durch die Anwendung der Matrix „Vegetationsform / Vegetationsanteil“ soll überprüft werden, ob sich diese Flächen als Kaltluftentstehungsgebiet eignen. Da die weiteren Raster des Untersuchungsgebiets durch Bebauung und Versiegelung geprägt sind, können diese als Kaltluftentstehungsgebiete ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wird die weitere Untersuchung nur für den nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets abgebildet (Abb. 50). Als Kaltluftentstehungsgebiet eignen sich besonders gut Freiflächen mit einer niedrigen Vegetation und einem hohen Vegetationsanteil. Diese können nach Sonnenuntergang schneller auskühlen als beispielsweise versiegelte oder bebaute Gebiete. Die Raster, die durch die landwirtschaftliche Nutzung geprägt sind, weisen diese Charakteristika auf. Mit zunehmender Bebauung und Versiegelung steigt die Wärmespeicherkapazität an, sodass das Kaltluftentstehungspotenzial sinkt.



Abb. 50: Kaltluftentstehungspotenzial Alex-Müller-Straße [Eigene Darstellung 2017]

6.4.2. Vergleich mit durchgeführter numerischen Simulation

Für die Validierung des Themenbereichs urbane Überwärmung wird die Lufttemperatur in 2 Meter Höhe um 1.00 Uhr nachts mit den Ergebnissen der Matrix-Methode verglichen. Drei bis vier Stunden nach Sonnenuntergang besitzt die urbane Wärmeinsel ihre maximale Intensität, sodass sich diese Werte am besten für den Vergleich mit den Ergebnissen der Matrix-Methode eignen. Bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse ist darauf zu achten, dass es trotz der Verwendung von Nesting-Grids zu fehlerhaften Ergebnissen im Bereich des Einströmrandes des Modells kommen kann. Da der westliche Teil für die Validierung des Kaltluftentstehungspotenzials von besonderer Bedeutung ist, wurde die Windrichtung (90°) so gewählt, dass diese Randeffekte am östlichen Modellrand auftreten. Im Fall dieser Simulation wird die Lufttemperatur am Einströmrand unterschätzt, sodass der Eindruck entsteht, von Osten würde Kaltluft in das Untersuchungsgebiet einströmen. Die Lufttemperatur in diesem Bereich des Untersuchungsgebiets wäre bei einer anderen Einströmrichtung demnach erhöht.

Durch die Matrix-Methode wurden besonders zwei Teilgebiete mit einem hohen bis sehr hohen Überwärmungspotenzial identifiziert (vgl. Abb. 49). Diese befinden sich im Bereich um die Nord-Süd-Achse auf Höhe von Raster 44 und im Gebiet um Raster 62. Für diese Bereiche wird mit bis zu 22,9 °C durch die numerische Simulation die höchste Lufttemperatur ausgegeben. Die Ergebnisse der Matrix-Methode werden somit für diese Teilbereiche des Untersuchungsgebiets durch die Envi-met Simulation bestätigt. Für den südöstlichen Teil des Untersuchungsgebiets wurde durch die Matrix-Methode ein mittleres Überwärmungspotenzial ermittelt. Dieser Teilbereich der Simulation wird stark durch den am östlichen Modellrand auftretenden Randeffekt beeinflusst. Anhand der Temperaturverteilung lässt sich allerdings ableiten, dass die in das Modell einströmende Luft langsam erwärmt wird. In diesem Bereich kommt es durch den Eintrag von künstlichen Materialien also auch zur Ausbildung einer urbanen Überwärmung. Da die Erwärmung der Luftmassen in diesem Teilgebiet allerdings langsamer voranschreitet als im Bereich der Raster 75 bis 77 kann davon ausgegangen werden, dass das Überwärmungspotenzial wie durch die Matrix-Methode vorhergesagt wurde, geringer ist. Für die Freiflächen im Nordwesten des Untersuchungsgebiet wurde durch die Matrix-Methode ein sehr geringes Überwärmungspotenzial ermittelt. Durch die Simulation werden für diesen Bereich allerdings Lufttemperaturen zwischen 22,2 °C und 22,6 °C vorhergesagt. Diese erhöhte Lufttemperatur ist aber nicht auf die Eigenschaften der Freiflächen zu-

rückzuführen, sondern wird durch den westlich angrenzenden bebauten Teilbereich beeinflusst. Diese Flächen mit einem sehr hohen Überwärmungspotenzial führen zu einer hohen Lufttemperatur. Durch den leichten Ostwind wird die warme Luft aus diesem Gebiet auf die Freiflächen getragen. Auf der Freifläche findet von Ost nach West eine Abkühlung der Luftmassen statt, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Luft keine weitere Energie hinzugefügt wird. Das Überwärmungspotenzial ist für diese Flächen demnach gering.

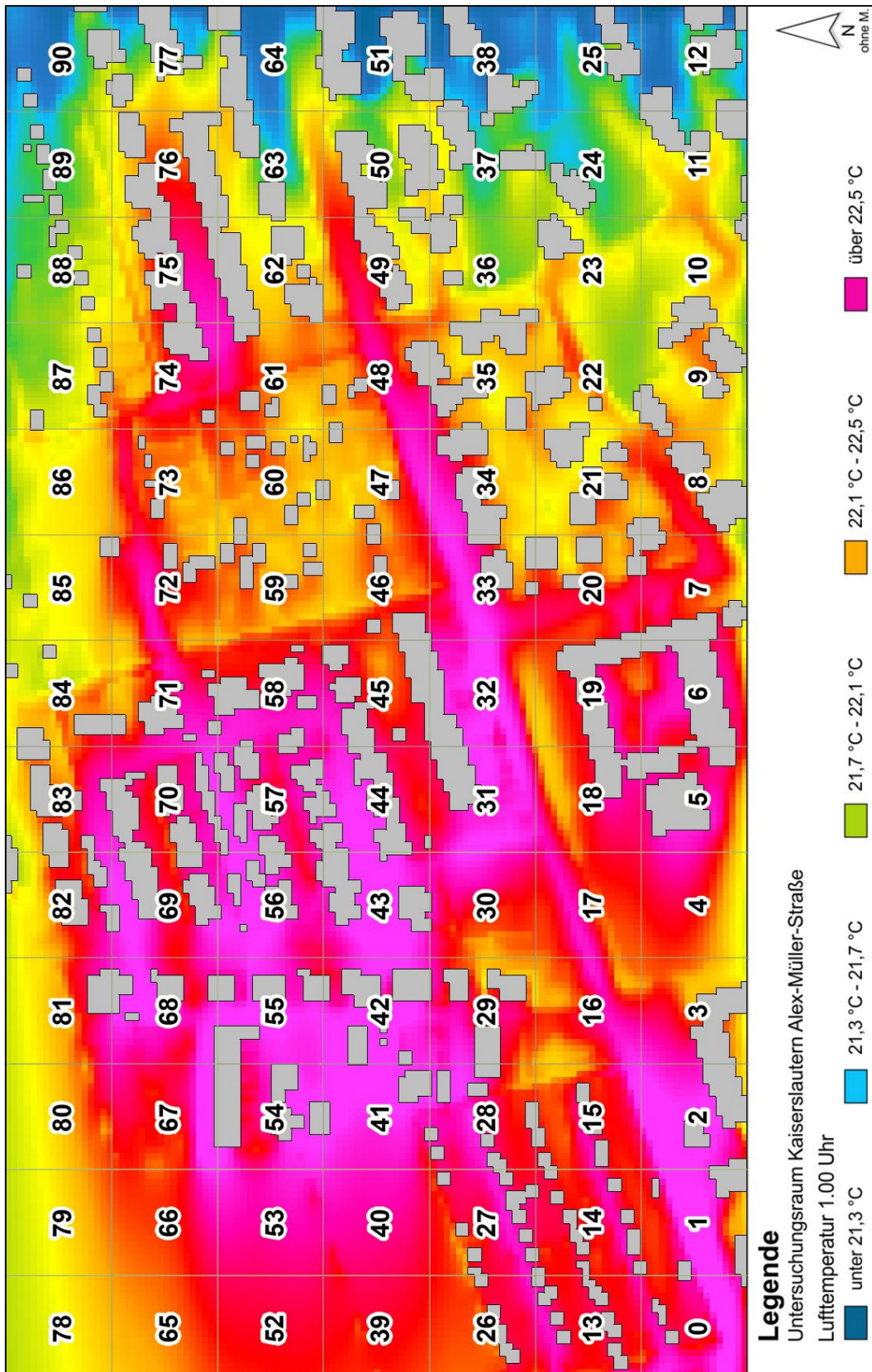


Abb. 51: Simulierte Lufttemperatur um 1.00 Uhr (Alex-Müller-Straße) [Eigene Darstellung 2017]

Zur Validierung der Matrix „Vegetationsform / Vegetationsanteil“ werden die Ergebnisse der Matrix-Methode für den nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebiets mit den simulierten Oberflächentemperaturen für diesen Teilbereich überlagert. Für diese Simulation wurden dieselben Ausgangsparameter wie für die Simulation der Lufttemperatur verwendet. Die durch die Simulation ermittelte Oberflächentemperatur liegt zwischen 17,7 °C und 27,0 °C. Besonders hohe Temperaturen besitzen die versiegelten Flächen im Untersuchungsgebiet. Diese Flächen nehmen über Tag ein Großteil der einfallenden Strahlung auf und speichern diese. Die Oberflächen im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Flächen besitzen eine Oberflächentemperatur von unter 19,6 °C. Der weitgehend natürliche Boden dieser Flächen nimmt über Tag deutlich weniger Energie auf und gibt diese schneller wieder ab. Wenn nach Sonnenuntergang keine weitere Erwärmung der Oberflächen stattfindet, kühlen diese schneller ab als die anthropogen überformten Oberflächen des Siedlungskörpers. Das so entstehende Kaltluftentstehungsgebiet ist deutlich sowohl in den Ergebnissen der Matrix-Methode wie auch der numerischen Simulation erkennbar.

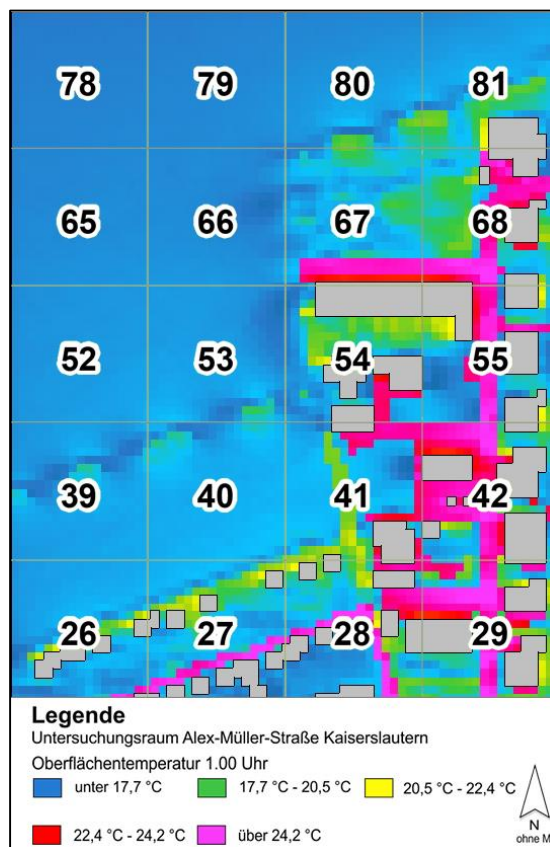


Abb. 52. Simulierte Oberflächentemperatur um 1.00 Uhr (Alex-Müller-Straße) [Eigene Darstellung 2017]

6.5. Kaiserslautern Dansenberg

6.5.1. Untersuchungsraum

Der Ortsbezirk Dansenberg befindet sich südlich des Kaiserslauterner Beckens auf einer Höhe von etwa 370 Meter über NN. Seit der Eingemeindung im Jahr 1969 ist Dansenberg ein Stadtteil von Kaiserslautern. Der Ortsbezirk erstreckt sich über eine Fläche von 4,92 km² [STADT KAISERSLAUTERN 2017b, O. S.]. Die Lage im nördlichen Pfälzerwald spiegelt sich im großen Waldanteil an der Gesamtfläche wieder. Die Siedlungsfläche Dansenbergs nimmt mit 0,75 km² etwa ein Siebtel der gesamten Ortsbezirksfläche ein. Im Südwesten grenzen kleine landwirtschaftlich genutzte Flächen an den Siedlungskörper. Die Siedlungsstruktur ist stark durch die Bebauung durch freistehende Einfamilienhäuser und Doppelhäuser geprägt. Punktuell sind ebenfalls dichtere Bebauungstypen, wie Reihenhausbauung und Mehrfamilienhäuser, vorhanden. Mit einer Einwohnerzahl von ca. 2.650 entspricht der Ortsbezirk Dansenberg den Rahmenbedingungen für die Anwendung der Matrix-Methode [STADT KAISERSLAUTERN 2017b, O. S.].

Für die Validierung der Matrix-Methode werden die Ergebnisse der Matrix-Methode mit empirischen Erhebungen verglichen. Diese Messungen wurden im Zeitraum Mai und Juni 2015 während autochthonen Strahlungswetterlagen durchgeführt. Als Messmethode diente eine mobile Messung mit Handgeräten an zuvor festgelegten Messpunkten (semikontinuierliche Messung). Da die Messungen nicht unter Zuhilfenahme von einem Fahrrad oder KFZ durchgeführt werden konnte, war es nicht möglich, eine flächendeckende Untersuchung des gesamten Ortsbezirkes durchzuführen. Stattdessen wurde ein Untersuchungsgebiet im Südwesten der Siedlung abgegrenzt, das sowohl die an die Siedlung angrenzenden Freiflächen, wie auch alle das Ortsbild prägende Bauungs- und Flächennutzungstypen umfasst (Abb. 53).

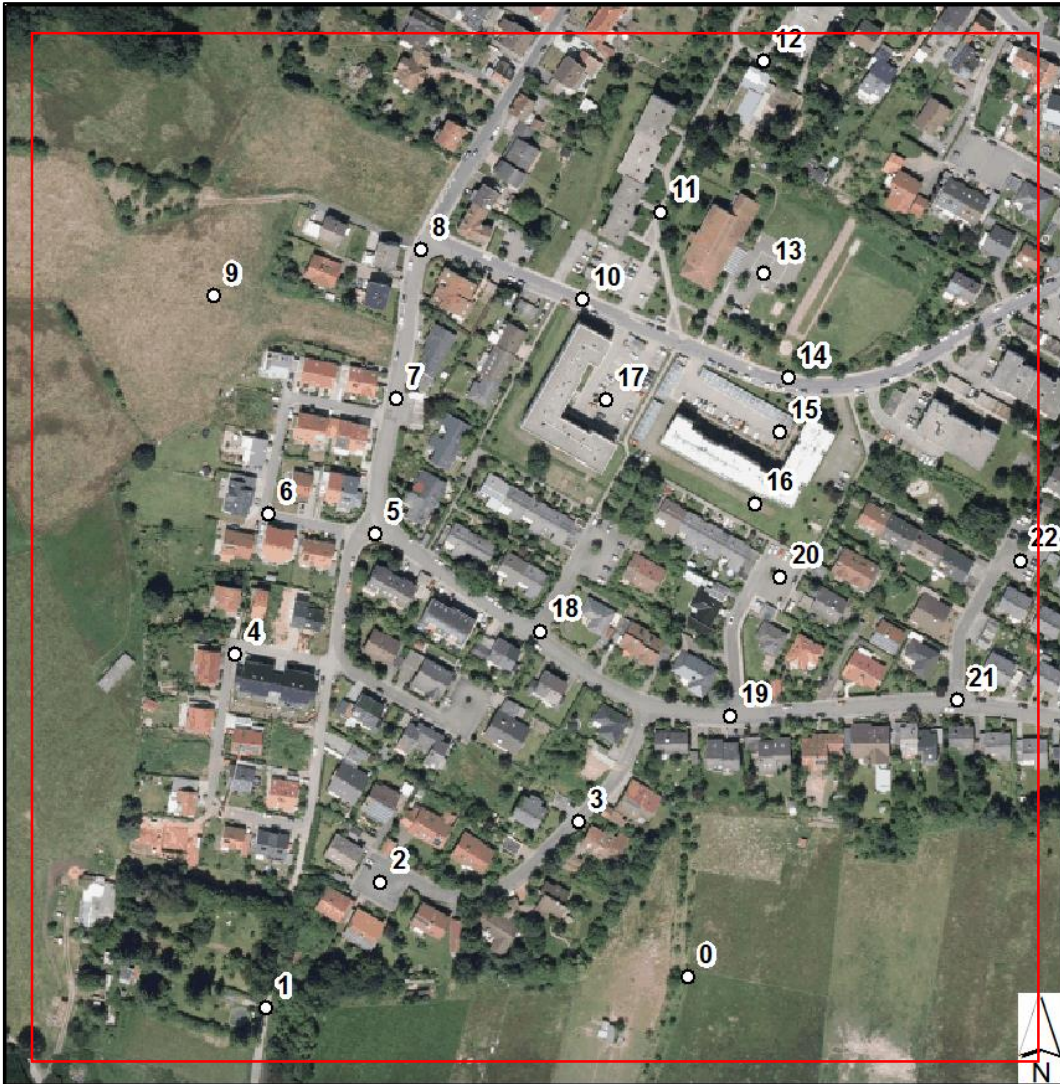


Abb. 53: Messpunkte im Untersuchungsgebiet Dansenberg Kaiserslautern [Eigene Darstellung 2017]

Entlang einer etwa 2,5 km langen Messstrecke wurden an 23 Messpunkten die Parameter Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit (maximal und durchschnittlich) aufgenommen. Insgesamt wurden in dem Messzeitraum vier Tages- (Startzeit ca. 14.00 Uhr) und drei Nachtmessungen (Startzeit ca. 3.50 Uhr) durchgeführt.

6.5.2. Matrix Methode

Der Untersuchungsraum für die Anwendung der Matrix-Methode entspricht dem der empirischen Erhebung. Das Untersuchungsgebiet mit einer Größe von 500 x 500 Metern wurde für die Anwendung der Matrix-Methode in 100 Raster mit einer Kantenlänge von 50 Metern unterteilt. Die Bestandsaufnahme vor Ort

erfolgte mit der App „ÖkoHaSie“. Als Luftbildgrundlage dienten während der Bestandsaufnahme die Orthofotos des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz mit einer Bodenauflösung von 40 cm. Als Untersuchungsgegenstände für die Validierung in diesem Untersuchungsraum werden die urbane Überwärmung (Matrizen 1-3) und die Matrix Oberflächenrauigkeit und Topographie verwendet. Diese sollen Aufschluss über die Ausbreitung von nächtlicher Kaltluft im Untersuchungsgebiet liefern.

Abbildung 54 zeigt die addierten Punkte der Matrizen, die zur Identifizierung von Flächen mit einem hohen urbanen Überwärmungspotenzial genutzt werden. Die Gesamtpunktzahl der drei Matrizen wird für diesen Untersuchungsraum in fünf Bewertungsklassen von „sehr gering“ bis „sehr hoch“ unterteilt. Die an den Siedlungsraum angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Flächen im Süden und Westen des Untersuchungsraums weisen ein sehr geringes Potenzial zur urbanen Überwärmung auf. Der anthropogene Eintrag von Material in diese Flächen ist sehr gering. Siedlungselemente wie Gebäude oder Straßen, die einen negativen Einfluss auf die Bewertung besitzen, sind in diesen Rastern nur sehr vereinzelt vorhanden. Ein Großteil der Raster, die innerhalb der Siedlungsfläche liegen, besitzen ein geringes oder mittleres Überwärmungspotenzial. Diese Raster sind in der Regel durch Punkthausbebauung oder aufgelockerte Bebauung geprägt. Der Versiegelungsgrad der Flächen kann meist den beiden ersten Versiegelungsklassen zugeordnet werden, sodass die Vegetation der vorhandenen Grünflächen und Gärten durch Verdunstung das Überwärmungspotenzial abmildern kann. Die im Untersuchungsraum verwendeten Oberflächenmaterialien besitzen zwar aus siedlungsökologischer Sicht meist schlechte Eigenschaften, doch durch den relativ geringen Flächenanteil können diese Materialien allerdings zu keiner signifikanten Steigerung des Überwärmungspotenzials beitragen. Ein hohes bzw. sehr hohes Überwärmungspotenzial besitzen besonders die Raster 65 bis 69. Diese sind durch einen sehr hohen Versiegelungsgrad geprägt, sodass es nur zu sehr geringen Kühlungseffekten durch Evapotranspiration kommt. Der hohe Eintrag von anthropogenem Material führt dazu, dass es über den Tag zu einer hohen Wärmespeicherung kommt, die in den Nachtstunden die Ausbildung einer Wärmeinsel hervorruft.

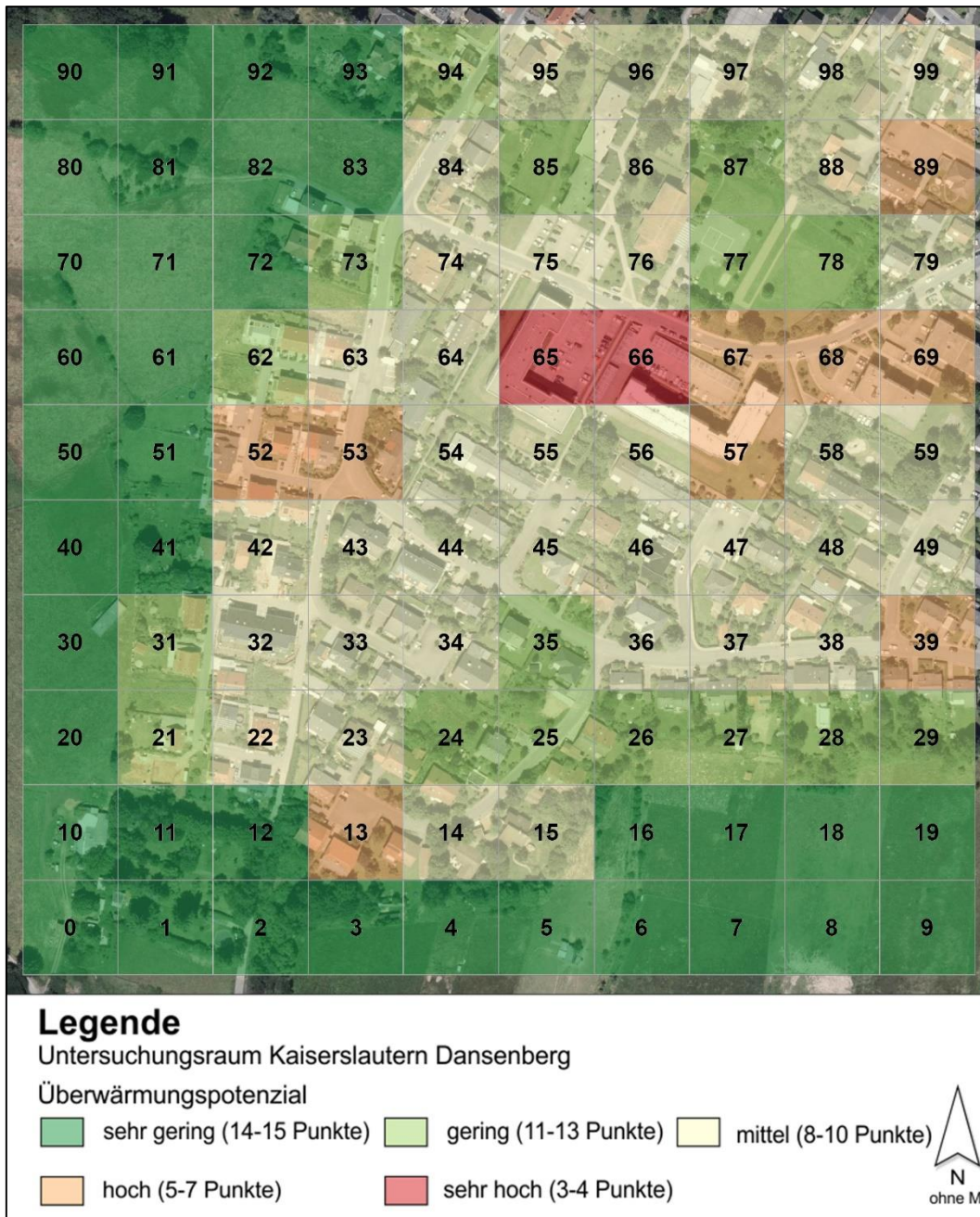


Abb. 54: Überwärmungspotenzial (Dansenberg) [Eigene Darstellung 2017]

Zur Bewertung der Flächen hinsichtlich ihrer Eignung als Ventilationsbahn wird die Matrix „Oberflächenrauigkeit und Topographie“ verwendet. Die landwirtschaftlich genutzten Flächen im Süden und Westen des Untersuchungsgebiets können als Freilandklimatop klassifiziert werden. Durch den niedrigen Versiegelungsgrad und die niedrige Vegetation besitzen diese Flächen ein hohes Kaltluftentstehungspotenzial. Die positive Wirkung dieser Flächen ist allerdings nur dann für die Siedlung relevant, wenn die entstandene Kaltluft auch in Richtung Siedlung abfließen und in den Siedlungskörper eindringen kann. Abbil-

dung 55 zeigt die Ergebnisse der Matrixuntersuchung zur Abschätzung der Eignung der Raster als Kaltluftleitbahn. Der Großteil des Untersuchungsgebiets eignet sich nicht als Ventilationsbahn. Der Hauptgrund für den Ausschluss der Flächen liegt in der durch Vegetation und Bebauung erhöhten Oberflächenrauigkeit. Diese sorgt dafür, dass die Kaltluft abgebremst bzw. aufgehalten wird und nicht in den Siedlungskörper eindringen kann. Die Freiflächen im Süden des Untersuchungsraums würden sich aufgrund der niedrigen Oberflächenrauigkeit sehr gut als Ventilationsbahn eignen. Allerdings gibt es in diesem Bereich ein Gefälle in Richtung Süden. Potenzielle Kaltluft, die in diesem Bereich entsteht, kann also nicht in Richtung Siedlung abfließen und ihre positive Wirkung entfalten.

Die Freiflächen im Westen des Untersuchungsgebiets besitzen ein Gefälle in Richtung Siedlung und eine geringe Oberflächenrauigkeit. Diese Eigenschaften führen dazu, dass die Flächen als potenzielle Ventilationsbahn mit Bedeutung für den Untersuchungsraum bewertet werden. Zusätzlich wurden fünf Raster im Nordosten des Untersuchungsraums mit „guten“ Eigenschaften als Ventilationsbahn bewertet. Diese Raster besitzen eine niedrige Oberflächenrauigkeit und eine ebene bzw. leicht gewellte Oberfläche. Diese Flächen sind für die Analyse von potenziellen Kaltluftleitbahnen allerdings nicht von Bedeutung, da sie innerhalb der Siedlung liegen und so keine Verbindung zu potenziellen Kaltluftentstehungsgebieten besitzen.

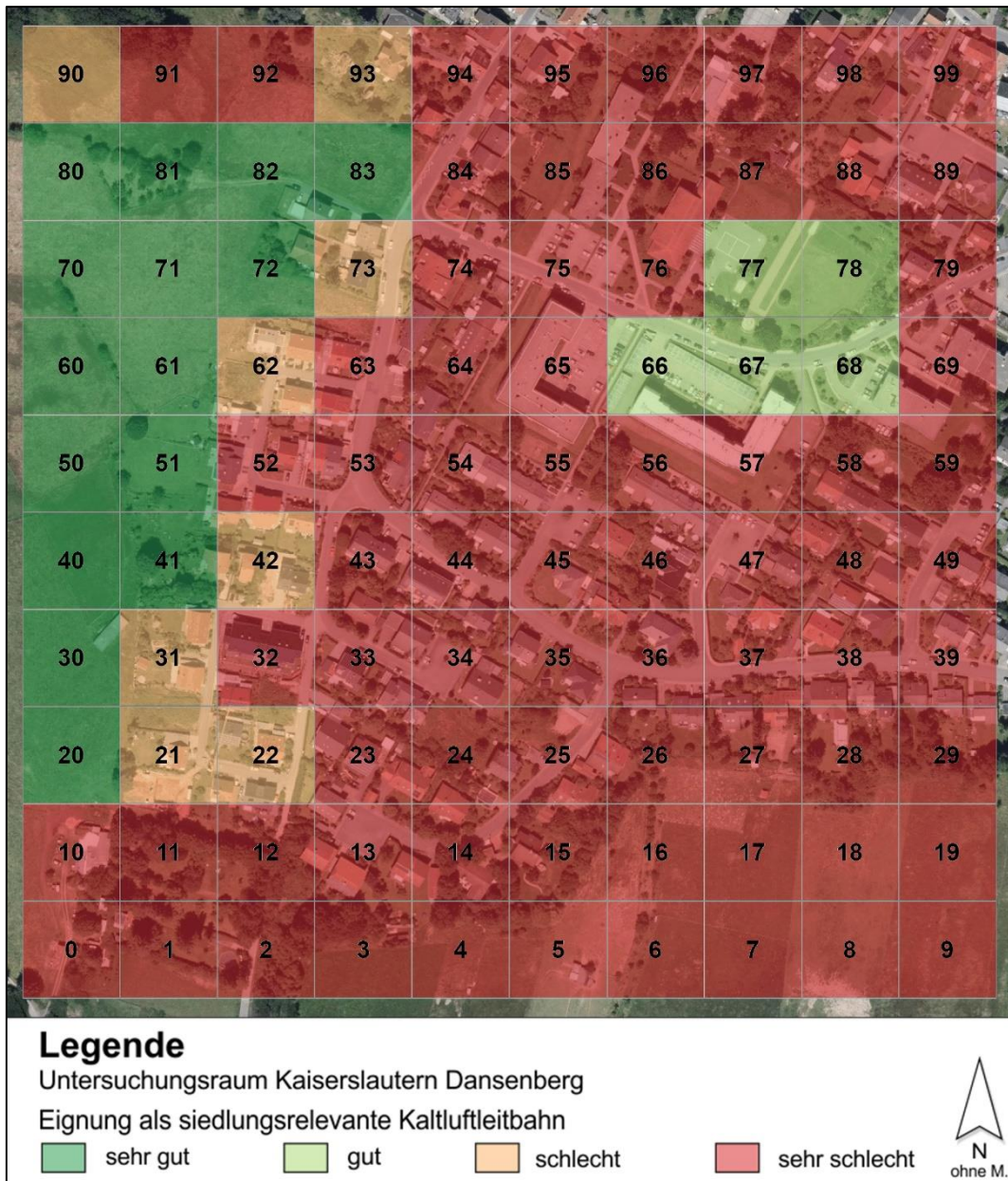


Abb. 55. Eignung als Kaltluftleitbahn (Dansenberg) [Eigene Darstellung 2017]

6.5.3. Vergleich mit durchgeführter mobiler Messung

Zur Ergebnisvalidierung werden die Ergebnisse der Matrix-Methode mit den gemessenen Werten überlagert. Für den Nachweis des Überwärmungspotenzials werden die Lufttemperatur der Tages- und der Nachtmessung verwendet.

Abbildung 56 zeigt die Überlagerung der Matrix-Methode mit den während den Tagesmessungen aufgenommenen Lufttemperaturwerten in zwei Meter Höhe. Die gemessenen Werte im Untersuchungsgebiet liegen zwischen 25,6 °C und 31,4 °C. Die niedrigsten Werte wurden an Messpunkt 12 gemessen. Dieser Messpunkt ist von Bäumen umgeben, sodass dieser den kompletten Tag im Schatten liegt und die Lufttemperatur im Vergleich zu den anderen Messpunkten nicht so stark ansteigt. Darüber hinaus sorgt die erhöhte Verdunstung durch die Vegetation zu einer Verringerung der Temperatur. Das zu diesem Messpunkt gehörige Raster wurde mit einem mittleren Überwärmungspotenzial bewertet. Die Verschattung durch Vegetation oder Gebäude wird bei der Anwendung der Matrix-Methode nicht berücksichtigt. Die Besonderheit dieses Messpunktes kann aus diesem Grund nicht erfasst bzw. berücksichtigt werden. An den beiden Messpunkten (0 und 9), die auf den an den Siedlungsraum angrenzenden Freiflächen liegen, wurden ebenfalls im Vergleich zu den anderen Messpunkten niedrigere Werte gemessen. Diese Messwerte sind deckungsgleich mit den Ergebnissen der Matrix-Methode, die diese Flächen als Gebiete mit einem sehr geringen Überwärmungspotenzial klassifizieren. Fünf von sechs Messpunkten mit einer Lufttemperatur zwischen 29 °C und 29,5 °C befinden sich in Flächen, die durch die Matrix-Methode mit einem mittleren Überwärmungspotenzial bewertet wurden. Die Messpunkte mit einer Lufttemperatur zwischen 30 °C und 30,5 °C können größtenteils Rastern mit einem hohen Überwärmungspotenzial zugeordnet werden. Ausnahmen stellen die Raster, in denen sich die Messpunkte 3 und 13 befinden, dar. Hier wurde das Überwärmungspotenzial durch die Matrix-Methode als „gering“ bewertet. Die genauere Analyse der Raster zeigt, dass die gute Bewertung hinsichtlich des Überwärmungspotenzials in erster Linie auf den niedrigen Versiegelungsgrad zurückzuführen ist. Die Messpunkte in beiden Rastern liegen auf einer versiegelten Fläche (Straße bzw. Schulhof) und bilden demnach nicht die charakteristischen Oberflächeneigenschaften dieser Raster ab. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse der Matrix-Methode die mikroklimatische Situation besser abbilden als die aufgenommenen Messwerte. Die höchsten Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet wurden an den Punkten 15, 16 und 17 gemessen. Für die Raster in diesem Gebiet wurde

durch die Anwendung der Matrix-Methode ein hohes bzw. sehr hohes Überwärmungspotenzial vorhergesagt.

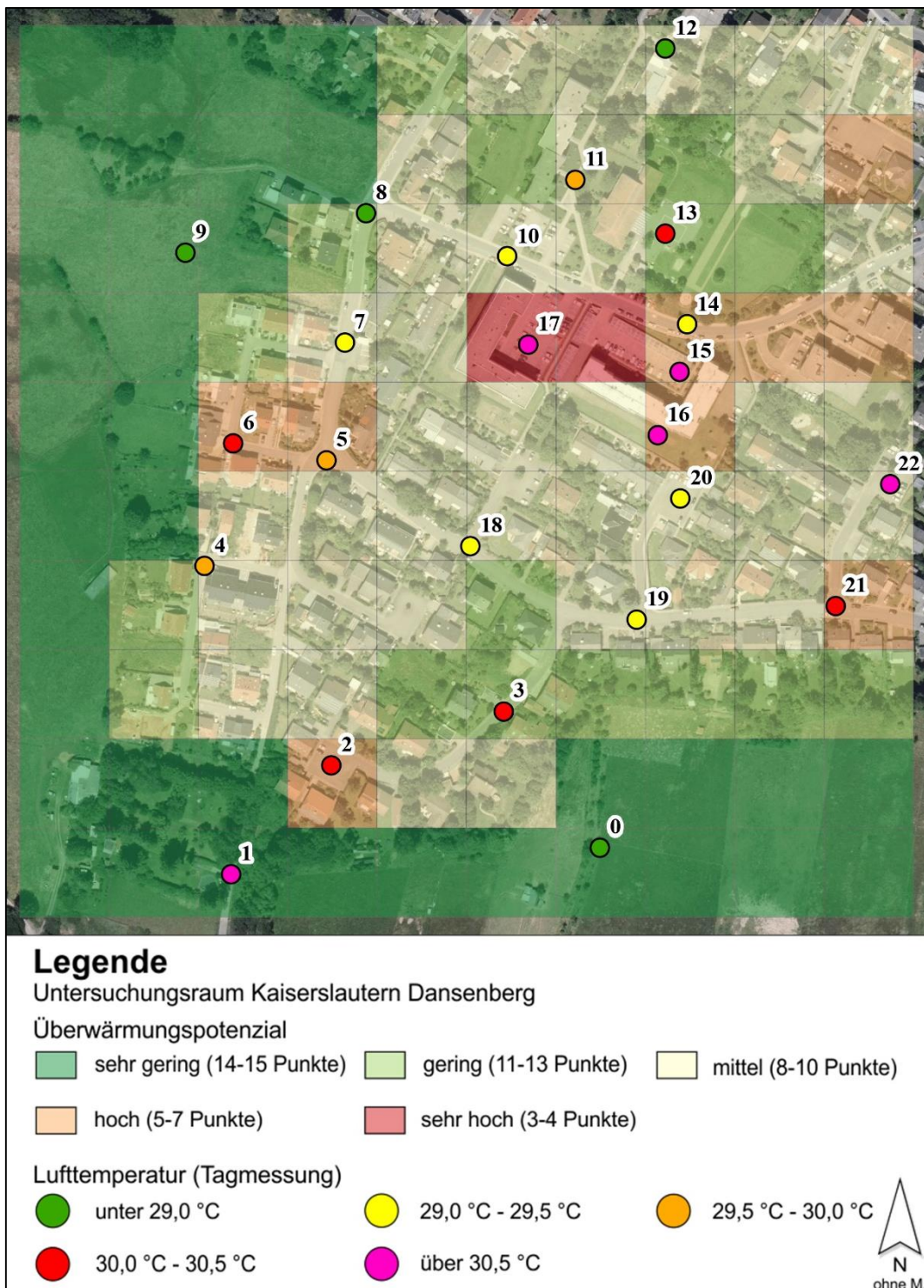


Abb. 56: Überlagerung von Überwärmungspotenzial und Lufttemperatur (Tagmessung) [Eigene Darstellung 2017]

Abbildung 57 zeigt das durch die Anwendung der Matrix-Methode ermittelte Überwärmungspotenzial in Überlagerung mit der während den Nachtmessungen ermittelten Lufttemperatur. Der Temperaturunterschied zwischen den niedrigsten (Messpunkt 0 und 9) und dem höchsten gemessenen Wert (Messpunkt 5) beträgt 1,4 K. Die Messpunkte 0 und 9 befinden sich in Rastern, die durch die Matrix-Methode als Flächen mit einem sehr geringen Überwärmungspotenzial klassifiziert werden. Die natürlichen Böden im Bereich der Messpunkte besitzen gegenüber versiegelten Flächen ein geringeres Wärmespeicherpotenzial und geben aus diesem Grund nach Sonnenuntergang weniger Wärmestrahlung ab, die zu einer Erhöhung der Lufttemperatur beitragen kann. Die gemessenen Werte innerhalb des Siedlungskörpers liegen zwischen 13,3 °C und 14,3 °C. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten und den Ergebnissen der Matrix-Methode ist für diesen Teil des Untersuchungsgebiets nicht erkennbar. Im Bereich der Messpunkte 14-17 wurden Lufttemperaturen zwischen 13,4 °C und 14,0 °C gemessen. Dies könnte auf eine erhöhte Wärmespeicherung in diesem Gebiet hindeuten, die ebenfalls durch die Matrix-Methode ermittelt wurde. Allerdings ist bei der Bewertung der Messwerte zu berücksichtigen, dass die Messgenauigkeit des verwendeten Thermometers bei 1 °C liegt. Die unterschiedlichen Messwerte innerhalb des Siedlungskörpers müssen demnach nicht zwangsläufig auf unterschiedliche klimatische Bedingungen vor Ort zurückzuführen sein, sondern können auch auf Messungenauigkeiten beruhen.

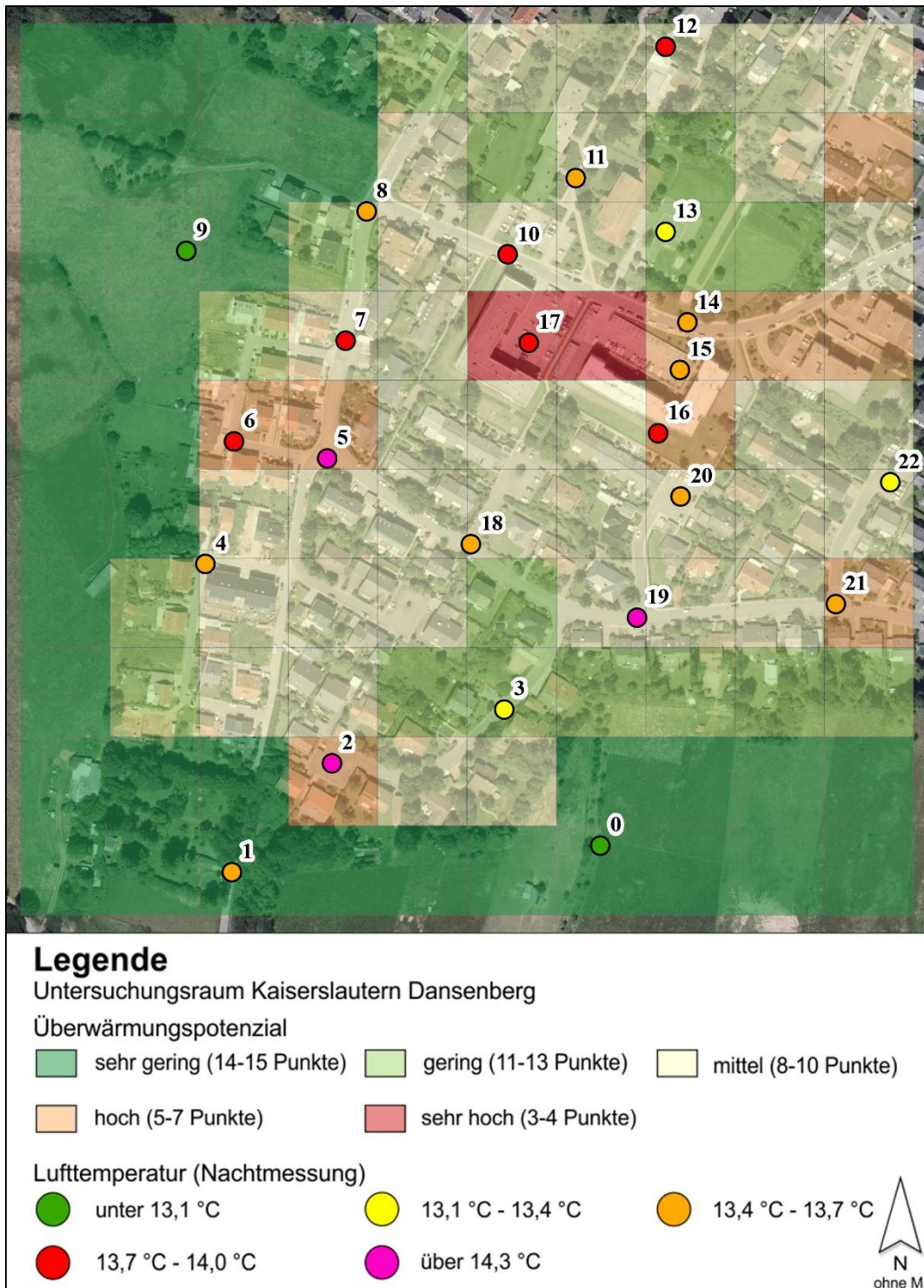


Abb. 57: Überlagerung von Überwärmungspotenzial und Lufttemperatur (Nachtmessung) [Eigene Darstellung 2017]

Abbildung 58 zeigt die durch die Anwendung der Matrix-Methode erhaltene Rasterbewertung hinsichtlich der Eignung als siedlungsrelevante Ventilationsbahn und die gemessenen Lufttemperaturen während der Nacht. Als potenzielle Kaltluftentstehungsgebiete konnten die an den Siedlungskörper angrenzenden

Freiflächen im Süden und Westen des Untersuchungsgebiets identifiziert werden. Zur Validierung der Ergebnisse der Matrix-Methode wird die Lufttemperatur an den Messpunkten betrachtet, die nur einen geringen Abstand zu den Freiflächen besitzen. Für die südliche Freifläche sind das die Messpunkte 2, 3, 19 und 21. Für die Freifläche im Westen werden die Messpunkte 4 bis 8 berücksichtigt. Sollte an diesen Messpunkten im Vergleich zu den restlichen Messpunkten innerhalb der Siedlung eine niedrigere Lufttemperatur vorherrschen, kann davon ausgegangen werden, dass zwischen Entstehungsgebiet und Messpunkt eine Kaltluftleitbahn liegt. Die Raster im südlichen Bereich des Untersuchungsgebiets wurden im Rahmen der Matrix-Methode als nicht relevant für die Kaltluftversorgung des Untersuchungsgebiets bewertet. Diese Bewertung beruht auf dem Gefälle des Geländes in Richtung Süden. So kann potenziell entstehende Kaltluft nicht in Richtung Siedlung fließen. Diese Bewertung spiegelt sich auch in der gemessenen Lufttemperatur an den Messpunkten 2, 3, 19 und 21 wieder. Die Lufttemperatur an diesen Messpunkten liegt mit Ausnahme von Messpunkt 3 über dem Durchschnitt der übrigen Messpunkte im Siedlungskörper. Es kann also davon ausgegangen werden, dass in diesen Bereich des Untersuchungsgebiets keine für die Siedlung relevanten Kaltluftleitbahnen vorhanden sind. Die Flächen im Westen des Untersuchungsgebiets eignen sich hingegen aufgrund der niedrigen Oberflächenrauigkeit und dem Gefälle in Richtung Siedlung als potenzielle Kaltluftleitbahnen. Die Lufttemperatur an den Messpunkten 4 und 8 liegt unter dem Durchschnitt der übrigen Messpunkte im Siedlungskörper. Dies könnte darauf hindeuten, dass an diesen Stellen Kaltluft über Kaltluftleitbahnen in den Siedlungskörper einströmt und zu einer Abkühlung führt. Allerdings kann diese scheinbare Abkühlung auch auf die Messungenauigkeit des Thermometers oder die mikroklimatischen Besonderheiten der Messpunkte zurückzuführen sein.

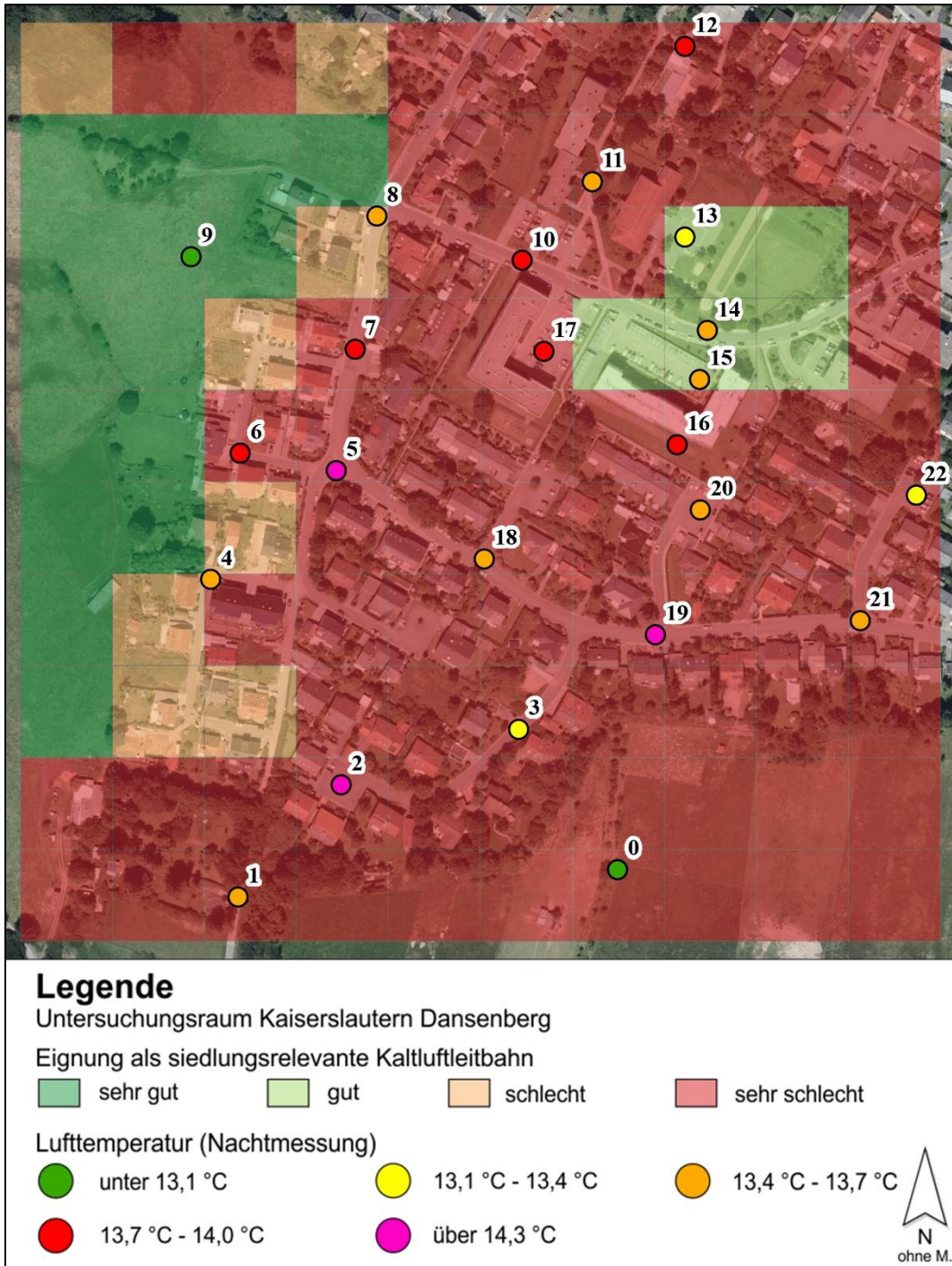


Abb. 58: Überlagerung von Ventilationsleitbahneignung und Lufttemperatur (Nachtmessung)
 [Eigene Darstellung 2017]

6.6. Innenstadt Kaiserslautern

Da die Validierung der Matrix-Methode für den Themenbereich der nächtlichen Überwärmung im Untersuchungsraum Dansenberg (vgl. Kapitel 6.5.3) aufgrund der Messgenauigkeiten des eingesetzten Thermometers nur bedingt belastbare Ergebnisse geliefert hat, wurde zusätzlich eine punktuelle Untersuchung der nächtlichen Überwärmung in der Innenstadt Kaiserslautern durchgeführt. Dazu wurden vier Raster mit einer Kantenlänge von 50 Metern abgegrenzt, die sich hinsichtlich der für die Matrix-Methode relevanten Indikatoren unterscheiden. Als Vergleich wurden innerhalb dieser Raster im August 2016 während autochthonen Strahlungs Nächten drei Lufttemperaturmessungen durchgeführt (Messzeitraum zwischen 2.00 und 3.00 Uhr). Um Fehlinterpretationen durch Messgenauigkeiten zu vermeiden wurde für diese empirische Erhebung ein Thermometer (GTH 175/Pt) mit einer Messgenauigkeit von 0,1 °C eingesetzt. Abbildung 59 zeigt die Lage der Raster im Innenstadtgebiet Kaiserslautern. Untersuchungspunkt 0 befindet sich im hochverdichteten Bereich der Shoppingmall in der Humboldtstraße. Messpunkt 1 befindet sich in der Lutrinastraße in einem ebenfalls dicht bebauten Gebiet. Die dichte Bebauung wird in diesem Bereich durch vereinzelte Vegetationselemente aufgelockert. Das Raster um Messpunkt 2 wird etwa zu gleichen Teilen durch unversiegelte (Philipp-Mees-Platz) und versiegelte Flächen (Lilienstraße und Polizeipräsidium Westpfalz) geprägt. Der letzte Messpunkt liegt innerhalb des Stadtparks auf einer Wiese. Die einzigen versiegelten Flächen innerhalb dieses Rasters sind die Fußwege.



Abb. 59: Übersicht Untersuchungsraum Innenstadt Kaiserslautern [Eigene Darstellung 2017]

Für den Validierungsprozess wurden diese Flächen anhand der Matrizen „Versiegelungsgrad und Bebauungsdichte“, „Versiegelungsgrad und Oberflächenfarbe“ und „Versiegelungsgrad und Oberflächenmaterial“ bewertet. Die Punkte dieser Matrizen wurden zur Ermittlung des Überwärmungspotenzials addiert und anhand der in Kapitel 6.4.2 verwendeten Klassifizierung unterteilt.

Abbildung 60 zeigt die Überlagerung der Ergebnisse der Matrix-Methode mit der gemessenen Lufttemperatur an den jeweiligen Messpunkten. Für das Raster im Stadtpark konnte ein sehr geringes Überwärmungspotenzial durch die Anwendung der Matrix-Methode vorhergesagt werden. Das ist besonders auf den niedrigen Versiegelungsgrad zurückzuführen. Zusätzlich führt die helle Oberflächenfarbe der zur Wegpflasterung genutzten Materialien zu einer höheren Reflexion der einfallenden Strahlung als dies bei dunklen Flächen der Fall wäre. Die durchgeführte Lufttemperaturmessung bestätigt das durch die Matrix-Methode erhaltene Ergebnis. Mit 15,3 °C wurde an diesem Messpunkt die niedrigste Temperatur der vier Messpunkte erfasst. Für das Raster am Polizeipräsidium wurde durch das Matrix-Verfahren für den Themenbereich urbane Überwärmung eine Gesamtpunktzahl von 8 ermittelt. Dieser Wert entspricht der Klasse „mittleres Überwärmungspotenzial“. Die gemessene Lufttemperatur (16,2 °C) ist gegenüber dem Messpunkt im Stadtpark um 0,9 K erhöht. Die durch die Matrix-Methode erfassten Veränderungen der mikroklimarelevanten Indikatoren spiegeln sich also auch in einer erhöhten Lufttemperatur wieder. Der hohe Versiegelungsgrad und die Materialeigenschaften der Flächen im Raster um den Messpunkt in der Lutrinastraße führen dazu, dass dieses Gebiet durch die Matrix-Methode mit einem hohen Überwärmungspotenzial bewertet wird. Diese Bewertung wird durch die gemessenen Lufttemperaturen bestätigt. Mit 17,8 °C liegt diese deutlich über den Lufttemperaturen, die innerhalb der Flächen mit einem geringen (Stadtpark) oder mittleren (Polizeipräsidium) Überwärmungspotenzial gemessen wurden. Die höchste nächtliche Lufttemperatur (18,3 °C) wurde am Messpunkt in der Humboldtstraße gemessen. Das Gebiet um diesen Messpunkt wird sehr stark durch die dichte Bebauung und den hohen Versiegelungsgrad geprägt. Die anthropogenen Materialien besitzen eine hohe Wärmespeicherkapazität und geben während der Nachtstunden die über Tag aufgenommene Energie an die Umgebung ab. Durch die Anwendung der Matrix-Methode wurde für diesen Untersuchungsraum ein sehr hohes Überwärmungspotenzial ermittelt.

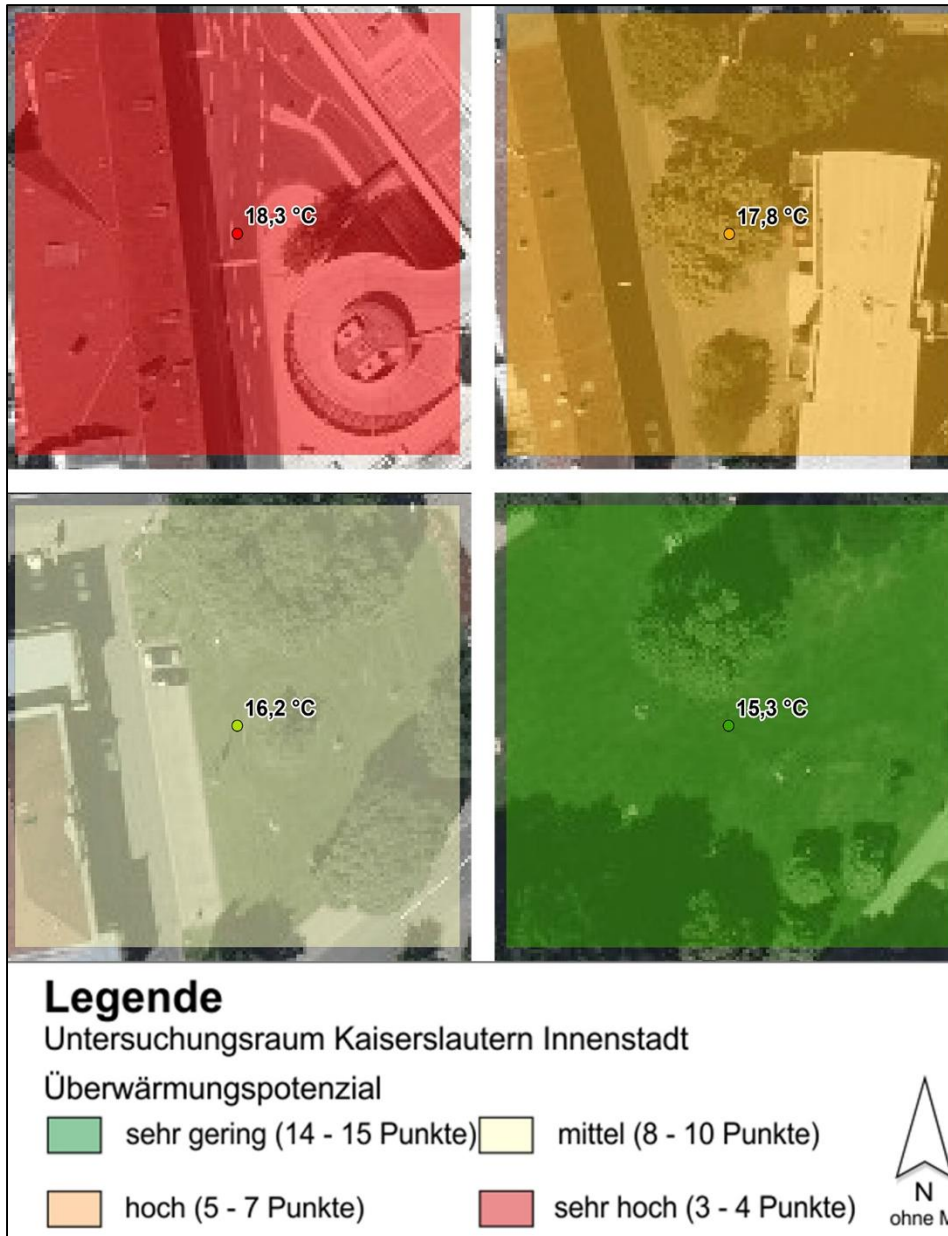


Abb. 60: Überwärmungspotenzial Innenstadt Kaiserslautern (Humboldtstr. = o. l.; Lutrinastr. = o. r.; Polizeipräsidium = u. l.; Stadtpark = u. r.) [Eigene Darstellung 2017]

7. Diskussion der Ergebnisse

Für die Bewertung der Matrix-Methode wird diese vor dem Hintergrund der Ergebnisvalidierung (Kapitel 6.4 bis 6.6) mit den in der Praxis eingesetzten Methoden zur Siedlungsklimaerfassung verglichen. Abschließend wird die Matrix-Methode in die in Kapitel 2.3.4 erstellte Gesamtbewertung eingeordnet.

7.1. Numerische Simulation

Die Ergebnisse der Matrix-Methode für den Untersuchungsraum **Alex-Müller-Straße Kaiserslautern** wurden im Rahmen der Validierung mit den Ergebnissen einer in Envi-met durchgeführten numerischen Modellsimulation verglichen. Zunächst ist eine kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen der Simulation notwendig. Für die ideale Abbildung der lokalklimatischen Situation im Untersuchungsgebiet wäre eine Simulation bei Windstille notwendig. Eine solche Simulation konnte allerdings aufgrund von Programmfehlern nicht durchgeführt werden. Dadurch kommt es am Einströmrand des Modells zu fehlerhaften Werten. Darüber hinaus muss die Luftbewegung bei der Interpretation der Werte berücksichtigt werden. Zusätzlich konnte bei der Simulation kein Geländemodell berücksichtigt werden. Dadurch können einige Untersuchungsgegenstände, wie zum Beispiel der Kaltluftabfluss, durch den Einsatz dieses Modellierungsverfahrens nicht berücksichtigt werden. Diese Probleme bei der Simulation sind nicht nur für die Validierung zu berücksichtigen, sondern können ebenfalls auftreten, wenn eine Gemeinde das lokale Klima mithilfe einer numerischen Simulation analysieren möchte.

Die Validierung der Matrix-Methode wurde für den Themenbereich urbane Überwärmung (Matrix 1 bis 3) und Kaltluftentstehungspotenzial (Matrix „Vegetationsform / Vegetationsanteil“) durchgeführt. Für die urbane Überwärmung konnten die Ergebnisse der Matrix-Methode bestätigt werden. Die Simulation der nächtlichen Lufttemperatur zeigt erhöhte Werte für die Raster die durch die Matrix-Methode als Flächen mit einem sehr hohen Überwärmungspotenzial identifiziert wurden. Für die Flächen mit einem durch die Matrix-Methode ermitteltem mittleren bzw. geringen oder sehr geringen Überwärmungspotenzial ist die Bestätigung durch die numerische Simulation auf den ersten Blick nicht offensichtlich. Nach Berücksichtigung der auftretenden Randeffekte am östlichen Modellrand und der auftretenden Luftbewegung, die besonders für die westlichen Freiflächen von Bedeutung ist, können die Ergebnisse der Matrix-Methode auch für diese Flächen bestätigt werden.

Für die Validierung der Matrix „Vegetationsform / Vegetationsanteil“ wurden die Ergebnisse mit der Oberflächentemperatur um 1.00 Uhr nachts verglichen. In den Ergebnissen der Simulation sind sehr deutlich die versiegelten Flächen zu erkennen, die tagsüber die einfallende Strahlung aufgenommen und gespeichert haben. Nach Sonnenuntergang wird diese Strahlung an die Atmosphäre abgegeben, sodass sich diese Flächen nur langsam abkühlen. Diese Bereiche wurden durch die Matrix-Methode ebenso identifiziert wie die unversiegelten Freiflächen, die durch ihr Abkühlverhalten als Kaltluftentstehungsgebiet fungieren. Der Abfluss der entstandenen Kaltluft konnte durch die numerische Simulation nicht validiert werden, da das Simulationsmodell die Topographie, die für den Kaltluftabfluss von entscheidender Bedeutung ist, nicht berücksichtigt.

7.2. Mobile Messung

Im Untersuchungsraum **Dansenberg** (vgl. Kapitel 6.5) wurden die Ergebnisse der Matrix-Methode mit Daten von durchgeführten mobilen Tag- und Nachtmessungen verglichen. Der Vergleich des durch die Matrix-Methode ermittelten Überwärmungspotenzials und der Lufttemperatur während den Tagmessungen hat eine große Übereinstimmung gezeigt. Sowohl Flächen mit einem geringen Überwärmungspotenzial, so die an den Siedlungsraum angrenzenden Freiflächen, wie auch Gebiete mit einem hohen Überwärmungspotenzial, so wie im Umfeld der Wohnblöcke, wurde durch die Matrix-Methode identifiziert. Bei der Analyse der Lufttemperaturmessung hat sich gezeigt, dass die gemessenen Werte sehr stark von der genauen Lage der Messpunkte abhängig sind. Kleinräumige Besonderheiten in unmittelbarer Umgebung um den Messpunkt können zu einer erheblichen Beeinflussung der gemessenen Werte führen. Die Lufttemperatur an Messpunkt 12 (Abb. 56) wird durch den Schatten der umstehenden Bäume stark beeinflusst. Dieser räumlich eng begrenzte Einfluss kann durch die Matrix-Methode nicht erfasst werden. Durch das gewählte Messverfahren der semikontinuierlichen Messung wurde die Anzahl der möglichen Messpunkte begrenzt. Aus diesem Grund ist nur eine stichprobenartige Überprüfung der Ergebnisse der Matrix-Methode durch die empirische Erhebung möglich. Auf eine Interpolation der Daten zwischen den einzelnen Messpunkten wurde bewusst verzichtet. Die interpolierten Werte werden durch mathematische Berechnungen erzeugt und berücksichtigen nicht die siedlungsökologischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes. Zur Validierung der Matrix-Methode wären diese inter-

polierten Werte demnach nicht aussagekräftig genug. Um durch Anwendung eines Interpolationsverfahrens flächendeckend belastbare Werte zu erhalten, wäre eine deutlich höhere Messpunktdichte notwendig. Dazu hätte beispielsweise statt der semikontinuierlichen eine kontinuierliche Messung durchgeführt werden müssen. Die für eine solche Messung notwendigen Messgeräte standen zum Durchführungszeitpunkt der Messung nicht zur Verfügung.

Der Nachweis einer nächtlichen Überwärmung im Untersuchungsgebiet Danksenberg konnte durch die durchgeführten Messungen nicht zweifelsfrei erbracht werden. Die Messungengenauigkeit der eingesetzten Messgeräte und die geringe Wertespanne zwischen der minimalen und maximalen Lufttemperatur lassen keine belastbare Validierung der Matrix-Methode zu. Grobe Tendenzen, die in den gemessenen Werten zu erkennen sind, spiegeln sich auch in den Bewertungsergebnissen der Matrix-Methode wieder. Die an den Siedlungsraum angrenzenden Freiflächen besitzen laut Matrix-Methode ein sehr geringes Überwärmungspotenzial. Diese Bewertung wird durch die niedrigen gemessenen Lufttemperaturen gestützt.

Der Teil der Matrix-Methode, der zur Identifikation von möglichen Kaltluftleitbahnen dient, konnte durch die durchgeführten Nachtmessungen grundsätzlich validiert werden. Für den südlichen Teil des Untersuchungsgebiets konnten durch beide Verfahren keine siedlungsrelevanten Kaltluftleitbahnen nachgewiesen werden. Für den westlichen Teil des Untersuchungsgebiets wurden durch das Matrix-Verfahren Flächen identifiziert, die als für den Siedlungskörper bedeutsame Kaltluftleitbahnen fungieren können. Die Lufttemperatur an den Messpunkten in diesem Bereich ist im Vergleich zum restlichen Siedlungskörper leicht verringert. Zur weiteren Untersuchung dieser potenziellen Kaltluftleitbahnen kann aus der Matrix-Methode die Handlungsempfehlung abgeleitet werden, in diesem Bereich einen Nachweis von bodennahen Luftbewegungen durchzuführen. Dazu könnten beispielsweise Tracergase wie SF₆ oder Rauchschwadenexperimente eingesetzt werden. Die Durchführung eines solchen Nachweises war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Zur Validierung der Matrix-Methode hinsichtlich der nächtlichen Überwärmung wurden vier Untersuchungs raster im **Innenstadtbereich Kaiserslauterns** analysiert. Die Raster wurden dabei so gewählt, dass unterschiedliche Charakteristika von urbanen Räumen abgebildet werden. Während der durchgeführten mobilen Messung der Lufttemperatur konnte eine Temperaturdifferenz von 4 K zwi-

schen dem wärmsten und dem kältesten Messpunkt erfasst werden. Durch Überlagerung des ermittelten Überwärmungspotenzials und den gemessenen Werten konnten die Ergebnisse der Matrix-Methode bestätigt werden.

7.3. Gesamtbetrachtung

In der Gesamtbetrachtung der Untersuchungsmethoden (Tab. 11) wird deutlich, dass die Matrix-Methode sowohl Vor- wie auch Nachteile gegenüber den aktuell eingesetzten Verfahren bietet. Im Gegensatz zu den anderen Methoden werden bei der Matrix-Methode keine Klimaparameter gemessen oder durch numerische Simulationen berechnet. Die Matrix-Methode beruht stattdessen auf der Abschätzung des Eintrittspotenzials von verschiedenen Stadtklimaphänomenen. Da die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit auf verallgemeinerten Literaturwerten beruht, kann mit der Matrix-Methode in der Regel keine so hohe Ergebnisqualität erreicht werden, wie bei der Anwendung der anderen Verfahren.

Die räumliche Auflösung der Matrix-Methode wird durch die gewählte Rastergröße beeinflusst. Wie die Auflösung im Vergleich zu den anderen Methoden zu bewerten ist, ist stark von den eingesetzten Messmethoden bzw. der gewählten Modellauflösung abhängig. Gegenüber den stationären Messungen ist die Matrix-Methode deutlich im Vorteil. Stationäre Messungen erlauben nur die Erfassung der Klimaparameter an einzelnen ausgewählten Stationsstandorten. Die Messpunktdichte ist dabei so gering, dass eine räumliche Interpolation der Daten nicht sinnvoll ist. Kontinuierliche mobile Messungen können eine sehr gute räumliche Auflösung erreichen. Wie viele Messpunkte pro km² erzeugt werden können, hängt dabei von der Größe des Untersuchungsgebiets, der Messdauer und dem eingesetzten Geräteträger ab. Bei den numerischen Modellsimulationen wird die räumliche Auflösung durch die Modellauflösung bestimmt. Diese liegt üblicherweise zwischen 0,5 und 10 Metern, sodass sowohl Simulationen mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung möglich sind, wie auch Simulationen, die nur einen groben Überblick über die klimatische Situation des Untersuchungsraums liefern.

Ähnlich wie bei der räumlichen Auflösung ist auch die maximale Untersuchungsgebietsgröße stark abhängig von der gewählten Methodik. Die Untersuchungsgegenstände, die durch stationäre Messungen erfasst werden sollen, beziehen

sich in der Regel auf die gesamtstädtische Ebene. Dementsprechend ist das Untersuchungsgebiet für die Messmethode entsprechend groß. Die Untersuchungsgebietsgröße für mobile kontinuierliche Messungen ist stark abhängig vom gewählten Geräteträger. Für die numerischen Modellierungen ergibt sich die maximale Untersuchungsgebietsgröße aus der Modellauflösung und der maximalen Modellgröße. Beim eingesetzten Envi-met Modell liegt die maximale Untersuchungsgebietsgröße bei 6,25 km². In der Praxis wird allerdings meist eine bessere räumliche Auflösung benötigt, sodass die Untersuchungsgebietsgröße kleiner wird. Die maximale Untersuchungsgebietsgröße der Matrix-Methode kann zwischen den Modellierungs- und den mobilen Messverfahren eingeordnet werden.

Mobile Messungen sollten möglichst während autochthonen Strahlungswetterlagen durchgeführt werden. Diese Abhängigkeit besteht bei den anderen untersuchten Methoden nicht. Stationäre Messungen werden in der Regel über einen sehr langen Zeitraum durchgeführt, sodass verschiedene Wetterlagen erfasst werden. Die Matrix-Methode ist ebenfalls unabhängig von Wetterlagen. Bei einer Bestandsaufnahme im Winter muss allerdings darauf geachtet werden, dass die Vegetationswahrnehmung im Vergleich zum Sommer verändert ist. Durch das fehlende Laub an den Bäumen kann es zu einer Unterschätzung des Vegetationsanteils kommen. Zusätzlich sollte die Bestandsaufnahme nicht durchgeführt werden, wenn Schnee liegt, da dieser die Erfassung der Oberflächenindikatoren erschwert. Numerische Simulationen können völlig unabhängig von der Wetterlage durchgeführt werden. Für die Bestandsaufnahme, die zur Erstellung des Simulationsmodells benötigt wird, sind dieselben Rahmenbedingungen wie für die Matrix-Methode zu beachten.

Eins der Hauptziele bei der Entwicklung der Matrix-Methode war es, ein Verfahren zu entwickeln, das es den Gemeinden ermöglicht, selbstständig die siedlungsökologische Situation vor Ort zu analysieren. Aus diesem Grund ist das benötigte Vorwissen für die Anwendung der Verfahren von besonderer Bedeutung. Bei beiden Messverfahren wird für die Planung der Messstandorte bzw. der Messroute eine Vorababschätzung der zu erwartenden Ergebnisse benötigt. Dazu ist ein fundiertes klimatologisches Vorwissen erforderlich. Die richtige Klassifizierung der Oberflächen und Modellobjekte zur Erstellung des Simulationsmodells erfordert großes Vorwissen über die Auswirkungen der Elemente auf das lokale Klima. Zusätzlich erfordert der Einsatz von numerischen Modellierungen ein hohes technisches Verständnis, da die meisten Simulationspro-

gramme nicht intuitiv zu bedienen sind. Für die Anwendung der Matrix-Methode wird kein besonderes Vorwissen benötigt. Bei der Auswahl der benötigten Programme wurde darauf geachtet, dass diese auch im normalen Planungsablauf der Gemeinden eingesetzt werden und somit dem Anwender bekannt sind. Die Bestandsaufnahme der Matrix-Methode kann über die entwickelte App Schritt für Schritt sehr intuitiv durchgeführt werden, sodass auch an dieser Stelle kein besonderes Vorwissen benötigt wird.

Ein weiteres Kriterium bei der Entwicklung der Matrix-Methode waren die möglichst geringzuhaltenden Kosten. Diese setzen sich aus den Kosten für Hard- und Software sowie dem Arbeitsaufwand zusammen. Der Arbeitsaufwand wird für die Bewertung noch einmal in den Vorbereitungs- und den Durchführungsaufwand unterschieden. Die für die beiden Messverfahren benötigten Messgeräte stellen einen erheblichen Kostenfaktor dar. Die Anschaffungs- bzw. Mietkosten sorgen dafür, dass diese Verfahren von finanzschwachen Gemeinden nicht durchgeführt werden können. Für die mobilen Messverfahren besteht neben dem Einsatz eines für Siedlungsklimaanalysen optimierten Geräteträgers auch die Möglichkeit, günstigere Handgeräte einzusetzen. Wie die in Dansenberg durchgeführte Lufttemperaturmessung zur Validierung der nächtlichen Überwärmung gezeigt hat, liefern diese Messgeräte keine ausreichend belastbaren Ergebnisse. Die numerischen Modellsimulationen erfordern neben der benötigten Softwarelizenz auch einen sehr leistungsstarken Computer, sodass für dieses Verfahren ebenfalls erhebliche Kosten entstehen können. Für die Anwendung der Matrix-Methode wird Software verwendet, die üblicherweise in den Planungsämtern bereits im Einsatz ist. Sollten die benötigten Lizenzen nicht vorhanden sein, können die Arbeitsschritte ebenfalls in kostenlosen Programmen durchgeführt werden. Für die Nutzung der App im Rahmen der Bestandsaufnahme wird ein Android Smartphone oder Tablet benötigt. Da kein besonders leistungsfähiges Gerät benötigt wird, sind die Anschaffungskosten eines neuen Geräts sehr gering (ca. 100 – 150 Euro).

Der Vorbereitungsaufwand für die Durchführung der Matrix-Methode ist im Vergleich zu den anderen untersuchten Methoden als gering einzustufen. Für die Bestandsaufnahme vor Ort müssen als Vorbereitung zuerst die Untersuchungs-raster und damit der Untersuchungsraum definiert werden. In einem weiteren Schritt wird die Plangrundlage entsprechend der Raster gekachelt und für die Bestandsaufnahme auf das Tablet oder Smartphone übertragen. Diese Arbeitsschritte können je nach Erfahrung mit den benötigten Programmen sehr schnell

durchgeführt werden. Die Planung der Messstandorte für eine stationäre Messung bzw. die Festlegung der Messroute für eine mobile Messung erfordert eine Abschätzung der zu erwartenden Ergebnisse. Darüber hinaus ist eine detaillierte Analyse der Siedlungsstruktur und der Besonderheiten des Untersuchungsraums notwendig. Die Vorabanalyse benötigt deutlich mehr Arbeitszeit als die Vorbereitungen für die Durchführung der Matrix-Methode. Für die Durchführung einer numerischen Simulation muss zunächst ein Modell des Untersuchungsraums erstellt werden. Ein Modell mit einem hohen Detaillierungsgrad kann nur in Verbindung mit einer aufwendigen Bestandsaufnahme vor Ort erstellt werden. Die Modellerstellung und die dazugehörige Bestandsaufnahme bedeuten einen hohen Arbeitsaufwand, der zu einem Anstieg der Kosten führt.

Der Durchführungsaufwand einer stationären Messung kann als gering bewertet werden. Nachdem die Messstationen an den entsprechenden Standorten aufgebaut sind, laufen die Messgeräte autonom. In Abhängigkeit des eingesetzten Modells müssen in regelmäßigen Abständen die Akkus getauscht und die Datenlogger ausgelesen werden. Die Durchführung einer mobilen Messung ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Um belastbare Werte zu erhalten, muss die Messstrecke mehrfach zurückgelegt werden. In Abhängigkeit des Untersuchungsgegenstands müssen sowohl Tag- wie auch Nachtmessungen durchgeführt werden. So entstehen durch den hohen Zeitaufwand erhebliche Kosten für die Gemeinde. Der Durchführungsaufwand einer numerischen Simulation ist zwischen den beiden Messverfahren einzuordnen. Dieser setzt sich aus der Einrichtung der Simulation und der Aufbereitung der simulierten Daten zusammen. Die Anwendung der Matrix-Methode ist mit einem geringen Durchführungsaufwand verbunden. Für die Bestandsaufnahme vor Ort müssen die einzelnen Raster nur einmal abgelaufen und bewertet werden. Durch die Nutzung der App können die aufgenommenen Daten im weiteren Arbeitsablauf weitestgehend automatisiert mit Hilfe von Makros und Skripten weiterverarbeitet werden. Diese Vorgehensweise spart bei der Anwendung der Matrix-Methode Arbeitszeit und damit verbunden Kosten ein.

Aus den Eigenschaften der einzelnen Methoden lassen sich verschiedene Einsatzfelder für die Planung ableiten. Stationäre Messungen eignen sich besonders für einen langen Messzeitraum für Untersuchungsgegenstände, die keine hohe räumliche Auflösung benötigen. Dieses Messverfahren ermöglicht die lückenlose Erfassung von Werten zur Erstellung eines interstationären Vergleiches. In der Praxis werden Sondermessnetze genutzt, um Vergleiche zwischen verschiedenen Stadtteilen durchzuführen oder die aufgenommenen Daten mit

Grenz-, Richt- und Leitwerten abzugleichen [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 9, 2004, 61]. Mobile Messungen werden am besten für Fragestellungen eingesetzt, die eine hohe räumliche Auflösung benötigen. Durch die Wahl des Geräteträgers kann die maximale Untersuchungsgebietsgröße bestimmt werden, sodass sich sowohl kleine wie auch große Untersuchungsgebiete analysieren lassen. Für die Planung ist besonders der Nachweis von Wärmeinseln und Luftschadstoffen von Bedeutung. Durch die Möglichkeit, nicht nur den Ist-Zustand zu analysieren, sondern ebenfalls mögliche Planungsvarianten zu simulieren, eignen sich die numerischen Modellsimulation in erster Linie zur Alternativenbewertung im Planungsprozess.

Für die Eingrenzung des Einsatzfeldes der Matrix-Methode muss besonders die Tatsache berücksichtigt werden, dass im Rahmen der Matrix-Methode kein direkter Nachweis von bestimmten Stadtklimaphänomenen erbracht werden kann, sondern nur eine Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt wird. Um daraus konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten reicht die erzielte Ergebnisqualität nicht aus. Vielmehr kann die Matrix-Methode für die Vorabanalyse einer Siedlung eingesetzt werden. So wird den Gemeinden die Möglichkeit gegeben, die siedlungsökologische Situation selbstständig zu analysieren und mögliche Risiko- und Potenzialgebiete zu identifizieren. Diese Gebiete können dann im Anschluss durch andere Methoden weitergehend untersucht werden. Auf diese Weise können viele Flächen der Siedlung, die nur einen geringen Einfluss auf das Siedlungsklima besitzen, von detaillierten Untersuchungen ausgeschlossen werden. Auf diese Weise wird eine erhebliche Kosteneinsparung erreicht. Zusätzlich wird durch die Anwendung der Matrix-Methode in den Gemeinden das Bewusstsein über die Auswirkungen des Siedlungskörpers auf das Mikroklima geschärft. Auf diese Weise wird im besten Fall innerhalb der Gemeinden ein Umdenkungsprozess in Gang gesetzt, der dazu führen kann, dass klimatische Belange im Planungsprozess stärker berücksichtigt werden [HENNINGER & LEITE 2017, 398].

Tab. 11: Gesamtbetrachtung relevanter Siedlungsklimaerfassungsmethoden im Vergleich zur Matrix-Methode [Eigene Darstellung 2017]

	Stationäre Messungen	Mobile Messungen (kontinuierlich)	Numerische Modellierungen	Matrix-Methode
Erfassbare Klimafaktoren	viele	mittel	sehr viele	keine direkte Erfassung möglich
Ergebnisqualität	sehr gut	gut	abhängig von Modell	mittel
Max. Räumliche Auflösung	sehr schlecht	sehr gut	sehr gut	mittel
Größe des Untersuchungsgebiet	groß	mittel	klein	mittel
Witterungsabhängigkeit	-	sehr hoch	-	-
Zeitliche Auflösung	sehr gut	gut	gut	keine Differenzierung möglich
Vorwissen	erforderlich (klimatologisch)	erforderlich (klimatologisch)	erforderlich (klimatologisch & technisch)	nicht erforderlich
Kosten (Geräte bzw. Software)	Sehr hohe Gerätekosten	Hohe Gerätekosten	Lizenzgebühren und leistungsstarker PC	gering
Vorbereitungsaufwand	mittel	sehr hoch	sehr hoch	gering
Durchführungsaufwand	gering	hoch	mittel	gering
Optimales Einsatzfeld	Langzeitmessungen zur Bewertung von Stadtteilen	Kleine bis mittelgroße Untersuchungs-räume	Alternativen Bewertung / Prognosen	Kleine Siedlungen (Vorabanalysen)

8. Fazit und Ausblick

8.1. Fazit

Klimaveränderungen durch den Menschen finden auf nahezu allen Maßstabsebenen statt. Diese Veränderungen reichen vom globalen Klimawandel bis hinunter zu Fragen des Windkomforts bei der Errichtung von einzelnen Gebäuden. Für die Raumplanung ergeben sich dabei besonders Handlungsfelder bei der Betrachtung des durch die Städte verursachten Stadtklimawandels [UMWELTBUNDESAMT 2017, o. S.]. In der Vergangenheit wurde bei der Betrachtung von Stadtklimaphänomenen der Fokus meist auf große Städte gelegt. Aber auch in kleinen Siedlungen kommt es, besonders durch den Eintrag von anthropogenen Materialien, zu Veränderungen des lokalen Klimas.

Die auftretenden Stadtklimaphänomene können durch eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden untersucht werden. Für die Raumplanung sind besonders die Erfassung von Klimafaktoren durch stationäre und mobile Messungen und der Einsatz von numerischen Modellsimulationen von Bedeutung. Diese Methoden unterscheiden sich erheblich in Kriterien wie der räumlichen und zeitlichen Auflösung, der maximalen Untersuchungsgebietsgröße oder der Witterungsabhängigkeit. Gemeinsam sind diesen Methoden besonders die hohen entstehenden Kosten für die Gemeinden und die Anwendungskomplexität. Durch hohe Anschaffungskosten der benötigten Geräte oder der Modellierungssoftware entstehen zusammen mit einem hohen Vorbereitungs- und Durchführungsaufwand erhebliche Kosten für kleine Kommunen. Zusätzlich wird für die Planung der Messstandorte und -routen bzw. für die Erstellung eines Simulationsmodells Expertenwissen benötigt, das durch die Gemeinden in der Regel nicht geleistet werden kann.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Matrix-Verfahren ermöglicht es Gemeinden, Siedlungsklimaanalysen selbstständig durchzuführen. Dabei werden die Klimaparameter, die zum Stadtklimanachweis genutzt werden, nicht direkt gemessen oder simuliert. Stattdessen werden natürliche und anthropogene Indikatoren, die das lokale Klima im Siedlungsraum beeinflussen, erfasst und untereinander in Bezug gesetzt. Die dabei genutzten Wirkungszusammenhänge ermöglichen eine Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von verschiedenen Stadtklimaphänomenen. Um den Anforderungen von kleinen Gemeinden gerecht zu werden, werden die für diese Siedlungen relevanten Themenbereiche urbane Überwärmung, urbane Frisch- und Kaltluftversorgung und urbaner Wasserhaushalt durch das Matrix-Verfahren untersucht. Ein zentraler Bestandteil

der Matrix-Methode stellt die Erfassung der verwendeten Indikatoren dar. Durch klassische Bestandsaufnahmeverfahren, wie der Luftbildauswertung oder einer Bestandsaufnahme vor Ort, können die Indikatoren nicht in dem benötigten Detaillierungsgrad erfasst werden. Mit der neu entwickelten Android-App „ÖkoHaSie“ werden die Vorteile der untersuchten Bestandsaufnahmeverfahren kombiniert. Die App ermöglicht eine unkomplizierte, smartphone- bzw. tabletgestützte Erfassung der relevanten Indikatoren vor Ort.

Für die Validierung der Matrix-Methode wurden drei Untersuchungsräume mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen gewählt. Der Ortsbezirk Dansenberg repräsentiert mit ca. 2.600 Einwohnern und der überwiegenden Bebauung durch freistehende Einfamilienhäuser typische kleine Siedlungen in Deutschland. Mit dem Untersuchungsraum „Alex-Müller-Straße Kaiserslautern“ wurde darüber hinaus ein Untersuchungsraum analysiert, der in Stadtrandlage einer Großstadt liegt. Der Untersuchungsraum „Kaiserslautern Innenstadt“ ist stark durch die städtische Struktur geprägt. Die Ergebnisse der Matrix-Methode konnten für alle Untersuchungsräume durch den Vergleich mit mobilen Messungen und einer numerischen Modellsimulation bestätigt werden. Das entwickelte Verfahren in Verbindung mit der appgestützten Bestandsaufnahme kann demnach genutzt werden, um eine Analyse der siedlungsklimarelevanten Untersuchungsgegenstände durchzuführen.

Der abschließende Vergleich der Matrix-Methode mit den für die Planung relevanten bestehenden Erfassungsmethoden zeigt, dass für jede der untersuchten Methoden ein optimales Einsatzgebiet besteht. Aus den Eigenschaften der Matrix-Methode kann abgeleitet werden, dass das optimale Einsatzfeld der Matrix-Methode die siedlungsökologische Vorabanalyse ist. Das Verfahren ermöglicht es Gemeinden, siedlungsklimatische Risiko- und Potenzialflächen selbstständig und wissenschaftlich fundiert zu ermitteln (vgl. Kapitel 7.3). Diese Ergebnisse können genutzt werden, um weitere Untersuchungen zielgerichtet und damit kostengünstig durchzuführen.

8.2. Ausblick

Der Prozess einer Methoden- und Software-Entwicklung beruht auf der stetigen Verbesserung der Grundidee. Im Folgenden werden einige Ansätze aufgezeigt, die zur Weiterentwicklung der Matrix-Methode und der App „ÖkoHaSie“ beitragen können. Der Grundgedanke der Matrix-Methode ist, ein möglichst einfach anzuwendendes Verfahren zu entwickeln, das es den Gemeinden ermöglicht, die siedlungsklimatische Situation des Untersuchungsraums wissenschaftlich

fundiert zu bewerten. Die Verbesserungsansätze können in die Bereiche „Ergebnisqualität“ und „Anwenderfreundlichkeit“ unterteilt werden.

Neben den Wechselwirkungen der siedlungsklimarelevanten Indikatoren, die zur Ausbildung der Stadtklimaphänomene führen, beeinflussen sich auch nebeneinanderliegende Flächen untereinander. Auf einer Grünfläche entstehende Kaltluft kann in den Siedlungskörper eindringen und so zu einer Verringerung der urbanen Überwärmung beitragen. Dieser und ähnliche Effekte können zurzeit durch die Matrix-Methode nur teilweise erfasst werden, da die einzelnen Raster nicht in einen räumlichen Zusammenhang gesetzt werden. Dieser räumliche Bezug ließe sich während der Auswertung oder der Visualisierung der Ergebnisse herstellen, um so die Ergebnisqualität zu verbessern. Dazu werden allerdings sehr tiefgehende GIS- und Virtual-Basic-Kenntnisse benötigt. Vor der Umsetzung dieser Verbesserung müsste zunächst geklärt werden, ob dieser Verknüpfungsprozess so weit zu vereinfachen wäre, dass er durch die Anwender bei den Gemeinden selbstständig durchgeführt werden kann.

Die Ansätze zur Verbesserung der App dienen zur Steigerung der Anwenderfreundlichkeit. Zum einen könnte in einer zukünftigen Version der App ein Übersichtsplan über das gesamte Untersuchungsgebiet integriert werden. Durch Georeferenzierung dieses Plans und die Nutzung der GPS-Funktion des Endgeräts könnte die Orientierung im Untersuchungsgebiet erleichtert werden. Zusätzlich wäre zu prüfen, ob die App soweit umzugestaltet ist, dass die Reihenfolge der Raster während der Bestandsaufnahme nicht durch die Raster-ID vorgegeben, sondern durch den Nutzer frei gewählt wird. Für diese Auswahl könnte der zuvor beschriebene Übersichtsplan verwendet werden, auf dem der Nutzer das zu untersuchende Raster durch antippen auswählt.

Literaturverzeichnis

- ADAM, K. & T. GROHÉ (1984): Ökologie und Stadtplanung – Erkenntnisse und praktische Beispiele integrierter Planung. Köln.
- AHRENS, D. (1981): Untersuchungen über die Wärmeinsel und die Mischungsschicht einer Großstadt. In: Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology, Series B, 29, pp. 29-36.
- AICHELE, C. & M. SCHÖNBERGER (2016): App-Entwicklung - effizient und erfolgreich: Eine kompakte Darstellung von Konzepten, Methoden und Werkzeugen Taschenbuch. Heidelberg.
- ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Darmstadt.
- BALDINELLI, G., BONAFONI, S., ANNIBALLE, R., PRESCIUTTI, A., GIOLI, B. & V. MAGLIULO (2015): Spaceborne detection of roof and impervious surface albedo: Potentialities and comparison with airborne thermography measurements. In: Sol. Energy 2015, 113, pp. 281–294.
- BAUMGARNTER, A., MAYER, H. & E.-M. NOACK (1985): Stadtklima Bayern – Abschlussbericht zum Teilprogramm „Thermalkartierung“. In: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Reihe 39, München.
- BAUNVO (2017): Baunutzungsverordnung – Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke. Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Januar 1990, letzte Änderung 04.05.2017 (BGBl. I S. 1057).
- BECKMANN, R.H. (1994): Ökologische Standards im Siedlungsbereich: Flächenbezogene Kennwerte zur Erhebung, Bewertung und Normierung, dargestellt an Beispielen in Stadt und Landkreis Kaiserslautern. Kaiserslautern.
- BEHRENS, U. & K. HOFFMANN [Hrsg.] (2016): Bericht – Stadtklimatische Untersuchungen in Leipzig. Ergebnisse statistischer Auswertungen langjähriger Klimareihen sowie temporärer Stations- und Profilmessungen. DEUTSCHER WETTERDIENST [Hrsg.] Potsdam.

- BLESKE, C. (2013): Java für Android: Native Android-Apps programmieren Taschenbuch. Haar.
- BLUME, H., HORN, R. & S. THIELE-BRUHN (2010): Handbuch des Bodenschutzes. Weinheim.
- BOCHOW, M. (2010): Automatisierungspotenzial von Stadtbiotopkartierungen durch Methoden der Fernerkundung. Berlin.
- BOEDDINGHAUS, G. & K.J. GRIGOLEIT (2014): BauNVO - Baunutzungsverordnung: Handkommentar. Heidelberg, München.
- BÖHM, R. (1998): Urban bias in temperature time series - a case study for the City of Vienna, Austria. In: Climatic Change 38, pp. 113-128.
- BONACQUISTI, V., CASALE, G.R., PALMIERI, S. & A.M. SIANI (2006): A canopy layer model and its application to Rome. In: Science of the Total Environment 364, pp. 1-13.
- BONGARDT, B. (2006): Stadtklimatologische Bedeutung kleiner Parkanlagen – dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. In: Essener Ökologische Schriften, Bd. 24. Hohenwarsleben.
- BRÜNDL, W.; MAYER, H. & A. BAUMGARTNER (1987): STADTKLIMA BAYERN – Abschlußbericht zum Teilprogramm „Klimamessungen München“. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Reihe Materialien Nr. 43.
- BRUSE, M. (1999): Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima. Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen. Bochum.
- BÜNING, H. & G. TRENKLER (1994): *Nichtparametrische statistische Methoden*. Berlin.
- CHANDLER, T.J., (1965): The climate of London. London, Hutchinson.
- DAVIS, F.D. (1986): A Technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: Theory and results. Massachusetts.

- DIEDRICHS, M. (2012): *Risikomanagement und Risikocontrolling*. München.
- DIN 1986-100 (2016): Planung und Ausführung von Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056. Berlin.
- DANZEISEN, H. (1983): Experimentelle Untersuchung bodennaher Lufttemperatur- und Feuchteverteilungen in Stadtgebieten mit Hilfe eines Meßwagens. In: LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ RHEINLAND-PFALZ [Hrsg.] (1983): *Landschaftsökologie: Boden - Klima - Fauna - Flora. Beiträge zur Landespflege in Rheinland-Pfalz, Bd. 9*. Oppenheim.
- EIS, D., HELM, D., LAUßMANN, D. & K. STARK (2010): *Klimawandel und Gesundheit - Ein Sachstandsbericht*. Berlin.
- EISENHARDT, T. (2008): *Mensch und Umwelt: Die Wirkungen der Umwelt auf den Menschen*. Wien, Dublin, Warschau, Istanbul.
- ELLEFSEN, R. (1987): *Urban Terrain Zone Characteristics*. Maryland.
- ERIKSEN, W. (1976): Die städtische Wärmeinsel. In: *Geographische Rundschau*, 28, pp. 368-373.
- ENGESSER, H. [Hrsg.] (2013): *Duden Informatik. Ein Sachlexikon für Studium und Praxis*.
- FABISCH, M. & S. HENNINGER (2015): Smartphonegestützte Bestandsaufnahme zur ökologischen Bewertung von Siedlungsräumen. In: SCHRENK, M., POPOVICH, V. & ZEILE, P. [Hrsg.]: *Proceedings of RealCORP 2015*. Gent.
- FABISCH, M. & S. HENNINGER (2014): Urban-Ecological Survey for Small Settlements. In: *Open Journal of Ecology*, 4, pp. 591-600.
- FENG, J.Z. & D.E. PETZOLD (1988): Temperature trends through urbanization in metropolitan Washington, D.C., 1945-1979. In: *Meteorology and Atmospheric Physics* 38, pp. 195-201.
- FOKAIDES, P.A., KYLILI, A., NICOLAOU, L. & L. BYRON (2016): The effect of soil sealing on the urban heat island phenomenon. In: *Indoor and Built Environment Vol 25, Issue 7*, pp. 1136-1147.

- GARSTANG, M., TYSON, P.D. & G.D. EMMIT (1975): The structure of heat islands. In: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 13, pp. 139-165.
- GASSNER, E. & A. WINKELBRANDT (2010): *UVP und strategische Umweltprüfung: Rechtliche und fachliche Anleitung für die Umweltverträglichkeitsprüfung*. Heidelberg.
- GAUR, A., TRIPATHI, S.N., KANAWADE, V.P., VINOD, T. & S.P. SHUKLA (2014): Four-year measurements of trace gases (SO₂, NO_x, CO, and O₃) at an urban location, Kanpur, in Northern India. In: *Journal of Atmospheric Chemistry*, 71, pp. 283-301.
- GERST, F., BUBENZER, O. & B. MÄCHTLE (2011): *Klimarelevante Einflüsse urbaner Bodeninanspruchnahme (Deutsche Langfassung)*. Heidelberg.
- GISEKE, U., HOLTSMANN, K., HUCKE, J., LYNAR, W., MÜLLER, H., REINECKE, A. & R. SANDER (1988): Städtebauliche Lösungsansätze zur Verminderung der Bodenversiegelung als Beitrag zum Bodenschutz. In: *Schriftenreihe „Forschung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau*, Heft Nr. 456.
- HAEGER-EUGENSSON, M., & B. HOLMER (1999): Advection caused by the urban heat island circulation as a regulating factor on the nocturnal urban heat island. *International Journal of Climatology* 19, pp. 975-988.
- HAIDER, T. (1997): Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. In: *Energy and Buildings* 25, pp. 99-103.
- HANTEL, M. (2016): *Einführung Theoretische Meteorologie*. Heidelberg.
- HELBIG, A. (1999): *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Heidelberg.
- HENNING, I. (1994): *Hydroklima und Klimavegetation der Kontinente*. Münster.
- HENNINGER, S. (2011): *Stadtökologie*. Paderborn.
- HENNINGER, S. & A., LEITTE (2017): Applied and Planning-Oriented Urban Climatology at the University of Kaiserslautern, In: Filho, W. L. [Hrsg.]: *Climate Change Research at Universities*. Hamburg.

- HUPFER, P. & W. KUTTLER (2006): Witterung und Klima. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden.
- HUTTNER, S. (2012): Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met. Mainz.
- ILLGEN, M. (2009): Das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen und seine urbanhydrologische Quantifizierung. Kaiserslautern.
- JAUREGUI, E. (1993): Mexico city's urban heat island revisited. In: Erdkunde 47, pp. 185-195.
- KAPPAS, M. (2009): Klimatologie. Klimaforschung im 21. Jahrhundert - Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften. Heidelberg.
- KARACA, M., TAYANC, M. & H. TOROS (1995): Effects of urbanization on climate of Istanbul and Ankara. In: Atmospheric Environment 29, pp. 3411-3421.
- KATSOLIS, B.D. & G.A. THEOHARATOS (1985): Indications of the urban heat island in Athens, Greece. In: Journal of Applied Meteorology and Climatology 24, pp. 1296-1302.
- KOLOKOTRONIM, M. & R. GIRIDHARAN (2008): Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. In: Solar Energy 82, pp. 986-998.
- KOPPE, C., KOVATS, S., JENDRITZKY, G. & B. MENNE (2004): Heat-waves: risks and responses. Copenhagen.
- KOZUCHOWSKI, K., TREPINSKA, J. & J. WIBIG (1994): The air temperature in Cracow from 1826 to 1990: persistence, fluctuations and the urban effect. In: International Journal of Climatology 14, pp. 1035-1049.
- KUTTLER, W. (1997): Städtische Klimamodifikation. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE [Hrsg.]: Umwelt- und Klimabeeinflussung durch den Menschen / 4 (VDI Berichte Nr. 1330). Düsseldorf.
- KUTTLER, W. (1998): Stadtklima. In: SUKOPP, H. & R. WITTIG [Hrsg.]: Stadtökologie. Ein Fachbuch für Studium und Praxis. Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm.

- KUTTLER, W. (2013): *Klimatologie*. Paderborn.
- LANDSBERG, H.E. (1981): *The urban climate*. New York, Academic Press.
- LEIBUNDGUT, C. (2007): *Abflussbildung und Einflussgebietsmodellierung*. Freiburg.
- LEMONSU, A. & V. MASSON (2002): Simulation of a summer urban breeze over Paris. In: *Boundary-Layer Meteorology* 104, pp. 463-490
- LESER, H. & C. CONRADIN (2008): *Stadtökologie in Stichworten*. Berlin.
- LINDBERG, F., HOLMER, B. & S. THORSSON (2008): Solweig 1.0 - modelling spatial variations of 3d radiant uxes and mean radiant temperature in complex urban settings. In: *International Journal of Biometeorology*, 52, pp. 697-713.
- LIVADA, I., SANTAMOURIS, M., NIACHOU, K., PAPANIKOLAOU, N. & G. MIHALAKOU (2002): Determination of places in the great Athens area where the heat island effect is observed. In: *Theoretical and Applied Climatology* 71, pp. 219-230.
- LOUIS, D. & P. MÜLLER (2007): *Das Java 6 Codebook*. Boston.
- MATZARAKIS, A., RUTZ, F. & H. MAYER (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the rayman model. In: *International Journal of Biometeorology*, 51, 2007, pp. 323-334.
- MAYER, H. (1986): Zielsetzung und Konzeption des Forschungsvorhaben STADTKLIMA BAYERN. In: *Mitt. Geogr. Gesellschaft München* 71, pp. 21-39.
- MAYER, H. (1992): Planungsfaktor Stadtklima. In: *Münchener Forum, Berichte und Protokolle* Nr. 107, pp. 167-205.
- MAYER, H. & P. HÖPPE (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. In: *Theoretical and Applied Climatology* 38, pp. 43-49.

- MEINEL, G., HECHT, R. & W. SOCHER (2006): Städtisches Grünvolumen – neuer Basisindikator für die Stadtökologie? Bestimmungsmethodik und Ergebnisbewertung. In: SCHRENK, M. [Hrsg.] (2006): CORP 2006 & Geomultimedia06, Wien.
- MEßER, J. (1997): Auswirkungen der Urbanisierung auf die Grundwasser-Neubildung im Ruhrgebiet: unter besonderer Berücksichtigung der Castroper Hochfläche und des Stadtgebietes Herne, In: DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, Band 58.
- MORENO-GARCIA, M.C. (1994): Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. In: International Journal of Climatology 14, pp. 705-710.
- OKE, T.R. (1973): City size and the urban heat island. In: Atmospheric Environment 7, pp. 769-779.
- OKE, T.R. (1976): The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. In: Atmosphere 14, pp. 268-277.
- OKE, T.R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108, pp. 1- 24.
- OKE, T. R. (2008): Urban observations. Guide to meteorological instruments and methods of observation, Part II of Observing Systems, 7th ed. In: WMO-No. 8, pp. II- 11-1–II-11-25.
- OKE, T.R. & C. EAST (1971): The urban boundary layer in Montreal. In: Boundary-Layer Meteorology 1, pp. 411-437.
- OKE, T.R., JOHNSON, G.T., STEYN, D.G. & I.D. WATSON (1991): Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 2: Diagnosis of causation. In: Boundary-Layer Meteorology 56, pp. 339-358.
- OKE, T.R. & G.B. MAXWELL (1975): Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. In: Atmospheric Environment 9, pp. 191-200.
- OTTE, U. (1999): Häufigkeit von Sturmböen in den letzten Jahren. In: DEUTSCHER WETTERDIENST [Hrsg.]: Klimastatusbericht. Potsdam.

- PARK, H.-S. (1986): Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. In: Atmospheric Environment 20, pp. 1859-1866.
- PAUL, M.J. & J.L. MEYER (2001): STREAMS IN THE URBAN LANDSCAPE. In: Annual Review of Ecology and Systematics 32, pp. 333–365.
- PLANZV (2017): Planzeichenverordnung - Verordnung über die Ausarbeitung der Bauleitpläne und die Darstellung des Planinhalts. Planzeichenverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Dezember 1990 (BGBl. 1991 I S. 58), letzte Änderung 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1057).
- POHL W., SCHULZE, H.-D. & M. GROßMANN (1984) Gutachten: Werte für die Landschaftsplanung – Grünvolumenzahl und Bodenfunktionszahl. In: UMWELTBEHÖRDE HAMBURG [HRSG.]: Schriftenreihe der Umweltbehörde Hamburg, Heft 9/1984.
- SAUMWEBER, W. (2016): Schnelleinstieg Swift 2: In neun praxisbezogenen Schritten die Programmiersprache für iOS-Apps erlernen. Haar.
- SCHERER, D., FEHRENBACH, U., LAKES, T., LAUF, S., MEIER, F. & C. SCHUSTER (2013): Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. In: Journal of the Geographical Society of Berlin, Vol. 144, No. 3-4, pp. 238-259.
- SCHLÜNZEN, K.H. (2012): Wärmeinsel im Treibhaus. In: Spektrum der Wissenschaft, 4/12, pp. 24-27.
- SCHÖNWIESE, C. (2008): Klimatologie. Stuttgart.
- SCHREIBER, U. (2012): Luftschadstoff- und Treibhausgasemission in Sachsen. Leipzig.
- SHAHGEDANOVA, M., BURT, T.P. & T.D. DAVIES (1997): Some aspects of the three-dimensional heat island in Moscow. In: Theoretical and Applied Climatology 17, pp. 1451-1465.
- SIEVERS, U. (1995): Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. In: Meteorologische Zeitschrift, 4, 1995, pp. 3-15.

- SIMON, H. (2016): Modeling urban microclimate - Development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met. Mainz.
- SONG, Y. (2003): Kaltluft und Kaltluftschneisen als Planungsfaktor zur Verbesserung der Luftqualität. Berlin.
- SPINDLER, H. (2014): Single-Page-Web-Apps. Haar.
- STEWART, I.D. & T.R. OKE (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. In: American Meteorological Society 93 (12), pp. 1879-1900.
- TANENBAUM, A.S. (2012): Computernetzwerke. München.
- VDI RICHTLINIE 3785 (2011): Experimentelle Strukturanalyse - Dehnungsmessstreifen mit metallischem Messgitter - Kenngrößen und Prüfbedingungen, Blatt 2. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE [HRSG.], Düsseldorf.
- VDI-RICHTLINIE 3786 (2008): Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Turbulenzmessung mit Ultraschall-Anemometern, Blatt 12. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE [Hrsg.], Düsseldorf.
- VDI-RICHTLINIE 3787 (2015): Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, Blatt 1. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE [Hrsg.], Düsseldorf.
- VDI-RICHTLINIE 3787 (2008): Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima, Blatt 2. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE [Hrsg.], Düsseldorf.
- VDI-RICHTLINIE 3787 (2003): Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft, Blatt 5. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE [Hrsg.], Düsseldorf.
- VDI-RICHTLINIE 3787 (2004): Umweltmeteorologie - Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen, Blatt 9. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE [Hrsg.], Düsseldorf.
- WEBER, S. (2004): Energiebilanz und Kaltluftdynamik einer urbanen Luftleitbahn. Hohenwarsleben. Hohenwarsleben.

WIESE, J. (2004) Entwicklung von Strategien für einen integrierten Betrieb von SBR-Kläranlagen und Mischkanalisationen Kaiserslautern. Kaiserslautern.

WMO (1983): Commission for Climatology and applications of Meteorology. In: Abridged final report 8th session, WMO-No. 600.

ZMARSLY, E., KUTTLER, W. & H. PETHE (2007): Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen. Stuttgart.

Internetquellen

BONGARDT, B. & A. PUHR (2017): Endlich wieder durchatmen. Mit Baumaßnahmen für ein besseres Stadtklima, aufgerufen unter: <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/ressourcenschonung/bauen/stadtklima/11358.html>, Zugriff: 13.06.2017.

DEUTSCHER WETTERDIENST (2017a): Der Deutsche Wetterdienst untersucht das Klima in der Stadt Leipzig, aufgerufen unter: http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_leipzig/stadtpl_leipzig_node.html, Zugriff: 20.06.2017.

DEUTSCHER WETTERDIENST (2017b): Klimatologische Kenntage, aufgerufen unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=101452>, Zugriff: 20.06.2017.

DEUTSCHER WETTERDIENST (2017c): Messnetzkarte DWD – nebenamtliche Wetterstationen [Wst III]; nebenamtliche Niederschlagsstationen [Nst (A)] – Karte vom 02.05.2016, 11:01 mit 771 Stationen, aufgerufen unter: http://www.dwd.de/DE/derdwd/messnetz/bodenbeobachtung/messnetzkarte_neben_w3_nst_a.pdf?__blob=publicationFile&v=4, Zugriff: 20.06.2017.

DEUTSCHER WETTERDIENST (2017d): Bodenmessnetz, aufgerufen unter: http://www.dwd.de/DE/derdwd/messnetz/bodenbeobachtung/_functions/Teasergroup/bodenmessnetz.html?nn=452720, Zugriff: 20.06.2017.

DIGITAL GLOBE (2017): Standard Imagery, aufgerufen unter: https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/21/Standard_Imagery_DS_10-7-16.pdf, Zugriff: 13.06.2017.

- DRIESEN+KERN GMBH (2017): Mietgeräte, aufgerufen unter: <http://www.driesen-kern.de/messgeraetemieten/index.html>, Zugriff: 20.06.2017.
- EICHHORN, J. (1989): Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modells, aufgerufen unter: http://www.staff.uni-mainz.de/eichhorn/docs/diss_eichhorn_1989.PDF, Zugriff: 12.06.2017.
- ENVI-MET (2017a): ENVI-met Model Architecture, aufgerufen unter: <http://www.envi-met.info/hg2e/doku.php?id=intro:modelconcept>, Zugriff: 20.06.2017.
- ENVI-MET (2017b): ENVI-met Version 4, aufgerufen unter: <http://www.envi-met.info/hg2e/doku.php?id=files:downloadv4>, Zugriff: 20.06.2017.
- ESRI (1998): ESRI Shapefile Technical Description, aufgerufen unter: <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>, Zugriff: 20.06.2017.
- FENNER, D., MÜCKE, H.-G. & D. SCHERER (2015): Innerstädtische Lufttemperatur als Indikator gesundheitlicher Belastungen in Großstädten am Beispiel Berlins, aufgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/innerstaedtische_lufttemperatur_30-38.pdf, Zugriff: 13.06.2017.
- KUUSKERI, J. (2011): Experiences on a Design Approach for Interactive Web Applications, aufgerufen unter: https://www.usenix.org/legacy/event/webapps11/tech/final_files/Kuuskeri.pdf, Zugriff: 20.06.2017.
- LANDESAMT FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ (2017): Aufgaben und Aufbau des Luftmessnetzes, aufgerufen unter: <http://www.luft-rlp.de/aktuell/messnetz/aufbau/>, Zugriff: 20.06.2017.
- LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION RHEINLAND-PFALZ (2017): Digitale Othrofotos (DOP) – Produktbeschreibung, aufgerufen unter: https://lvermgeo.rlp.de/fileadmin/lvermgeo/pdf/produktblaetter/ProduktbeschreibungRP_DOP.pdf, Zugriff: 12.06.2017.
- OKE, T.R. (2006): Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. In: Instruments and observing methods Rep. 81, WMO/TD-No. 1250, S. 47, aufgerufen unter: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1250.pdf, Zugriff: 12.06.2017.

- POKRESS, C.S. & J.J.D. VEIGA (2013): MIT App Inventor Enabling personal mobile computing, aufgerufen unter: <https://arxiv.org/pdf/1310.2830.pdf>, Zugriff: 13.06.2017.
- RICHTER, M., GRUNICKE, U. & R. BÖCKER (2003): Boden- und Flächenressourcen-Management in Ballungsräumen: Entwicklung von Bewertungsrahmen zur Beurteilung der ökosystemaren Potenziale verschiedener Nutzungs- und Strukturtypen im urbanen Bereich, aufgerufen unter: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/Servlet/is/40143/BWC99007SBer.pdf?command=downloadContent&filename=BWC99007SBer.pdf&FIS=203>, Zugriff: 13.06.2017.
- SCHAPPERT, S. (2015): Ein neuer Temperaturrekord in Deutschland, doch wie wurde er, aufgerufen unter: http://www.wetterdienst.de/Deutschland-wetter/Thema_des_Tages/1864/ein-neuer-temperaturrekord-in-deutschland-doch-wie-wurde-er, Zugriff: 20.06.2017.
- SCIENTIFIC SALES (2017): 5900 Remote Monitoring Complete Meteorological System, aufgerufen unter: <https://www.scientificsales.com/Remote-Monitoring-Complete-Meteorological-System-p/5900.htm>, Zugriff: 13.06.2017.
- SCHLÜNZEN, K.H. (2012): Stadtklima im Wandel – Was kommt auf deutsche Städte zu?, aufgerufen unter: http://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/20120118_csc_stadtklima_im_wandel_5_for-web.pdf, Zugriff: 13.06.2017.
- SIEVERS, U. (2016): Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3, Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen, aufgerufen unter: <http://d-nb.info/1103838733/34>, Zugriff: 12.06.2017.
- STADTENTWICKLUNG BERLIN (2007): Oberflächenabfluss, Versickerung, Gesamtabfluss und Verdunstung aus Niederschlägen, aufgerufen unter: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/kb213.pdf, Zugriff: 20.06.2017.
- STADT KAISERSLAUTERN (2017): Bevölkerung in der Kernstadt und in den Ortsbezirken – Einwohner mit Haupt- oder Nebenwohnsitz zum 01.01.2017 (ausgewertet an 11.01.2016), aufgerufen unter: https://www.kaiserslautern.de/arbeit_bildung_wissenschaft/standort/statistik/stadt/index.html.de, Zugriff: 20.06.2017.

- STADT KAISERSLAUTERN (2017): Statistik – Ortsbezirk Dansenberg, aufgerufen unter: https://www.kaiserslautern.de/sozial_leben_wohnen/stadtportrait/ortsbezirke/dansenberg/statistik/index.html.de, Zugriff: 20.06.2017.
- STATISTA (2017a): Urbanisierungsgrad: Anteil der Stadtbewohner an der Gesamtbevölkerung in Deutschland in den Jahren von 2005 bis 2015, aufgerufen unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/662560/umfrage/urbanisierung-in-deutschland/>, Zugriff: 20.06.2017.
- STATISTA (2017b): Anzahl der Einwohner in Deutschland nach Gemeindegrößenklassen (Stand 31.12.2015), aufgerufen unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/161806/umfrage/anzahl-der-einwohner-nach-gemeindegroessenklassen-in-deutschland/>, Zugriff: 20.06.2017.
- T3N DIGITAL PIONEERS (2017): Weltweite Marktanteile: Android frisst iOS und Windows Phone auf, aufgerufen unter: <http://t3n.de/news/android-waechst-ios-verliert-705793/>, Zugriff: 20.06.2017.
- TASPO (2012): „Straßengrün“ im Windkanal: Bäume können Schadstoffgehalt in der Luft erhöhen, aufgerufen unter: <https://taspo.de/unternehmen-produkte/strassengruen-im-windkanal-baeume-koennen-schadstoffgehalt-in-der-luft-erhoehen/#.WUEtsevyiHs>, Zugriff: 19.06.2017.
- TURBAK, F., SANDU, S., KOTSOPOULOS, O., ERDMAN, E., DAVIS, E. & K. CHADHA (2012): Blocks Languages for Creating Tangible Artifacts, aufgerufen unter: <http://cs.wellesley.edu/~fturbak/pubs/VLHCC-2012-paper-turbak.pdf>, Zugriff: 13.06.2017.
- UMWELTBUNDESAMT (2016): Ozon-Belastung, aufgerufen unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/ozon-belastung#textpart-3>, Zugriff: 19.06.2017.
- UMWELTBUNDESAMT (2017): Stadtklimawandel, aufgerufen unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgenanpassung/werkzeuge-der-anpassung/projekt-katalog/stadtklimawandel>, Zugriff: 19.06.2017.
- UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN (2017): Rauchschwadenexperiment, aufgerufen unter: https://www.uni-due.de/imperia/md/images/fb10_geo/klimatologie/rauch_gross.jpg, Zugriff: 20.06.2017.

VAN HOVE, L.W.A., STEENEVELD, G.J., JACOBS, C.M.J., HEUSINKVELD, B.G., ELBERS, J.A., MOORS, E.J. & A.A.M. HOLTSLAG (2011): Exploring the Urban Heat Island Intensity of Dutch cities: Assessment based on a literature review, recent meteorological observations and datasets provided by hobby meteorologists. In: Alterra report 2170, aufgerufen unter: <http://edepot.wur.nl/171621>, Zugriff: 13.06.2017.

WMO (2014): Towards Integrated Urban Weather, Environment and Climate Services, aufgerufen unter: <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/towards-integrated-urban-weather-environment-and-climate-services>, Zugriff: 20.06.2017.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Atmosphärische Wirkungskomplexe [EISENHARDT 2008, 114; verändert].....	6
Abb. 2: Trend der Ozonjahresmittelwerte [UMWELTBUNDESAMT 2016, o. S.]	8
Abb. 3: Wärmeinselintensität in Abhängigkeit der Einwohnergröße (grün = deutsche Städte;orange = weltweite Städte) [SPEKTRUM 2012, o. S.; OKE 1982, 6; verändert]...	11
Abb. 4: Einwohner nach Gemeindegrößenklasse [Eigene Darstellung 2017; Grundlage: STATISTA 2017b, o.S.].....	13
Abb. 5: Local Climate Zones [STEWART & OKE 2012, 1885].....	17
Abb. 6: Klimatische und lufthygienische Untersuchungsmethoden für die räumliche Planung [VDI-RICHTLINIE 3787 BLATT 9 2004, 59]	18
Abb. 7: Messfeld Fichtelberg [SCHAPPERT 2015, o. S.].....	19
Abb. 8: Mobile Klimamessstation [Eigene Aufnahme 2017]	20
Abb. 9: Messfahrzeug für mobile Klimamessungen [DWD 2017, o. S.].....	21
Abb. 10: Rauchschwadenexperiment zum Kaltluftnachweis [UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN 2017, o. S.].....	23
Abb. 11: Physikalisches Stadtmodell im Windkanal [TASPO 2012, o. S.]	25
Abb. 12: Envi-met Modellkonzept [ENVI-MET 2017b, o.S.].....	27
Abb. 13: Envi-met Model Architecture [ENVI-MET 2017a, o. S.].....	29
Abb. 14: Sondermessnetz Stadtklimauntersuchung Leipzig [DWD 2017a, o. S.].....	32
Abb. 15: Risikomatrix (grün = akzeptabel; gelb = akzeptabel mit Schadensminderung; rot = unakzeptabel) [Eigene Darstellung 2017].....	40
Abb. 16: Schematische Matrix-Darstellung [Eigene Darstellung 2017]	41
Abb. 17: Vergleich Rastergröße zur Bestandsaufnahme (links = 25 Meter; Mitte = 50 Meter; rechts = 100 Meter) [Eigene Darstellung 2017]	41
Abb. 18: Empfohlene Themenbereiche und Matrizen zur Anwendung der Matrix-Methode [Eigene Darstellung 2017].....	42
Abb. 19: Matrix "Versiegelungsgrad / Bebauungsdichte" [Eigene Darstellung 2017].....	45
Abb. 20: Matrix "Versiegelungsgrad / Oberflächenfarbe" [Eigene Darstellung 2017].....	47
Abb. 21: Matrix "Versiegelungsgrad / Oberflächenmaterial" [Eigene Darstellung 2017].....	48
Abb. 22: Matrix "Vegetationsanteil / Vegetationsform" [Eigene Darstellung 2017].....	50
Abb. 23: Matrix "Oberflächenrauigkeit / Topographie" [Eigene Darstellung 2017]	51
Abb. 24: Matrix "Vegetationsdichte / Topographie" [Eigene Darstellung 2017].....	52
Abb. 25: Statistische Validierung des Schätzverfahrens [Eigene Darstellung 2017]	66

Abb. 26: Ergebnisvalidierung Schätzverfahren: Versiegelungsgrad [Eigene Darstellung 2017].....	68
Abb. 27: Ergebnisvalidierung Schätzverfahren: Bebauungsdichte [Eigene Darstellung 2017].....	70
Abb. 28: Onlinebestandsaufnahme mit Luftbildgrundlage Geoportal RLP (links) und Google Earth (rechts) [Eigene Darstellung 2017].....	74
Abb. 29: Funktionsweise Web-App [Eigene Darstellung 2017].....	75
Abb. 30: Designansicht App-Inventor (Startseite „ÖkoHaSie“) [Eigene Darstellung 2017].....	79
Abb. 31: Designansicht App-Inventor (Erfassungsseite „ÖkoHaSie“) [Eigene Darstellung 2017].....	80
Abb. 32: Blockansicht App-Inventor (Startbutton „ÖkoHaSie“) [Eigene Darstellung 2017].....	82
Abb. 33: Blockansicht App-Inventor (Button1 „ÖkoHaSie“) (Ausschnitt) [Eigene Darstellung 2017].....	84
Abb. 34: Blockansicht App-Inventor (Ausstiegsbedingung „ÖkoHaSie“) [Eigene Darstellung 2017]	85
Abb. 35: Untersuchungsgebietsabgrenzung (Alex-Müller-Straße Kaiserslautern) mit Rasternummerierung [Eigene Darstellung 2017]	87
Abb. 36: Slice-Funktion (Photoshop) zur Kachelung der Luftbildgrundlage [Eigene Darstellung 2017].....	88
Abb. 37: Startseite der entwickelten ÖkoHaSie-App [Eigene Darstellung 2017]	89
Abb. 38: Screenshot Bestandsaufnahme-App (Raster 42, Frage 7) [Eigene Darstellung 2017].....	90
Abb. 39: Datenexport nach Abschluss der Bestandsaufnahme [Eigene Darstellung 2017].....	91
Abb. 40: Schematische Ausgangssituation Ergebnisaufbereitung [Eigene Darstellung 2017].....	93
Abb. 41: Indikatorenübersicht nach Aufbereitung der Bestandsaufnahmeergebnisse [Eigene Darstellung 2017].....	95
Abb. 42: Berechnungsmatrix Oberflächenrauigkeit [Eigene Darstellung 2017].....	96
Abb. 43: Punktauswertung Matrix "Versiegelungsgrad / Bebauungsdichte" [Eigene Darstellung 2017].....	97
Abb. 44: Attributtabelle der Rastergrundlage nach Verknüpfung mit Matrizenergebnissen [Eigene Darstellung 2017].....	99
Abb. 45: Überwärmungspotenzial „Versiegelungsgrad / Bebauungsdichte“ (Alex-Müller-Straße) [Eigene Darstellung 2017]	100

Abb. 46: Berechnung Gesamtbewertung des Überwärmungspotenzial mittels VB-Skript [Eigene Darstellung 2017].....	101
Abb. 47: Überwärmungspotenzial „Gesamtbewertung Matrizen 1 - 3“ (Alex-Müller-Straße) [Eigene Darstellung 2017].....	102
Abb. 48: Modellansicht Untersuchungsgebiet (Alex-Müller-Straße) [Eigene Darstellung 2017].....	103
Abb. 49: Überwärmungspotenzial Alex-Müller-Straße Kaiserslautern [Eigene Darstellung 2017].....	105
Abb. 50: Kaltluftentstehungspotenzial Alex-Müller-Straße Kaiserslautern [Eigene Darstellung 2017].....	106
Abb. 51: Simulierte Lufttemperatur um 1.00 Uhr (Alex-Müller-Straße) [Eigene Darstellung 2017].....	109
Abb. 52: Simulierte Oberflächentemperatur um 1.00 Uhr (Alex-Müller-Straße) [Eigene Darstellung 2017].....	110
Abb. 53: Messpunkte im Untersuchungsgebiet Dansenberg Kaiserslautern [Eigene Darstellung 2017].....	112
Abb. 54: Überwärmungspotenzial (Dansenberg) [Eigene Darstellung 2017]	114
Abb. 55: Eignung als Kaltluftleitbahn (Dansenberg) [Eigene Darstellung 2017].....	116
Abb. 56: Überlagerung von Überwärmungspotenzial und Lufttemperatur (Tagmessung) [Eigene Darstellung 2017].....	118
Abb. 57: Überlagerung von Überwärmungspotenzial und Lufttemperatur (Nachtmessung) [Eigene Darstellung 2017]	120
Abb. 58: Überlagerung von Ventilationsleitbahneignung und Lufttemperatur (Nachtmessung) [Eigene Darstellung 2017]	122
Abb. 59: Übersicht Untersuchungsraum Innenstadt Kaiserslautern [Eigene Darstellung 2017].....	123
Abb. 60: Überwärmungspotenzial Innenstadt Kaiserslautern (Humboldtstr. = o. l.; Lutrinastr. = o. r.; Polizeipräsidium = u. l.; Stadtpark = u. r.) [Eigene Darstellung 2017].....	125

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Energetische Ursachen der urbanen Wärmeinsel [Oke 1982, 17; verändert].....	9
Tab. 2: UHlmit in verschiedenen Städten [Eigene Darstellung 2017].....	10
Tab. 3: UHlmax in verschiedenen Städten [Van Hove et al.2017, 22; verändert].....	10
Tab. 4: Klimatoptypen [VDI-Richtlinie 3783 Blatt 1 2015, 14 ff.; verändert].....	16
Tab. 5: Einsatzbereiche verschiedener Geräteträger bei einer Messdauer von 2,5 Stunden [VDI-Richtlinie 3785 Blatt 2 2011, 31; verändert].....	21
Tab. 6: Bewertung relevanter Siedlungsklimaerfassungsmethoden [Eigene Darstellung 2017].....	36
Tab. 7: Indikatoren zu Anwendung der Matrix-Methode [Eigene Darstellung 2017].....	43
Tab. 8: Überführung der verbalen Beschreibung in Punktesystem [Eigene Darstellung 2017].....	53
Tab. 9: Bewertung siedlungsökologischer Bestandsaufnahmeverfahren zur Anwendung der Matrix-Methode [Eigene Darstellung 2017].....	62
Tab. 10: Variablenübersicht "ÖkoHaSie" [Eigene Darstellung 2017].....	81
Tab. 11: Gesamtbetrachtung relevanter Siedlungsklimaerfassungsmethoden im Vergleich zur Matrix-Methode [Eigene Darstellung 2017].....	134

Codeverzeichnis

Code 1: VBA-Skript zur Ergebnisaufbereitung.....	94
Code 2: VB-Code zur Matrizenbewertung.....	96
Code 3: Code zur Berechnung der Bewertungspunkte (Matrix 1- 1. Spalte).....	98

Lebenslauf

MARTIN FABISCH

Seit 04/2011

Technische Universität Kaiserslautern

- Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Lehrgebiet „Physische Geographie und Fachdidaktik“

01/2013 – 03/2013

Technische Universität Kaiserslautern

- Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Lehrgebiet „Computergestützte Planungs- und Entwurfsmethoden“

01/2011 - 12/2012

Schildwächter Ingenieure

- Erstellung von computergestützten Visualisierungen für Architektur, Stadt- und Raumplanung
- Erstellung und Pflege von GIS-Datenbanken

STUDIUM

10/2006 – 04/2011

Technische Universität Kaiserslautern



- Studium Raum- und Umweltplanung
- Thema Diplomarbeit : „Einsatzmöglichkeiten von Klimafunktionskarten in der Raumplanung“

04/2006 – 10/2006


Technische Universität Kaiserslautern

- Studium Architektur

PRAKTIKA

- 08/2009 – 09/2009 **Landesbetrieb für Mobilität Rheinland-Pfalz**
-  Erfassung, Dokumentation und Bewertung landespflegerischer Kompensationsflächen
- 03/2003 – 04/2003 **Stadtverwaltung Andernach**
-  Erstellung der GIS-Datenbank „Denkmäler und Kulturgüter der Stadt Andernach“

SCHULBILDUNG

- 08/1996 – 03/2005 **Bertha-von-Suttner Gymnasium, Andernach**
-  Abschluss: Allgemeine deutsche Hochschulreife
- 08/1992 – 07/1996 **Grundschule: Martinschule, Andernach**

Anhang

Android-App „ÖkoHaSie“:

<http://131.246.97.7/Oeko/OekoHaSie.apk>



Excel-Datei zur Bestandsaufnahmeaufbereitung:

<http://131.246.97.7/Oeko/Aufbereitung.xlsm>

Excel-Datei zur Auswertung:

<http://131.246.97.7/Oeko/Auswertung.xlsx>

Startbildschirm „ÖkoHaSie“ und Erfassung „Versiegelungsgrad“

Herzlich Willkommen in der Bestandsaufnahme-App „ÖkoHaSie“,


um eine optimale Ergebnisqualität zu erhalten, achten Sie während der Bestandsaufnahme vor Ort bitte darauf, dass Sie jedes Raster unabhängig und nicht in Relation zu den zuvor aufgenommenen Rastern bewerten. Nach Abschluss der Bestandsaufnahme werden die Ergebnisse automatisch an die E-Mail-App Ihres Tablets übergeben. Sollte nach Abschluss der Bestandsaufnahme kein Internetzugang bestehen, können Sie die E-Mail als Entwurf Eine ausführliche Anleitung zur Nutzung der App finden Sie im Online-Handbuch (<http://131.246.97.7/Oeko/Handbuch.html>).

Wie viele Raster umfasst das Untersuchungsgebiet?

Start

Dipl.-Ing. Martin Fabisch
Technische Universität Kaiserslautern
Lehr- und Forschungseinheit Physische Geographie und Fachdidaktik
martin.fabisch@ru.uni-kl.de
0631 – 205 4507

Wie hoch ist der Versiegelungsgrad?



	0 - 25 %
	26 - 50 %
	51 - 75 %
	76 - 100 %

Erfassungsbildschirm Bebauungsdichte und Oberflächenfarbe

Wie hoch ist die Bebauungsdichte?


	bebauungsfrei (0 %)
	Punktbauung (1 - 25 %)
	aufglockerte Bauung (26 - 50 %)
	dichte Bauung (51 - 75 %)
	sehr dichte Bauung (76 - 100 %)

Was ist die überwiegende Oberflächenfarbe der versiegelten Flächen?

weiß (z. B.: Kies)	blau (z. B.: Kies, Pflaster, Dachschindeln)	grün (z. B.: Kies, Pflaster)	
rot (z. B.: Dachziegel, Fuß- und Radwege)	braun (z. B.: Dachziegel, Pflaster)	grau (z. B.: Dachziegel, Gehwege, Parkplätze, Straßen)	schwarz (z. B.: Dachziegel, Parkplätze, Straßen)

Erfassungsbildschirm Oberflächenmaterial und Vegetationsanteil

19:04




42

Welches ist das überwiegende Oberflächenmaterial der verstegeten Flächen?

- versickerungsfähiges Material (z. B.: Pflastersteine, Schotterrasen, Porenpflaster)
- Schotter- und Kiesflächen (z. B.: Spaltbeton auf Parkplätzen)
- wasserbundene Decken (z. B.: Parkplätze, Stellplätze, Gehwege)
- Pflaster und Plattenbeläge (z. B.: Kopfsteinpflaster, Gehwege, Einfahrten)
- Asphalt- und Betonflächen (z. B.: Fahrbahnen, Gehwege, Parkplätze)


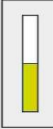


19:04

19:05



42

Wie hoch ist der Vegetationsanteil?

	0 - 25 %
	26 - 50 %
	51 - 75 %
	76 - 100 %

19:05

Erfassungsbildschirm Vegetationform und Topographie

