

Erstellung einer Stadtklimaanalyse für die Stadt Ingelheim am Rhein

Teil 1 – Klimaanalyse und Planungshinweise

im Rahmen des Projekts:

„KlimPraxIng – Klimawandel in der Praxis am Beispiel der
Mittelstadt Ingelheim am Rhein“

Oktober 2023

Förderkennzeichen: 67DAS189

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BEARBEITUNG

Dr.-Ing. René Burghardt
Joann Richtzenhain, B.Sc.
Frederik Hilden, B.Sc.
Swantje Kalthoff
Dipl.-Biol. Nicole Burghardt, M.Sc.

Insofern nicht anders angegeben gilt für alle Abbildungen und Tabellen als Quelle:
Burghardt und Partner, Ingenieure (BPI) - 2023

Auftraggeber (AG)

Stadtverwaltung Ingelheim am Rhein
Abteilung 67/2 – Umwelt- und Klimaschutz,
Grünordnung und Landwirtschaft
Fridtjof-Nansen-Platz 1
55218 Ingelheim am Rhein

**Kontakt**

Tel.: +49 6132 782257
E-Mail: klimaschutz@ingelheim.de

Auftragnehmer (AN)

Burghardt und Partner, Ingenieure
Am Sonnenhang 4
34128 Kassel

**BPI**

Burghardt und Partner, Ingenieure

Ansprechpartner

Dr. René Burghardt
Tel.: +49 561 76678963
E-Mail: info@lp-kassel.de

Gestattungserklärung / Erklärung des Verfassers:

Hiermit überträgt der Auftragnehmer dem Auftraggeber die Nutzungsrechte hinsichtlich der vorliegenden Ausarbeitung

ERSTELLUNG EINER STADTKLIMAANALYSE

KLIMPRAXING - STADT INGELHEIM AM RHEIN

gez.

Dr. René Burghardt

Kassel im Oktober 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	8
1.1	Projekt „KlimPraxing“	8
1.2	Auftragsgegenstand.....	9
2	Fachlicher Hintergrund	10
2.1	Stadtklima.....	10
2.2	Temperatur und städtische Wärmeinsel	12
2.3	Vegetation und städtisches Grün	14
2.4	Regionaler Wind und städtische Durchlüftung	15
2.4.1	Rauigkeit und Porosität	17
2.4.2	Luftleitbahnen	19
2.4.3	Strömungsregime	20
2.5	Flurwind und Kaltluft	21
3	Methodisches Vorgehen und verwendete Software.....	24
3.1	Ableitung der Klimafunktionskarte.....	26
3.2	Ableitung der Planungshinweiskarte.....	27
3.3	Technische Umsetzung	28
3.4	Verwendete Software	30
3.4.1	Geoinformationssystem.....	30
3.4.2	Kaltluftproduktion und -abfluss.....	30
3.4.3	Windfeldsimulation	31
4	Charakterisierung des Untersuchungsraums	32
4.1	Räumliche Charakterisierung der Region.....	32
4.2	Topographie	32
4.3	Naturräumliche Einordnung.....	34
5	Historische Klimaanalysen	38
5.1	Klimatische Charakterisierung der Region	38
5.1.1	Temperatur und Niederschlag	39
5.1.2	Ereignistage	43

5.1.3	Windverhältnisse	47
6	Bestand Ingelheim am Rhein	54
6.1	Topographische Analysen	55
6.1.1	Landnutzung	55
6.1.2	Topographie	58
6.2	Bebauungs-Analysen	60
6.2.1	Bauliche und räumliche Offenheit	60
6.2.2	Bauvolumendichte	63
6.3	Vegetations-Analysen	65
6.3.1	Vegetationserfassung	65
6.3.2	Städtische Durchgrünung	67
6.4	Klimatische Analysen	70
6.4.1	Nächtliche Kaltluftschichtdicke und bodennahes Windfeld	70
6.4.2	Bodennahe nächtliche Lufttemperatur	77
7	Klimatischer Bestand und Vergleich	80
7.1	Klimafunktionskarte (KFK)	80
7.2	Vergleich der klimatischen Simulationen	84
8	Planung und Analysen	88
8.1	Planungshinweiskarte (PHK)	88
8.2	Handlungshinweise und Maßnahmenbeispiele	92
8.2.1	Detailbetrachtung – Neuplanung der „Präsident-Mohr-Grundschule“	96
8.3	Erreichbarkeit von potentiellen lokalklimatischen Ausgleichsräumen	98
9	Zusammenfassung	101
10	Anhang	103
10.1	Glossar	103
10.2	Literaturverzeichnis	107
10.3	Abbildungsverzeichnis	112
10.4	Tabellenverzeichnis	118
10.5	Diagrammverzeichnis	119
10.6	Diagramme	121

%	Prozent	JJA	Juni, Juli, August
<	kleiner als	k.A.	keine Angaben
>	größer als	Kap.	Kapitel
Δ	Differenz	KFK	Klimafunktionskarte
Σ	Summe	kg	Kilogramm
\leq	kleiner gleich	km	Kilometer
\geq	größer gleich	KR	Kaltluftraum
§	Paragraph	l	Liter
°	Grad	L	Landstraße
°C	Grad Celsius	log.	logarithmisch
3D	dreidimensional	LP	Landschaftsplan
AG	Auftraggeber	m	Meter
AN	Auftragnehmer	m ²	Quadratmeter
B	Bundesstraße	m ³	Kubikmeter
BauGB	Baugesetzbuch	MAM	März, April, Mai
B-Plan	Bebauungsplan	Max.	Maximum
bspw.	beispielsweise	Min.	Minimum
bzw.	beziehungsweise	min.	Minuten
ca.	circa	mm	Millimeter
CFD	Computer Fluid Dynamics	N	Norden
Cgreen	Green Chlorophyll Index	NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
cm	Zentimeter	O	Osten
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	o.ä.	oder ähnliches
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment	O ₂	Sauerstoff
DGM	Digitales Geländemodell	offiz.	offiziell
DJF	Dezember, Januar, Februar	PDF	Portable Document Format
DLM	Digitales Landschaftsmodell	PET	physiologische äquivalent Temperatur
DR	Durchlüftungsraum	Ph _{var}	städtische Porosität
DWD	Deutscher Wetterdienst	PHK	Planhinweiskarte
entspr.	entsprechend	PNG	Portable Network Graphics
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy	PR	Planungsraum
ESD	Empirisch-Statistischen Downscaling Methoden	RCM	regional climate models
et al.	lat. Et alii, dt. "und andere"	RCP	Representative Concentration Pathways
etc.	et cetera	rd.	rund
FFL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.	S	Süden
FNP	Flächennutzungsplan	SKV	SkyView-Faktor
GIS	Geoinformationssystem	SON	September, Oktober, November
GWA	Global Wind Atlas	spez.	speziell
h	hour	Std.	Stunden
ha	Hektar	TBR	Thermischer Belastungsraum
i.d.R.	in der Regel	TK25	Topographische Karte 1:25000
inkl.	inklusive	ü. NHN	über Normalhöhennull
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	ü. NN	über Normalnull
		u.a.	unter anderem
		ü.G.	über Grund

UC	mittlere Gebäudehöhe
UCL	Urban Canopy Layer
UR	Untersuchungsraum
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
u_z	Windgeschwindigkeit
VA	Vegetationsanteil
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
W	West
WCRP	World Climate Research Programme
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil
Z_0	Rauigkeitslänge
Z_d	Nullpunktverschiebung

1 Einleitung

1.1 Projekt „KlimPraxing“

Die letzten Jahre und nicht zuletzt der Sommer 2018 haben gezeigt, dass die innerstädtische Überwärmung und eine gezielte Anpassung an die Folgen des Klimawandels eine immer größere Bedeutung in der kommunalen Planungspraxis spielen. Neben Klimaschutzmaßnahmen und der Emissionsvermeidung von Treibhausgasen (Mitigation) werden geeignete Anpassungsmaßnahmen an die Auswirkungen des Klimawandels (Adaption) zu einer immer wichtigeren Aufgabe.

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) hat in diesem Zusammenhang den Handlungsleitfaden „KLIMPRAX Stadtklima – Anforderungen an die Berücksichtigung klima-relevanter Belange in kommunalen Planungsprozessen“ entwickelt (Veröffentlichung Januar 2017), der konkrete Handlungsschritte und -empfehlungen enthält. Im Rahmen des KLIMPRAX-Projektes wurde untersucht, wie sich das gegenwärtige und zukünftige Stadtklima darstellt und welcher Handlungsbedarf daraus abgeleitet werden kann. Der Leitfaden soll Kommunen bei der Auseinandersetzung mit stadtklimatischen Belangen in kommunalen Planungsprozessen unterstützen. Wissenschaftliche Erkenntnisse und Empfehlungen zur Optimierung der Berücksichtigung stadtklimatischer Belange unter Einbeziehung einer Anpassung an den Klimawandel werden formuliert. Neben dem bereits vorliegenden Handlungsleitfaden wird im KLIMPRAX-Projekt ein Methodenbaukasten erarbeitet, der u.a. Empfehlungen zur Ermittlung fachlicher Grundlagen zur Hitzebelastung in Kommunen und der Betroffenheit der menschlichen Gesundheit enthält. Die Endergebnisse des KLIMPRAX-Projektes mit einem konkreten Methodenbaukasten wurden im Sommer 2019 veröffentlicht.

Die Ziele des geplanten Vorhabens „KlimPraxing“ sind es, die Empfehlungen, Datengrundlagen und

Vorarbeiten des vom HLNUG entwickelten Handlungsleitfadens „KLIMPRAX“ sowie den Methodenbaukasten für eine Überführung in die Planungspraxis zu nutzen und ggf. Optimierungen für die spezifischen Anforderungen eines Mittelzentrums herauszustellen. Dies soll am Beispiel der Mittelstadt Ingelheim am Rhein erfolgen. Insbesondere die Verankerung von Klimawandelanpassung in der kommunalen Bauleitplanung sowie der Aufbau eines Netzwerkes zur Klimawandelanpassung und die begleitende Öffentlichkeitsarbeit stehen hierbei im Vordergrund. In diesem Zusammenhang stellt die gemeinsame Erarbeitung eines Maßnahmenplans mit allen relevanten Akteuren mit weitergehenden, konkreten Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel, ein wichtiges Ziel dar. Die frühzeitige Einbindung der lokalen Akteure in Kombination mit der begleitenden Öffentlichkeitsarbeit ermöglicht hierbei neben der Schaffung von Transparenz und der Bewusstseinsbildung für notwendige Klimaanpassungsmaßnahmen, die aktive Beteiligung an der Gestaltung des Klimaschutzes und der Klimaanpassung in Ingelheim. Hierdurch kann die direkte Kommunikation der Ergebnisse zu den Bürgerinnen und Bürgern sowie den lokalen Akteuren erfolgen und die Bedeutung von Schutzmaßnahmen verankert werden. Darüber hinaus soll die Kommunikation der Ergebnisse an andere Kommunen insbesondere in Form von Impulsen und Handlungsempfehlungen erfolgen (Ableitung eines Maßnahmenplans). (Ingelheim 2020)

1.2 Auftragsgegenstand

Um die individuellen klimatischen Defizite der Stadt Ingelheim am Rhein aufzuzeigen und die daraus resultierenden Bedarfe abzuleiten, muss zuerst für das Gemeindegebiet der klimatische IST-Zustand ermittelt werden. Diese klimatische Bestandsanalyse wird auch als Stadtklimaanalyse bezeichnet.

Ferner sollen im Zuge der Neuausrichtung des Flächennutzungsplans der Stadt Ingelheim am Rhein die klimatische Veränderungen in der strategischen Entwicklungsplanung Ingelheims berücksichtigt werden. Um in diesem Kontext sowohl mögliche positive als auch negative klimatische Einflüsse zu identifizieren und durch die Implementation entsprechender Maßnahmen zu reduzieren bzw. weiterzuentwickeln, wird eine Stadtklimaanalyse des städtischen Gebiets in Form eines Klimaplanatlases (Plan- und Kartenwerke) erstellt. Die Analyse fußt auf einer Reihe klimatisch relevanter Themenkarten (z.B. der Bauvolumendichte, der Vegetationsbedeckung, der Kaltluftentstehung und des Kaltlufttransports etc.), welche mit Hilfe eines Geoinformationssystems (GIS) generiert bzw. aus anderen Simulationsprogrammen ins GIS übertragen werden. Diese Analysen sowie weitere klimatische Informationen bilden die Grundlage für die Erstellung einer VDI-konformen Klimafunktionskarte (KFK – vgl. Kapitel 7.1) nach der VDI-Richtlinie 3878 Blatt 1. Um die klimatischen Erkenntnisse der KFK nahtlos in die Planung integrieren zu können, wird für diese ein zusätzliches Planungsinstrument in Form der Planungshinweiskarte sowie ein zugehöriger Erläuterungsbericht mit Handlungsempfehlungen (Maßnahmenhinweiskarte) für das Stadtgebiet erstellt. Im selben Zuge werden darauf aufbauend weiterführende Analysen in Form bspw. der „Erreichbarkeit von potentiellen lokal-klimatischen Ausgleichsräumen“ (vgl. Kapitel 8.3) durchgeführt. Mit

diesen Informationen kann die Stadt ihre klimatische Situation besser im Städtebau und der Landschaftsplanung berücksichtigen und so eine zukunftsgerechte und klimaangepasste Entwicklung unterstützen.

2 Fachlicher Hintergrund

2.1 Stadtklima

Der städtische Siedlungsraum unterscheidet sich hinsichtlich seiner klimatischen Wirkungsweise deutlich von seinem unbebauten Umfeld. In Städten und Ballungsräumen herrscht das sogenannte Stadtklima, welches sich aus der menschengemachten Modifikation des natürlichen Mesoklimas (Lokalklimas) ergibt, während das Meso- und Mikroklima (Kleinklima) (siehe Abbildung 1) mitunter standortbedingt von den stadtklimatischen Veränderungen der urbanen Bebauung, Abwärme, Luftbeimengungen u.a. beeinflusst wird (Hupfer und Kuttler 1998).

Das Stadtklima wirkt sich wiederum auf die meso- und mikroklimatische Ebene aus, wobei seine konkrete Ausprägung in Abhängigkeit von den vorhandenen Klimaeinflussfaktoren und Klimamodifikatoren variiert (siehe Tabelle 1). Hiervon unterscheiden sich einige Parameter, z.B. in Bezug auf einzelne Stadtteile, nur wenig (z.B. Sonneneinstrahlung, Niederschlag); andere wiederum, die z.B. durch das Wärmespeichervermögen von Baustoffen, die Versiegelung des Bodens oder anthropogene Abwärme etc. bedingt werden, können spürbar große Unterschiede aufweisen.

Tabelle 1: Beispiele für typische Einflüsse (linke Spalte) und deren (Aus-)Wirkungen (rechte Spalte) im städtischen Raum

PARAMETER URSACHE	WIRKUNG RISIKO
Beeinflussung durch Oberflächengeometrie, aerodynamische Rauigkeit, Wärmeinseleffekt	Windfeldveränderungen, Turbulenzen
Oberflächenversiegelung	Reduzierte Retentionsfähigkeit (kumulativ)
Oberflächenversiegelung, geringer Grünflächenanteil	Reduzierte Verdunstung
Reduzierte Retentionsfähigkeit	Gefahr von Überschwemmungen
Reduzierte Verdunstung und erhöhte Wärmespeicherung durch Bebauung	Temperaturerhöhung
Temperaturerhöhung	Vorhandensein wärmeliebender Pflanzenarten
	Hitzestress, thermische Belastung
	Anstieg der hitzebezogenen Vulnerabilität unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen

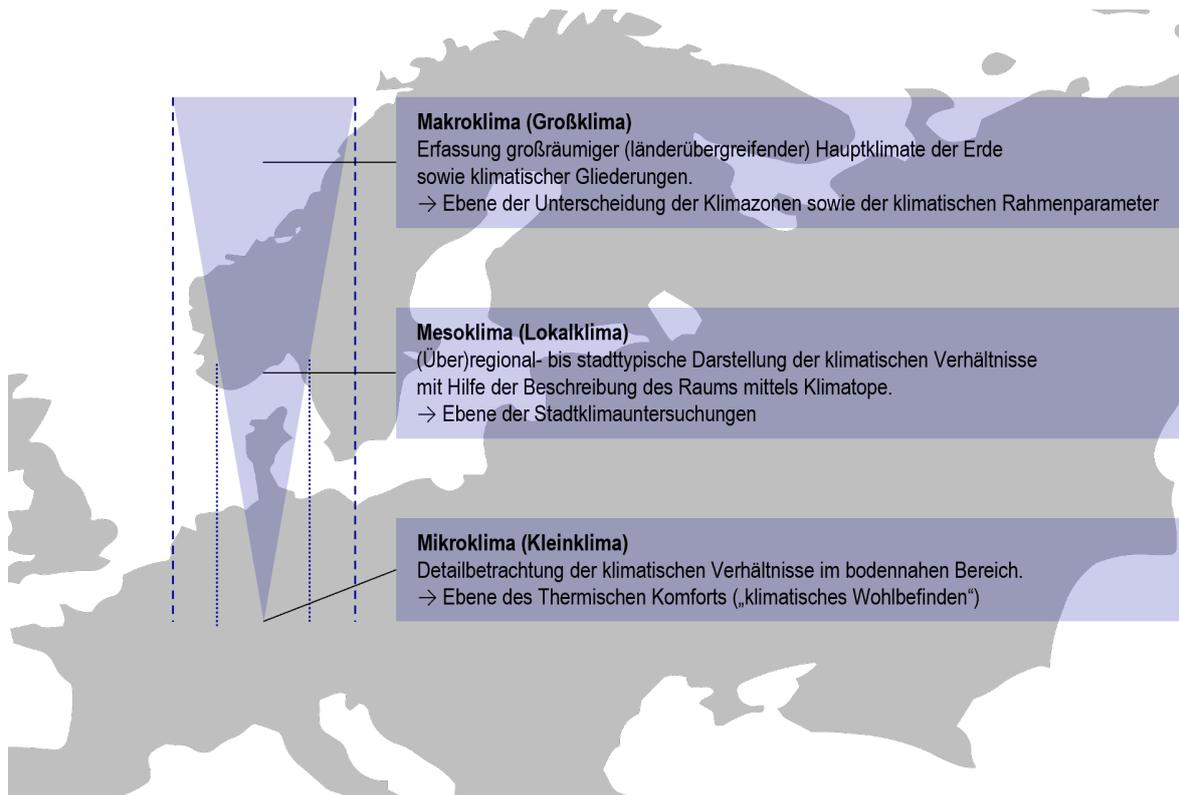


Abbildung 1: Übersicht der Klimaebenen im typischen Planungskontext. Je nach klimatischer Ebene unterscheiden sich Einflussgrößen, Fragestellungen, Bezugsraum und Anwendungsmöglichkeiten.

2.2 Temperatur und städtische Wärmeinsel

Ähnlich unterschiedlich wie die Ursachen für die Modifikation des städtischen Mesoklimas sind die Auswirkungen des Stadtklimas auf Menschen, Tiere, Pflanzen und auch die unbelebte Natur (z.B. Gebäude). Obwohl nicht alle Eigenschaften des Stadtklimas generell schädlich sind, werden viele der stadtklimatischen Wirkungskomplexe wegen ihrer Auswirkung auf die städtische Infrastruktur, das Wohlbefinden oder die Gesundheit der Stadtbewohner negativ konnotiert. Ein solcher Wirkungskomplex ist der städtische Wärmeinseleffekt, der aus der Wechselwirkung von verschiedenen Faktoren und Effekten im urbanen Kontext resultiert. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Städte tragen stets zur Erwärmung der Lufttemperatur bei; im Jahresmittel sind sie durchschnittlich um 1 bis 2 °C wärmer als die sie umgebende Landschaft (Matzarakis et al. 2008; Kuttler 2011). Der Mittelwert der Lufttemperatur wird langfristig durch urbane Charakteristika, wie die Bebauung und die damit einhergehende Bodenversiegelung, beeinflusst. Wird beispielsweise der Versiegelungsgrad innerhalb eines Quartiers um 10 % erhöht, steigt auch der Lufttemperaturmittelwert um ca. 0,2 °C gegenüber seiner unbebauten Umgebung an. Dieser Wert kann in Hinsicht auf einzelne Tageswerte, sprich Temperaturminima und -maxima, bei Strahlungswetterlagen noch stärker überschritten werden (Bründl et al. 1986).

Ergänzend zu der eigentlichen Bebauung spielen auch die Eigenschaften der eingesetzten Materialien (Absorptionsvermögen, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeemissionsvermögen und Verdunstungsfähigkeit) sowie die

Kubaturen, die Baumassen und die Bebauungsmorphologie im Kontext des Überwärmungsrisikos städtischer Räume eine bedeutende Rolle (siehe Abbildung 2).

Aus diesem Zusammenspiel urbaner Eigenschaften und klimatischer Effekte entsteht die ballungsraumtypische Wärmeinsel (siehe Abbildung 3). Sie ist durch eine starke Erwärmung am Tag und eine nur eingeschränkte Abkühlung während der Nacht geprägt. Die akkumulative Intensität dieses Effekts kann durch Extremwetter, wie länger anhaltende Hitzeperioden, zusätzlich verstärkt werden. Im Zuge des Klimawandels treten diese immer häufiger auf. In dieser Form stellt der Effekt der städtischen Wärmeinsel ein gesundheitsbedingtes Risiko für eine ebenfalls zunehmende Zahl an hitzevulnerablen Menschen, Tieren, Pflanzen und Infrastruktur dar und zählt somit zu den negativen Effekten des Stadtklimas.

Eine **Hitzewelle** ist eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung. Sie ist ein Extremereignis, welches die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme und die Infrastruktur schädigen kann. Neben der Lufttemperatur sind hierbei weitere Parameter, wie die Luftfeuchte, Strahlung und Wind von Bedeutung.

International existiert keine einheitliche Definition des Begriffs Hitzewelle. Definitionen basieren häufig auf einer Kombination von Perzentil basierten Schwellenwerten (z.B. 98. Perzentil der Tagesmaxima-Werte und einer minimalen Andauer z.B. 3 Tage). (DWD 2022)

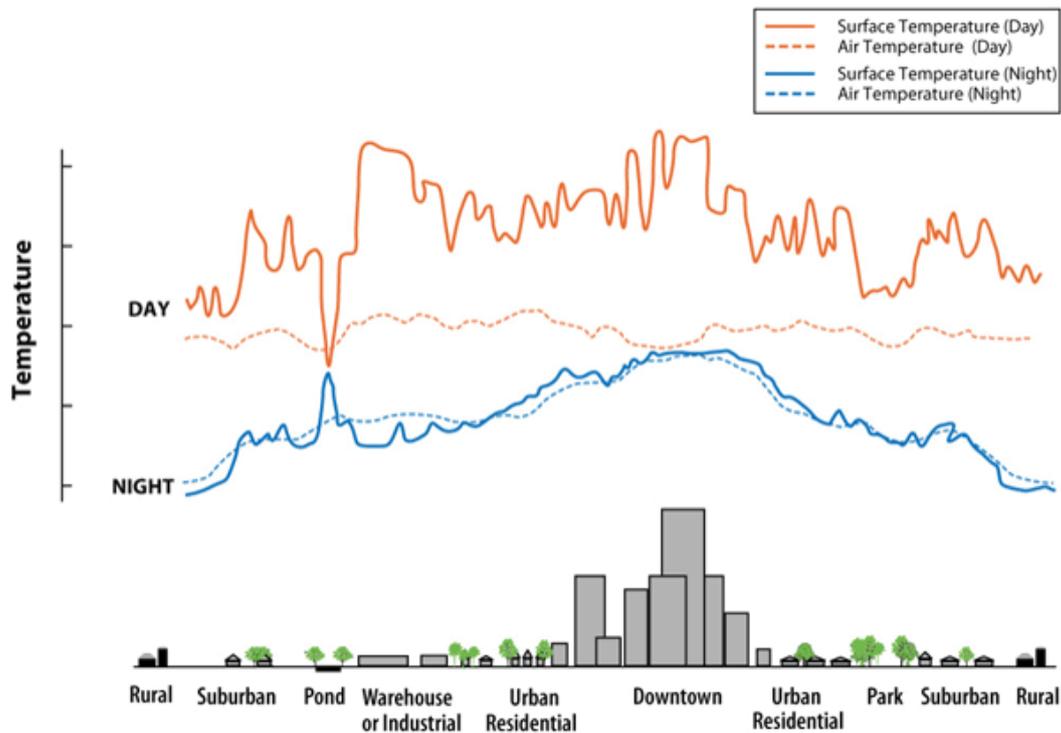


Abbildung 2: Darstellung der typischen Temperaturentwicklungen (nicht während einer Hitzewelle) am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit von der Umgebung. Die orangenen Graphen stellen die Oberflächen- (durchgehend) und Lufttemperaturen (gestrichelt) am Tag dar, die blauen Graphen beide Temperaturen bei Nacht. Hierbei zeigt sich deutlich die unterschiedliche Wärmespeicherkapazität verschiedener Materialien oder Objekte. Am Tag steigt die Temperatur des Teichwassers (Pond) kaum bzw. nur sehr langsam an, auf Grund der guten Wärmespeicherkapazität des Wasserkörpers fällt sie in der Nacht, ohne Strahlungseintrag, aber auch nicht bzw. nur kaum ab. Ein gegensätzliches Beispiel stellen Industrieanlagen oder -hallen (Warehouse or Industrial) dar. I.d.R. bestehen die Dächer dieser Bauten aus Metall und erhitzen sich am Tag, bei Strahlungseintrag, sehr stark. Nachts kühlen sie sich dagegen recht schnell ab, u.a. auch weil die Gebäude keine Massivbauten sind und keine große Masse besitzen (EPA 2008).

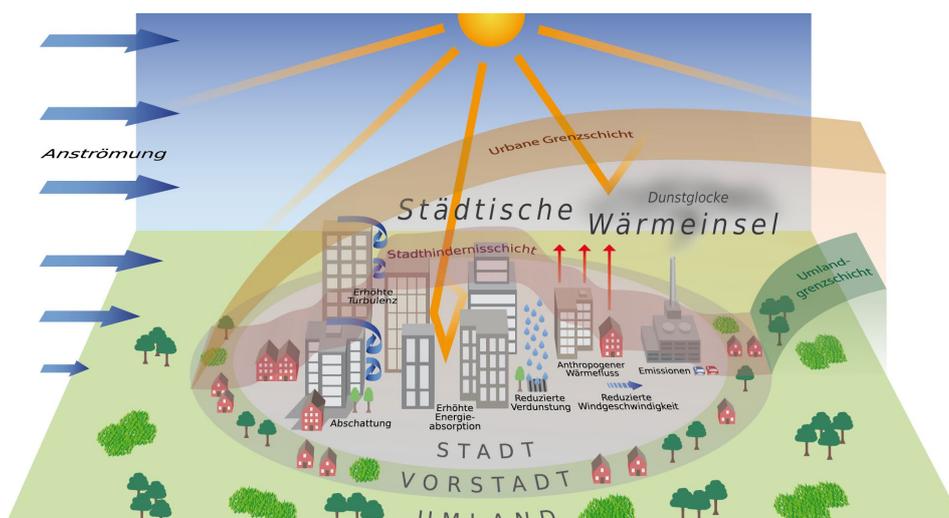


Abbildung 3: Schematische Darstellung unterschiedlicher temperaturrelevanter Faktoren und Effekte im urbanen Raum, die zur Ausprägung der städtischen Wärmeinsel beitragen (DWD 2017).

2.3 Vegetation und städtisches Grün

Urbanes Grün erfüllt eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen, die das städtische Klima und die Lufthygiene positiv beeinflussen. Auf das Stadtklima bezogen spielt es vor allem bei Verdunstungsprozessen und der Verhinderung der Bodenversiegelung (Retentionseigenschaft) eine wichtige Rolle. Städtische Vegetation bestimmt aber auch die urbane Struktur und hat eine soziale und ästhetische Funktion, wodurch die Identität der Stadt geprägt und die Lebensqualität der Bewohner beeinflusst wird.

Oft wird ein großer Teil des öffentlichen städtischen Grüns von Rasenflächen eingenommen. Bei guter Wasserversorgung weisen diese an Strahlungstagen im Vergleich zu angrenzenden versiegelten Flächen wesentlich niedrigere Oberflächentemperaturen und damit niedrigere Lufttemperaturen auf. Bei schlechter Wasserversorgung heizt sich Kurzgras allerdings stark auf, sodass von einer Kühlwirkung nicht mehr gesprochen werden kann (Hupfer und Kuttler 1998).

Wiesen, d.h. Vegetationsflächen mit größeren Wuchshöhen, können den Boden vor einer zu starken Überhitzung schützen. Auch die Oberflächentemperatur ist hier durch Eigenverschattung geringer.

Ihre größte thermische Wirkung besitzen Rasenflächen abends und nachts, wenn aufgrund der isolierenden Wirkung des Grasfilzes der Bodenwärmestrom gering und die Ausstrahlung hoch ist. Diese Rasenareale kühlen dann sehr stark ab und heben sich als innerstädtische Kaltluftflächen (vgl. Kapitel 2.5) hervor. Baum- und strauchbestandene innerstädtische Flächen können die oben genannten positiven klimati-

schen Effekte noch weiter verstärken, da sie neben ihrer Transpiration auch durch ihren Schattwurf tagsüber für niedrigere Temperaturen sorgen. Nachts hingegen stellen sich dort höhere Temperaturen als auf einer Rasenfläche ein. Die relative Luftfeuchte ist in einem Stadtwald höher als über einer urbanen Rasenfläche. Die Ursache hierfür liegt in der Lufttemperatur und der Windstille im Baumbestand. Baumbestandene Flächen transpirieren im Vergleich zu Kurzgras mit 40 % - 70 % (je nach Baumart) deutlich mehr. Außerdem weisen sie nach Niederschlägen wegen ihres größeren Interzeptionsvolumens eine höhere Evaporationsrate als Rasenflächen auf. Da der größte Teil der Globalstrahlung bereits vom Kronendach absorbiert wird, steht tagsüber weniger Energie für die Bodenwärmung und Speicherung zur Verfügung als bei Rasenflächen, Wiesen oder gar unbeschatteten versiegelten Oberflächen. Ferner bewirken Baumbestände eine Reduzierung der Windgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 2.4), wodurch Aerosole und Stäube, aber auch Gase aus der vorbeiströmenden Luft ausgefiltert werden können (Hupfer und Kuttler 1998). Unter klimatischen Gesichtspunkten nehmen bereits kleinräumige Grünflächen Einfluss auf das Mikroklima. Ab wann jedoch ein deutlicher „Abstrahlungseffekt“ entsteht, hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren ab. Dimoudi und Nikolopoulou (2003) haben die Klimarelevanz für Vegetationsflächen von min. 10 m x 10 m untersucht und nachgewiesen.

2.4 Regionaler Wind und städtische Durchlüftung

Die Unterscheidung zwischen ländlichem und städtischem Gebiet spielt im Hinblick auf den Faktor Wind eine große Rolle. Die morphologischen (siehe Abbildung 5) und thermischen Charakteristika des urbanen Raums führen dort zu einer Veränderung der Windverhältnisse (Windgeschwindigkeit & Windrichtung).

Die Luftbewegungen in der Stadt werden insbesondere durch lokale Windsysteme beeinflusst, die entweder von den topographischen Gege-

benheiten oder von der Art und Anordnung seiner Bebauung abhängig sind (VM BW 2012). Diese Windsysteme bilden sich gerade dann heraus, wenn der überregionale Wind nur schwach ausgeprägt ist.

Stark durch das vorliegende Relief geprägte Windsysteme (topographisch) sind bspw. Hangwinde sowie Berg- und Talwinde (siehe Abbildung 4). Vor allem bei Städten in Tal- und Kessellagen sind diese Zirkulationssysteme von Bedeutung, da sie die Frischluftzufuhr und den Abluftabtransport (z.B. hinsichtlich Schadstoffen) fördern.

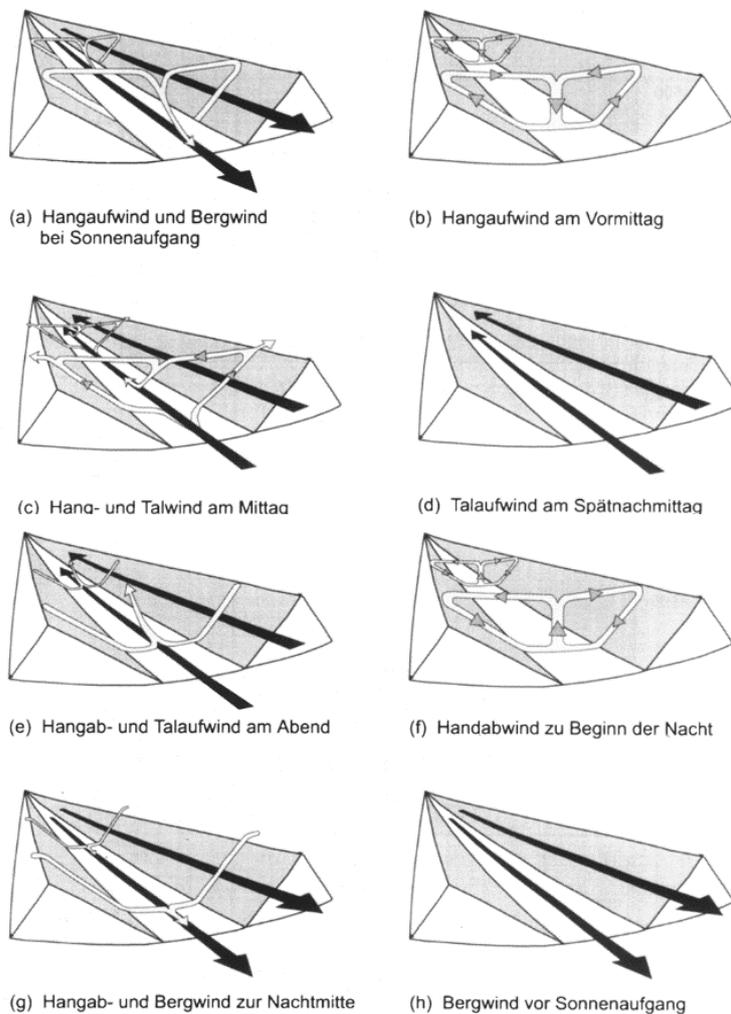


Abbildung 4: Darstellung der Zirkulation von Hang- (helle Pfeile) sowie Berg- und Talwinden (dunkle Pfeile) in Abhängigkeit zur Tageszeit (Liljequist und Cehak 1979).

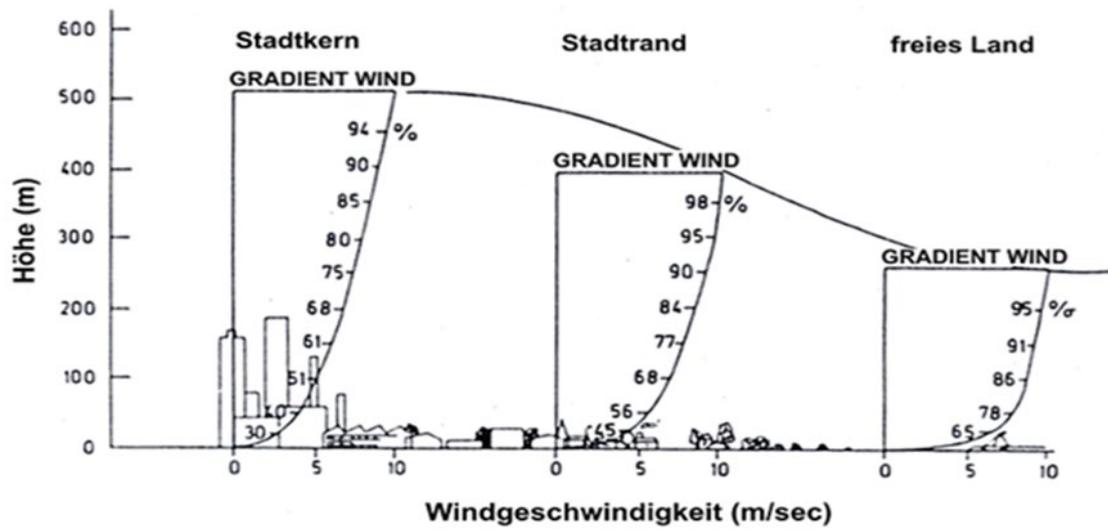


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Windprofile über dem Stadtkern, dem Stadtrand, dem freien Land (Robel et al., 1978).

2.4.1 Rauigkeit und Porosität

Wie bereits beschrieben verändert das urbane Profil die Windverhältnisse hinsichtlich der Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung. Die größere Oberfläche und Rauigkeit (Oberflächen- oder Terrainstruktur) einer städtischen Bebauung bewirkt durch die erhöhte Reibung eine Verminderung der Windgeschwindigkeit (bis zu 30 % im Jahresmittel). Insbesondere nimmt die Häufigkeit von Windstillen um bis zu 20 % zu, was auch zu einer Verminderung des Luftaustausches führt und damit den Schadstofftransport behindert (VM BW 2012).

Hinsichtlich der Rauigkeit einer Oberfläche oder eines Terrains sind zwei Parameter von Relevanz. Zum einen die Rauigkeitslänge (Z_0) und zum anderen die Nullpunktverschiebung (Z_d). Typische Werte beider Rauigkeitsparameter für unterschiedliche Beispiele werden in Tabelle 2 wiedergegeben. Z_0 beschreibt den durch die Oberflächenrauigkeit eines Hindernisses beeinflussten vertikalen Raum über dem Objekt. Z_d beschreibt den vertikalen Versatz von Z_0 (siehe Abbildung 6). Je höher die Werte von Z_0 und Z_d , desto stärker wird das Windprofil verformt, was u.a. eine Verminderung der Windgeschwindigkeit im Urban Canopy Layer (UCL) zur Folge hat.

Der UCL beschreibt in der Stadt die Atmosphärenschicht zwischen Erdoberfläche und mittlerer Hausdachhöhe (Stadthindernisschicht), also den typischen Lebensraum für Menschen in der Stadt. Das logarithmische Windprofil wird als Näherung zur Beschreibung von Geschwindigkeitsprofilen verwendet, die durch die Bodenrauigkeit oder die Bebauung in der Windströmung entstehen.

Die städtische Porosität (Ph_{var}) beschreibt den Zustand des offenen 3-dimensionalen Raums im

Verhältnis zum bebauten Volumen. Ph_{var} wird parallel zu den Rauigkeitslängen (Z_0) und der Nullpunktverschiebung (Z_d) berechnet und basiert auf dem Ansatz der „Frontal Area Analyse“ (Unger 2009). Für die Berechnung der Porosität ist die vorherrschende Windrichtung nicht von Relevanz, da hierbei der 3-dimensionale Raum und die in ihm enthaltenen Baumassen untersucht werden.

Ergänzend zu den dynamischen Faktoren Z_0 und Z_d , die eine direkte Aussage über die Rauigkeit bzw. den Reibungsverlust treffen (siehe Tabelle 2), zeigt die urbane Porosität (Ph_{var}) das Potential einer möglichen Durchlüftung an. Damit ist Ph_{var} alleinstehend von größerer planerischer Relevanz als die Rauigkeitslänge und die Nullpunktverschiebung. Die Einteilung der städtischen Porosität geschieht im Wertemaßstab von 0 bis 1, wobei 1 die höchste Porosität und 0 die niedrigste Porosität des 3-dimensionalen Raums darstellt. Das heißt, je höher der Wert, desto geringer ist der Windwiderstand des Bereichs.

Mit Hilfe der berechneten städtischen Porosität können klare Planungshinweise abgeleitet werden. Durch die Erfassung mehrerer Bereiche mit einer hohen Porosität können Durchlüftungspotentiale definiert und in der Klimafunktionskarte dargestellt werden.

Darüber hinaus dienen die Ergebnisse der Themenkarte (Kaltluft mit dem bodennahen Strömungsfeld) als Informationsbasis, um Potentiale und Möglichkeiten zur Schaffung einer besseren Durchlüftung in der Stadtentwicklung zu berücksichtigen.

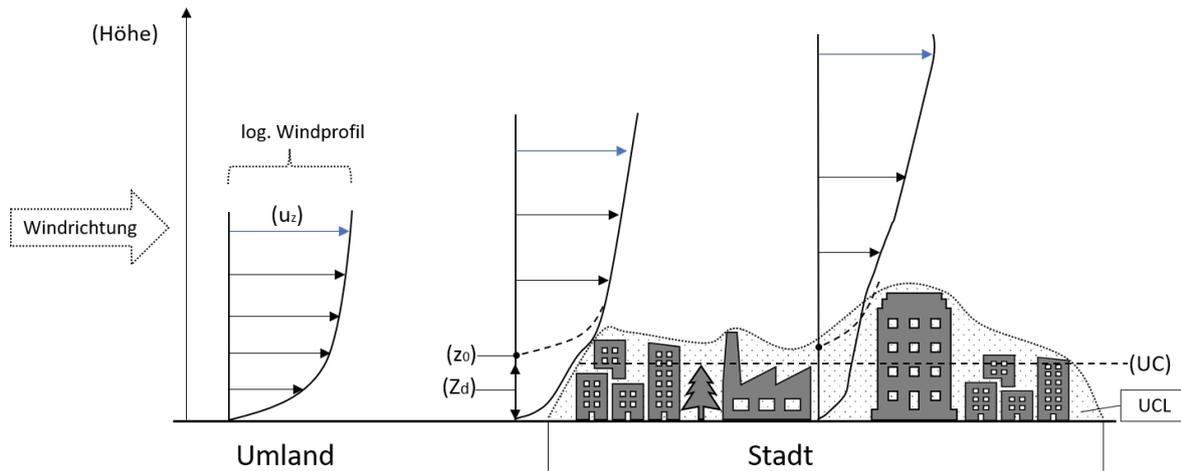


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Beeinflussung des log. Windprofils im urbanen Bereich. Z_0 beschreibt die Rauigkeitslänge in Metern, Z_d die Nullpunktverschiebung in Metern, u_z die Windgeschwindigkeit (blauer Pfeil mit gleicher Geschwindigkeit, aber auf unterschiedlicher Höhe = vertikale Streckung des Profils) und den Raum unterhalb der mittleren Gebäude-höhe (UC).

Tabelle 2: Beispiele für Z_0 und Z_d für unterschiedliche Oberflächen (nach Oke 2017).

	OBERFLÄCHE TERRAIN	RAUIGKEITSLÄNGE (Z_0)	NULLPUNKTVERSCHIEBUNG (Z_d)
rural	Eis, geteerte Fahrbahn	0,001 – 0,01 mm	--
	Schnee, Wasser	0,1 – 1 mm	--
	blanker Boden, geschnittenes Gras*	0,01 – 0,02 m	--
	Gras*, Stoppelfeld	0,03 – 0,06 m	0,1 – 0,3 m
	Ackerland, Pflanzenbestand*	0,05 – 0,15 m	0,2 – 0,7 m
	Plantagen*, Buschland*	0,4 – 1 m	1,3 – 2,5 m
	Wald*	0,8 – 2 m	9 – 24 m
urban	niedrige Höhe und Dichte Häuser, Gärten, Bäume, Warenhäuser	0,3 – 0,8 m	2 – 4 m
	mittlere Höhe und Dichte Reihenhäuser, Stadtzentren	0,7 – 1,5 m	3,5 – 8 m
	hoch und hohe Dichte weniger als sechs Stockwerke, Reihen- und Block-Gebäude	0,8 – 2 m	7 – 15 m

* abhängig von der Windgeschwindigkeit, da Vegetation flexibel ist

Jedes Objekt besitzt eine gewisse **Oberflächenrauigkeit**. Bezogen auf die Be- und Durchlüftung kann diese spezifische Rauigkeit als Barrierewirkung interpretiert werden. Die Barrierewirkung wiederum äußert sich in einer erhöhten Reibung zwischen Luftstrom und Objekt. Je stärker die Reibung, desto mehr (Bewegungs-)Energie wird dem Luftstrom entzogen, wodurch die Be- bzw. Durchlüftung verringert werden kann.

2.4.2 Luftleitbahnen

Sowohl der horizontale wie auch der vertikale Luftmassentransport reguliert die Belüftung des bodennahen Raums, ganzjährig relevant für die Durchlüftung von städtischen Gebieten ist jedoch nur die horizontale Luftströmung. Von besonderer stadtklimatischer Relevanz sind diese Luftströmungen besonders in den Nacht- und Vormittagsstunden bei austauscharmen Hochdruckwetterlagen. Diese Wettersituationen verstärken die typischen Eigenschaften des Stadtklimas, wodurch die thermische und lufthygienische Belastung der Bevölkerung gesteigert wird (Mayer 1992).

Stadtklimarelevante Luftleitbahnen ermöglichen besonders bei austauscharmen Wetterlagen das Ein- und Durchdringen vorhandener schwacher Horizontalströmungen in den UCL. Eine räumlich umfangreichere Möglichkeit zur Verminderung thermischer und lufthygienischer Belastun-

gen innerhalb des Stadtraums liegt in der Freihaltung beziehungsweise Schaffung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen (z.B. Ein- und Ausfallstraßen, Grünflächen, Gewässer, Gleisanlagen) im UCL (Kuttler 2000).

Entsprechend ihrer thermischen und lufthygienischen Eigenschaften sowie der thermischen und lufthygienischen Qualität der transportierten Luftmassen werden stadtklimarelevante Luftleitbahnen in

- Ventilationsbahnen,
- Frischluftbahnen und
- Kaltluftbahnen unterteilt (VDI 2015).

Kaltluft beschreibt ausschließlich einen Temperaturzustand von Luftmassen, nimmt aber keinen Bezug auf lufthygienische Aspekte (Thematik Frischluft).

2.4.3 Strömungsregime

In Abhängigkeit von der Stadtmorphologie können sich unterschiedliche lokale Strömungsregime im innerstädtischen Raum ausbilden (siehe Abbildung 7). Das hierbei relevante dimensionslose Höhen-Weiten-Verhältnis beschreibt den Raum zwischen zwei Objekten (z.B. Gebäuden) in Abhängigkeit einer angenommenen Windrichtung. Dabei definieren unterschiedliche Schwellenwerte des Höhen-Weiten-Verhältnis die Zugehörigkeit zu einem Strömungsregime (siehe Tabelle 3).

Informationen zu bestehenden Strömungsregimen bzw. deren mögliche Veränderung (z.B. durch bauliche Nachverdichtung oder Abriss von Gebäuden) sind für die Stadtplanung bzw. -entwicklung von großem Interesse. So können konkrete Aussagen zu baulichen Vorgaben (keine Bebauung, definierte Bebauung etc.) z.B. im Bereich von bestehenden Luftleitbahnen getroffen werden, so dass deren Funktionalität weiterhin bestehen bleibt. Funktionierende Strömungssysteme können durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klimaökologische und immissionsrelevante Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Tabelle 3: Zuordnung unterschiedlicher Höhen-Weiten-Verhältnisse zu den entspr. Strömungsregimen

HÖHEN-WEITEN-VERHÄLTNIS	STRÖMUNGSREGIME
kleiner als 0,3 bis 0,5	Isolierte Rauigkeitsströmung (siehe Abbildung 7– a)
größer 0,5 und kleiner 0,65	Wirbelüberlagerungsströmung (siehe Abbildung 7– b)
größer als 0,65	Abgehobene Strömung (siehe Abbildung 7– c)

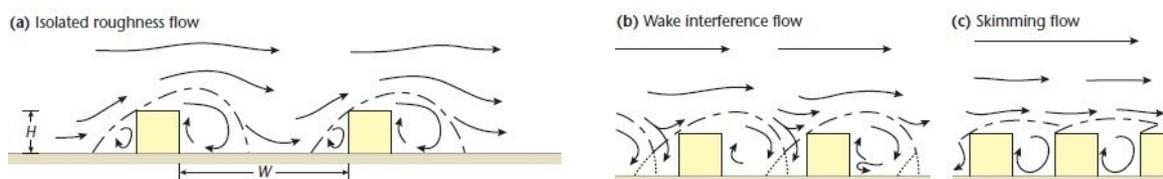


Abbildung 7: Darstellung unterschiedlicher Strömungsregime (isolierte Rauigkeitsströmung (a), Wirbelüberlagerungsströmung (b) und die abgehobene Strömung (c)) (nach Oke 1988, basierend auf Daten von Hussain und Lee 1980).

2.5 Flurwind und Kaltluft

Neben den durch das Relief beeinflussten Strömungen bilden sich in ebenen Lagen sogenannte Flurwinde aus. Das Flurwindssystem beschreibt Druckausgleichsströmungen zwischen verschiedenen Fluren (z.B. Stadt-Umland) und ist an ein flaches Relief oder an hindernisarme Freiflächen (Leitbahnen) gebunden. Der flache städtische Raum ist stark von seiner baulichen Gestaltung abhängig und fällt als ein durch Bebauung bedingtes Windsystem in diese Kategorie. Diese Windsysteme sind ein unterstützender Faktor bei der Kalt- und Frischluftzufuhr und dem Luftabtransport, wenngleich die Flurwinde in ihrer Intensität regulär recht schwach ausgeprägt sind.

Flurwinde entstehen, wenn sich in Gebieten gegenüber ihrem Umland ein lokales thermisches Tief aufbaut. Dies wird insbesondere durch die Überwärmung bebauter oder versiegelter Gebiete und dem damit einhergehenden konvektiven Aufstieg von Luftmassen (siehe Abbildung 8) gefördert. Der entstehende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (Druckausgleichsströmung).

Im Gegensatz zu den topographischen Windsystemen ist dieses System eher in Städten mit einem flachen Relief zu finden. Es unterstützt aber gleichfalls die Kalt- und Frischluftzufuhr und den Luftabtransport, allerdings sind Flurwinde in der Regel in ihrer Intensität schwach ausgeprägt.

Die Kaltluftentstehung beschreibt auf mikro- und mesoskaliger Ebene den nächtlichen Abkühlungsprozess der bodennahen Luftschichten. Mit dem Sonnenuntergang beginnt auf ausreichend großen Grün- und Freiflächen die Kaltluftproduk-

tion. Diese dauert bis in die frühen Morgenstunden an und wird sowohl durch die ausbleibende solare Einstrahlung als auch durch die thermische Ausstrahlung der oberen Bodenschicht bedingt. Da sich die Luft mit dem Erkalten auch verdichtet, strömt sie anschließend flüssigkeitsähnlich der Reliefausprägung folgend in tiefere Regionen. Eine signifikante Strömungsdynamik entwickelt sich hierbei ab ca. 1 – 2 ° Gefälle und wird stets von der Rauigkeit (vgl. 2.4.1) der überströmten Bodenschichten beeinflusst (siehe Tabelle 2).

Sowohl das Entstehungsgebiet als auch die Kaltluftproduktionsrate werden von dem vorhandenen Untergrund bestimmt. Hierbei fördern besonders unversiegelte Freiflächen (z.B. Wiesen, Brachen, Grünflächen etc.) mit einer niedrigen Vegetationshöhe die Kaltluftproduktion. Liegen diese Areale in einem reliefierten Gebiet (z.B. unbebaute Hänge), werden die Kaltluftmassen über die topographischen Windsysteme (Hang- und Bergwinde) abgeleitet. Allerdings können Hindernisse, in Abhängigkeit ihrer Ausprägung (Länge, Höhe, Ausrichtung), den Kaltluftabfluss behindern oder auch komplett zum Erliegen bringen (siehe Abbildung 9).

Das fehlende Gefälle der Kaltluftentstehungsflächen reduziert zwar nicht die Kaltluftproduktion, verringert jedoch den Wirkungsbereich, aufgrund des fehlenden Kaltluftabflusses. Unter Umständen können die Sogwirkungen vorhandener Flurwinde den Kaltlufttransport unterstützen. Waldgebiete auf stark geneigten Flächen (LANUV NRW 2018) tragen ebenfalls zur Kaltluftproduktion bei. Durch die Baumkronen wird das Aufheizen tagsüber verringert und die Neigung des Geländes unterstützt die Durchströmung des kühlen Stammraums. Dies ermöglicht

den Kaltluftabfluss aus dem bodennahen Waldbereich. In Abhängigkeit von Gefälle, Dauer und Einzugsgebiet kann eine Kaltluftschicht bis zu einer Höhe von über mehreren Dekametern anwachsen.

In Tabelle 4 werden die Ergebnisse verschiedener Studien zur Entstehung von Kaltluft im Vergleich dargelegt. Die Kaltluftproduktion wird anhand des Volumens innerhalb einer Stunde gemessen und mit dem Aufkommen in vier verschiedenen Landschaftsstrukturen gegenübergestellt. Trotz der abweichenden Angaben zu den einzelnen Produktionsraten kann zusammenfassend abgeleitet werden, dass die bereits oben genannten natürlichen, unversiegelten Untergründe für die Kaltluftentstehung entscheidend sind. Zudem kann eine geringe Bodenrauigkeit (keine bodennahen Hindernisse wie Mauern, dichte Büsche etc.) zu einem besseren Abflussverhalten an einem Hang führen und sich der Wirkungsraum somit vergrößern lassen. Im Durchschnitt wird den Acker- und Wiesenflächen das höchste Kaltluftentstehungspotential zugeordnet.

In der Regel handelt es sich bei diesen Luftmassen um weniger stark belastete Luft, weshalb sie auch im Zusammenhang mit dem städtischen

Luftaustausch umgangssprachlich als „Frischluff“ bezeichnet wird. Wissenschaftlich ist dies jedoch nicht korrekt, da Kaltluft nur einen Temperaturzustand von Luftmassen beschreibt und entsprechend auch aus lufthygienischer Sicht belastet sein kann. Liegt beispielsweise eine starke Emissionsquelle (lufthygienisch) im Abflussbereich eines Kaltluftentstehungsgebiets, so entsteht zwar weiterhin Kaltluft, diese kann aber nicht als unbelastete Luft bezeichnet werden. Entsprechend müssen die Umgebung oder mögliche lufthygienische Störfaktoren bei der Bewertung von potenziellen Frischluftzuflüssen miteinbezogen werden. Der Begriff der Frischluft beschreibt den am Tag durch Photosynthese neu gebildeten Sauerstoff (O₂) der Vegetation (vornehmlich in Waldgebieten). Dadurch ist Frischluft per se unbelastet, und nicht mit Kaltluft gleichzusetzen.

Besonders für urbane Räume in Kessel- oder Hanglagen ist die Kaltluftentstehung und deren Transport für die thermische Regulierung des Stadtklimas und der Luftreinhaltung von großer Wichtigkeit. Die Richtlinie 3787 Blatt 5 des VDI (VDI 2003) unterstreicht diese Bedeutung mit der Forderung, Kaltluftentstehung und Kaltluftabflüsse in der Stadt- und Regionalplanung zu berücksichtigen.

Tabelle 4: Zusammenstellung verschiedener Kaltluftentstehungsraten aus unterschiedlichen Studien in Abhängigkeit zur Art des Untergrunds (k. A. = keine Angaben).

	KUBIKMETER KALTLUFT PRO QUADRATMETER BODEN PRO STUNDE (M ³ /M ² /H)			
	Acker	Wiese	Wald	Siedlung
King (1973)	k. A.	12	k. A.	k. A.
Gross (1987)	11	11	13	k. A.
GEONet (2002)	10 - 20	k. A.	5 – 40	k. A.
GEONet (2011)	10 - 15	20	15	1

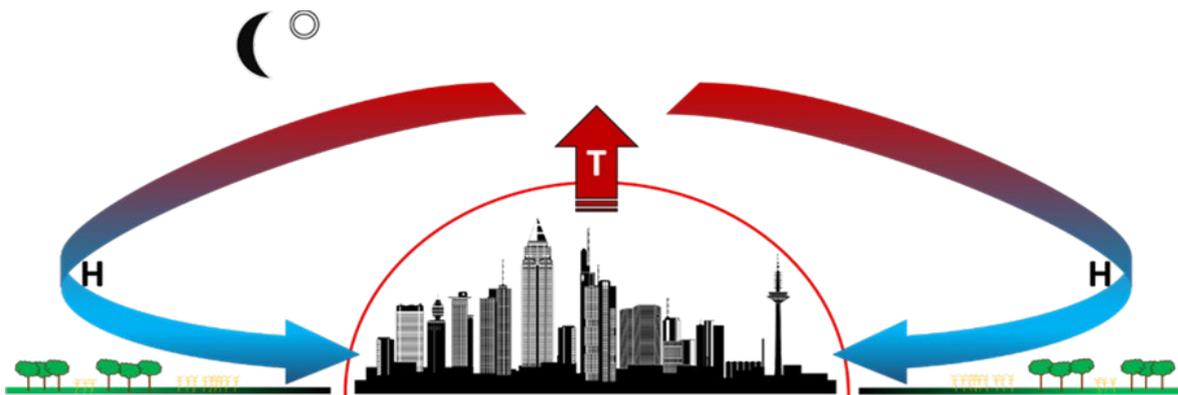


Abbildung 8: Darstellung eines Flurwindsystems am Beispiel des Stadt-Umland-Windsystems. Während einer strahlungsarmen Nacht steigen die wärmeren "Stadtluft"-Massen auf (geringere Dichte) um nach Abkühlung (höhere Dichte) wieder abzusinken. Zusammen mit den nach Sonnenuntergang entstehenden Kaltluftmassen des ruderalen Raums etabliert sich so ein sensibles Flurwindsystem (Sogwirkung durch den Luftdruckgegensatz).

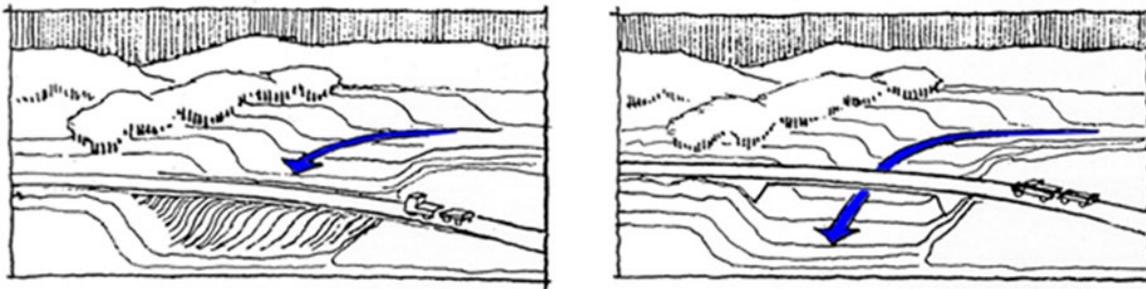


Abbildung 9: Der den Kaltluftabfluss querenden Damm mit Straße (links) wird zum Hindernis und blockiert bzw. staut den Kaltluftstrom auf. Die den Kaltluftabfluss querende Brücke mit Straße (rechts) bremst bzw. staut den Kaltluftstrom nicht (VM BW 2012).

3 Methodisches Vorgehen und verwendete Software

Die zunehmende Temperaturverschiebung und insbesondere die Zunahme der Sommertage ($\geq 25^\circ\text{C}$) sowie Tropennächte ($\geq 20^\circ\text{C}$) rücken immer stärker in den Fokus der Stadtplanung. Insbesondere durch die Akkumulation der Wärme innerhalb des urbanen Umfelds kann es bereits in mittelgroßen Städten zur Ausprägung von städtischen Wärmeinseln kommen. Diese führen wiederum zur verstärkten thermischen Beeinflussung von Baustrukturen (und Infrastruktur) sowie zu der bioklimatischen Belastung für Menschen, Tiere und Pflanzen. In Anbetracht der weiter voranschreitenden Klimaveränderung ist es daher eine wichtige Aufgabe der Kommunen, klimatische Aspekte bei der Stadtentwicklung systematisch zu berücksichtigen. Belastungen müssen durch eine vorausschauende Stadtplanung und die Umsetzungen von individuellen Klimaanpassungsmaßnahmen gezielt für das Umfeld abgebaut werden, während positive Effekte gefördert und erhalten werden müssen.

Die angewandte Stadtklimatologie befasst sich seit geraumer Zeit mit Analysemethoden (Burghardt 2015; Burghardt et al. 2014), die eine direkte Grundlage und einen Zugang für eine Vielzahl planerischer Fragestellungen bieten. Prinzipiell werden beim Stadtklima zwei Aspekte betrachtet, die Thermischen und die Dynamischen. Der Arbeitskreis der Umweltmeteorologen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (2018) definiert das Stadtklima wie folgt:

„...Ein ideales Stadtklima zeichnet sich durch eine möglichst große Inhomogenität mit einer charakteristischen Weglänge von 150 m und ei-

nem thermisch und lufthygienisch belastungsfreien Raum aus. Es soll die planerischen Absichten im Außenraum unterstützen...“

Demzufolge bietet ein heterogenes Mikroklima mehr Freiraum für die individuelle Anpassung von Menschen, Tieren und Pflanzen an ihre städtische Umwelt, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, stadtklimatische Belange mit planerischen Zielen in Einklang zu bringen.

Im stadtplanerischen Kontext wird zwischen mehreren Planungsebenen unterschieden. In Abhängigkeit der gewählten Planungsebene finden sich wiederum unterschiedliche klimatische Einordnungen (= klimatische Planungsebenen) (siehe Abbildung 10), die es zu beachten gilt. So bewegt sich ein Flächennutzungsplan im mesoklimatischen Bereich, wohingegen Einzelgebäude oder Gebäudegruppen sich auf der Ebene des Mikroklimas wiederfinden. Bebauungspläne liegen, je nach Flächenumgriff, zwischen diesen beiden Ebenen und werden dem Lokalklima zugeordnet.

Trotz der direkten und indirekten Wechselbeziehungen der einzelnen stadtklimatischen Ebenen muss dennoch eine strikte fachliche Trennung erfolgen. So kann z.B. eine gesamtstädtische mesoklimatische Analyse nicht auf einen Objektplan gezoomt und angewendet werden. Dies ergibt sich zum einen aus den unterschiedlichen Auflösungen (Rastergrößen) und zum anderen aus den unterschiedlichen klimatischen Fragestellungen unter deren Aspekten die jeweiligen Klimaanalysen durchgeführt werden (siehe Abbildung 10). Ebenso kann die erforderliche Datenbasis in Abhängigkeit der klimatischen Planungsebene variieren.

Um ein Gesamtbild einer stadtklimatischen Situation darstellen zu können, ist eine mesoskalige Analyse notwendig. Die Ergebnisse der Analyse werden als Klimafunktionskarte dargestellt und geben Aufschluss über die Verteilung verschiedener Klimatope (Flächen, die sich durch bestimmte klimatische Eigenschaften charakterisieren lassen) sowie über den Einfluss der regionalen Belüftungssituation, auch können für die Stadtentwicklung wichtige Empfehlungen erarbeitet werden. Sollten sich hierbei bereits einzelne „Hotspots“ herauskristallisieren, so können diese nachfolgend, unter Zuhilfenahme mikroklimatischer, numerischer Simulationen, genauer untersucht werden, um detaillierte Maßnahmen zu erarbeiten.

Stadtklimatische Bewertungen, die den Außenraum und somit den direkten Lebens- und Aufenthaltsraum der Menschen betreffen, finden im Maßstab der Mikroklimata (< 1:1000) statt. Die Gestaltung der Umwelt hat direkten Einfluss auf

die thermische Situation in diesem Bereich und beeinflusst dadurch auch indirekt das Wohlbefinden der Bewohner. In diesem Maßstab, in dem kleinräumige nachbarschaftliche Einflüsse eine größere Rolle spielen, zeigt sich, ob ein schattenspendender Baum am richtigen Ort gepflanzt wurde oder ob er durch die Baumkrone möglicherweise ein Belüftungshindernis darstellt. Auf den Menschen wirken permanent eine Vielzahl von unterschiedlichen Umwelteinflüssen ein, mit denen sich der Organismus auseinandersetzen muss. Um nun das subjektive Behaglichkeitsempfinden eines Individuums erfassen zu können, müssen alle relevanten Einflüsse, die wiederum in einem komplexen Zusammenspiel miteinander stehen, berücksichtigt werden (Frank 1975). Durch die Komplexität und Dynamik der mikroskaligen Energieflüsse ist eine gesamtstädtische Darstellung (Simulation) des vorherrschenden Mikroklimas mit einer Auflösung von 1 m aus technischer Sicht heute noch nicht möglich.

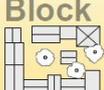
administrativer Bezug	Planungsebene	Klimatische Fragestellung	Auflösung (Rastergöße)	klimatische Einordnung
 Region	Regionalplan > M 1: 100.000	regionale Luftaustauschprozesse und Klimafunktionen	100m	↓ Mesoklima
 Stadt	Flächennutzungsplan > M 1: 10.000	Wärmeineleffekt, Belüftungsstrukturen (Rauhigkeiten)	25 - 50m	
 Ortsteil	Bebauungsplan M 1: 5.000	Übergang von Klimatop- zu Mikroklimanalyse	10m	
 Block	Bebauungsplan M 1:1.000	Mikroklimatische Untersuchungen, thermischer Komfort	2 - 5m	↓ Mikroklima
 Gebäude	Bauplan/Objekt M 1:200	Strahlungs- und Gebäudeströmungen	>0 - 2m	

Abbildung 10: Die unterschiedlichen Planungsebenen mit ihrem administrativen Bezug sowie den korrespondierenden klimatischen Fragestellungen und den möglichen Auflösungen.

3.1 Ableitung der Klimafunktionskarte

Ziel der Erstellung einer Klimafunktionskarte (KFK) ist es, Flächen und deren Verbindungen miteinander hinsichtlich ihrer Klimafunktionen zu

bewerten und daraus planungsrelevante Empfehlungen für die Stadt- und Landschaftsplanung abzuleiten. Hierfür werden vier klimatische Aspekte (siehe Tabelle 5) unter Einbeziehung ihres Ursprungs und ihrer Abhängigkeiten zugrunde gelegt.

Tabelle 5: Vier grundlegende Aspekte und deren Ursprung bzw. ihren Abhängigkeiten, die zur Bewertung der Klima-funktionen herangezogen werden.

KLIMATISCHER ASPEKT	URSPRUNG UND ABHÄNGIGKEIT
Wärmebelastung	<ul style="list-style-type: none"> • solare Einstrahlung • umgebendes Gebäudevolumen • vorhandene Vegetation
Übergeordnetes Strömungsfeld (Luftleitbahnen)	<p>Für die Durchlüftung der Stadt sorgen häufig großräumige (synoptische) Winde. Die Winde in der Stadt hängen dabei von:</p> <ul style="list-style-type: none"> • der Anströmrichtung, • der baulichen und • der topographischen Struktur der Stadt ab. <p>Für die Durchlüftung der Stadt sind daher Luftleitbahnen (zusammenhängende, windoffene Flächen mit geringer Oberflächenrauigkeit) von entscheidender Bedeutung.</p>
Autochthones Windfeld (Flurwind)	<p>Als Ergänzung zu den großräumigen Winden bilden sich, vornehmlich während austauscharmer Wetterlagen, auch lokale (autochthone, also eigenbürtige) Strömungen aus.</p> <p>Häufig werden diese durch lokale Temperaturdifferenzen angetrieben. Ihnen kommt in der stadtklimatischen Bewertung eine besondere Bedeutung zu, da sie an (windstillen) Hitzetagen / Tropennächten die einzigen, vornehmlich kühlenden Windströmungen darstellen.</p>
Nächtliche Kaltluftproduktion	<p>Beim Ausbleiben des externen Strahlungsantriebes der Sonne (nach Sonnenuntergang) findet die Aus- bzw. Abkühlung aller Flächen und Objekte auf der Erdoberfläche statt. Dabei kühlen insbesondere Acker- und Wiesenflächen besonders schnell und stark ab, wodurch die Temperatur der bodennahen Luftschichten sinkt, und so Kaltluft entsteht.</p>

3.2 Ableitung der Planungshinweiskarte

Die Planhinweiskarte (PHK) transformiert die wissenschaftlichen Erkenntnisse der KFK sowie weiterer Analysen, Szenarien und Studien in planungsangepasste Aussagen hinsichtlich einer städtebaulichen und zukunftsorientierten (klimaangepassten) Stadtentwicklung. Durch die integrierte Berücksichtigung vieler unterschiedlicher Thematiken können so synergetische, aber auch konkurrierende Effekte - und die damit verbundenen Maßnahmenempfehlungen - in Bezug auf die kommunale Planung herausgearbeitet werden.

Über die statistische Verteilung der stadtklimatisch relevanten Einflussgrößen (Themenkarten) lassen sich Stadtteilcharakteristika ablesen. Diese können für eine individuelle klimatische Beschreibung der einzelnen Stadtteile sowie der gesamten Stadt und für zukünftige Planungsentscheidungen, z.B. in Hinblick auf eine optimierte städtische Belüftung oder den Abbau von Wärmeinseln, herangezogen werden. Die Planungshinweiskarte in Kombination mit den im Erläuterungsbericht genannten konkreten Handlungsempfehlungen dient zukünftig als Instrument um die Schutz- und Entwicklungsmöglichkeiten von Stadträumen in Bezug auf ihre Empfindlichkeit gegenüber strukturellen Veränderungen hinsichtlich der klimatischen Wirkgrößen frühzeitig abzuleiten. Die Funktionsräume werden dabei konkret beschrieben und in mehreren planerischen Bewertungsstufen dargestellt.

Den einzelnen Bewertungsstufen wiederum werden allgemeine Planungshinweise zu planerisch relevanten Themenkomplexen, wie z.B.

- Nachverdichtungs-/Bebauungsempfindlichkeit,
- Schutzbedürftigkeit,

- Verbesserung/Erhalt Luftaustausch,
- Bedarf an Aufwertungs- und Sanierungsmaßnahmen oder
- Prävention (z.B. Hitze)

zugewiesen.

3.3 Technische Umsetzung

Die Technik der Erstellung einer Klimafunktionskarte hat sich seit Anfang der 1970er dahingehend verändert, dass durch den Einsatz moderner Geoinformationssysteme (GIS) wesentliche Verbesserungen in der Erfassung der klimatischen Wechselbeziehungen möglich wurden. Obwohl national wie auch international keine einheitlichen Standards zur Herleitung einer Klimafunktionskarte existieren, ist die Verschneidung zuvor erfasster stadtklimatischer Einflussgrößen mit dem Ziel der Klimatopausweisung und -evaluierung anerkannte wissenschaftliche Praxis (Katzschner et al. 2009; Lohmeyer 2008; Burghardt 2015; Oke 1987 & 2006; Gartland 2008). Insbesondere haben Ng & Ren (2015) mit ihrem umfassenden Werk „The Urban Climatic Map“ die internationale und nationale Verbreitung und Erstellung moderner Klimafunktionskarten thematisiert.

In diesem Zug erfolgt die Analyse einzelner klimatisch relevanter Größen (Themenkarten), die Berechnung der Klimafunktionskarte sowie die Entwicklung der Planungshinweiskarte innerhalb eines Geoinformationssystems (hier ArcGISPro der Firma Esri).

Wie aus Abbildung 11 ersichtlich, werden die einzelnen Themenkarten (siehe Abbildung 12) mit Hilfe mehrerer und unterschiedlicher Eingangssatensätzen erstellt. Entgegen den Ein-

gangsdaten, welche diskrete stadt- und landschaftsplanerische Informationen abbilden, repräsentieren die Themenkarten klimarelevante räumliche Ableitungen. Die Entwicklung der Themenkarten basiert auf physikalisch korrekten Berechnungen innerhalb des GIS. Die Methodik zur Herleitung wurde unter anderem im Rahmen unterschiedlicher Arbeiten entwickelt und geprüft (Burghardt 2015). Dabei werden die Ergebnisse der Themenkarten immer auch in den planerischen Kontext gesetzt, so dass die Verwendbarkeit im Planungsalltag gewährleistet wird.

Auf Basis der Themenkarten wird in der Folge die Klimafunktionskarte abgeleitet. Dies geschieht unter Zuhilfenahme einer linearen Wertungsmatrix, welche auf den geolokalen Besonderheiten der Stadt, sowie der wissenschaftlichen klimatischen Expertise beruht.

Gleichzeitig fließen auch numerische Simulationen in den Entstehungsprozess ein.

Mit Hilfe der Planhinweiskarte werden die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Themenkarten, der Klimafunktionskarte und – sofern vorhanden – weiterer stadtklimatischer Analysen und Untersuchungen in planungsangepasste Aussagen hinsichtlich einer städtebaulichen und zukunftsorientierten (klimaangepassten) Entwicklung des Untersuchungsraums transformiert.

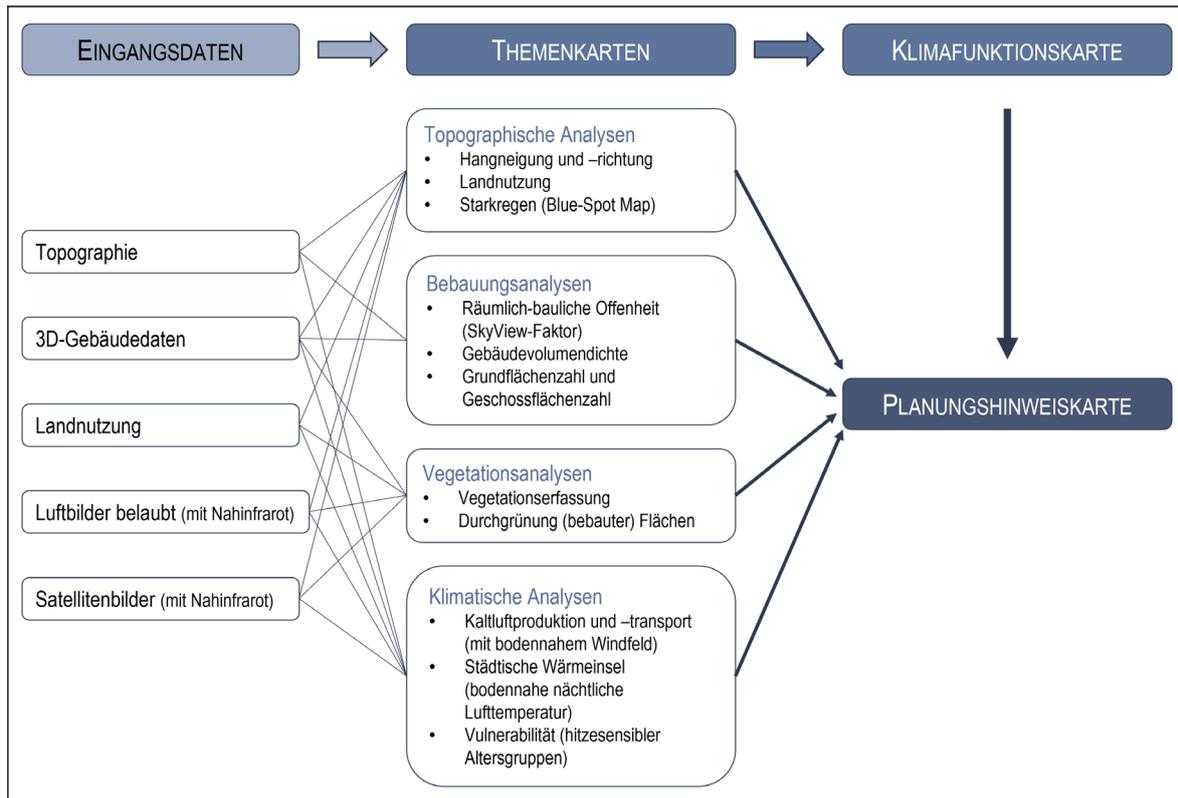


Abbildung 11: Schematische Darstellung der grundsätzlichen Herleitung von KFK und PHK. Die Eingangsdaten bilden diskrete stadt- und landschaftsplanerische Informationen ab, die Themenkarten repräsentieren (klimarelevante) räumliche Ableitungen.

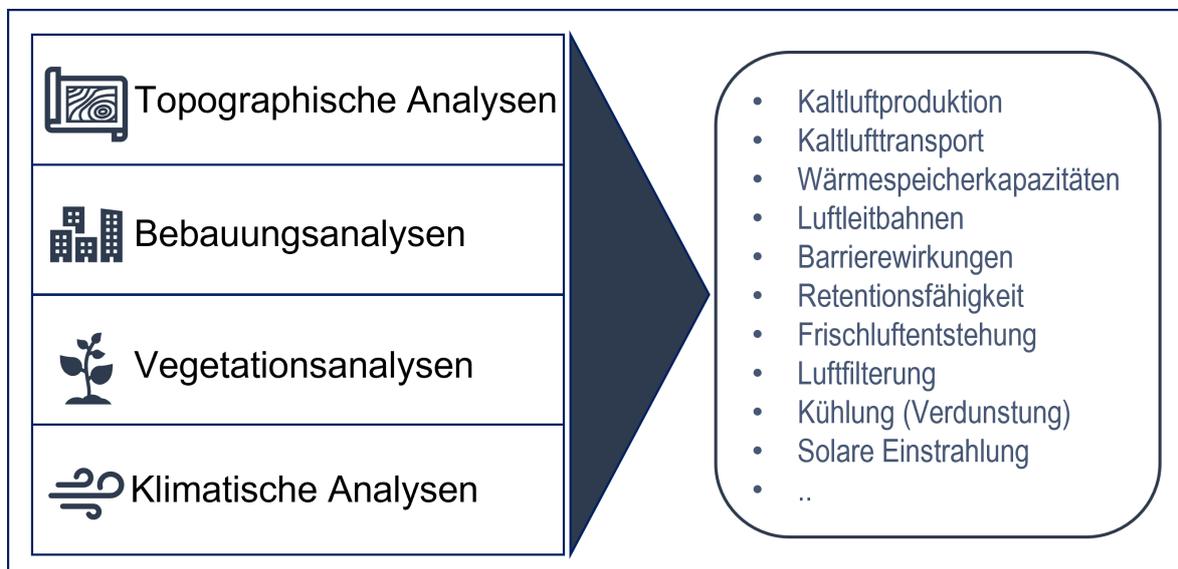


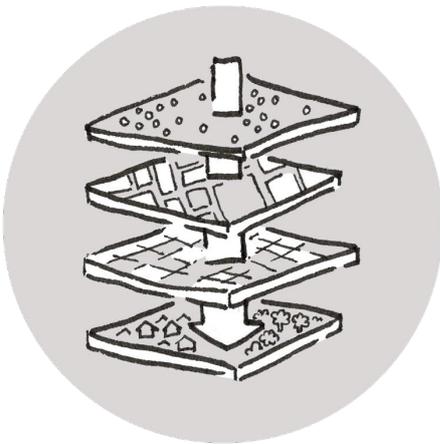
Abbildung 12: Vier Themenkartengruppen (links) mit deren Hilfe unterschiedlichste klimatische Informationen (rechts) für den Untersuchungsraum dargestellt werden können.

3.4 Verwendete Software

3.4.1 Geoinformationssystem

Geoinformationssysteme (GIS) stellen eine Schnittstellentechnologie zwischen räumlichen und technischen Sachdaten dar. Einzig über GIS ist es möglich, Daten im Raum zu verorten und gleichzeitig räumlich und zeitlich zu analysieren

(siehe Abbildung 13). Unter der Berücksichtigung bzw. der Erfassung räumlicher sowie zeitlicher Korrelationen, können analytische, planerische und entwerferische Mehrwerte generiert werden. Gleichzeitig organisieren Geoinformationssysteme Geodatenbestände und ermöglichen so die Verwaltung von räumlichen, zeitlichen und technischen Daten auf Datenbankebene.



Räumliche und zeitliche Analyse unterschiedlichster Eingangsdaten

Unterschiedliche Geo- und Sachdaten

- Vektordaten (Punkt-, Linien-, Flächendaten mit unterschiedlichsten Attributen)
- Rasterdaten (z.B. Luftbilder, Satellitenbilder, etc.)
- Sachdaten (mit einem Positionsbezug – z.B. Einwohnermeldedaten, etc.)

Abbildung 13: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines GIS. Unterschiedlichste Eingangsdaten (Raster- oder Vektordaten) können miteinander verschnitten und analysiert werden, um ein möglichst genaues digitales Abbild der Realität zu schaffen.

3.4.2 Kaltluftproduktion und -abfluss

„KLAM_21 ist ein vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickeltes zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in orographisch gegliedertem Gelände für Fragen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung. (...) Das Modell simuliert die Entwicklung von Kaltluftflüssen und die Ansammlung von Kaltluft in einem beliebig auswählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgebiet. Über diese Fläche wird ein numerisches Gitter gelegt, typische Gitterpunktstände sind dabei 20 bis 50 m. Die Modellgebietsgröße wird in der Regel so gewählt, dass alle relevanten Kaltlufteinzugsgebiete erfasst

sind. Bei 50 m Gitterabstand beträgt z.B. die maximale Größe 22.500 km². Jedem Gitterpunkt werden eine Flächennutzung (schematisiert in 9 Nutzungsklassen, Sondernutzungen können bei Bedarf ergänzt werden) sowie eine Geländehöhe zugeordnet. Jeder Landnutzungs-kategorie wiederum entspricht eine fest vorgegebene Kälteproduktionsrate und eine „Rauigkeit“ als Maß für den aerodynamischen Widerstand sowie gegebenenfalls eine „Porosität“ als Maß für die Durchlässigkeit von bebauten Flächen. Außerdem können aus dem Gelände herausragende Hindernisse (z.B. Einzelgebäude, Dämme, Schallschutzwände) modelliert werden, die von der Kaltluft erst dann überwunden werden, wenn sie eine entsprechende Höhe erreicht hat. Das

Zusammenspiel dieser Einflussgrößen bestimmt das Entstehen, Fließen und die Ansammlung der Kaltluft. Der Start der Simulation liegt kurz vor Sonnenuntergang. Zu diesem Zeitpunkt wird eine annähernd adiabatisch geschichtete Atmosphäre vorausgesetzt, in der keine horizontalen Gradienten der Lufttemperatur und der Luftdichte vorhanden sind. Es werden während der gesamten Nacht gleichbleibend gute Ausstrahlungsbedingungen, das heißt eine geringe Bewölkung, angenommen. Möglich ist die Vorgabe einer schwachen, durch regionale Luftdruckunterschiede hervorgerufenen Grundströmung des Windes. Der Simulationszeitraum von 8 Stunden entspricht der mittleren Andauer einer Sommernacht. Im Gegensatz zu stark vereinfachenden Modellen, die auf einer „statischen“ Analyse des Reliefs und der Landnutzung beruhen, können mit KLAM_21 Kaltluftbewegungen in ihrer Dynamik und zeitlichen Entwicklung flächendeckend wiedergegeben werden. Die physikalische Basis des Modells bilden eine vereinfachte Bewegungsgleichung und eine Energiebilanzgleichung, mit der der Energieverlust und damit der „Kälteinhalt“ der Kaltluftschicht bestimmt wird. Aus dem Kälteinhalt einer jeden Säule wird dann (unter der Annahme einer bestimmten Höhenabhängigkeit der Abkühlung) die Kaltluflhöhe errechnet. Als Ergebnis erhält man die flächenhafte Verteilung der Kaltluflhöhe und ihrer mittleren Fließgeschwindigkeit oder der Volumenströme zu beliebig abgreifbaren Simulationszeitpunkten. Der Vergleich von IST- und Planungszuständen wird mit Differenzkarten oder zeitlichen Animationen der Kaltluflhöhe, der Fließgeschwindigkeit oder der Volumenströme visualisiert.“ (DWD 2016)

3.4.3 Windfeldsimulation

Um die Interaktionen der vielen unterschiedlichen Faktoren realitätsnah zu simulieren, werden Windfeldsimulationen primär mit numerischen Strömungsmechanik-Modellen (CFD Computer Fluid Dynamics) durchgeführt.

Durch die Verwendung der international evaluierten Softwareerweiterung „Airflow Analyst“ ist es möglich, das Windfeld direkt innerhalb des Geoinformationssystems zu berechnen. Bei der Berechnung des Windfeldes wird eine räumliche Auflösung von 0,5 bis 1 m zugrunde gelegt. Da das berechnete Windfeld den 3-dimensionalen Raum abdeckt, können unterschiedlichste Informationen zum Windfeld für jede beliebige Höhe abgefragt werden. Dies ist insbesondere dann von großem Interesse, wenn zu überprüfen ist, inwieweit vertikale und horizontale Veränderungen (z.B. durch neue Gebäudestrukturen, Vegetation o.ä.) im Windfeld auftreten.

Innerhalb des Geoinformationssystems kann die Simulationssoftware numerische Analysen turbulenter Strömungen über komplexer Topografie im urbanen und ruralen Raum durchführen. Als Eingangsparameter werden eine gitterartige Beschreibung der Geländehöhe, Rauigkeit sowie Windbeobachtungsdaten oder ein alternatives Grenzschichtprofil, welches in einer Datei vorliegt, verwendet. Das Windfeld wird in einem 3D-Raster berechnet und ermöglicht die Nachbearbeitung der Ergebnisse sowie den Export von Daten in ein GIS-konformes Austauschformat.

4 Charakterisierung des Untersuchungsraums

4.1 Räumliche Charakterisierung der Region

Die Stadt Ingelheim am Rhein befindet sich westlich der Landeshauptstadt Mainz am linken Rheinufer und erstreckt sich über eine Fläche von 73 km². Ingelheim gehört zum Landkreis Mainz-Bingen und hat rd. 36.000 Einwohner (Statistisches Landesamt RLP 2021, Ingelheim 2021). Der Rhein im Norden des Stadtgebietes bildet dort die Grenze der Stadt und ebenso die Grenze des Bundeslandes Rheinland-Pfalz zum Nachbarland Hessen. Ingelheim befindet sich auf 50°02'561 nördlicher Breite und 8°15'869 östlicher Länge (Topographic Map 2022). Angrenzende Gemeinden sind Bingen, Gau-Algesheim und Mainz. Die Stadt ist durch eine Bahnlinie mit drei Bahnhöfen und Halt in Ingelheim, die Bundesautobahn A60 und eine Fähre auf die andere Seite des Rheins angebunden. Ingelheim selbst besteht aus insgesamt zehn Stadtteilen:

- Nieder-Ingelheim
- Ober-Ingelheim
- Ingelheim-West
- Großwinterheim
- Heidesheim
- Wackernheim
- Sporkenheim
- Frei-Weinheim
- Heidenfahrt
- Uhlerborn

4.2 Topographie

Topographisch befindet sich der Untersuchungsraum in der Talregion des Rheins (siehe Abbildung 14). Das Minimum liegt mit ca. 78 m

ü. NN in den Rheinauen an der nördlichen Grenze des Untersuchungsraums. Der Ingelheimer Siedlungsbereich ist in Richtung des Rheins überwiegend flach geprägt (rd. 80 – 100 m ü. NN). Südlich der, von Südwest nach Nordost verlaufenden Bahnstrecke („Linke Rheinstrecke“) steigt das Gelände zunehmend an und wird nur durch das von Süden nach Nordwesten verlaufende Tal der „Selz“ eingeschnitten. Beidseits der „Selz“ steigen die Höhenzüge im Stadtgebiet von Ingelheim am Rhein auf knapp 250 m ü. NN an. Die höchsten Erhebungen im Stadtgebiet sind der „Mainzer Berg“ (247,8 m ü. NN) östlich der „Selz“ und der „Westerberg“ (247,5 m ü. NN) westlich des Fließgewässers.

Somit ergibt sich innerhalb des Untersuchungsraums eine maximale Höhendifferenz von knapp 170 m. Etwas weniger stark ausgeprägt macht sich die Höhendifferenz besonders im Naturschutzgebiet „Nordausläufer Westerberg“ sowie in den Übergängen städtischer Siedlungsräume (wie z.B. Nieder-Ingelheim und Großwinterheim) zu deren anliegenden Hängen bemerkbar. Der südliche Teil des Ingelheimer Siedlungs- und Untersuchungsraums wird durch die in Richtung Nord bzw. Nordwest ausgerichtete Hangsituation charakterisiert. Markant gestaltet sich die Hangexposition zu beiden Seiten der „Selz“, welche eine Schneise durch den südlichen Raum zieht. Die dominante Hangrichtung liegt somit in nordwestlicher Richtung und folgt damit dem primären topographisch absteigenden Verlauf des Geländes in Richtung des Rheins. Sowohl der tiefer gelegene, nördliche Teil des Untersuchungsraums als auch das höher gelegene Gelände zur südlichen Grenze hin ist davon abgesehen überwiegend flach geprägt.

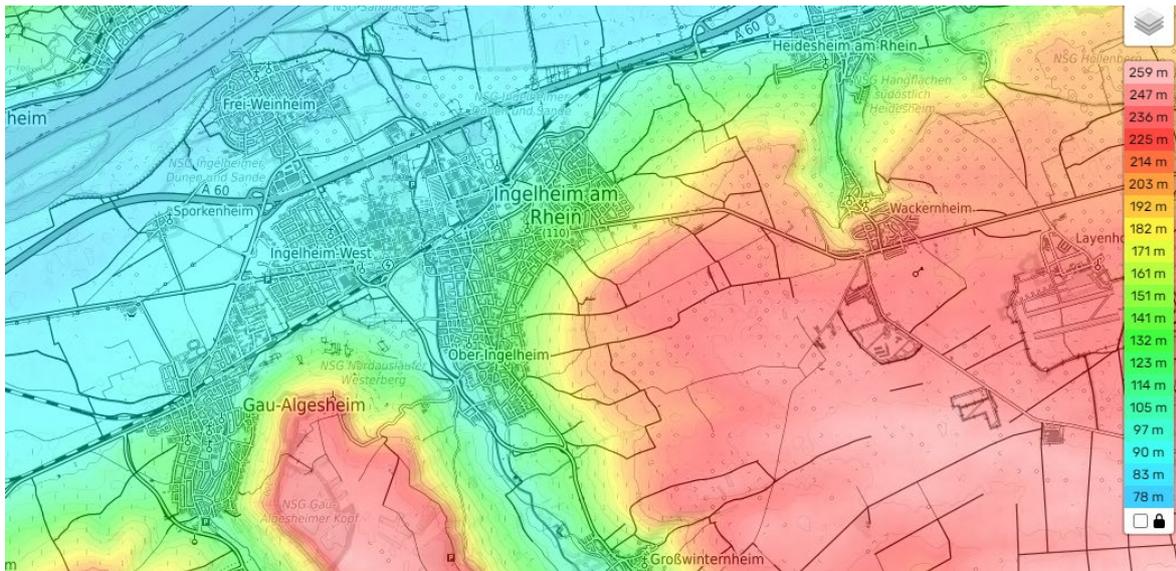


Abbildung 14: Topographisches Profil der Stadt Ingelheim am Rhein und der näheren Umgebung. Die weiß-roten Bereiche stellen die Höhenzüge („Mainzer Berg“ 247,8 m ü. NN, östlich und „Westerberg“ 247,5 m ü. NN, westlich der „Selz“) und die türkis-blauen Bereiche die Niederungen des Rheins (rd. 80 m ü. NN) dar.

4.3 Naturräumliche Einordnung

Eine Gliederung Deutschlands dient der einheitlichen Einteilung und Kategorisierung von Landschaften. Die Methodik nach Meynen und Schmithüsen (2012) beinhaltet die Unterscheidung in naturräumliche Großregionen, Haupteinheiten und Untereinheiten und berücksichtigt in erster Linie geomorphologische, geologische, hydrologische, biogeographische und bodenkundliche Kriterien (siehe Abbildung 15).

Die Naturräumliche Großregion 1. Ordnung, in dessen nördlichen Teil sich Ingelheim am Rhein befindet, ist das „Oberrheinisches Tiefland“ (D53).

Die lokalräumlichen Gegebenheiten (2. Ordnung) des Untersuchungsgebietes entsprechen dem „Rhein-Main-Tiefland“ (Nr. 23) sowie Randbereichen des „Nördlichen Oberrheintiefland“ (Nr. 22) und auf der Ebene der Untereinheiten (3. Ordnung) der „Ingelheimer Rheinebene“ (237).

Das „Oberrheinisches Tiefland“ entspricht der Großlandschaft „Oberrheinisches Tiefland und Rhein-Main-Tiefenebene“ (D53) nach Ssymank et al. (1994) (siehe Abbildung 16).

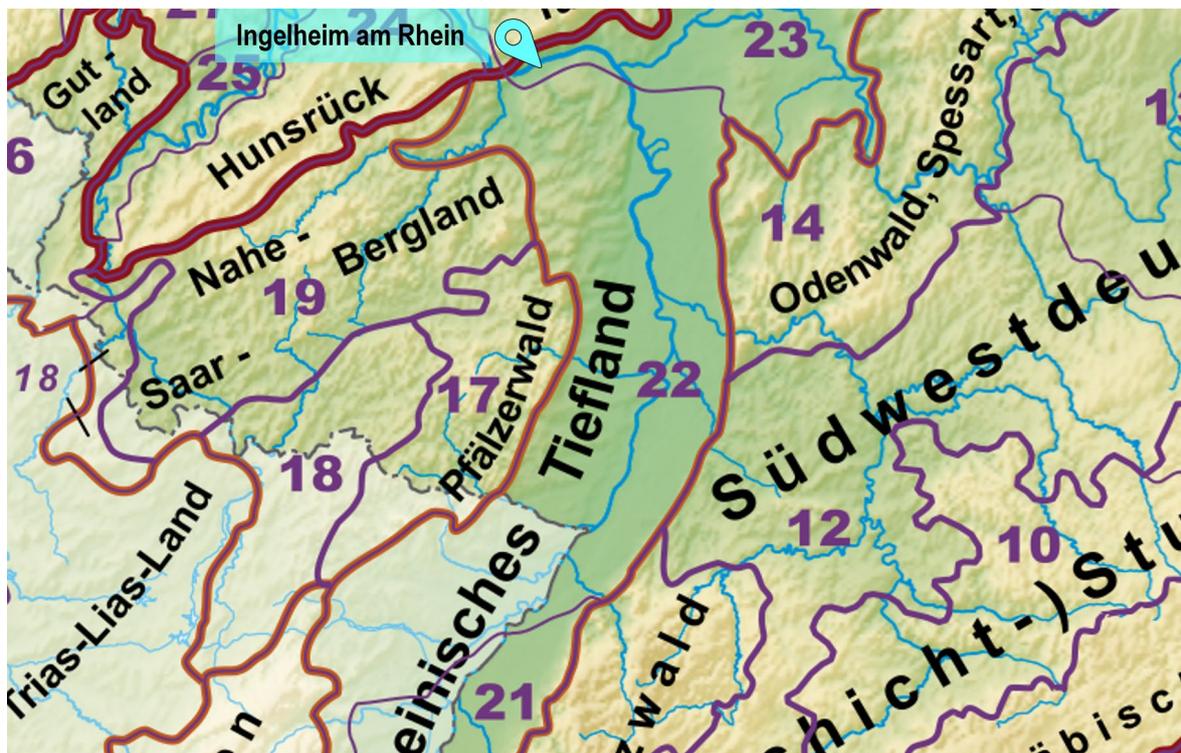


Abbildung 15: Lage der Stadt Ingelheim am Rhein (hellblauer Marker) im Kontext der naturräumlichen Großregionen Deutschlands nach Meynen und Schmithüsen (2012).



Abbildung 16: Lage der Stadt Ingelheim am Rhein (schwarzer Marker) im Kontext der der Großlandschaften nach Ssymank et al (1994)

Auf dem Stadtgebiet Ingelheims sind zwei verschiedene Landschaftstypen zu finden. Zum einen die Landschaft „Rheinhessen“ (ID 279), bei der es sich um eine Weinbaulandschaft mit geringer naturschutzfachlicher Bedeutung handelt, und außerdem die „Mainz-Ingelheimer Rheinebene“ (ID 363), eine Obstbaulandschaft, die vom BfN als schutzwürdige Landschaft eingestuft wird (BfN 2022). Die Mainz-Ingelheimer Rheinebene erstreckt sich linksrheinisch von Mainz bis Bingen und zeichnet sich durch viele waldreiche Aueninseln aus. Der Rhein hat in diesem Abschnitt mit 1 km Breite seine größte Ausdehnung im Oberrheinischen Tiefland. Auf den sich hier befindenden Flugsanddünen kann nicht nur Obst- und Gemüseanbau betrieben werden, außerdem lassen sich Reste ursprünglicher Flora finden. Diese so vielfältige Landschaft umfasst deshalb auch einen Schutzgebietsanteil von 51,27 %, davon sind 49,37 % Vogelschutz-

gebiete, 30,6 % FFH-Gebiet und 29,71 % Naturschutzgebiet (BfN 2022b). Die Landschaft „Rheinhessen“ umfasst primär den südlichen Stadtraum von Ingelheim sowie das ansteigende Hügelland und wird vor allem durch Weinanbau dominiert. Durch die Lee-Stellung zu den Mittelgebirgen im Westen zeichnet sich Rheinhessen durch ein trockenes und warmes Klima aus, das den Wein- und Obstbau begünstigt. Die Selz ist eines der wenigen Fließgewässer dieser Landschaft. Der Schutzgebietsanteil dieser Landschaft ist gering und beträgt nur 5,98 %. Davon handelt es sich bei 4,74 % um Vogelschutzgebiete und 1,53 % Naturschutzgebiete (BfN 2022c).

Der Großteil des Stadtgebietes Ingelheims (siehe Abbildung 17) liegt im Landschaftsschutzgebiet (LSG) „Rheinheinisches Rheingebiet“, das eine Gesamtgröße von 36122,04 ha hat und sich von Mainz bis Bingen entlang des Rheins erstreckt. Im Stadtgebiet liegt außerdem das

LSG „Selztal“ (3118,46 ha). Im Stadtgebiet finden sich außerdem neun Naturschutzgebiete (NSG). Dabei handelt es sich um NSG „Sandlache“ (57,66 ha), „Fulderaue-Ilmenau“ (338,08 ha) und „Ingelheimer Dünen und Sande“ (340,23 ha) im Norden/ Nordwesten der Stadt, das NSG „Nordausläufer Westerberg“ (180,41 ha) im Süden und die NSG „Hangflächen um den Heidesheimer Weg“ (334,76 ha), „Hangflächen südöstlich Heidesheim“ (151,61 ha), „Höllenberg“ (151,47 ha), „Lennebergwald“ (284,42 ha) und „Haderaue-Königsklinger Aue“ (35,5 ha) im Westen. Die Auen-Schutzgebiete zeichnen sich besonders durch typische Wasserwechselbereiche aus, die naturnahe Uferzonen und Altwässer beinhalten und Lebensraum seltener und gefährdeter Tier- und Pflanzenarten sind. Auch als Rast- und Wintergebiet von Zugvögeln und Standort von Kulturlandschaftselementen wie Kopfweiden und Streuobstbeständen sind die NSG „Fulderaue-Ilmenau“, „Haderaue-Königsklinger Aue“ sowie „Sandlache“ schützenswerte Bestandteile der Landschaft (Landkreis Mainz-Bingen 1997, 1992, 1995a).

Beim NSG „Ingelheimer Dünen und Sande“ handelt es sich als Teil des Kalkflugsandgebietes Mainz-Ingelheim um ein Biotopsystem von nationaler und europäischer Bedeutung für den Arten- und Biotopschutz. Die NSG „Fulderaue-Ilmenau“ sowie „Ingelheimer Dünen und Sande“ sind außerdem als FFH-Gebiete ausgewiesen (BfN 2002d). Das Schutzgebiet „Nordausläufer Westerberg“ zeichnet sich durch offene Sandflächen und Sandpionierfluren aus, hier ist eine strukturreiche, durch Kalkflugsande geprägte Kulturlandschaft mit naturnahen Gehölzen, Hohlwegen, Streuobstbeständen und Hecken zu finden, die so einen wichtigen und seltenen Lebensraum für dort vorkommende

Tiere und Pflanzen bietet (Landkreis Mainz-Bingen 2003). Die NSG „Hangflächen um den Heidesheimer Weg“ und „Hangflächen südöstlich Heidesheim“ sind beide ebenfalls wegen des Vorkommens von Sandpionierfluren und damit einhergehender Vegetation geschützt sowie den ausgeprägten Merkmalen historischer Kulturlandschaften. Das NSG „Hangflächen südöstlich Heidesheim“ schützt außerdem dort vorkommende naturnahe Quell- und Gewässerbereiche, ebenso wie die „Hangflächen um den Heidesheimer Weg“, wo zudem noch Ufergehölze, Schilfflächen und Feucht- und Bruchflächen vorkommen (Landkreis Mainz-Bingen 2003). Beim NSG „Höllenberg“ handelt es sich um eine Landschaft mit offenen Sandflächen, Sandheiden und Sandkiefernheiden sowie Bruchflächen und Streuobstwiesen. Auch hier sind Kalkflugsanddünen und -flächen als Bestandteil des Kalkflugsandgebietes geschützt (Landkreis Mainz-Bingen 1995b). Das NSG „Lennebergwald“ ist ein Gebiet mit ebenfalls an Kalkflugsande gebundenen Lebensgemeinschaften, hier gibt es Dünen- und Sand-Trockenwäldern und Kiefernheiden. Ausgeprägte Übergangszonen zwischen Wald- und Offenlandbiotopen prägen das Schutzgebiet. Außerdem finden sich hier naturnahe Teiche und Quellbereiche. Neben den Kalkflugsandbereichen werden außerdem naturnahe und standortheimische Eichen- Buchen und Buchenmischwälder sowie Feucht- und Nasswälder geschützt (Landkreis Mainz-Bingen 1996). (Naturschutzverwaltung RLP 2022) Große Teile der Ingelheimer Naturschutzgebiete sind zusätzlich auch Vogelschutzgebiete im Natura2000-Netz. Auf das Stadtgebiet erstrecken sich die beiden FFH-Gebiete „Rheinniederung Mainz-Bingen“ (1148 ha) und „Dünen- und Sandgebiet Mainz-Ingelheim“ (1302 ha) (BfN 2022d).

Die Flächennutzung innerhalb des Stadtgebietes wird stark von der Landwirtschaft dominiert, darauf entfallen ca. 36,4 % der Flächen. Waldgebiete und forstwirtschaftliche Nutzung findet statt auf 8,3 % der Gesamtfläche. Bau- und Sied-

lungsflächen machen 14,9 % aus, wovon die bestehenden Gewerbeflächen 3 % einnehmen und die Wohnbaufläche bei 6 % liegt. Wasserflächen finden sich auf 6 % der Stadtfläche. (Statistisches Landesamt RLP 2021)

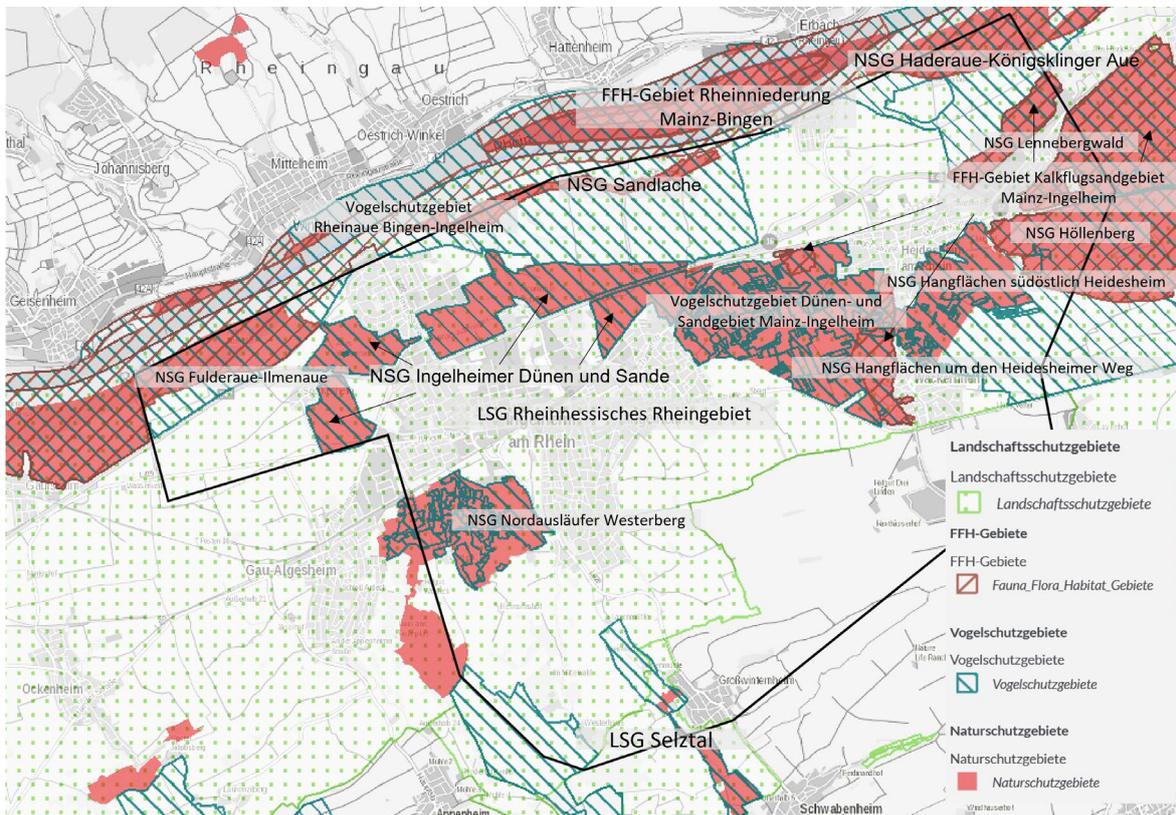


Abbildung 17: Schutzgebiete im Bereich Ingelheim am Rhein (schwarze Linie). (Rot eingefärbt = NSG; Grün punktiert = LSG; Rot schraffiert = FFH-Gebiet; Blau schraffiert = Vogelschutzgebiet) (BfN 2022).

5 Historische Klimaanalysen

5.1 Klimatische Charakterisierung der Region

In der bioklimatischen Bewertungskarte des DWD (Graw et al. 2019) zeichnet sich die Region durch eine vermehrte bis häufige Wärmebelastung (Stufe 4/5 von 6) und einem selten auftretenden Kältereiz (Stufe 1 von 6) aus. Ingelheim am Rhein ist von einem submaritimen Klima geprägt, was im Durchschnitt mit einer Jahreschwankung der Lufttemperatur von $>17^{\circ}$ Kelvin rechnen lässt. Geringe Tages- und/oder Jahresgänge der Temperatur und hohe relative Luftfeuchte sind charakteristisch für das maritime

Klima (DWD 2022b). Hinsichtlich des subkontinentalen Klimas gelten diese klimatischen Parameter in abgeschwächter Form.

Gleichzeitig findet sich die Stadt am Rand einer niederschlagsbenachteiligten Zone, die mit <600 mm Niederschlag unterhalb des bundesdeutschen Durchschnitts liegt.



Abbildung 18: Ausschnitt zur Übersichtskarte „klimatischen Gliederung Deutschland“ (Hendl und Endlicher 2003). Die Stadt Ingelheim am Rhein (Marker) liegt in einer Zone des submaritimen Klimas und am Rand eines niederschlagsbenachteiligten Bereichs (rote Punkte, < 600 mm/Jahr)

5.1.1 Temperatur und Niederschlag

Die Raster beruhen auf DWD-Stationsdaten (Kaspar et al. 2013) und stehen mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km zur Verfügung. Die nachfolgenden Raster-Diagramme beruhen auf Daten einer zentral ausgewählten Rasterzelle im Stadtgebiet der Stadt Ingelheim am Rhein für vier aufeinanderfolgende 30-jährige Mittel:

- 1962 – 1991 (1),
- 1972 – 2001 (2),
- 1982 – 2011 (3) und
- 1992 – 2021 (4).

Bei der Auswertung der Monatsmittelwerte für die **Lufttemperatur** (2 m ü. Grund) (DWD CDC 2022a) wird deutlich, dass für diesen klimatischen Aspekt ein Anstieg der Werte im Bereich

von knapp 1 bis ungefähr 1,5, maximal 1,7 °C seit 1962 für die unterschiedlichen Monate zu verzeichnen ist (siehe Diagramm 1).

Im Vergleich (siehe Tabelle 6) des ältesten (1962 – 1991) und des jüngsten (1992 – 2021) 30-jährigen Mittels fallen vor allem der April mit +1,7 °C sowie der Juni mit +1,6 °C und der Februar, Juli und August mit jeweils +1,4 °C Differenz ins Auge. Im Vergleich der beiden letzten 30-jährigen Mittel zeigt sich die stärkste Veränderung im Monatsmittel des Februars bzw. des Junis mit +0,7 °C bzw. +0,8 °C.

Negative Monatsmittelwerte traten in keiner der Periode auf.

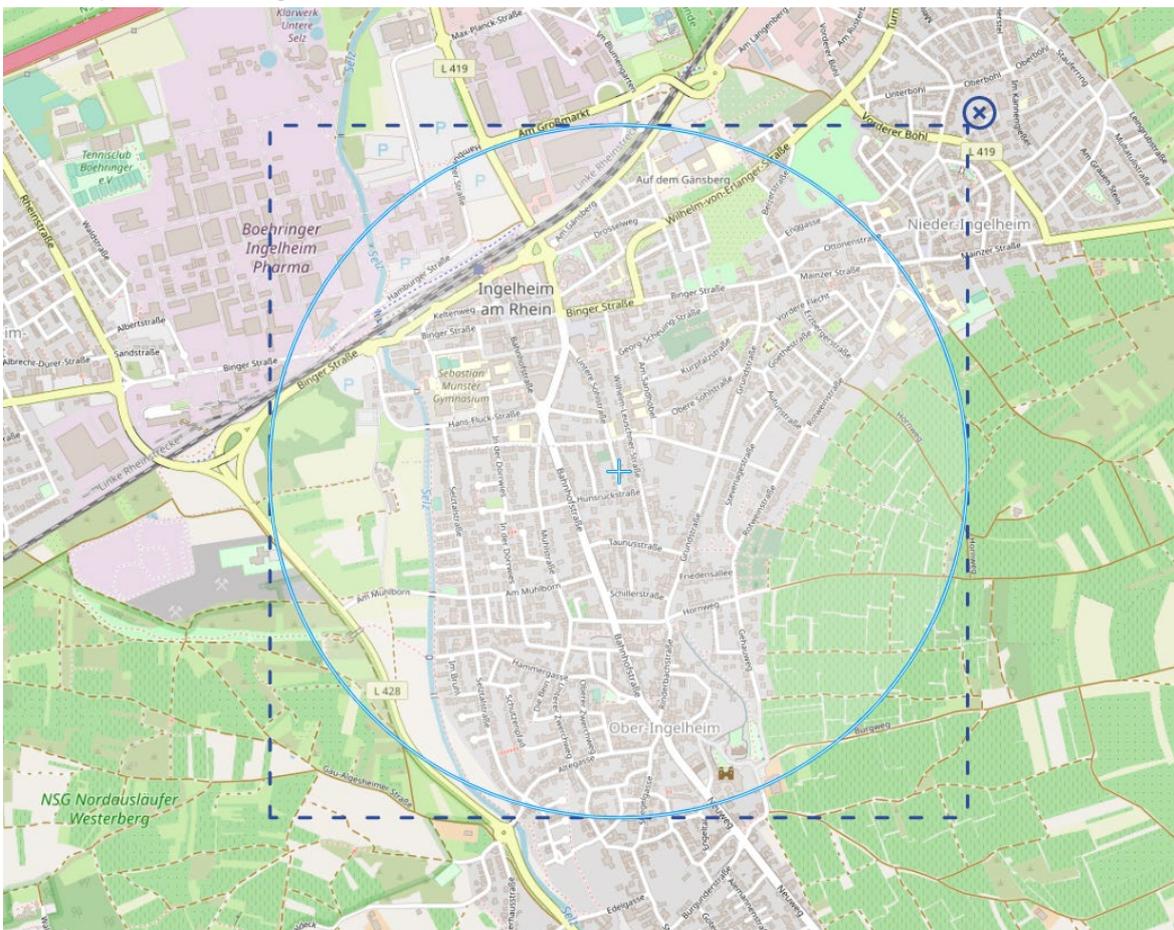


Abbildung 19: Ausgewählte Rasterzelle der Datensätze zur Temperatur und Niederschlag sowie der Ereignistage

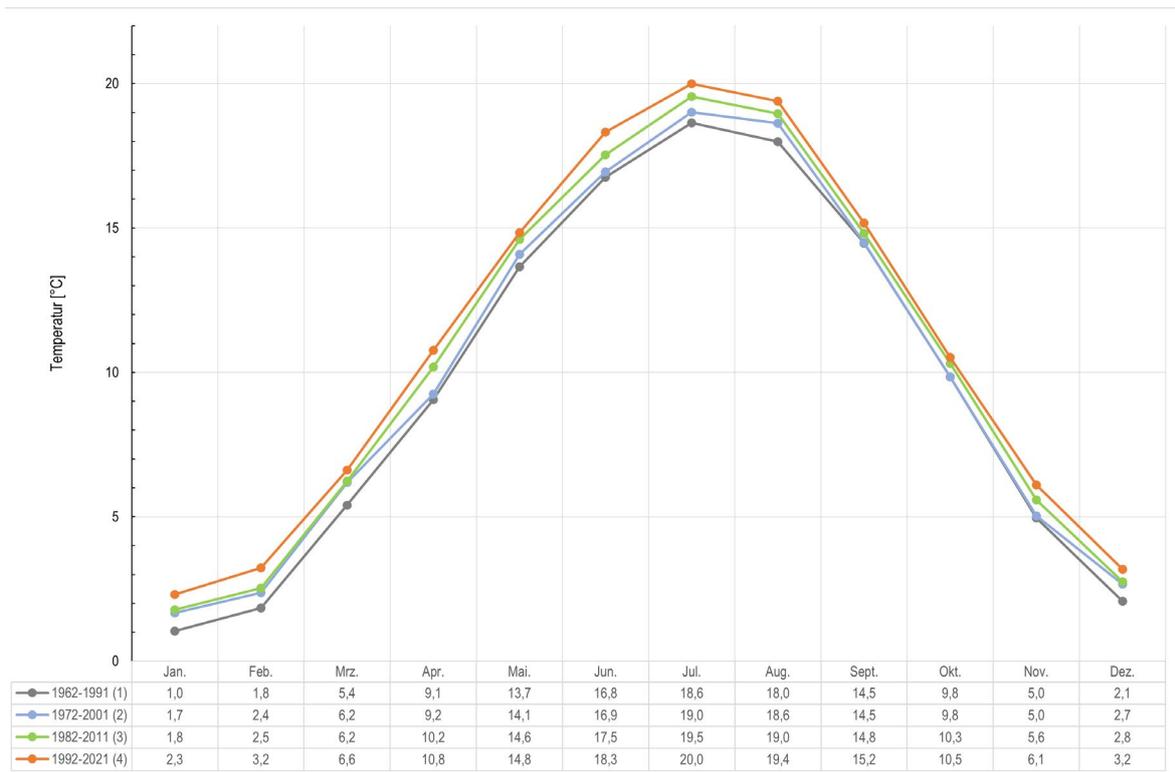


Diagramm 1: Darstellung der monatlichen Durchschnittstemperatur [°C] in einer Höhe von 2 m über Grund für unterschiedliche 30jährige Mittel. (1) 1962 bis 1991 (graue), (2) 1972 bis 2001 (blau), (3) 1982 bis 2011 (grün) und (4) 1992 bis 2021 (orange). Deutlich erkennbar ist ein Anstieg der Monatsmittelwerte zur Lufttemperatur seit 1962. Eine größere Darstellung des Diagramms ist im Anhang zu finden.

Tabelle 6: Differenzbewertung der monatlichen Durchschnittstemperaturen [°C] von den unterschiedlichen 30jährigen Mitteln. Innerhalb eines Vergleichs (Zeile), z.B. (1) zu (4) zeigt die zunehmende Farbintensität die größte Differenz an. Im genannten Vergleich ist die monatliche Durchschnittstemperatur [°C] im April um +1,7°C am stärksten angestiegen, gefolgt vom Monat Juni mit +1,6°C.

Δ [°C]	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
(1) zu (4)	+1,3	+1,4	+1,2	+1,7	+1,2	+1,6	+1,4	+1,4	+0,7	+0,7	+1,2	+1,1
(2) zu (4)	+0,6	+0,9	+0,4	+1,5	+0,7	+1,4	+1,0	+0,8	+0,7	+0,7	+1,1	+0,5
(3) zu (4)	+0,5	+0,7	+0,4	+0,6	+0,2	+0,8	+0,4	+0,4	+0,4	+0,2	+0,5	+0,4

Bei der Auswertung der Monatssummen zum **Niederschlag** (DWD CDC 2022b) zeigt sich für die Jahressummen dieses klimatischen Aspekts nur eine geringe Veränderung in den Gesamtmengen:

- 1962-1991 (1) → Σ 736,1 mm
- 1972-2001 (2) → Σ 753,4 mm
- 1982-2011 (3) → Σ 772,6 mm
- 1992-2021 (4) → Σ 752,0 mm

Zwar bleiben die Jahresniederschläge ungefähr gleich, so zeigt sich jedoch eine zunehmende Verschiebung der Niederschlagsmengen während des Jahres. Besonders auffällig zeigen sich hier die Monate März bis Juni sowie teilweise der September, die im Vergleich des jüngsten 30-jährigen Mittel (4) mit allen anderen 30-jährigen

Mitteln kontinuierlich weniger Niederschlag in der Monatssumme aufweisen (siehe Diagramm 2). Durch dieses voranschreitende Ungleichgewicht bei den Niederschlagsmengen werden Dürreperioden und Probleme in der Landwirtschaft (fehlendes Wasser bei der Ansaat und im Reifeprozess) forciert.

Im Gegensatz zum „Wetter“ beziehen sich Aussagen zum „**Klima**“ immer auf einen längeren Zeitraum. Um möglichst alle wesentlichen Ausprägungen des Klimas mit seiner natürlichen Variabilität zu erfassen, haben sich 30-jährige Perioden für wissenschaftlich belastbare Aussagen als besonders geeignet erwiesen.

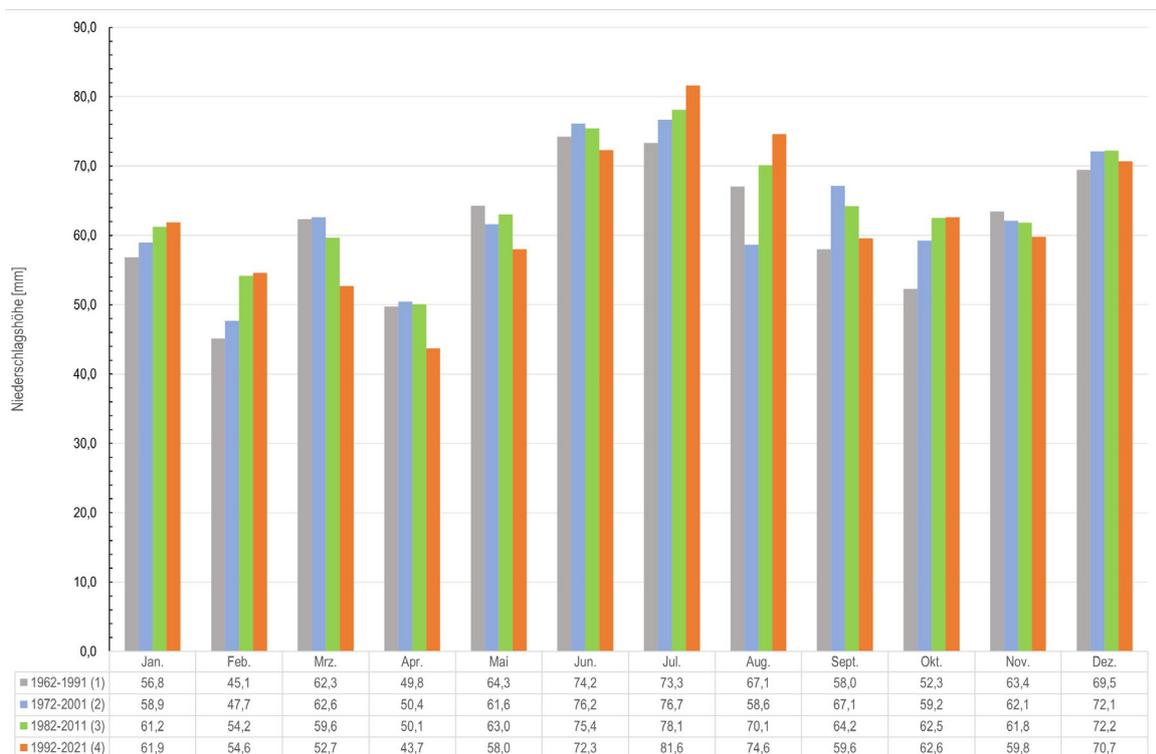


Diagramm 2: Darstellung der 30-jährigen Mittel der Monatssummen zum Niederschlag [mm]. Darstellung der monatlichen Niederschlagssummen für unterschiedliche 30jährige Mittel. (1) 1962 bis 1991 (graue), (2) 1972 bis 2001 (blau), (3) 1982 bis 2011 (grün) und (4) 1992 bis 2021 (orange). Auffällig ist eine zunehmende Abnahme der Niederschläge in den Monaten März bis Juni und September. Eine größere Darstellung des Diagramms ist im Anhang zu finden.

Tabelle 7: Differenzbewertung der monatlichen Niederschlagssummen [mm] von den unterschiedlichen 30jährigen Mitteln. Innerhalb eines Vergleichs (Zeile), z.B. (1) zu (4) zeigen Grüntöne eine Erhöhung des Niederschlags im letzten 30jährigen Mittel, während Rottöne eine Abnahme anzeigen.

Δ [mm]	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Σ
(1) zu (4)	+5,0	+9,5	-9,6	-6,0	-6,3	-2,0	+8,3	+7,5	+1,6	+10,3	-3,6	+1,2	+15,9
(2) zu (4)	+2,9	+6,9	-9,9	-6,7	-3,6	-3,9	+4,9	+15,9	-7,6	+3,4	-2,3	-1,5	-1,4
(3) zu (4)	+0,7	+0,4	-6,9	-6,3	-5,0	-3,2	+3,5	+4,4	-4,7	+0,1	-2,0	-1,6	-20,6

5.1.2 Ereignistage

Unter dem Begriff der „Ereignistage“ versteht man im klimatologischen Kontext jene Tage, die aufgrund ihrer besonders hohen bzw. niedrigen Temperaturen oder auch aufgrund eines extre-

men Niederschlags herausstechen. Im langjährigen Verlauf lassen sich so klimatische Entwicklungen beschreiben, auf die in der Klimaanpassung einzugehen ist. Hinsichtlich der Lufttemperatur werden vier unterschiedliche Ereignistage (siehe Tabelle 8) mit ihren zugehörigen Rahmenparametern beschrieben.

Tabelle 8: Ereignistage zur Lufttemperatur und die dazugehörigen Definitionen

EREIGNISTAG	DEFINITION
Sommertage (DWD-CDC 2022c)	Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C
Heiße Tage (DWD-CDC 2022d)	Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C
Frosttage (DWD-CDC 2022e)	Minimum der Lufttemperatur < 0 °C
Eistage (DWD-CDC 2022f)	Maximum der Lufttemperatur < 0 °C

Die Anzahl der jährlichen Sommertage wie auch die der jährlichen Heißen Tage (siehe Diagramm 3) in der Zeit von 1951-2021 in Ingelheim am Rhein hat, trotz der normalen Schwankungen, kontinuierlich zugenommen. Während bis 1990 die Anzahl der Sommertage zwischen 25 und 50 Tagen im Jahr pendelte, wurden ab 1990 ausschließlich Jahre mit mehr als 40 Sommertagen registriert. Der gleiche Versatz, wenn auch in einem geringeren Umfang, ist bei den Heißen Tagen zu beobachten. Während vor 1990 die Anzahl dieser Ereignistage überwiegend unter 10 Tagen pro Jahr lag, fällt die Anzahl nach 1990 selten unter 10 Tage pro Jahr. Spitzenreiter sowohl bei den Sommertagen wie auch bei den Heißen Tagen sind die Jahre 2003 und 2018 mit über 90 Sommertagen bzw. knapp 30 Heißen Tagen. Im Verhältnis stechen bei den Heißen Tagen außerdem die Jahre 2015 und 2019 mit jeweils mehr als 25 Ereignistagen hervor. Eine höhere Anzahl von aufeinanderfolgenden Sommertagen (und Heißen Tagen) kann besonders in einem hochverdichteten Stadtraum den städtischen Wärmeinsel-Effekt (siehe Kapitel 2.2)

fördern bzw. forcieren. Daraus i.d.R. resultierende hohe Nachttemperaturen von bspw. über 20 °C (Tropennacht), die, über einen längeren Zeitraum und zusätzlich zu den hohen Tagestemperaturen, eine zusätzliche Belastung für Menschen, Tiere und Pflanzen, aber auch langfristig für die Stadt und ihre Strukturen darstellen.

Eine **Hitzewelle** ist eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung. Sie ist ein Extremereignis, welches die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme und die Infrastruktur schädigen kann. Neben der Lufttemperatur sind hierbei weitere Parameter, wie die Luftfeuchte, Strahlung und Wind von Bedeutung.

International existiert keine einheitliche Definition des Begriffs Hitzewelle. Definitionen basieren häufig auf einer Kombination von Perzentil basierten Schwellenwerten (z.B. 98. Perzentil der Tagesmaximum-Werte und einer minimalen Andauer z.B. 3 Tage). (DWD 2022a)

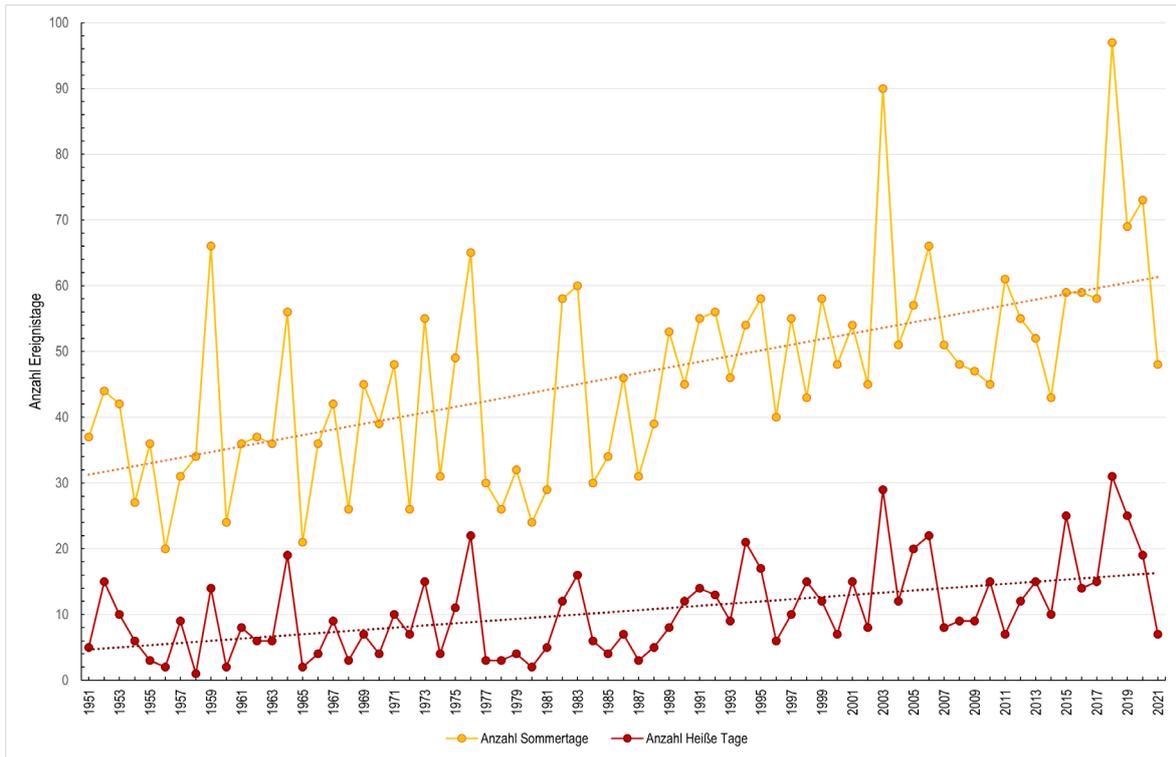


Diagramm 3: Darstellung der jährlichen Anzahl der Sommertage (LT Max. $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, gelbe Linie) und Heißen Tage (LT Max. $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, rote Linie) seit 1951 bis 2021. Die jeweiligen Trendlinien sind gepunktet dargestellt, verzeichnen aber für beide Ereignistage einen Anstieg. Eine größere Darstellung des Diagramms ist im Anhang zu finden.

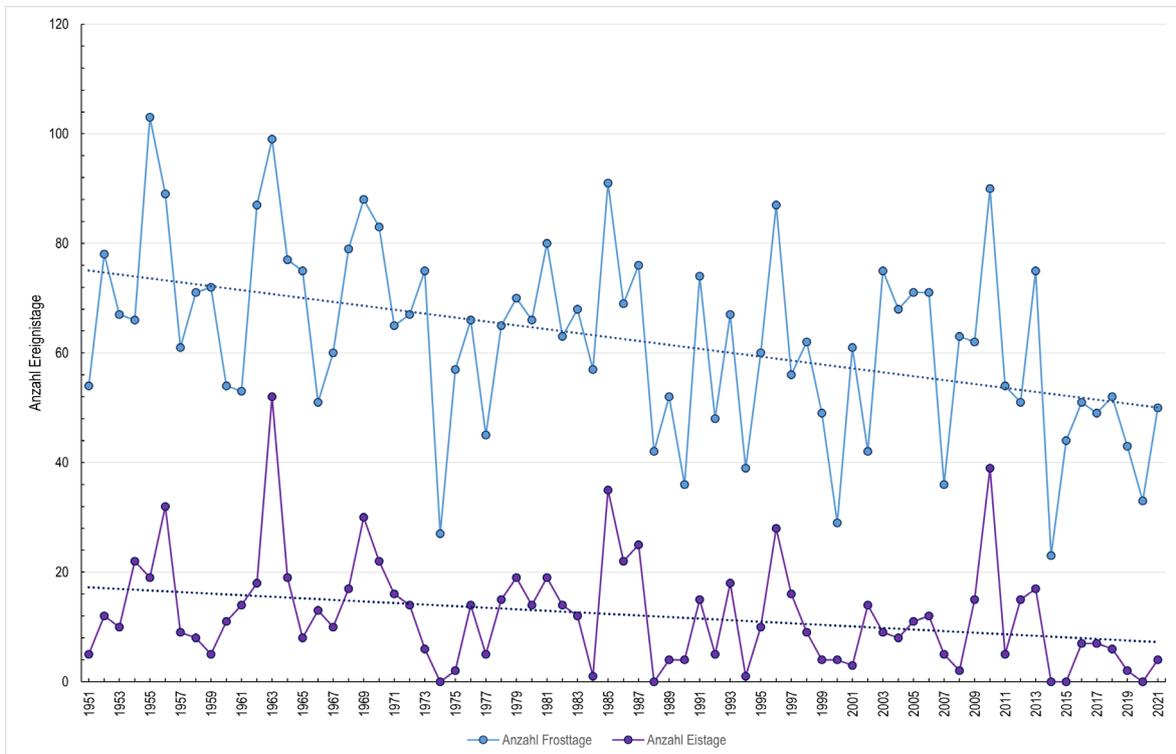


Diagramm 4: Darstellung der jährlichen Anzahl der Frosttage (LT Min. $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, blaue Linie) und der Eistage (LT Max. $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, violette Linie) seit 1951 bis 2021. Die jeweiligen Trendlinien sind gepunktet dargestellt, verzeichnen aber für beide Ereignistage einen Abfall. Eine größere Darstellung des Diagramms ist im Anhang zu finden.

Einhergehend zum Anstieg der Sommertage und Heißen Tage ist ein gleichzeitiger Abfall der Frost- und der Eistage (siehe Diagramm 4) zu verzeichnen. Anhand der Anzahl der Frosttage (LT Min. $< 0\text{ °C}$) wird die „Strenge“ des Winters ermittelt. Von 1951 bis 1990 bewegt sich die Anzahl der jährlichen Frosttage im Bereich von 60 bis 80 Tagen, mit Ausreißern nach oben und nach unten. Seit 1990 nimmt die Anzahl der Frosttage in Ingelheim am Rhein kontinuierlich ab und pendelt bei unter 60 Tagen Forst im Jahr.

Zu der Menge der Forsttage gehören auch die Eistage, an denen die maximale Lufttemperatur noch unterhalb der 0 °C -Grenze liegt. Auch für die Zahl der Eistage zeichnet sich für Ingelheim am Rhein ein abnehmender Trend ab. Lagten bis zum Jahr 1990 die meisten Jahre, mit wenigen Ausnahmen, über der Grenze von 10 jährlichen Eistagen, so wird diese Grenze in den letzten 20 Jahren kaum noch erreicht oder überschritten.

Das zunehmende Fehlen von Frost- und Eistagen zeigt beispielsweise direkte Auswirkungen oder Störungen im natürlichen Lebensrhythmus von Wildtieren und Pflanzen.

In Ergänzung zu den temperaturbezogenen Ereignistagen wurde außerdem die jährliche Anzahl der Tage mit einer Niederschlagshöhe von $\geq 20\text{ mm}$ (DWD-CDC 2022g) und $\geq 30\text{ mm}$ (DWD-CDC 2022h) ausgewertet (siehe Diagramm 5). Hierbei ist zu beachten, dass es sich um Angaben pro Tag (24Std.) handelt.

Angaben zu Regenmengen, die umgangssprachlich als Starkregen bezeichnet werden, beziehen sich i.d.R. auf 1 Stunde oder 6 Stunden. „Starkregenereignisse“ sind bei der Aus-

wertung also inkludiert, aber nicht jedem im Diagramm aufgeführten Tag lag zwingend ein „Starkregenereignis“ zu Grunde.

Ähnlich wie bei den bereits beschriebenen Auswertungen zeigt sich auch in diesem Fall eine Zweiteilung der Daten, aber weniger bezüglich der Anzahl der jährlichen Tage, sondern vielmehr hinsichtlich der zunehmenden Häufigkeit der aufeinander folgenden Jahre mit diesen Ereignissen. Seit dem Jahr 1984 tritt in jedem Jahr mindestens ein Ereignistag mit mehr als 20 mm Niederschlag auf, ab dem Jahr 2005 sind es zunehmend zwei oder mehr (bis vier) Tage. Ebenfalls ab dem Jahr 2005 tritt fast jährlich ein Ereignistag mit 30 mm Niederschlag auf.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich der Klimawandel in der Stadt Ingelheim am Rhein bzw. der Region in den fast typischen Ausprägungen widerspiegelt.

Ein kontinuierlicher Anstieg der Lufttemperatur, bei einem ungefähr gleichbleibenden Jahresniederschlag, der aber eine andere Verteilung über

Der DWD unterteilt **Starkregen** in drei Stufen, mit folgenden Schwellenwerte.

Markante Wetterwarnung:

Regenmengen 15 bis 25 l/m² in 1 Stunde
oder 20 bis 35 l/m² in 6 Stunden

Unwetterwarnung: Regenmengen:

> 25 bis 40 l/m² in 1 Stunde oder > 35 l/m²
bis 60 l/m² in 6 Stunden

Extreme Unwetterwarnung:

Regenmengen > 40 l/m² in 1 Stunde oder > 60 l/m² in 6 Stunden

(mm Niederschlag entspricht l/m²)

(DWD 2022b)

das Jahr und der Tagesintensität (häufigere Starkregenereignisse) erfährt.

Hinzu kommen steigende Zahlen von Sommertagen und Heißen Tagen, die verkettet zu Hitze-

wellen, zusätzliche Herausforderungen an Menschen, Tiere, Pflanzen und die Stadtstruktur stellen.

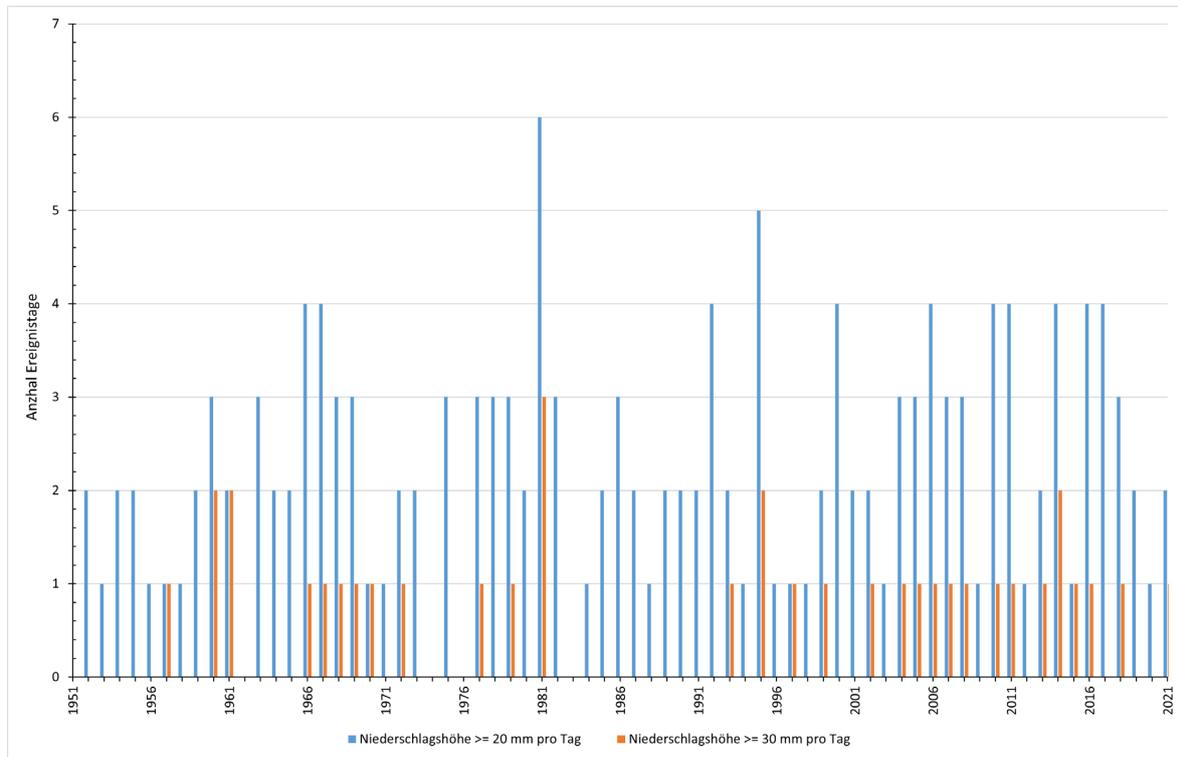


Diagramm 5: Anzahl der jährlichen Tage mit Niederschlagsmengen ≥ 20 mm (hellblau) und ≥ 30 mm (orange) innerhalb von 24 Stunden seit 1951 bis 2021. Die dargestellte Anzahl der Tage ist nicht automatisch mit Starkregenereignissen gleichzusetzen, da Starkregen laut Definition einen anderen Zeitbezug (siehe Infokasten) hat. Eine größere Darstellung des Diagramms ist im Anhang zu finden.

5.1.3 Windverhältnisse

Zur Erläuterung der Windverhältnisse in Ingelheim am Rhein wurde auf zwei Datenquellen zurückgegriffen. Zum einen auf die Messergebnisse der DWD-Station „01580 Geisenheim“ und zum anderen auf aktuelle Daten des Global Wind Atlas (GWA 2022).

Auf Grund der vorhandenen Datenlage konnten die Windstärke und Windrichtung für das langjährige Mittel der Jahre 1990 bis 2020 ausgewertet werden. Durch die Betrachtung eines längeren Zeitraums haben temporäre Schwankungen einen weniger starken Einfluss auf die Ergebnisse. Zusätzlich muss im Rahmen der Auswertung die Windverhältnisse auch hinsichtlich der Tages- bzw. Nachtsituation und der Jahreszeiten unterschieden werden. Diese Trennung muss erfolgen, da aufgrund der nachts fehlenden solaren Einstrahlung unterschiedliche klimatische Einflüsse wirken. Die Übergangsbereiche der Dämmerung bzw. des Sonnenaufgangs werden nicht berücksichtigt, um ein eindeutigeres Ergebnis zu erhalten. Die Schwankungen in den Lufttemperaturen im Laufe der Jahreszeiten erfordern des Weiteren die differenzierte Betrachtung gemäß der Jahreszeiten Winter (Dezember, Januar, Februar), Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August) und Herbst (September, Oktober, November).

Tabelle 9 beinhaltet die zeitlichen und saisonalen Grenzwerte, die im Rahmen der Datenauswertung Anwendung fanden, während Tabelle 10 die Ergebnisse der Windrosen (siehe Diagramm 6 bis Diagramm 13) zusammenfasst.

Die unterschiedlichen Ausprägungen der regionalen Anströmungen haben zur Folge, dass bestimmte Stadtbereiche aufgrund ihrer Stadtmorphologie und abhängig von der Uhrzeit bzw. der

Jahreszeit unterschiedlich stark durchlüftet werden. Insbesondere in Monaten mit einer hohen thermischen Belastung ist dies von Relevanz (vgl. Kapitel 2.2 und 2.4).

Während den zunehmend austauschärmeren Sommernächten erfolgt die Durch- bzw. Belüftung der Stadt über das bodennahe Flurwindsystem (vgl. Kapitel 6.4.1) und am Tag (und in Austausch-Nächten) über die ermittelten Hauptströmungsrichtungen (siehe Tabelle 10), die gleichzeitig die Ausrichtung für wichtige Durchlüftungsachsen ungefähr vorgeben.

Die Windrosen (siehe Diagramm 6 bis Diagramm 13) geben außerdem Aufschluss über die relative Ausprägung von Windgeschwindigkeiten (in %) in Bezug zur Windrichtung. Der geringen Ausprägung bzw. Häufigkeit des Auftretens von Windgeschwindigkeit über 6 m/s entsprechend, wurden diese zur Gruppe „> 6 m/s“ zusammengefasst.

Hierbei ist zu beachten, dass die DWD-Station nicht im Stadtgebiet von Ingelheim am Rhein steht, sondern im Gebiet der Stadt Geisenheim auf der gegenüberliegenden Rheinseite. Entsprechend dürfen die abgebildeten Windrosen nicht eins zu eins auf das Stadtgebiet von Ingelheim übertragen werden. Dies gilt insbesondere für nächtliche Anströmungen, bei denen Rhein und Taunus Einfluss ausüben. Wohl aber geben sie Hinweise auf die regionaltypischen Windverhältnisse des Gebiets.

Im Rahmen einer eigenen Messkampagne in Ingelheim am Rhein in den Sommermonaten 2021, wurden stadtspezifische Windrosen und Temperaturdiagramme (siehe Kapitel 10.6) erstellt, die die Jahresdaten weitestgehend bestätigten.



Abbildung 20: Wetterstation 01580 Geisenheim. Die Windmessungen der Station wurden für die Auswertung des langjährigen Mittels der Windstärke und der Windrichtung in Abhängigkeit der Tages- bzw. Nachtzeit sowie der Jahreszeiten herangezogen.

Tabelle 9: Zeitliche und saisonale Grenzwerte der Datenauswertung der DWD-Station

JAHRESZEIT	TAG	NACHT
Winter (DJF)	08:00 – 18:00 Uhr	22:00 – 04:00 Uhr
Frühling (MAM)	08:00 – 18:00 Uhr	22:00 – 04:00 Uhr
Sommer (JJA)	08:00 – 18:00 Uhr	22:00 – 04:00 Uhr
Herbst (SON)	08:00 – 18:00 Uhr	22:00 – 04:00 Uhr

Tabelle 10: Ergebnisübersicht zur Auswertung der zeitlichen und saisonalen Windverhältnisse. Hierbei sind, besonders für die Nacht, die orographischen Einflüsse auf den Standort der Station in Geisenheim zu beachten.

	AUSWERTUNGSZEITRAUM	HAUPTANSTRÖMUNG IM LANGJÄHRIGEN MITTEL	ERGÄNZENDE KOMPONENTEN IM LANGJÄHRIGEN MITTEL
Tag	Winter	Süd-Südwest mit Süd-West	Ost-Nordost
	Frühling	Süd-West mit Nord-Nordwest	Ost
	Sommer	Süd-West mit West	Nord-Nordwest sowie Ost
	Herbst	Süd-Südwest mit Süd-West	Ost-Nordost
Nacht	Winter	Süd-Südwest mit Süd-West	Ost-Nordost
	Frühling	Süd-West mit Süd-Südwest	Nord-Nordwest sowie Ost-Nordost
	Sommer	Nord-Nordwest	--
	Herbst	Nord-Nordwest	Ost-Nordost

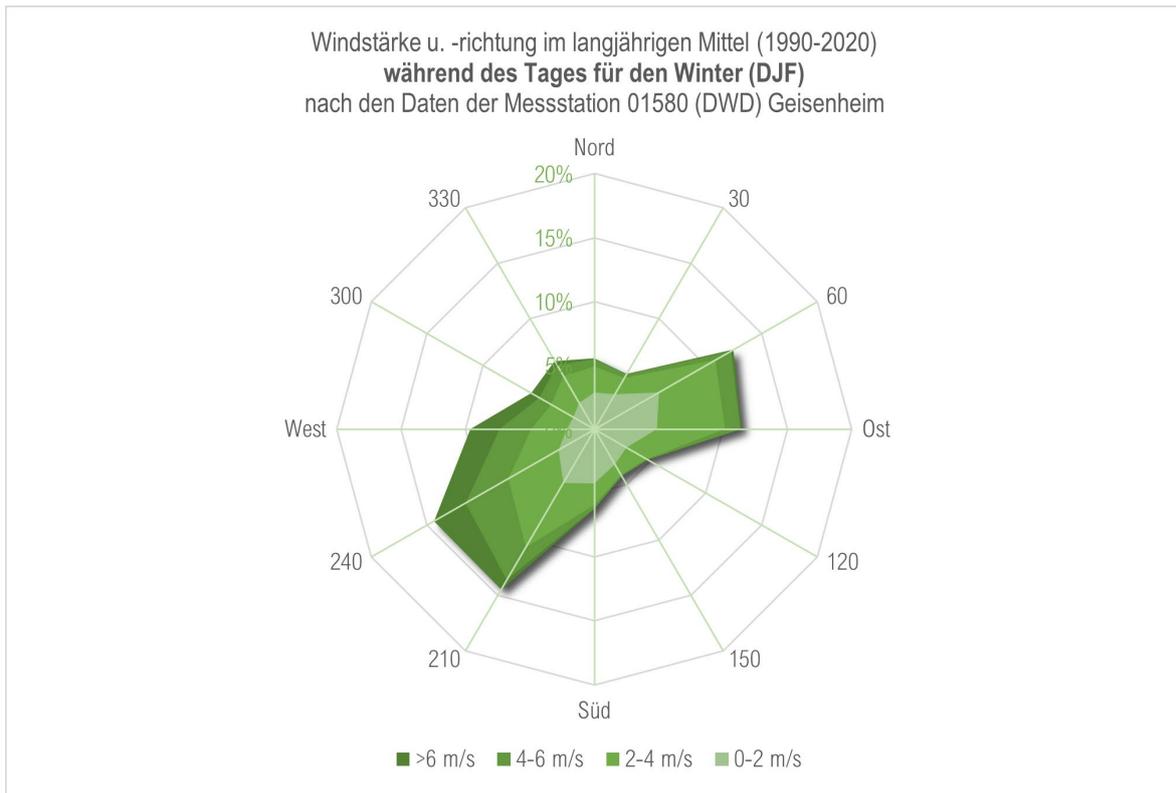


Diagramm 6: Windstärke und Windrichtung während des Tages im Winter. Die Haupanströmungsrichtung ist Süd-Südwest mit Süd-West und Ost-Nordostkomponenten

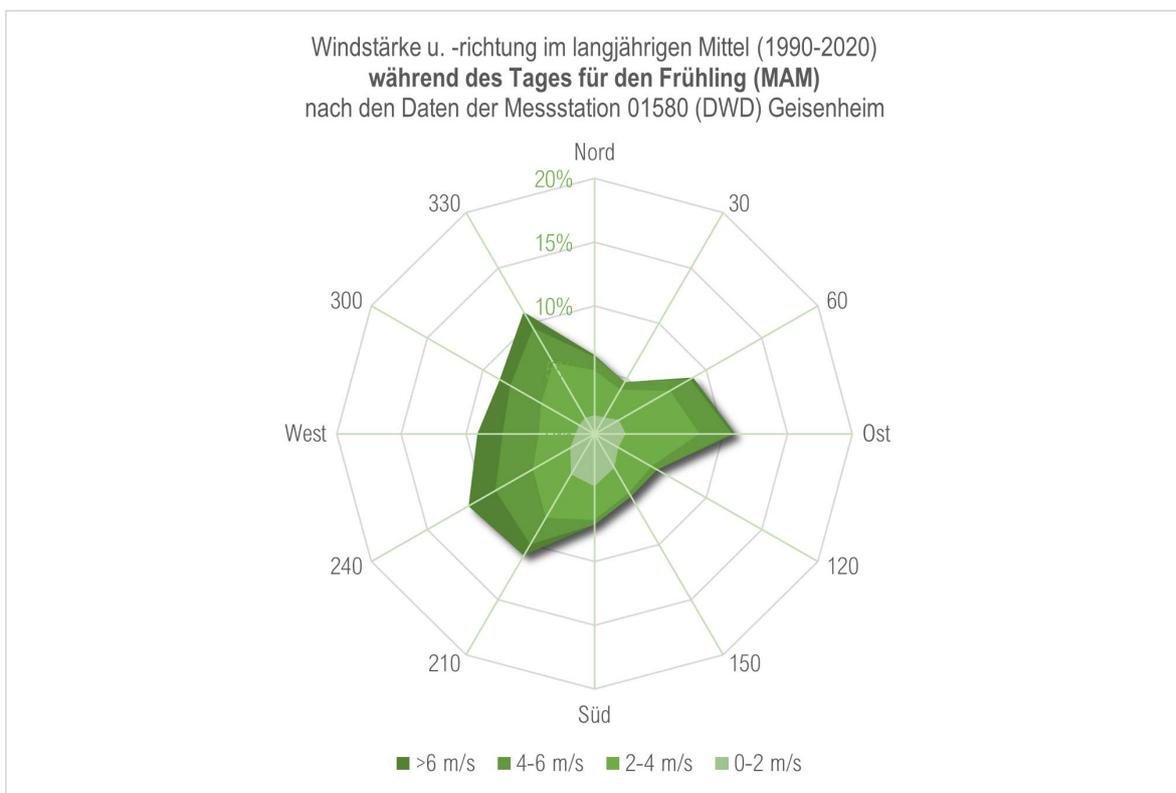


Diagramm 7: Windstärke und Windrichtung während des Tages im Frühling. Die Haupanströmungsrichtung ist Süd-West mit Nord-Nordwest und Ostkomponenten

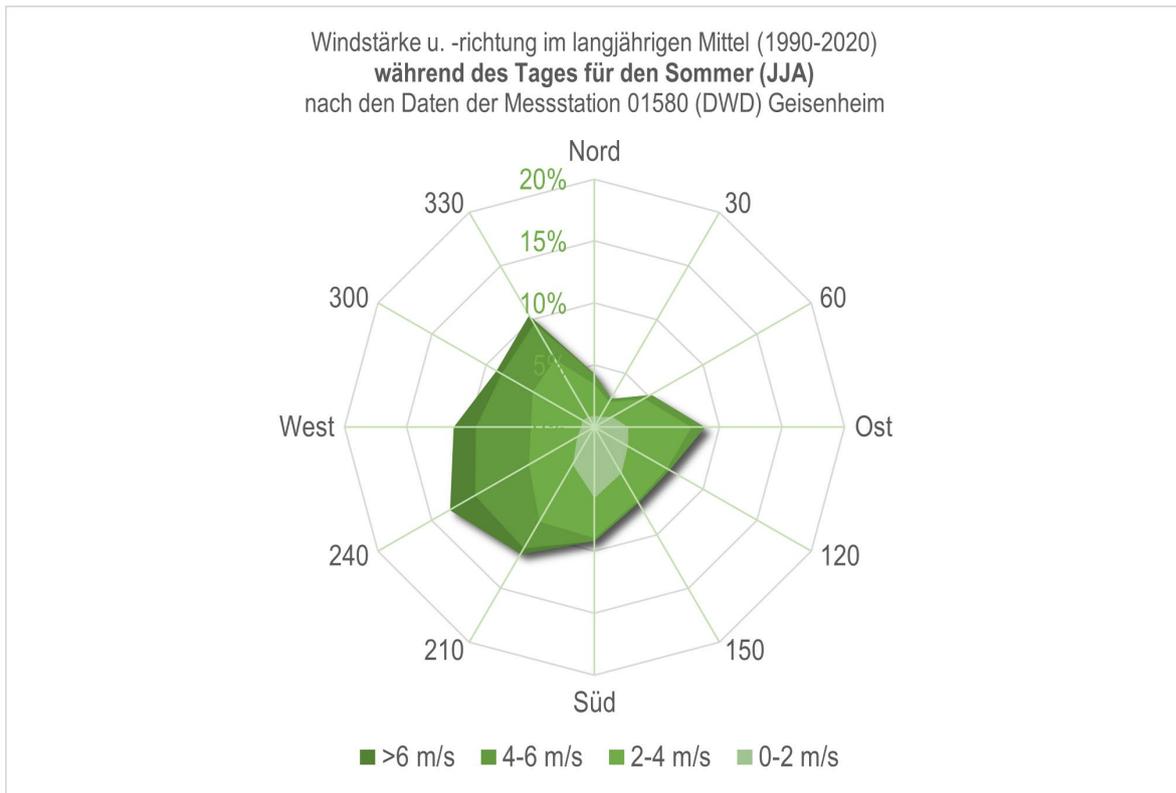


Diagramm 8: Windstärke und Windrichtung während des Tages im Sommer. Die Hauptröhmungsrichtung ist Süd-West mit West und leichten Nord-Nordwest sowie Ostkomponenten

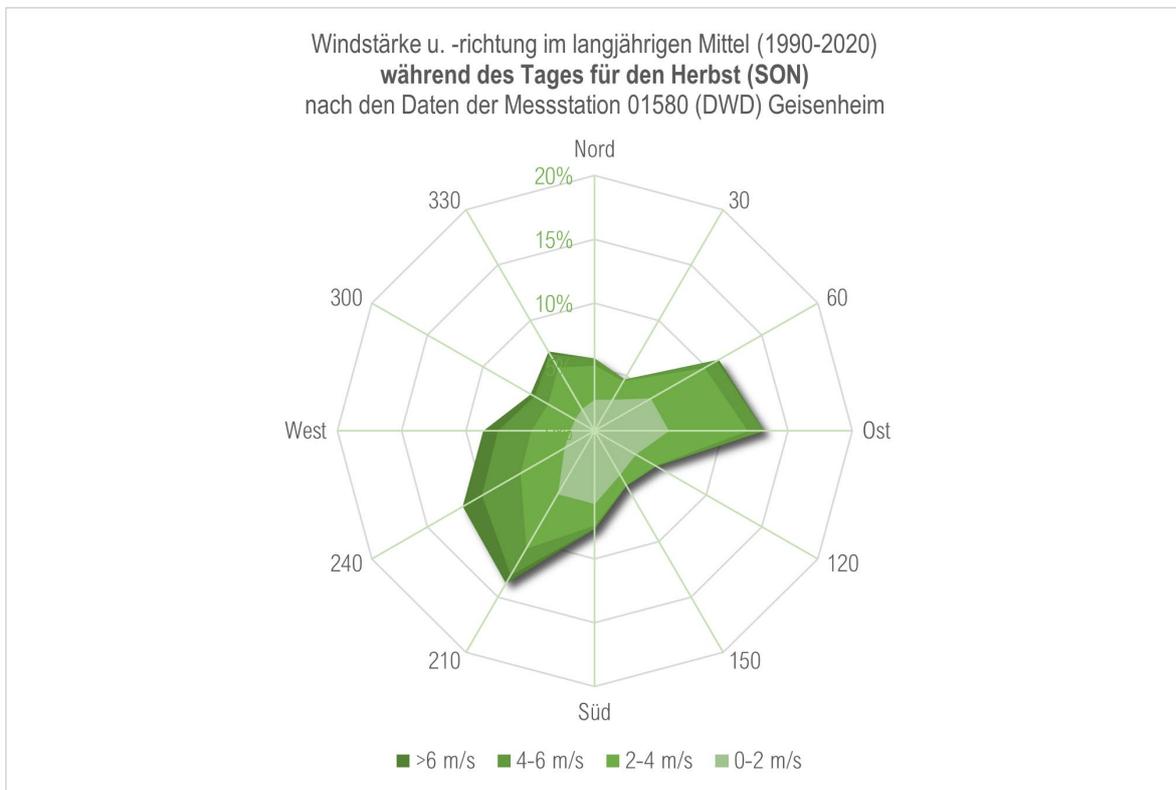


Diagramm 9: Windstärke und Windrichtung während des Tages im Herbst. Die Hauptröhmungsrichtung ist Süd-Südwest mit Süd-West und Ost-Nordostkomponenten

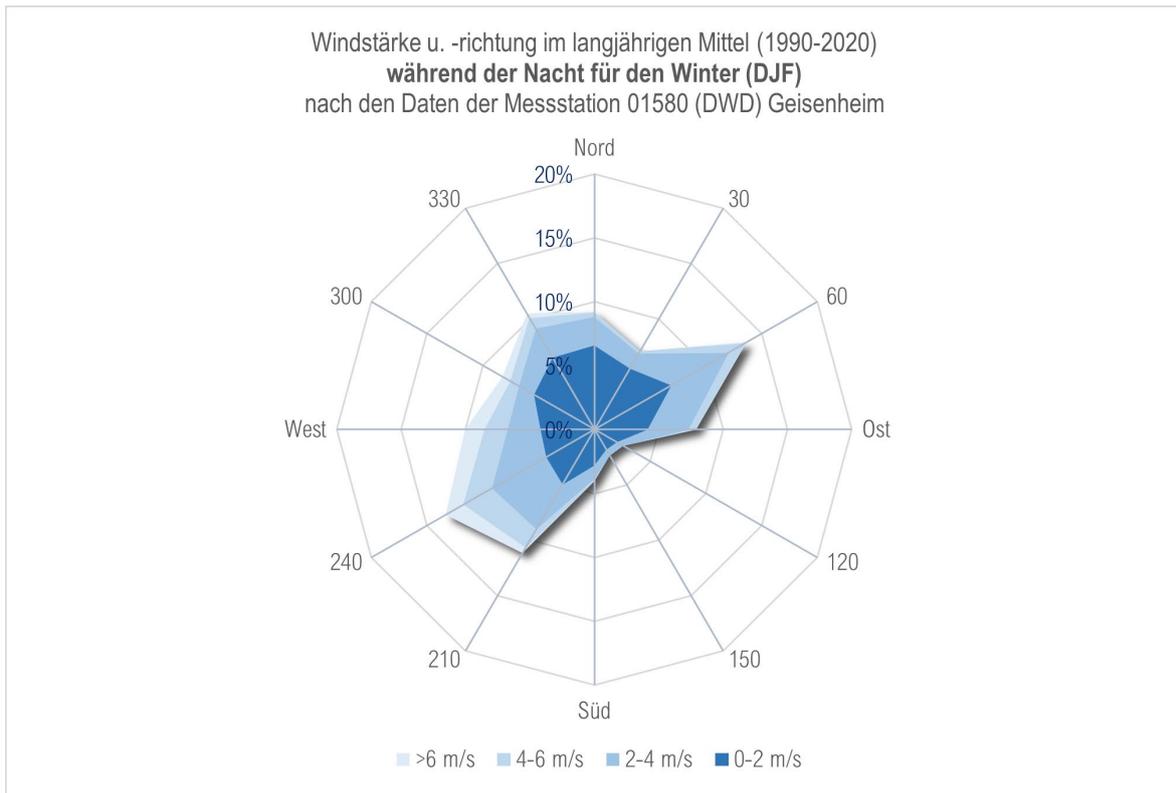


Diagramm 10: Windstärke und Windrichtung während der Nacht im Winter. Die Hauptströmungsrichtung ist Süd-Südwest mit Süd-West und Ost-Nordostkomponenten

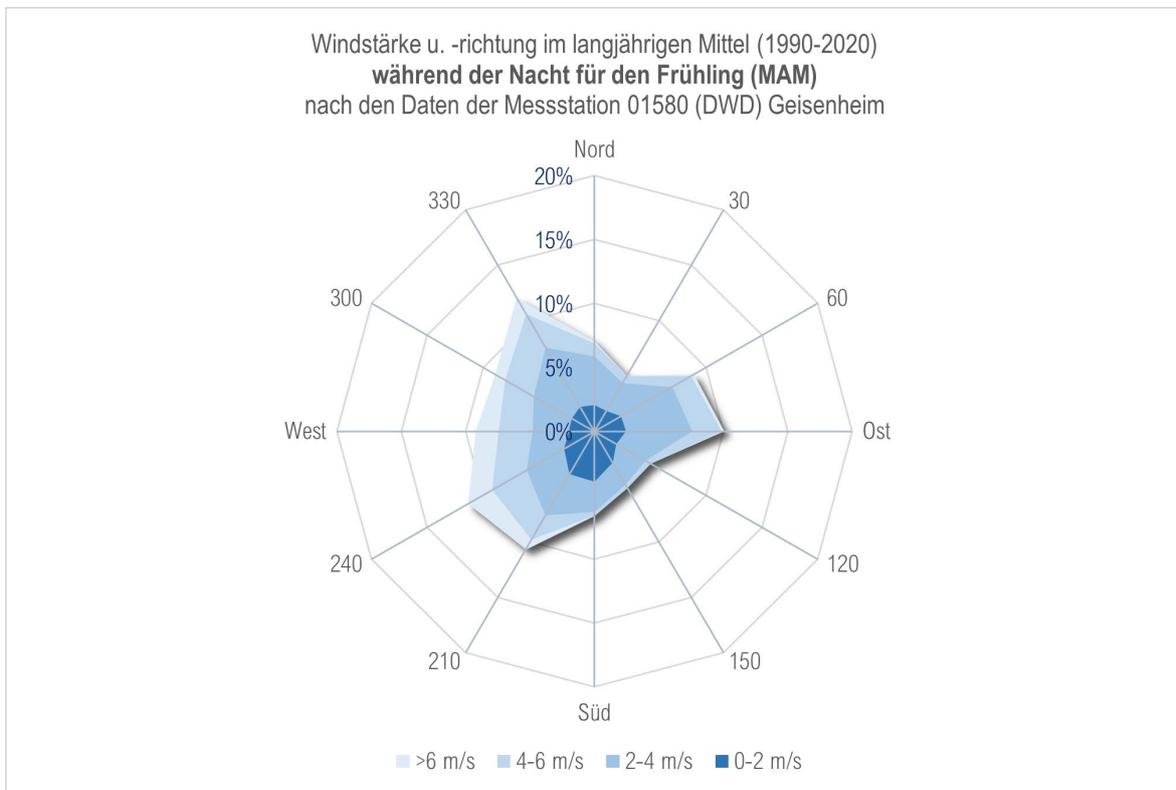


Diagramm 11: Windstärke und Windrichtung während der Nacht im Frühling. Die Hauptströmungsrichtung ist Süd-West mit Süd-Südwest und Nord-Nordwest- sowie Ost-Nordostkomponenten

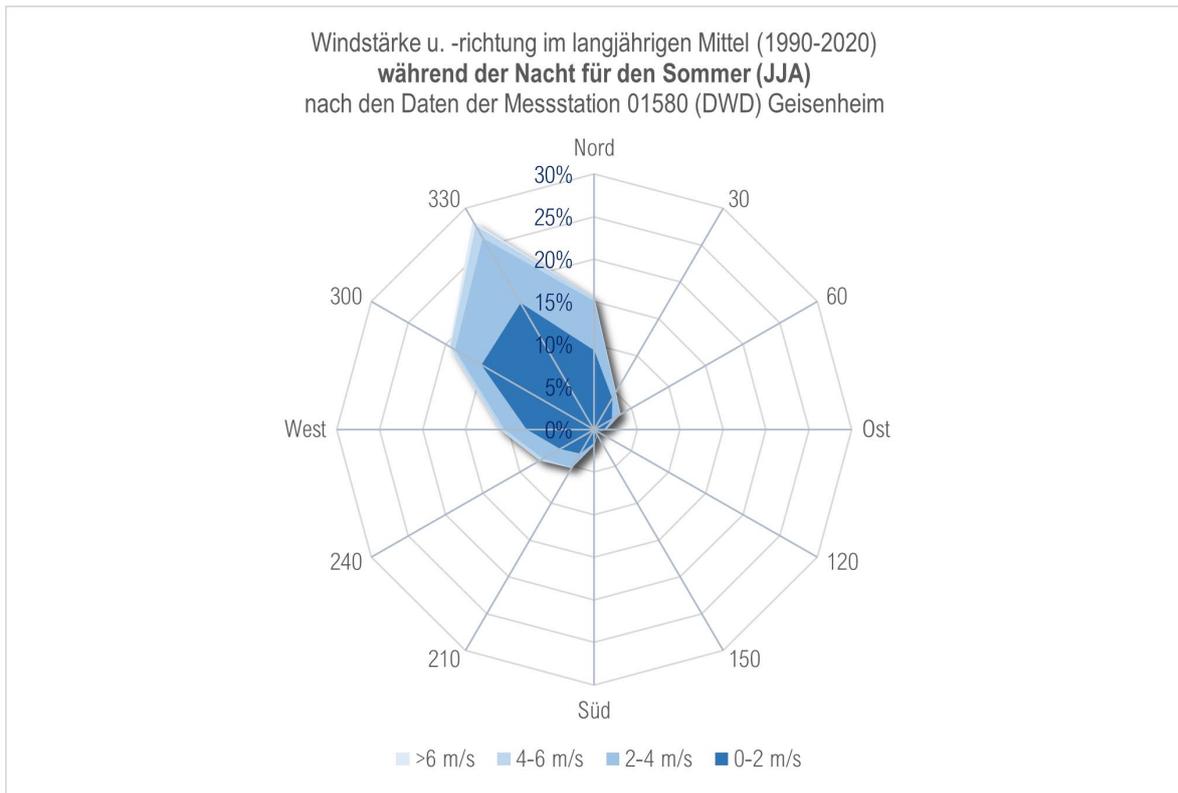


Diagramm 12: Windstärke und Windrichtung während der Nacht im Sommer. Die Haupanströmungsrichtung ist Nord-Nordwest.

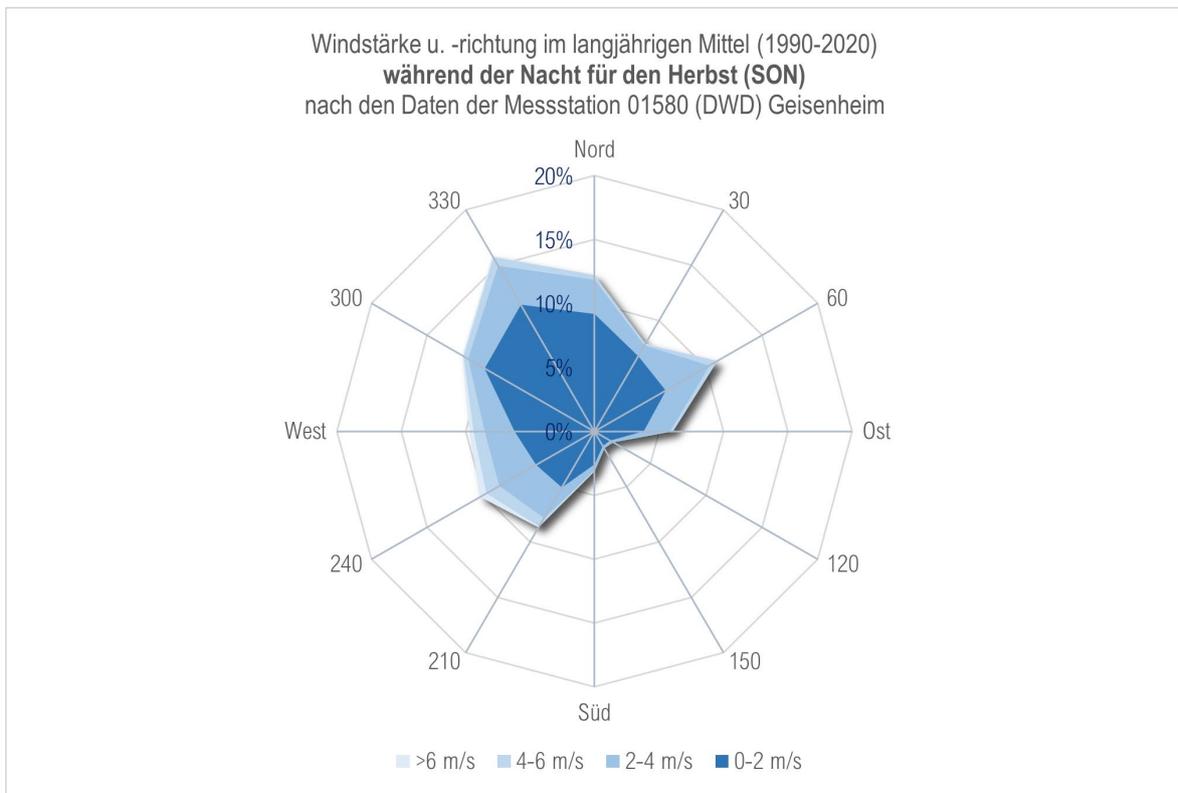


Diagramm 13: Windstärke und Windrichtung während der Nacht im Herbst. Die Haupanströmungsrichtung ist Nord-Nordwest und leichten Ost-Nordostkomponenten

Jahresaktuelle Daten zur Anströmung und Windgeschwindigkeit direkt für Ingelheim am Rhein können dem Global Wind Atlas entnommen werden. Für eine Zelle von 9km² um den Stadtkern von Ingelheim am Rhein werden diese Informationen auch für unterschiedlichen Höhen abgerufen. Die ganzjährige Durchschnittsgeschwindigkeit für Ingelheim am Rhein auf 10 m

(1,84 m/s) und auf 50 m (3,57 m/s) Höhe wird in Abbildung 21 und die ganzjährige Anströmung (bezogen auf die Windrichtung) in Abbildung 22 dargestellt. Süd-West mit West (partiell Süd-Südwest) als Hauptanströmung mit einer zusätzlichen Anströmung aus Osten und Ost-Nordost werden als akkumulierte Anströmungsrichtungen im Jahresgang ausgegeben.

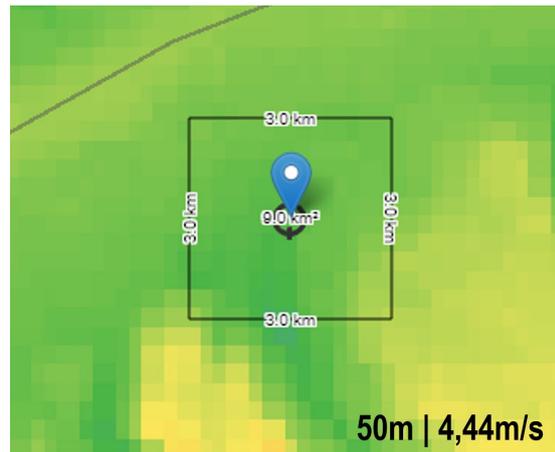
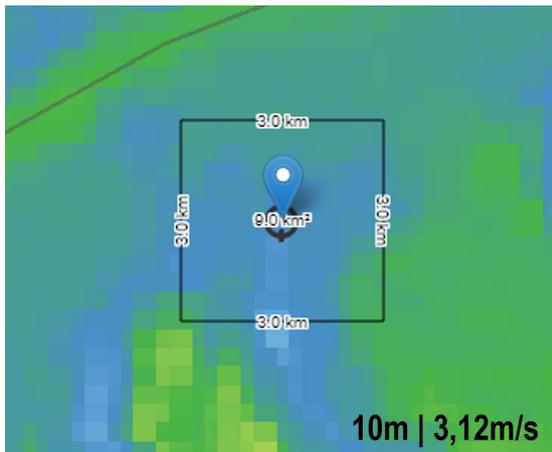


Abbildung 21: Übersicht zur ganzjährigen durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 3,12 m/s bzw. 4,44 m/s in der Region Ingelheim am Rhein (3 km x 3 km) auf einer Höhe von 10 m (links) bzw. 50 m (rechts) ü. Grund (GWA 2022). Deutlich ist der aus Süden kommende Verlauf des Selz-Tals, flankiert von den kleineren Höhenzügen zu erkennen.

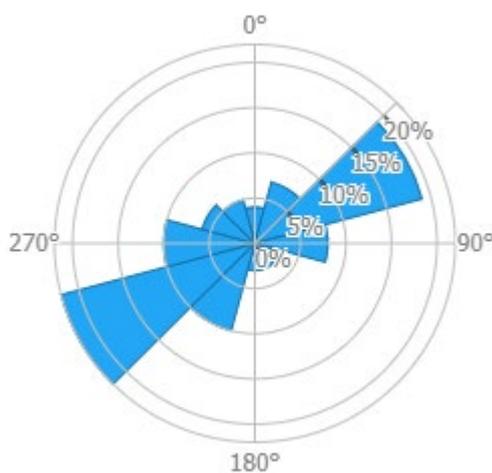


Abbildung 22: Darstellung der ganzjährigen Anströmung (nicht die Windstärke) auf einer Höhe von 10 m ü. Grund für Ingelheim am Rhein (GWA 2022).

6 Bestand Ingelheim am Rhein

Das nachfolgende Kapitel umfasst die Bestandsaufnahme zu unterschiedlichen Aspekten des Untersuchungsraums, die unmittelbar oder mittelbar einen Einfluss auf die klimatische IST-Situation der Stadt Ingelheim am Rhein haben. Die unterschiedlichen Themenkarten (siehe Tabelle 11) bilden, neben bspw. den historischen Klimanalysen, eine Grundlage für die Erstellung der Klimafunktionskarte (KFK). Zusätzlich ist aber auch eine individuelle Betrachtung bzw. Verwendung jeder Themenkarte möglich, da bezogen auf das Thema der Karte, fachliche Mehrwerte und Synergien generiert werden, die auch bei nicht-klimatischen Fragestellungen von ggf. nicht direkt involvierten Verwaltungsbereichen hilfreich bzw. aufklärend sein können.

Bezugnehmend auf den jeweils dargestellten Aspekt werden die Themenkarten in folgende vier Kategorien unterteilt

- Topographische Analysen,
- Bebauungs-Analysen,
- Vegetations-Analysen und
- Klimatische Analysen.

Jede Themenkarte verfügt über eine technische Kurzbeschreibung der Thematik, so dass sie auch ohne den Berichtsteil der Stadtklimaanalyse verständlich ist. Eine Vertiefung dieser Kurzbeschreibungen, erfolgt bei Bedarf in den einzelnen Unterkapiteln, zusammen mit einer beschreibenden Analyse des städtischen Gesamttraums sowie des Detailraums des Zentrums von Ingelheim am Rhein.

Alle Karten inkl. Legende und technischer Kurzerläuterung liegen zusätzlich in einem größeren A3-Format im zweiten Teil des Berichts „Karten- und Planwerke“ vor.

Tabelle 11: Übersicht zu den einzelnen Themenkarten in den entsprechenden Kategorien

KATEGORIE	THEMENKARTE
1	Topographische Analysen Landnutzung Topographie
2	Bebauungs-Analysen Bauliche und Räumliche Offenheit Gebäudevolumendichte
3	Vegetations-Analysen Vegetationserfassung Städtische Durchgrünung
4	Klimatische Analysen Nächtliche Kaltluftschichtdicke und bodennahes Windfeld (vier Zeitschnitte: nach 15Min., 2Std., 4Std. und 8Std.) Bodennahe nächtliche Lufttemperatur

6.1 Topographische Analysen

6.1.1 Landnutzung

Die Themenkarte **Landnutzung** basiert auf den Daten des „Urban Atlas 2018“ (Copernicus Land Monitoring Service 2022). Der Urban Atlas bildet die Bodenbedeckung sowie die Landnutzung flächendeckend für große europäische Stadtgebiete ab. Seine Informationen resultieren hauptsächlich aus der Kombination von (statistischen) Bildklassifizierungen und visuellen Interpretationen von hochauflösenden Satellitenbildern. Als Eingabedaten werden multispektrale SPOT-5- und -6- sowie Formosat-2-Pan-Sharped-Bilder mit einer räumlichen Auflösung von 2 bis 2,5 m verwendet. Die Bebauungsklassen werden mit Informationen über die Dichte und den Grad der Bodenversiegelung kombiniert, die aus der hochauflösenden Schicht der Wasserundurchlässigkeit abgeleitet werden, um die Dichte der städtischen Struktur detaillierter darzustellen. Schließlich wird das Produkt Urban Atlas mit funktionalen Informationen (Straßennetz, Dienstleistungen, Versorgungseinrichtungen usw.) ergänzt und angereichert, wobei zusätzliche Datenquellen wie lokale Stadtpläne oder Online-Kartendienste verwendet werden.

Die Themenkarte (siehe Abbildung 23) unterscheidet den Siedlungs- und Freiraum farblich-flächig hinsichtlich seiner Flächennutzung. Aus dieser Darstellung können sowohl Rückschlüsse auf die den Landnutzungsarten zugehörigen Bauungsarten als auch auf deren räumliche Anordnung im Siedlungskontext abgeleitet werden. Gleichzeitig können unterschiedlichen Flächennutzungen verschiedene klimatische Aspekte bzw. Problematiken zugeordnet werden.

Der vegetationsdominierte Siedlungsaußenbereich wird primär den Nutzungen „Ackerland“

und „Dauerkulturen“ zugeordnet. „Wiesen und Weiden“ und „Wald“ sind ebenfalls präsent, spielen gegenüber den zuerst genannten Kategorien aber eher eine untergeordnete Rolle im außer-räumlichen Gesamtkontext. Dauerlandkulturen markieren oftmals den Übergang zwischen dem Siedlungsraum und dem weiter außerhalb liegenden Ackerland. Gegenüber den Wiesen und Weiden bzw. Grünländern, die insbesondere in der Nähe des Rheins gelegen sind und den über den Untersuchungsraum verteilten Waldflächen handelt es sich bei den Äckern und Dauerlandkulturen um die flächig größten Landnutzungen. Sowohl punktuell im Außenraum als auch großflächig im Siedlungsraum verteilt sind „Industrie- und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen, Militär und Transport“. Diese machen insbesondere in der Kernstadt Ingelheim und dem Stadtteil Heidesheim große Teile des gesamtstädtischen Siedlungsraums aus. Der weitere urbane Raum wird seinem prozentualen Versiegelungsanteil nach in weitere Kategorien aufgeschlüsselt: „durchgängig städtisch“ ist der Raum bei einem Versiegelungsgrad von 80 % geprägt; „nicht durchgängig“ dagegen bei Prozentwerten in den Spannen von 50 % - 80 %; 30 % - 50 %; 10 % - 30 % und < 10 %. Lockere Wohnrandbauungen gehen zum Beispiel mit niedrigeren Versiegelungswerten einher als stark verdichtete innerstädtische Bereiche, weswegen die Zentren der Siedlungsräume oftmals von hohen Versiegelungswerten (> 80 %) geprägt sind, die sich nach außen hin verringern. Nahezu der gesamte Siedlungsbereich Heidesheims ist von einer durchgängig städtischen Prägung gekennzeichnet; in Wackernheim beträgt der Versiegelungsgrad durchschnittlich 50 % - 80 %. Ähnlich verhält es sich in Großwinternheim; hier ist das an der Landesstraße 428 gelegene Zentrum ge-

genüber der umliegenden Bebauung am stärksten versiegelt. In Frei-Weinheim ballt sich die durchgängig städtische Prägung ebenfalls an der „Rheinstraße“ als zentrale Verkehrsachse. In Ingelheim ist der städtische Raum aufgrund seiner Größe differenzierter zu betrachten; der östliche Siedlungsraum an der „Turnierstraße“, die Flächen entlang der „Binger-“ und „Mainzer Straße“ sowie der an der „Bahnhofstraße“ gelegene Kern des südlichen Stadtraums sind zu > 80 % versiegelt. Der restliche urbane Raum ist überwiegend zu 50 % - 80 % versiegelt. Im westlichen Teil Ingelheims ist das Versiegelungsverhältnis ähnlich gemischt. Lediglich in den südlichen Stadtrandlagen und zwischen den städtischen Grünflächen an der „Wilhelm-von-Erlanger-Straße“ wird die städtische Prägung auf ein

Versiegelungsmaß von 30 % - 50 % reduziert. Die urbanen Räume werden zusätzlich durch weitere Flächennutzungen wie die „Städtischen Grünflächen“ und „Sport- und Freizeitanlagen“ durchsetzt, auf denen entweder keine oder eine nur geringfügige Bebauung vorhanden ist. In Ingelheim sind die größeren Sport- und Freizeitanlagen an das zwischen der Autobahn und der Bahnstrecke gelegenen Industrie- und Gewerbegebiet angeschlossen, während kleinere Anlagen im Stadtraum verteilt sind. Ähnlich verhält es sich mit den städtischen Grünflächen, in die auch Friedhöfe inbegriffen sind; in Ingelheim konzentrieren sie sich besonders nahe zentraler Verkehrsachsen.

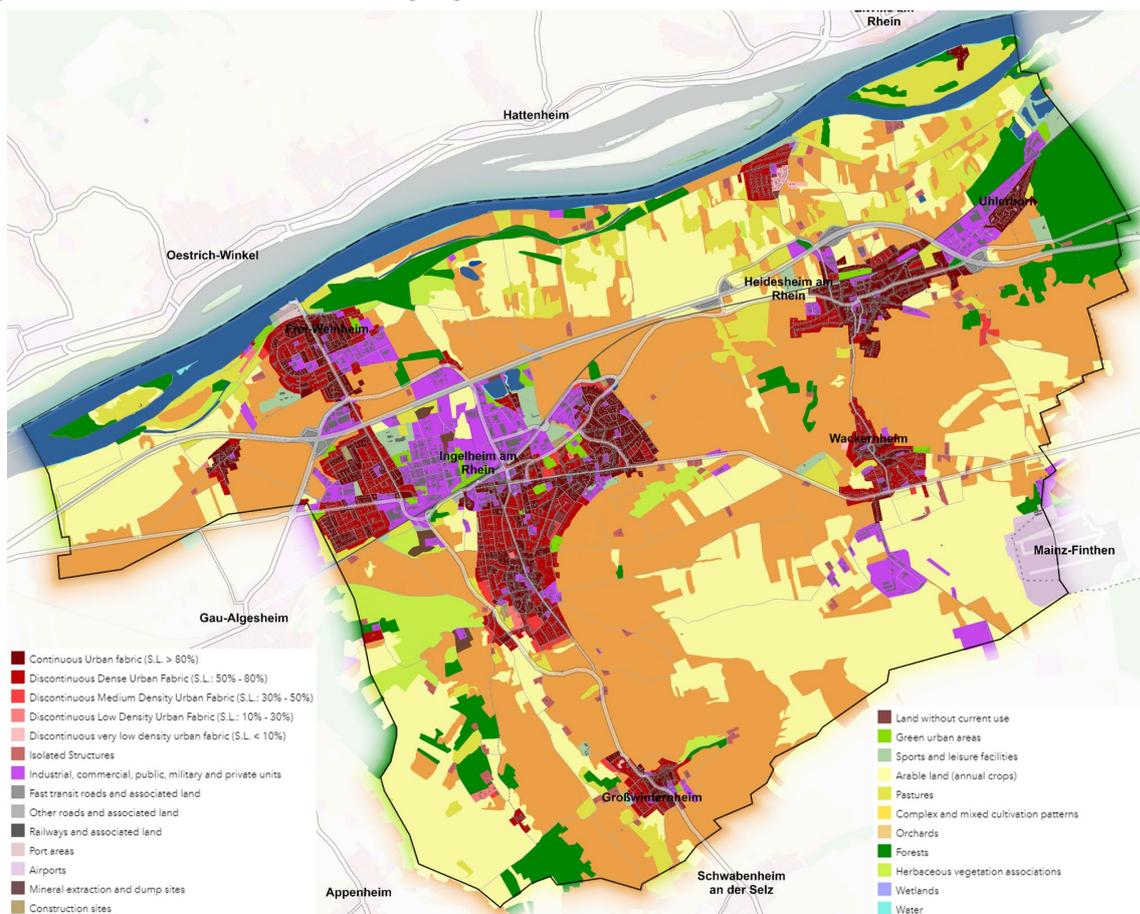


Abbildung 23: Übersicht Themenkarte "Landnutzung". Unterschiedlich stark verdichtete Siedlungsbereiche werden in abgestuften Rottönen dargestellt, Industrie- und Gewerbeflächen in Violett. Mit hoher Vegetation bestandene Bereiche werden in unterschiedlichen Grün- bzw. Orangetönen und Offenlandbereiche gelblich wiedergegeben.

Der Detailraum (siehe Abbildung 24) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Ingelheimer Innenstadtbereichs, der im Norden einen Teil des Industriegebiets („Boehringer Ingelheim“) zeigt, im Osten über die „Rotweinstraße“ hinausreicht, im Süden an die „Tanusstraße“ und im Westen an die „Selz“ grenzt. Der Fokusraum ist hinsichtlich der Landnutzung heterogen durchmischt: Der Norden des Gebiets ist von Industrie- und Gewerbe geprägt, welches in kleinerem Ausmaß auch im zentralen Innenstadtbereich verteilt ist. Dieser wird insbesondere im bahnhofsnahe Bereich sowie entlang der „Binger Straße“

durchgängig städtisch geprägt (Versiegelung > 80 %). Der südliche Teil der Innenstadt wird von einem Versiegelungsgrad von 50 % - 80 % dominiert und im Osten von Dauerkulturen und im Westen von Ackerland eingeschlossen. Der „Friedhof-Mitte“, zwei weitere größere Freiflächen an der „Wilhelm-von-Erlanger-Straße“ und entlang der „Selz“ im Gewerbe- und Industriegebiet zeigen die punktuelle Verteilung städtischer Grünflächen in zentralen Lagen des innerstädtischen Bereichs.

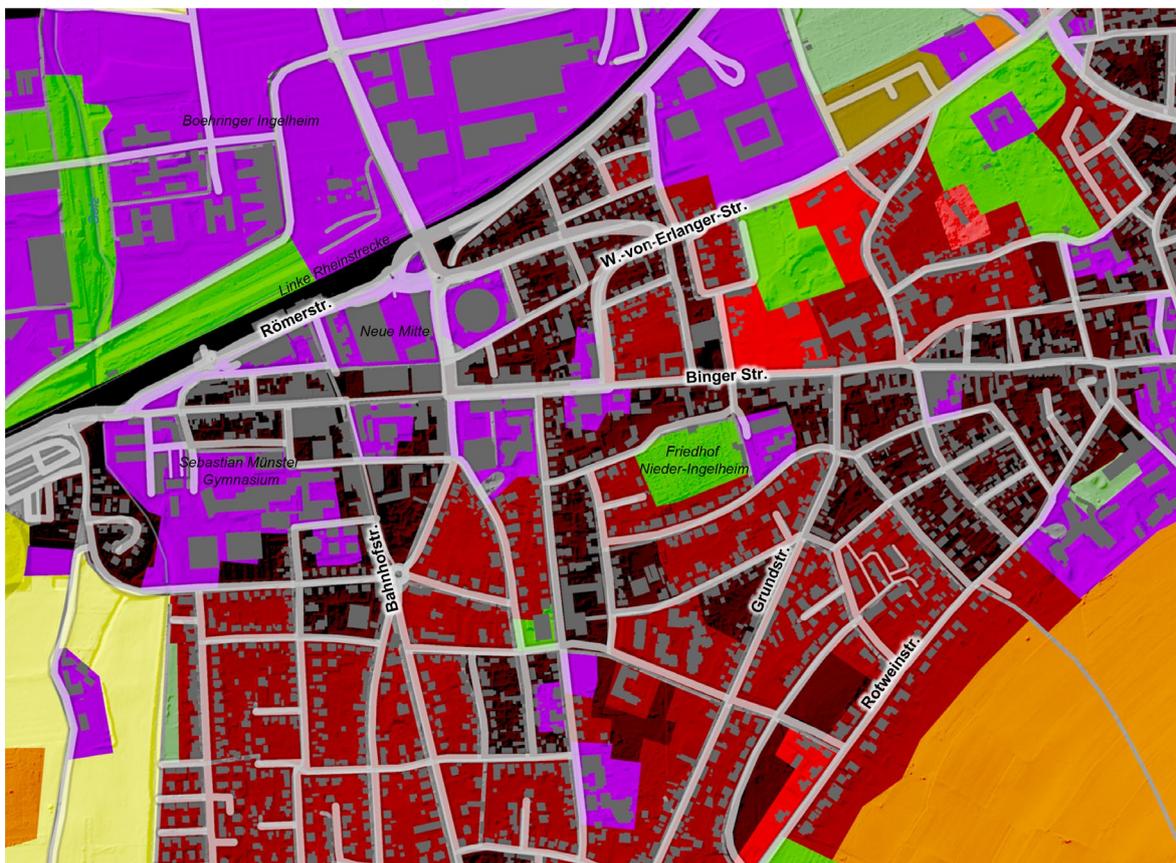


Abbildung 24: Detailansicht Themenkarte "Landnutzung" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Zentral von West nach Ost verläuft die „Binger Str.“ durch stark verdichtete Siedlungsbereiche sowie Industrie- und Gewerbeflächen bzw. öffentliche Einrichtungen (violett). Nördlich der Bahnstrecke dominieren die Industrie- und Gewerbeflächen von „Boehringer Ingelheim“. Vegetationsbezogene Flächen (Grüntöne) sind spärlich im Zentrum vorhanden, wie bspw. der „Friedhof Nieder-Ingelheim“ oder weiter östlich, südlich der Wilhelm-von-Erlanger-Straße.

6.1.2 Topographie

Der Themenkarte **Topographie** (siehe Abbildung 25) liegen Informationen des Digitalen Geländemodells (DGM - Auflösung 1 m) zugrunde. Die Karte zeigt die mitunter für den Luftmassenaustausch oder im Kontext von Starkregenereignissen relevante Geländesituation des Ingelheimer Stadtgebiets. Die Höhenverteilung des Geländes reicht von minimal 78 m bis maximal 238 m über NHN, wodurch sich für den Untersuchungsraum eine maximale Höhendifferenz von 160 m ergibt. Der südliche Teil des Untersuchungsraums ist von einem wesentlich stärkeren

Geländeanstieg geprägt als der nördliche, rheinnahe Teil. Vom Rhein bis an die „Landesstraße 422“, die südlich der Autobahn verläuft, ist der Raum nahezu gleichmäßig flach ausgeprägt (ca. < 80 m). Südlich der Straße steigt das Gelände mitunter stark an; eine Ausnahme bildet hier das Gelände um die „Landesstraße 428“, teilweise begleitet durch die „Selz“, die von Süd nach Nord in Richtung Ingelheim durch Großwinternheim hindurchführt. Dieser Raum bildet eine topographische Schneise, die sich durch das ansteigende Gelände im Süden des Untersuchungsraums hindurchzieht.

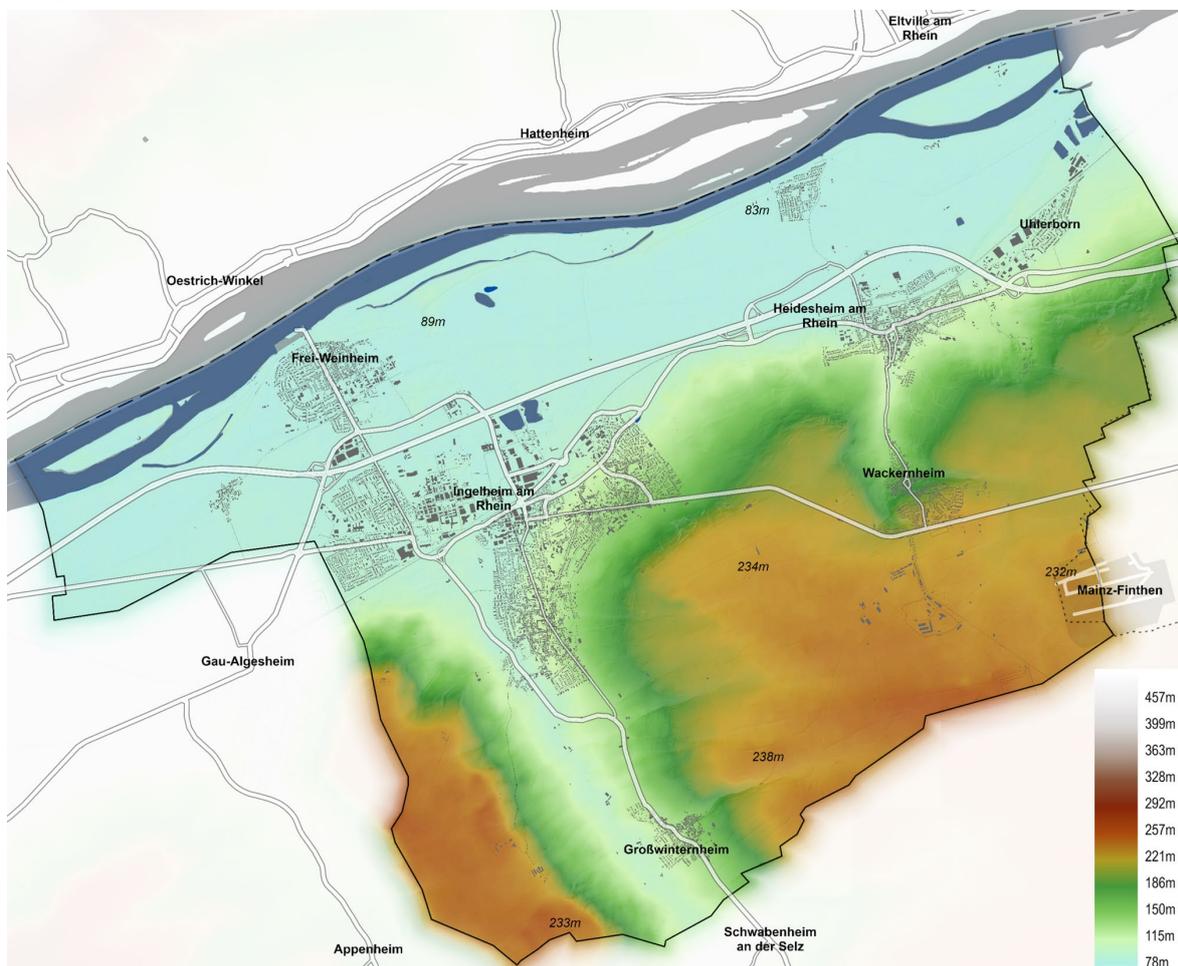


Abbildung 25: Übersicht Themenkarte "Topographie". Deutlich erkennbar ist das Richtung Süden ansteigende Geländeprofil, welches nur durch die Schneise entlang der L 422 bzw. dem Bachlauf der „Selz“ unterbrochen wird.

Der südöstliche Stadtraum Ingelheims wird bereits von einem leichten Geländeanstieg in Richtung Südost geprägt; Wackernheim liegt im Gegensatz zu den rheinnahen Siedlungsteilen bereits auf einer Geländehöhe von ca. 190 m. Von hier aus steigt das Gelände weiter an und erreicht an vier verschiedenen Stellen im südlichen Raum maximale Höhenmeter von 232 m – 238 m.

Der Detailraum (siehe Abbildung 26) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Ingelheimer Innen-

stadtbereichs, der im Norden einen Teil des Industriegebiets („Boehringer Ingelheim“) zeigt, im Osten über die „Rotweinstraße“ hinausreicht, im Süden an die „Tanusstraße“ und im Westen an die „Selz“ grenzt. Der dargestellte Innenstadtbereich wird hinsichtlich seiner topographischen Prägung diagonal geteilt (Südwest – Nordost): Das Gelände des westlichen Teils des Fokusraums ist mit > 90 m flacher ausgeprägt als der östliche Teil, der durch einen zunehmend stärker werdenden Geländeanstieg in Richtung Südost gekennzeichnet wird (> 115 m).



Abbildung 26: Detailansicht Themenkarte "Topographie" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Das Geländeprofil steigt von Nordwesten Richtung Südosten stetig an. Im Bereich der Detailansicht liegt die Geländehöhe ungefähr zwischen 90 m und 115 m über NHN.

6.2 Bebauungs-Analysen

6.2.1 Bauliche und räumliche Offenheit

Die **bauliche und räumliche Offenheit** kann mit Hilfe des SkyView Faktors (SVF – siehe Abbildung 27) beschrieben werden. Der SVF misst den Grad der Offenheit gegenüber dem Himmel. Es ist ein dimensionsloser Wert, der zwischen Null (vollständige Geschlossenheit) und Eins (völlige Offenheit des Himmels) liegt. Der SkyView Faktor ist ein Maß, das zum besseren Verständnis der Beziehung zwischen den Parametern wie der Hitzeinsel, Luftverschmutzung, Wärme und Energieaustausch in städtischen Umgebungen beiträgt.



Abbildung 27: Prinzip des SkyView Faktors (SVF). Je stärker das Sichtfeld, z.B. durch umgebende Bebauung eingeschränkt ist, desto niedriger ist der SVF.

Der Außenraum der Stadt Ingelheim am Rhein (siehe Abbildung 28) charakterisiert sich durch die Abwesenheit raumprägender Bauungsstrukturen und die damit einhergehende Offenheit des unbebauten Raums. Diese Offenheit wird gemäß der topographischen Situation des Untersuchungsgebiets nur geringfügig durch das ansteigende bzw. abfallende Gelände zu beiden Seiten der „Landesstraße 428“ und südlich der „Landesstraße 422“ kompromittiert.

Anders verhält es sich innerhalb des Siedlungsraums, dessen Offenheit abhängig vom Grad seiner Bebauungsdichte unterschiedlich stark beeinträchtigt wird. Eine deutliche Abnahme der

baulich räumlichen Offenheit wird insbesondere in stark verdichteten, zentralen Siedlungsbereichen erfasst, die sich vorwiegend um die primären Verkehrswege herum ballen. Dementsprechend nimmt der SVF-Faktor in Wackenheim nahe der „Kirch-“ bzw. „Heerstraße“ ab, in Heidesheim insbesondere südlich der „Mainzer Straße“ und nahe der „Römerstraße“ sowie im östlichen Teil Großwinternheims und Frei-Weinheims.

In Ingelheim schränkt die hohe Bebauungsdichte im Stadtzentrum, im südlichen Teil des Stadtgebiets nahe der „Bahnhofstraße“, entlang der „Mainzer Straße“ und der „Vorderer Böhl“ die baulich räumliche Offenheit ebenfalls sehr stark ein ($> 0,1$). Im restlichen Stadtgebiet beläuft sich der SVF-Faktor großflächig auf 0,5, wobei sich dieser Wert – und damit die baulich-räumliche Offenheit – nahe größerer innerstädtischer Freiflächen auf $> 0,8$ erhöht.

Der Detailraum (siehe Abbildung 29) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Ingelheimer Innenstadtbereichs, der im Norden einen Teil des Industriegebiets („Boehringer Ingelheim“) zeigt, im Osten über die „Rotweinstraße“ hinausreicht, im Süden an die „Tanusstraße“ und im Westen an die „Selz“ grenzt. Der hohe Verdichtungsgrad der gewerblich geprägten Innenstadt südlich der Bahngleise, die sich gegenüber ihrem Umfeld durch große Baukörper und Gebäudekomplexe auszeichnet, sowie die stark verdichtete Bauweise entlang der „Binger Straße“, der „Erzbergerstraße“ und der „Belzerstraße“ im Osten des Detailraums wirkt sich nachteilig auf die räumlich bauliche Offenheit aus ($> 0,1$). Das Gewerbe- und Industriegebiet im Norden des Fokusraums zeichnet sich abseits der Gebäudegruppen durch große Freiflächen aus, welche die baulich

räumliche Offenheit ähnlich den innerstädtischen Grünanlagen (Parks, Friedhof) südlich der Bahngleise positiv beeinflussen ($> 0,9$). Der restliche Siedlungsraum wird insbesondere im südlichen Detailraum durch eine freiere Anordnung

der Gebäudekörper gekennzeichnet; der SVF-Faktor beträgt in diesen Bereichen Werte von ca. 0,8 - 0,5.

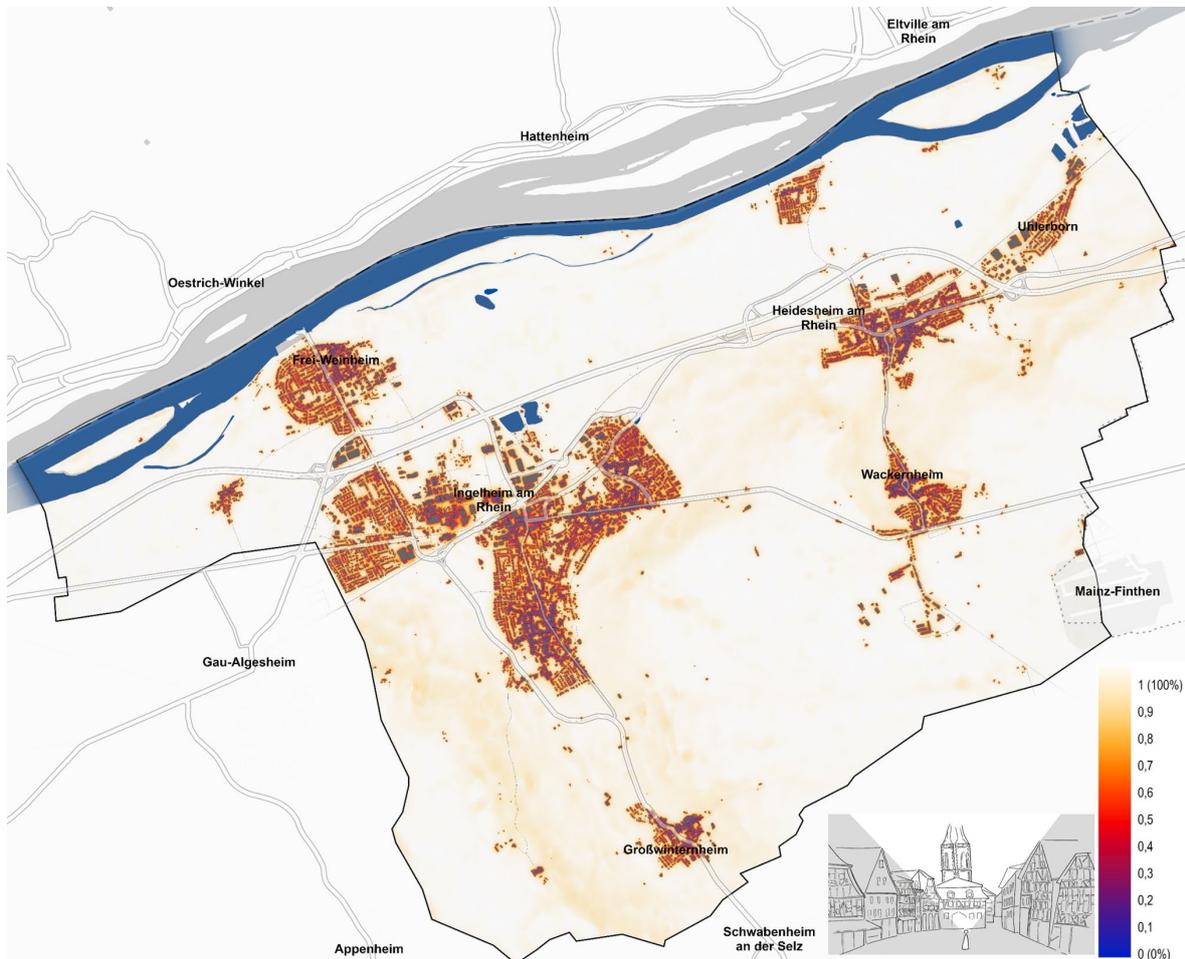


Abbildung 28: Übersicht Themenkarte "Bauliche und räumliche Offenheit". Der SkyView-Faktor ist eine dimensionslose Größe und wird in Werten zwischen 0 und 1 wiedergegeben. Werte um den Bereich 1 (hellorange bis durchsichtig) stellen eine baulich und räumliche Offenheit von fast 100 % dar. Rot und bis ins Blaue dargestellte Bereiche haben eine sehr niedrige baulich und räumliche Offenheit.



Abbildung 29: Detailansicht Themenkarte "Bauliche und räumliche Offenheit" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Dieser Innenstadtbereich, besonders entlang der „Binger Str.“ und im Kreuzungsbereich mit der „Bahnhofsstr.“ ist auf Grund seiner dichten Bebauung von einem sehr niedrigen SVF (rot bis blau) geprägt.

6.2.2 Bauvolumendichte

Über die **Bauvolumendichte** lassen sich Rückschlüsse auf die Baumassen und die bauliche Dichte der Gebäude innerhalb des Siedlungsraums zueinander ziehen. Die Analyse erfolgt auf Grundlage eines Rasters mit 1 m Auflösung. Entsprechend der Auflösung werden alle Gebäude in ein regelmäßiges Punktraster konvertiert. Bei der durchgeführten Berechnung der Punktdichte werden bei allen Punkten die Informationen der jeweiligen Gebäudehöhen sowie die Nachbarschaft in einem Umkreis von 50 m (um jede Rasterzelle) berücksichtigt. Die Bauvolumendichte ermöglicht somit die Interpretation

des 3-dimensionalen bebauten Raums im Kontext der Nachbarschaft von Gebäuden, ihrer Volumina sowie des Freiraums der nicht überbauten Flächen.

Die Gebäudevolumendichte (siehe Abbildung 30) fällt im gesamten Siedlungsraum überwiegend gering aus ($0,01 \text{ m}^3/\text{m}^2$ - $2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$). An vereinzelt, meist zentral gelegenen Stellen im Stadtraum nimmt die Dichte der Baumassen zu ($2,51 \text{ m}^3/\text{m}^2$ - $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$), ein signifikanter Anstieg der Gebäudevolumendichte wird allerdings nur in Teilen der Innenstadt und dem daran angrenzenden nördlichen Gewerbegebiet erreicht.

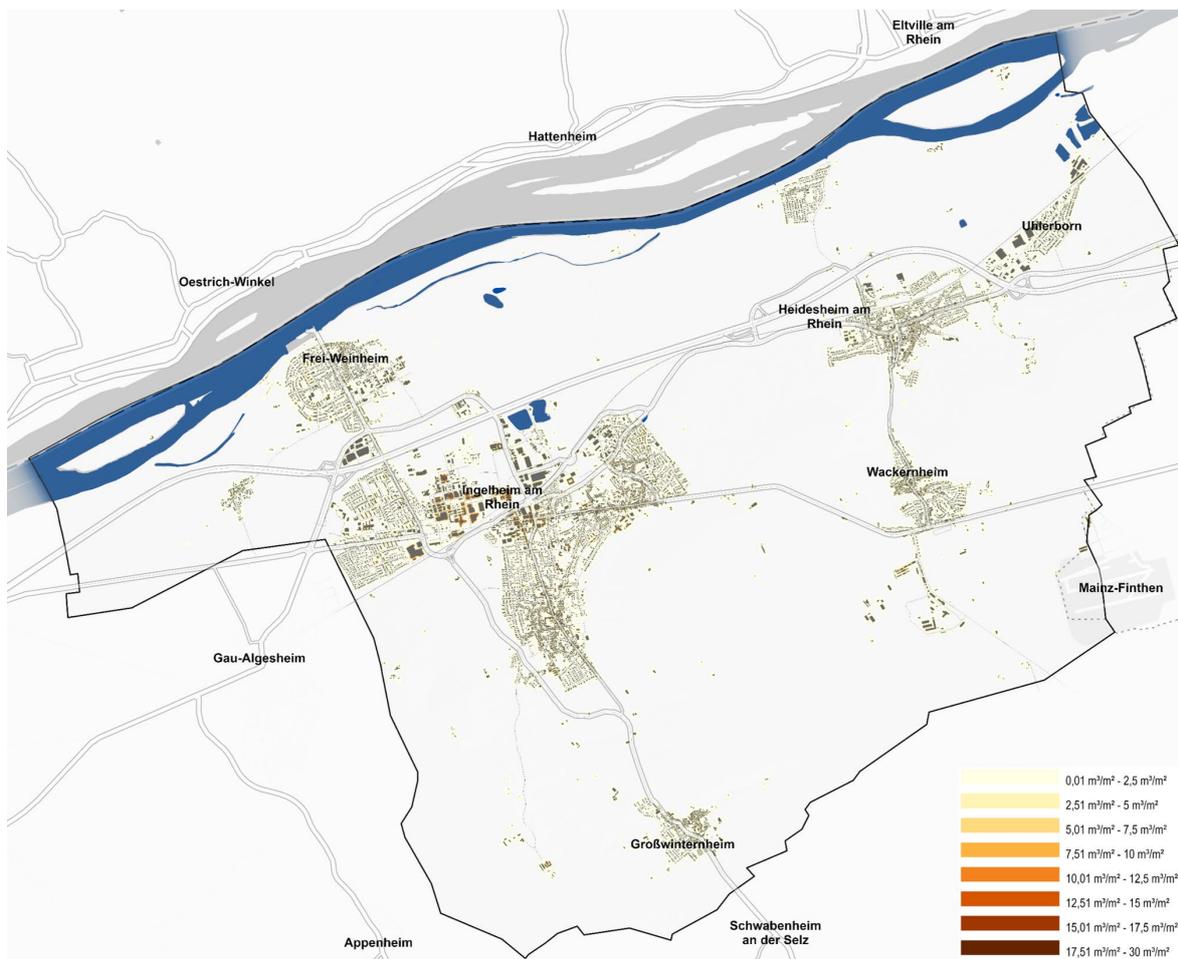


Abbildung 30: Übersicht Themenkarte "Bauvolumendichte". Die Bauvolumendichte beschreibt die Dichte der Bebauung im dreidimensionalen Raum. Eine hohe Bauvolumendichte wird in Rot-Tönen dargestellt, während eine geringe Bauvolumendichte in hellen Gelb-Tönen erscheint.

Der Detailraum (siehe Abbildung 31) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Ingelheimer Innenstadtbereichs, der im Norden einen Teil des Industriegebiets („Boehringer Ingelheim“) zeigt, im Osten über die „Rotweinstraße“ hinausreicht, im Süden an die „Tanusstraße“ und im Westen an die „Selz“ grenzt. Der Großteil des Innenstadtbereichs weist ebenfalls eine nur geringe Gebäudevolumendichte auf ($0,01 \text{ m}^3/\text{m}^2 - 2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$). Im Industrie- und Gewerbegebiet nördlich und südlich der Bahntrasse sowie entlang der „Binger Straße“ nimmt die Gebäudevolumendichte dagegen zu. In vergleichsweise hohem Maße fällt die Gebäudevolumendichte im gewerblichen

Teil des Fokusraums aus. Im Gegensatz zur restlichen Bebauung der Innenstadt sind die Baumassen hier massiver, haben aber weiterhin einen direkten räumlichen Bezug zueinander. Die Gebäudevolumendichte nimmt hier im Schnitt Werte von ca. $7,51 \text{ m}^3/\text{m}^2 - 10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ an, wobei diese insbesondere nördlich der Bahntrasse weiter ansteigen können. Die straßenbegleitenden Gebäude an der „Binger Straße“ weisen gegenüber ihrem Umfeld ebenfalls eine erhöhte bauliche Dichte auf (ca. $5,01 \text{ m}^3/\text{m}^2 - 7,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$), die allerdings weniger stark ausfällt als im gewerblich geprägten Teil der Innenstadt.



Abbildung 31: Detailansicht Themenkarte "Bauvolumendichte" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Hohe Werte für die Bauvolumendichte konzentrieren sich zwischen dem nördlichen Teil der „Bahnhofstraße“ und der „Gartenfeldstr.“ bzw. „Konrad-Adenauer-Str.“ sowie nördlich der Bahntrasse auf dem Gelände von „Boehringer Ingelheim“.

6.3 Vegetations-Analysen

6.3.1 Vegetationserfassung

Die **Vegetationsstrukturen** werden auf Grundlage der aktuellen (Stand: 2020) digitalen Luftbildaufnahmen (Orthophotos) mit integriertem Nahinfrarotkanal aus einer Sommerbefliegung bei einer räumlichen Auflösung von 20 cm dargestellt (siehe Abbildung 32).

Dabei reflektieren „vitale“ Grünstrukturen den Nahinfrarotbereich, wodurch eine dezidierte Erfassung der Vegetation ermöglicht wird.

Zur Identifikation aller vitalen Vegetationsstrukturen wird der NDVI ("Normalized Difference Vegetation Index") sowie der Clgreen ("Green Chlorophyll Index") genutzt. Dabei können po-

tentiell verfälschende Einflüsse durch Schattenwürfe von Gebäuden, Topographie oder aber auch Bäumen reduziert werden.

Ergänzende Flächennutzungen, die nativ vegetationsdominiert sind (z.B. Wälder, Offenland, Friedhöfe etc.) werden nicht dezidiert analysiert, sondern auf Grundlage städtischer Informationen sowie des Urban Atlas (2018) dargestellt und überlagert. Der Außenraum ist stark vegetationsdominiert, wobei ein geringer Anteil dieser Vegetationsstrukturen aus Waldflächen besteht. Diese befinden sich vorwiegend am Rheinufer („Sandlache“), zwischen der „Landesstraße 428“ und der westlichen Grenze des Untersuchungsraums sowie im Osten Heidesheims („Lennebergwald“).

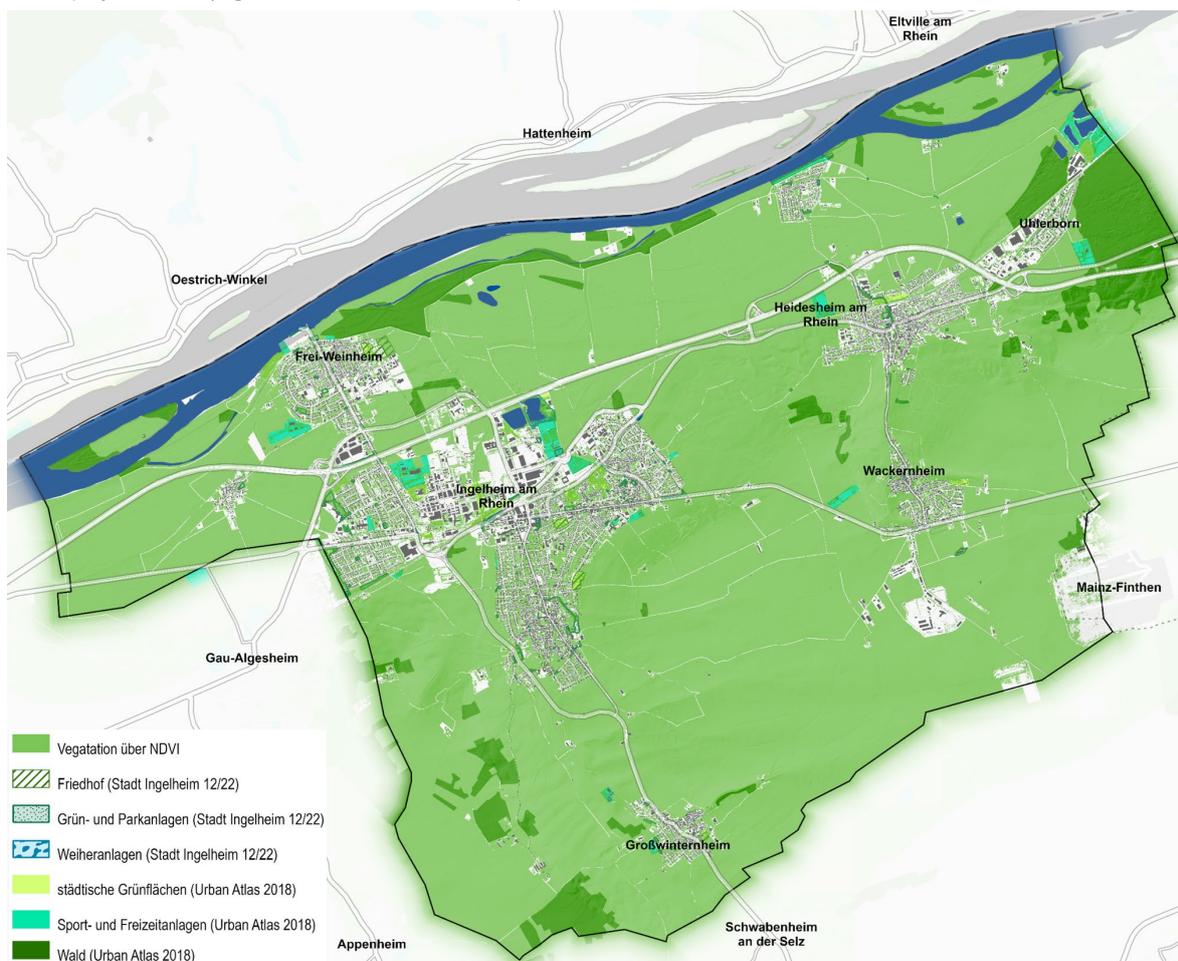


Abbildung 32: Übersicht Themenkarte "Vegetationserfassung". Zusätzlich zu den offiziellen vegetationsbefaheten Nutzungsklassen des Urban Atlas (2018) wurden vitale Vegetationsstrukturen über die Analyse von Nahinfrarotluftbilder identifiziert, um das gesamte Grünvolumen des Untersuchungsraums zu erfassen.

Vereinzelte Sport- und Freizeitanlagen (z.B. Camping-, Reit- und Tennisanlagen) sind im Außen- wie auch im Siedlungsraum verteilt. Innerhalb des Siedlungsraums unterscheiden sich größere Vegetationsflächen weiter in städtische Grünflächen, Grün und Parkanlagen, Weiheranlagen und Friedhöfe. Die Weiheranlage umschließt den zwischen Ingelheim und der „Autobahn 60“ gelegenen „IKA-see“, an den im Süden auch das Sportzentrum anschließt. Die Friedhöfe liegen mit Ausnahme des „Friedhof-Mitte“ vorwiegend an den östlichen Siedlungsändern der Kommunen. Der Detailraum (siehe Abbildung 33) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Ingelheimer Innenstadtbereichs, der im Norden einen Teil des Industriegebiets („Boehringer Ingelheim“) zeigt, im Osten über die „Rotwein-

straße“ hinausreicht, im Süden an die „Tanusstraße“ und im Westen an die „Selz“ grenzt. Neben drei Sport- und Freizeitanlagen an den Rändern des Fokusraums bestehen dessen größte Vegetationsflächen (mit Ausnahme des privaten Grüns) aus dem zentralen Friedhof („Friedhof-Mitte“) und weiteren städtischen Grünflächen bzw. Grün- und Parkanlagen. Diese liegen mitunter an der „Selz“, nördlich der Bahngleise und an der „Wilhelm-von-Erlangen-Straße“; der „Friedhof-Mitte“ wird sowohl als Friedhof als auch als städtische Grünfläche aufgeführt. Der Süden des Fokusraums wird insbesondere durch private Grünflächen dominiert; eine einzige kleinere städtische Grünfläche befindet sich neben dem „Friedhof Ober-Ingelheim“ (Süden) in der Nähe der Kindertageskrippe an der „Paul-Clemen-Straße“.



Abbildung 33: Detailansicht Themenkarte "Vegetationserfassung" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Vegetation, welche über die NDVI-Methode erfasst wurde (hierzu zählt auch das private Grün) erscheint in blass grün. Seitens der Stadt wurden zusätzlich Friedhöfe (grüne Schraffur) und Park- bzw. Grünanlagen (grün gepunktet) benannt. Hellgrüne und türkisgrüne Flächen entstammen dem Urban Atlas (2018) und sind dort als städtische Grünflächen bzw. Sport- und Freizeitanlagen klassifiziert.

6.3.2 Städtische Durchgrünung

Die Themenkarte **städtische Durchgrünung** (siehe Abbildung 34) zeigt parzellen- bzw. flurstücksgenau den prozentualen Anteil des Vegetationsvorkommens in Relation zum Versiegelungsgrad der Fläche.

Die Darstellung der Flächendurchgrünung basiert auf der räumlichen Verschneidung der Flurstücksdaten mit den erfassten Vegetationsstrukturen auf Grundlage der Luftbilddauswertung (vgl. Kapitel 6.3.1). Dabei wird der prozentuale Anteil der Flächendurchgrünung ausschließlich für Flächen im Siedlungsraum dargestellt. Vegetationsdominierte Flächen im Außenbereich werden im Kontext der prozentualen Durchgrünung nicht aufgeschlüsselt. Die flächenhafte bzw. auf die Fläche projizierte Darstellung des Grads der Durchgrünung ermöglicht eine visuelle wie auch inhaltlich differenzierte Betrachtung des gesamten bebauten Raums.

Der Siedlungsraum gestaltet sich hinsichtlich seiner prozentualen parzellengenauen Flächendurchgrünung heterogen. Die meist großflächigen Industrie- und Gewerbegebiete sind im gesamtstädtischen Kontext insofern auffällig, als dass sie sich durch vergleichsweise geringe Durchgrünungsanteile kennzeichnen. Auch hier ist aufgrund der Diversität der vereinzelt Parzellen keine einheitliche Aussage zu treffen, doch große Flächen der Industrie- und Gewerbegebiete weisen Durchgrünungsraten von < 21 % - 30 % auf. Die restlichen Flächen des urbanen Raums charakterisieren sich insbesondere bei Wohnnutzungen durch wesentlich kleinere Parzellen mit je unterschiedlichen Vegetationsanteilen. Im Schnitt sind sie allerdings insbesondere in den Siedlungsrandlagen besser durchgrünt als in zentralen Siedlungsbereichen.

Der Detailraum (siehe Abbildung 35) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Ingelheimer Innenstadtbereichs, der im Norden einen Teil des Industriegebiets („Boehringer Ingelheim“) zeigt, im Osten über die „Rotweinstraße“ hinausreicht, im Süden an die „Tanusstraße“ und im Westen an die „Selz“ grenzt.

Hierbei zeigt sich, dass viele Flurstücke des städtischen Zentrums südlich der „Römerstr.“ und östlich der „Bahnhofstr.“ einen extrem niedrigen Vegetationsanteil von 0 % bis 10 % aufweisen und stark versiegelt sind. Einzelne z.T. größere Flurstücke, wie bspw. das „Sebastian Münster Gymnasium“ verfügen über eine Vegetationsabdeckung bis 30 %, bilden damit aber die Ausnahme in diesem Kernbereich. Ähnlich defizitär gestaltet sich die Vegetationsausstattung im anschließenden Industriegebiet nördlich der „Linken Rheinstrecke“, primär im Bereich des Großmarktes sowie nördlich der „Wilhelm-von-Erlangen-Straße“ im Bereich der „Kaiserpfalz Realschule“.

Sehr hohe Vegetationsabdeckungen, bis über 90 %, werden südlich der „Wilhelm-von-Erlangen-Straße“ (private Parkanlage und die Kommerzienrat Albert-Boehringer-Anlage) erzielt.

Die dem städtischen Zentrum nach Süden und Südosten anschließende Siedlungsbebauung weist hinsichtlich der Grünabdeckung Werte zwischen 41 % und 60 %, teilweise bis 70 % auf.

Hierbei ist anzumerken, dass die Siedlungsbebauung östlich der „Kreisverwaltung Mainz-Bingen“ sowie im Bereich „Mainzer Str.“ / „Erzbergerstraße“ weniger gut durchgrünt ist.

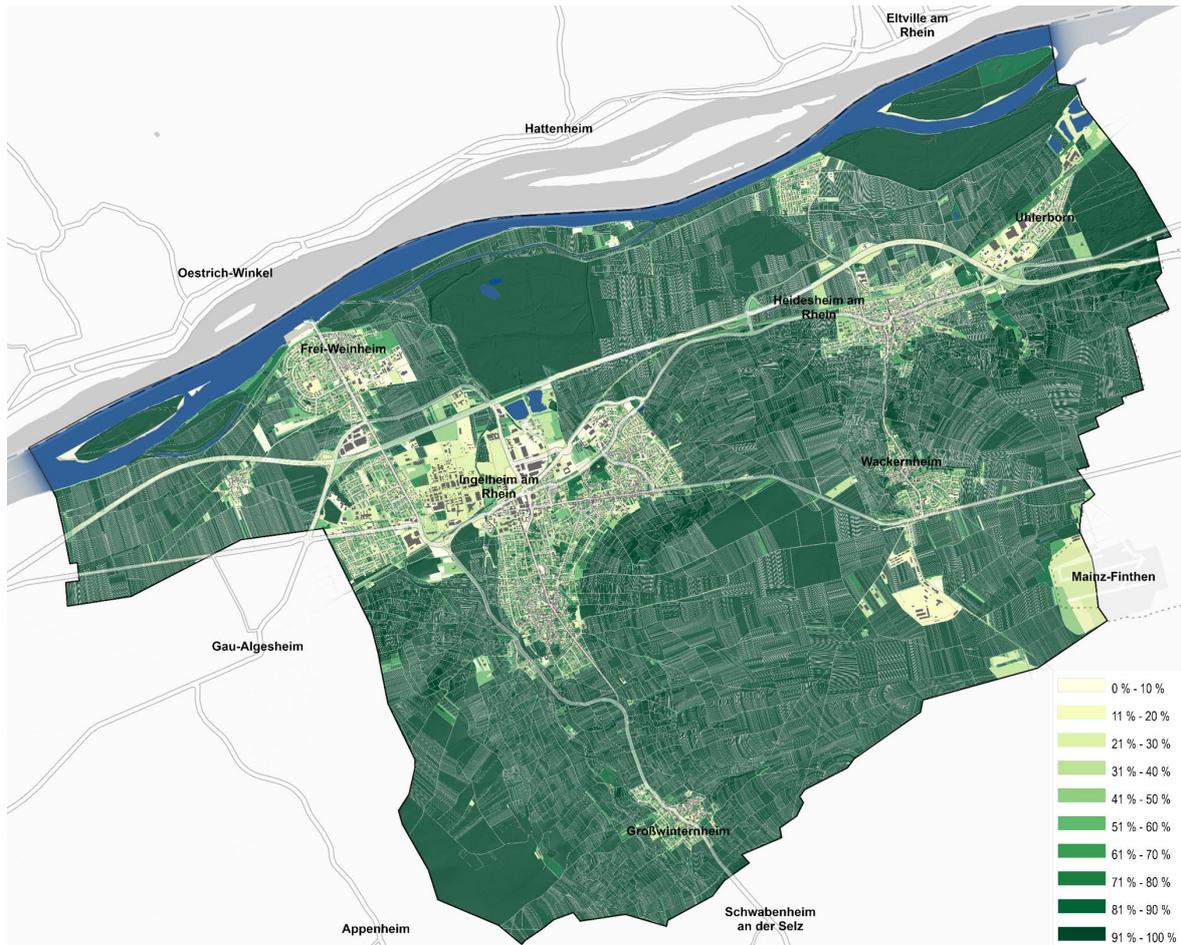


Abbildung 34: Übersicht Themenkarte "Städtische Durchgrünung auf Flurstücksebene". Entsprechend dem analysierten Durchgrünungsgrad werden die Flurstücke in unterschiedlichen Farben dargestellt. Blass gelb steht für eine Durchgrünung von weniger als 10 %. Vegetationsdominierte Flächen im Außenbereich werden im Kontext der prozentualen Durchgrünung nicht aufgeschlüsselt und automatisch der Klasse 91 % bis 100 % zugeteilt.

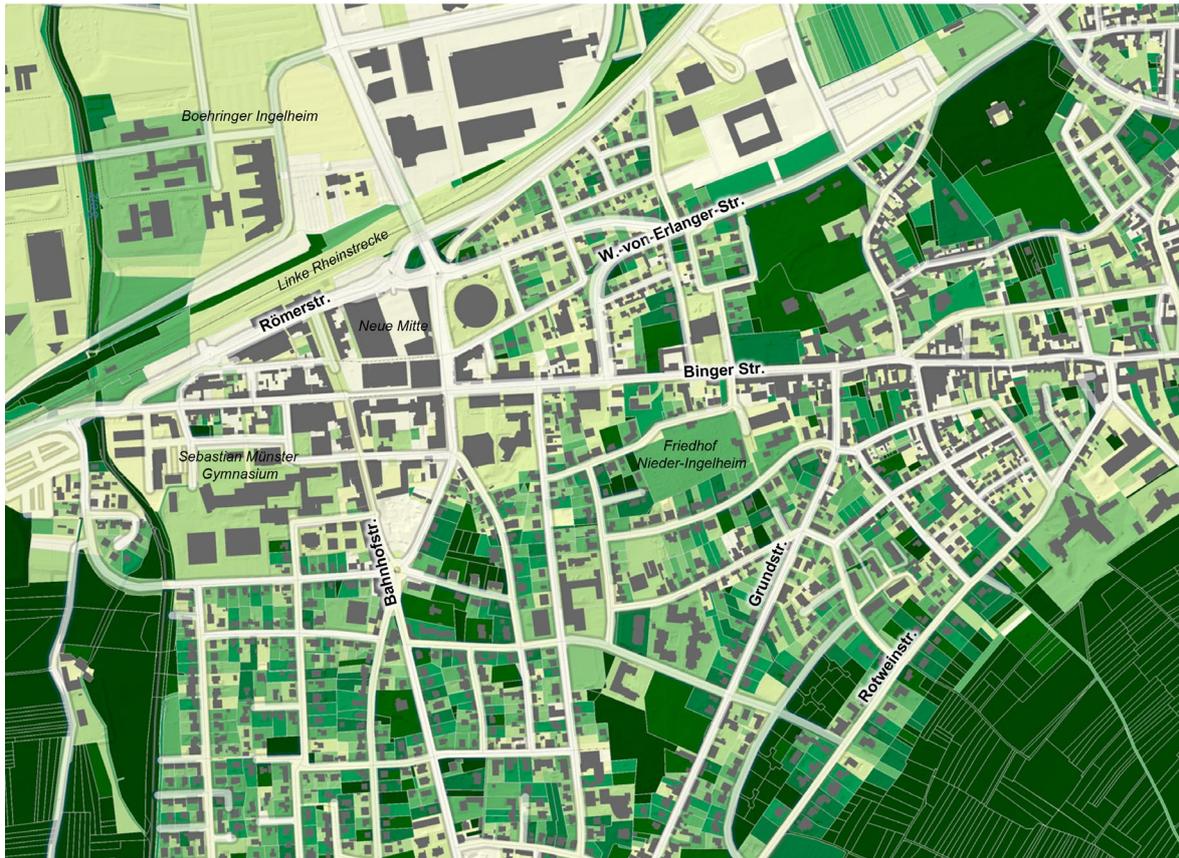


Abbildung 35: Detailansicht Themenkarte "Städtische Durchgrünung auf Flurstücksebene" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Je dunkler die Grünfärbung, desto höher der Durchgrünungsgrad des Flurstücks. Defizitäre Bereiche mit unter 20% Durchgrünung finden sich in den östlichen Teilen des Industriegebietes „Auf dem Gänsberg“ / „Am Gebrannten Hof“ sowie in der „Neuen Mitte“.

6.4 Klimatische Analysen

6.4.1 Nächtliche Kaltluftschichtdicke und bodennahes Windfeld

Die numerische Berechnung der **nächtlichen Kaltluftproduktion und des -transports** basiert primär auf der Landnutzung, der Bebauungsstruktur und der Topographie. Ausgegangen wird hier von einer austauscharmen Strahlungsnacht in einem der Sommermonate.

Wenig vegetationsbesetzte Offenlandflächen stellen die primären Kaltluftentstehungsgebiete dar, da hier ein sehr schnelles Auskühlen der bodennahen Luftschichten stattfindet (vgl. Kapitel 2.5). Zusätzlich fördern innerstädtische Frei- und Grünflächen die lokale Kaltluftproduktion und können, je nach Lage und Ausrichtung, das Eindringen des Kaltluftabflusses in den Siedlungsraum unterstützen. Kaltluft bildet sich in den Nachtstunden, vorzugsweise während Strahlungsnächten (wolkenlos). Der klimatisch wirksame Kaltluftabfluss / -transport ist zudem abhängig von einer autochthonen Wetterlage, ohne überlagernde regionale Anströmungen. Die Kaltluftp Höhen und das bodennahe Strömungsfeld wurden für eine Referenzzeitspanne von acht Stunden nach Sonnenuntergang berechnet. Dabei wurden für unterschiedliche Zeiten während der Simulationsnacht Schnitte erzeugt.

Die Kaltluftschichtdicke wird farblich abgestuft dargestellt und durch die Pfeildarstellung des bodennahen nächtlichen Strömungsfeldes ergänzt. Dabei handelt es sich um ein orographie- und druckinduziertes Strömungsfeld auf einer Höhe von 2 m ü. Grund, welches maßgeblich für den Transport nächtlicher Kaltluftströme verantwortlich ist. Die Intensität dieser bodennahen Strömungsschicht liegt zwischen 0,0 m/s und

>1,5 m/s und wird ebenfalls farblich ausdifferenziert. Werte unter 0,1 m/s werden der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

Nachfolgend werden nur die Zeitschnitte der Simulation für

- 15 Minuten,
- 2 Stunden,
- 4 Stunden und
- 8 Stunden dargestellt.

Alle zehn Zeitschnitte sind in den Karten- und Planwerken (Teil 2) zu finden.

In der **ersten Viertelstunde** (siehe Abbildung 36 und Abbildung 37) nach Sonnenuntergang ist noch keine signifikante Kaltluftverteilung im Untersuchungsraum erkennbar. Erste Anzeichen des einsetzenden Kaltlufttransportes bzw. der Kaltluftentstehung zeigen sich jedoch bereits in der topographischen Schneise entlang der „Landesstraße 428“ und dem topographischen Korridor zwischen Wackernheim und Heidesheim.

Der Kaltlufttransport erfolgt der Ausrichtung des bodennahen nächtlichen Strömungsfeldes entsprechend primär aus Süden und Südwesten in Richtung des im Norden gelegenen Rheins. Der topographischen Ausprägung des Untersuchungsraums folgend verändern sich die Windgeschwindigkeiten des Strömungsfeldes; der Süden des Ingelheimer Stadtgebietes wird durch niedrige bis mittlere Windgeschwindigkeiten (0,1 m/s – 0,75 m/s) gekennzeichnet. Stärkere topographische Geländeabfälle gehen mit erhöhten Windgeschwindigkeiten einher. Vor den Stadträndern Ingelheims, Großwinternheims, Wackernheims und Heidesheims sowie in Richtung der topographischen Schneise an der „L 428“ erreicht das bodennahe nächtliche Strömungsfeld Windgeschwindigkeiten von 0,75 m/s - > 1,5 m/s. Während die Luftmassen an den

Stadträndern durch die zunehmende Bebauung abgebremst werden, geht das Strömungsfeld zwischen Ingelheim und Heidesheim ungestört in die gemäßigten Windgeschwindigkeiten des Flachlands über ($0,5 \text{ m/s} - < 0,1 \text{ m/s}$). Von dort aus werden anströmende Luftmassen weiter in Richtung Rhein getragen.

Nach einer halben Stunde haben sich bereits weitere Kaltluftmassen in den topographischen Schneisen des Untersuchungsraums angesammelt (Schichthöhe ca. $30 \text{ m} - 40 \text{ m}$), von wo aus sie mit Windgeschwindigkeiten von $0,1 \text{ m/s} - 0,25 \text{ m/s}$ in die nördlich gelegenen Siedlungsbereiche hineintransportiert werden. Auch auf dem flachen Gelände nahe des Rheins nimmt die Kaltluftschichtdicke gegenüber den südlichen Hängen leicht zu.

Diese Differenz nimmt im Laufe des Abends bzw. der Nacht weiter zu. Nach einer Stunde bildet sich im flachen Bereich des Rheinufers eine Kaltluftschichtdicke von ca. 30 m , die in den topographischen Schneisen entlang der „L 428“ und im Süden Heidesheims von Kaltluftschichtdicken bis $> 50 \text{ m}$ übertroffen wird. Die Kaltluft wird durch das bodennahe nächtliche Strömungsfeld an weitere Teile des Siedlungsraums herangetragen (Uhlborn im Osten Heidesheims, der westliche Teil Ingelheims). Die Windgeschwindigkeiten im nördlichen Bereich des Untersuchungsraums nehmen ebenfalls geringfügig zu ($< 0,1 \text{ m/s} - 0,5 \text{ m/s}$), wodurch eine gleichmäßige Verteilung der Kaltluft im nördlichen Freiraum erreicht wird.

Nach **Stunde zwei** (siehe Abbildung 38 und Abbildung 39) ist die räumliche Kante zwischen den Kaltluftmassen deutlich ausgebildet. Während der südliche Teil des Untersuchungsraums eine Kaltluftschichtdicke von ca. 20 m aufweist, nimmt diese im Norden durch die abfließende

Kaltluft aus dem Süden sowie die eigene Kaltluftproduktion und -verteilung stark zu (ca. 40 m). Die Windgeschwindigkeiten sind zu dieser Stunde im Norden deutlich reduziert ($< 0,1 \text{ m/s}$). Auf Grund des fortschreitenden Luftmassenaustausches zwischen dem „wärmeren“ Stadtraum und dem „kühleren“ Umland verringert sich zum einen der Druckunterschied zwischen urbanen Raum und Außenraum zunehmend und zum anderen tritt ein Sättigungseffekt durch die mittlerweile vorhandene Kaltluft ein. Beide Zustände beeinflussen das Windfeld direkt. Durch die zunehmende „Kaltluftsättigung“ und den schwächer werdenden Druckunterschied wird das Windfeld abgebremst und die Windgeschwindigkeiten verringern sich.

Frei-Weinheim, große Teile Ingelheims, Heidesheims und Uhlborns sind bereits mit Kaltluftmassen unterschiedlicher Ausprägungen überströmt. Die höchste Ansammlung an Kaltluft befindet sich nach wie vor in den topographischen Schneisen des Untersuchungsraums; besonders ballen sich die Luftmassen jedoch im Kaltluftkorridor im Westen Großwinterheims (ca. 80 m).

Dieses Muster zieht sich auch durch die weiteren Nachtstunden hindurch. Mit Ausnahme Wackernheims und des östlichen Siedlungsteils Ingelheims werden alle Siedlungsbereiche nach **Stunde vier** (siehe Abbildung 40 und Abbildung 41) überströmt. Die Kaltluftschichtdicke nimmt weiterhin beständig zu, wobei sich ab der dritten Stunde bis zur Stunde acht keine weiteren Veränderungen in der Ausrichtung oder Windgeschwindigkeit des bodennahen Strömungsfeldes ergeben. Ab der dritten Stunde beschränkt es sich auf die Hänge des südlichen Teils des Untersuchungsraums und trägt somit weiterhin

zum Abfluss der Kaltluft in Richtung der tiefergelegenen Siedlungsräume bei.

Stunde acht (Abbildung 42 und Abbildung 43) stellt die finale Ausprägung der Kaltluftmassen während der Nachtstunden dar. Das Gefälle zwischen Nord und Süd ist zu dieser Stunde am stärksten ausgeprägt: Im flachen nördlichen Teil des Untersuchungsraums hat sich eine Kaltluftschichtdicke von > 100 m angesammelt, die einer Kaltluftschichtdicke von < 10 m im südöstlichen Teil gegenübersteht. Die Kaltluft, die sich

zuvor insbesondere in den topographischen Schneisen im Westen Großwinternheims und im Norden Wackernheims angesammelt hatte, überströmt nahezu alle Bereiche der Ingelheimer Siedlungsräume. Die Kaltluft staut sich in den Talregionen so weit auf, dass sie mitunter die Ausläufer der südlich gelegenen Höhenzüge erreicht, wodurch auch der östliche Siedlungsteil Ingelheims überströmt wird. Lediglich Wackernheim wird aufgrund seiner Hanglage nachts nicht mit Kaltluft überströmt.

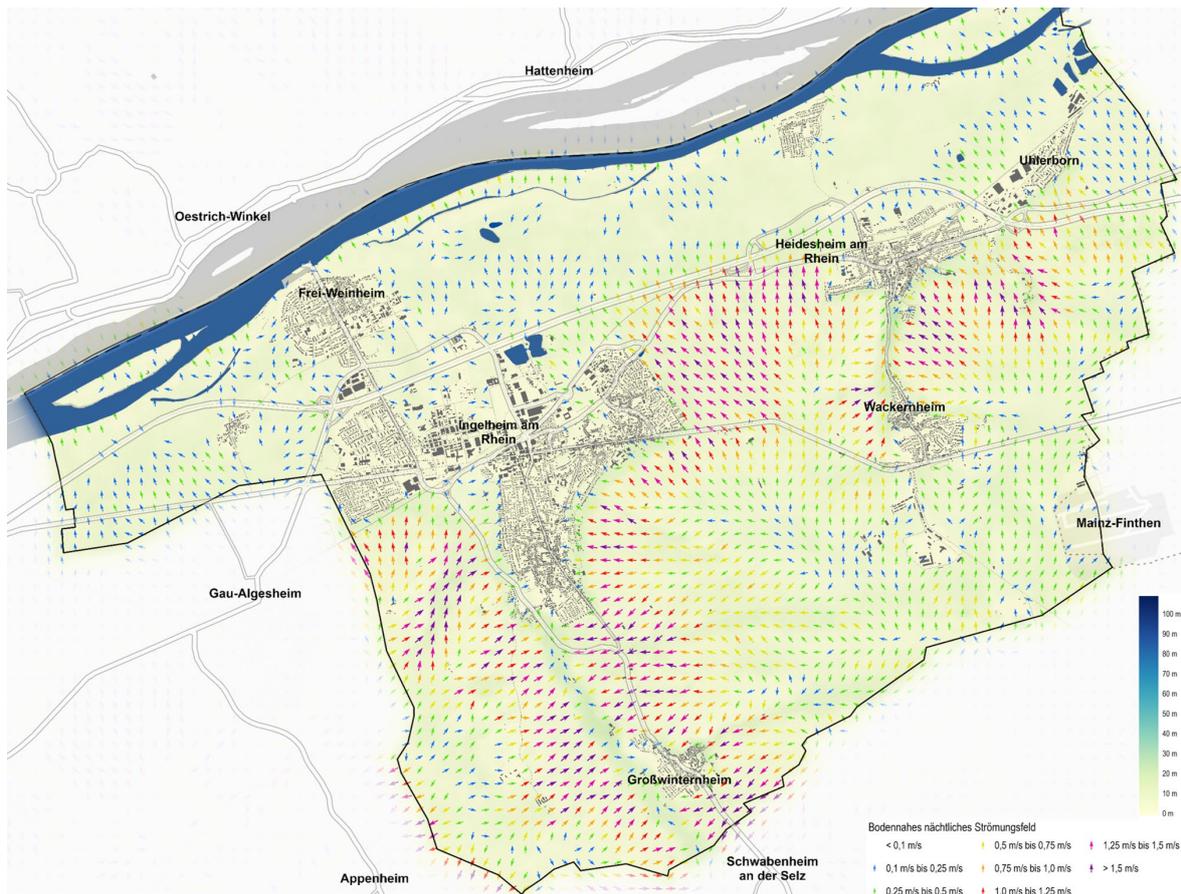


Abbildung 36: Übersicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 15min. Simulationszeit". Das bodennahe nächtliche Windfeld ist zu Beginn der Nacht im Außenbereich noch sehr heterogen ausgeprägt und weist auch durchgängig Windgeschwindigkeiten $> 0,1\text{m/s}$ auf. Eine deutliche Kaltluftschicht ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorhanden.



Abbildung 37: Detailansicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 15min. Simulationszeit" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Zu diesem Zeitpunkt existieren noch keine Kaltluftschichten im Innenstadtbereich.

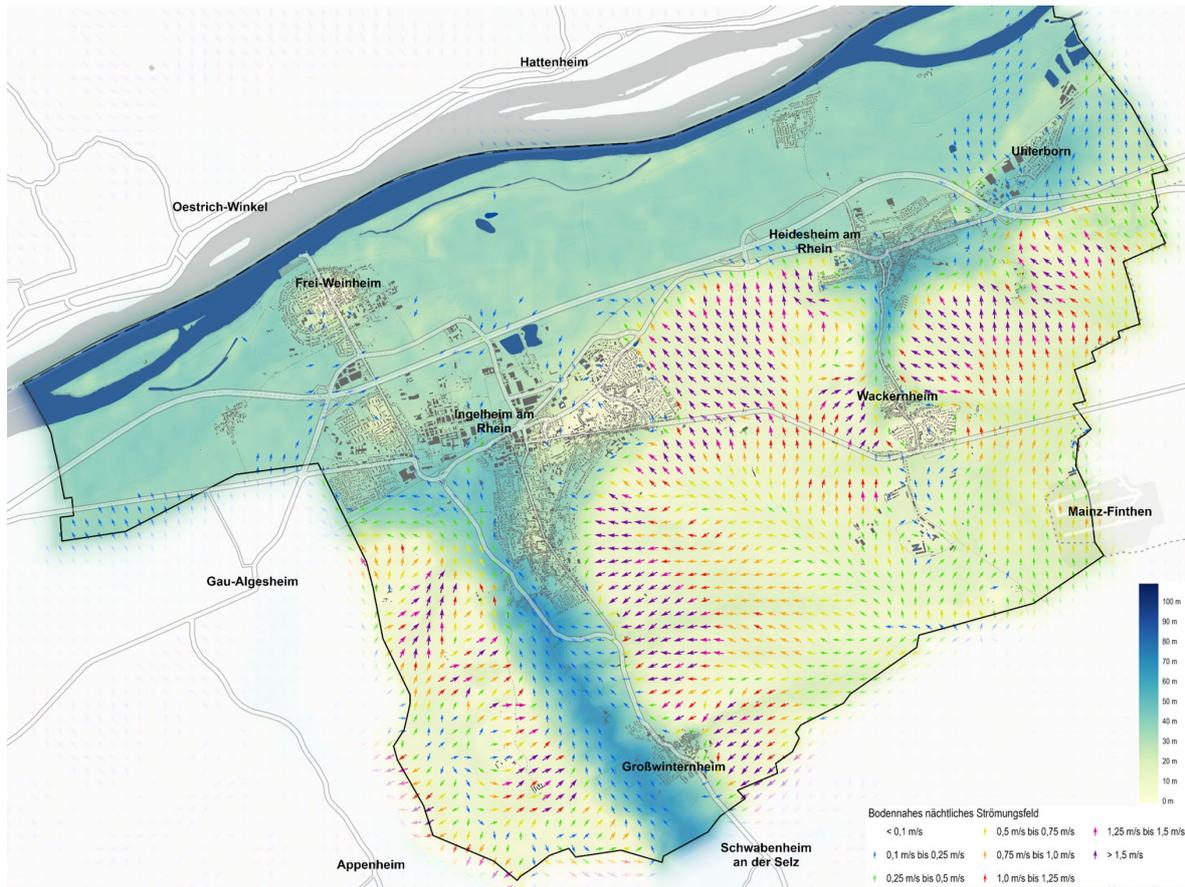


Abbildung 38: Übersicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 2Std. Simulationszeit". Das bodennahe nächtliche Windfeld wird zunehmend homogener, während eines gleichzeitigen Rückgangs der Windgeschwindigkeiten. Die Tal- und Senkenbereiche füllen sich zunehmend mit im Offenland entstehender Kaltluft.

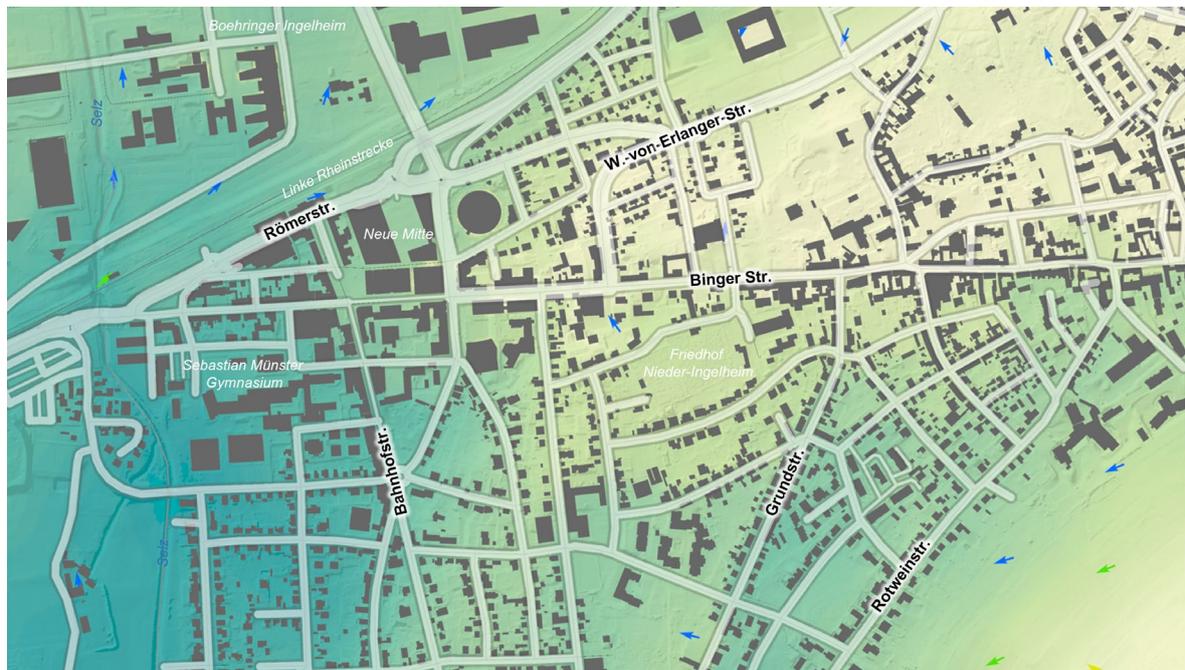


Abbildung 39: Detailansicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 2Std. Simulationszeit" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein".

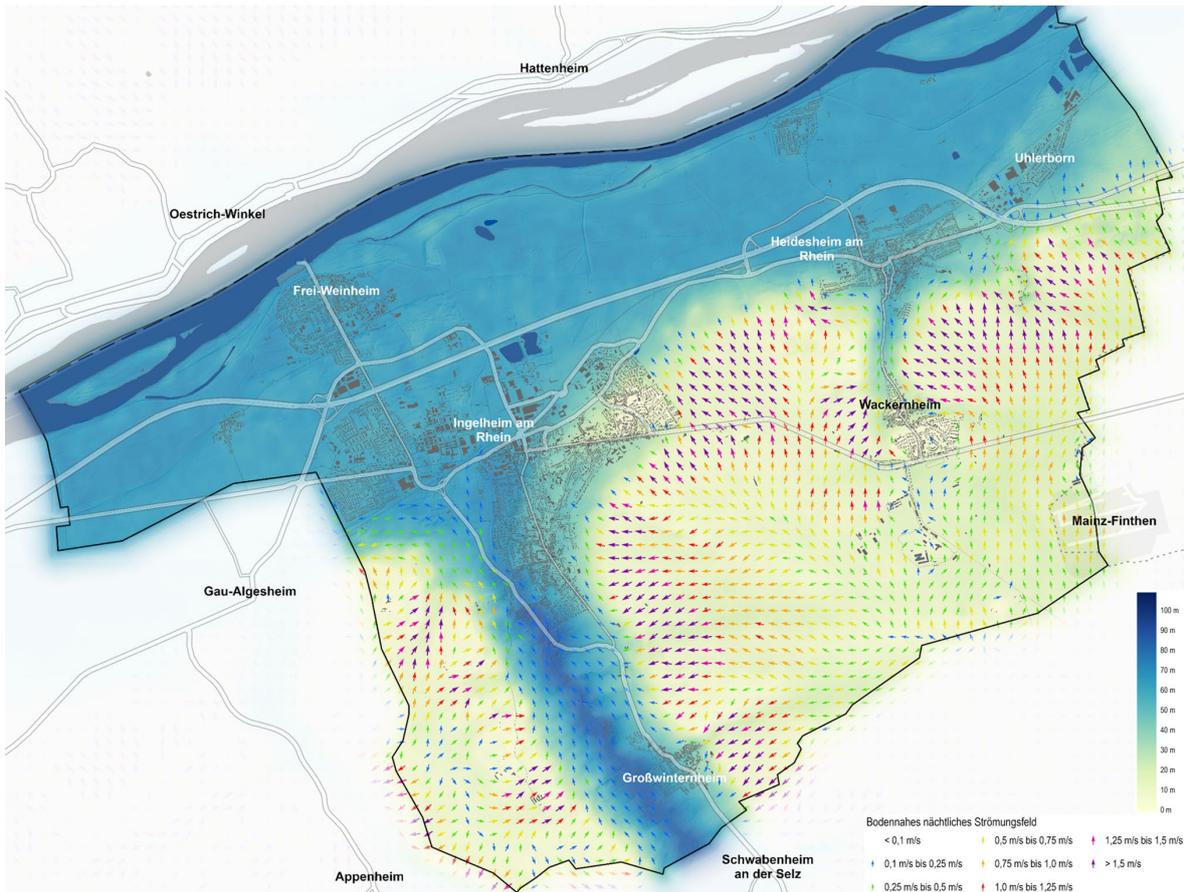


Abbildung 40: Auszug aus der Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 4Std. Simulationszeit". Die rheinnahen Siedlungsräume verfügen mittlerweile eine Kaltluftschichtdicke von rd. 50 m. Das Windfeld beruhigt sich zunehmend.



Abbildung 41: Detailansicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 4Std. Simulationszeit" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Die Kaltluftschichtdicke steigt im Innenstadtbereich weiter an.

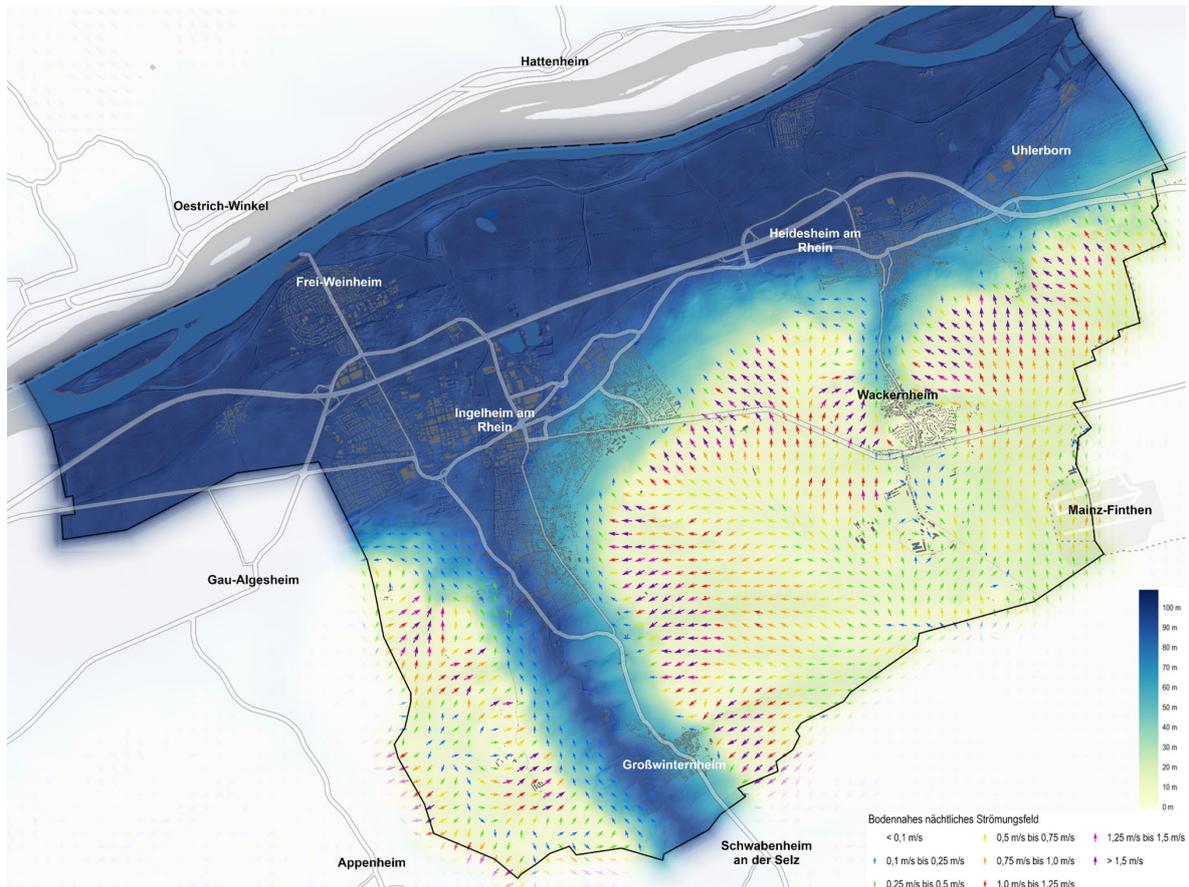


Abbildung 42: Auszug aus der Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 8Std. Simulationszeit". Am Ende der Simulationsnacht liegt die Kaltluftschichtdicke in den rheinnahen Bereichen bei rd. 100 m.

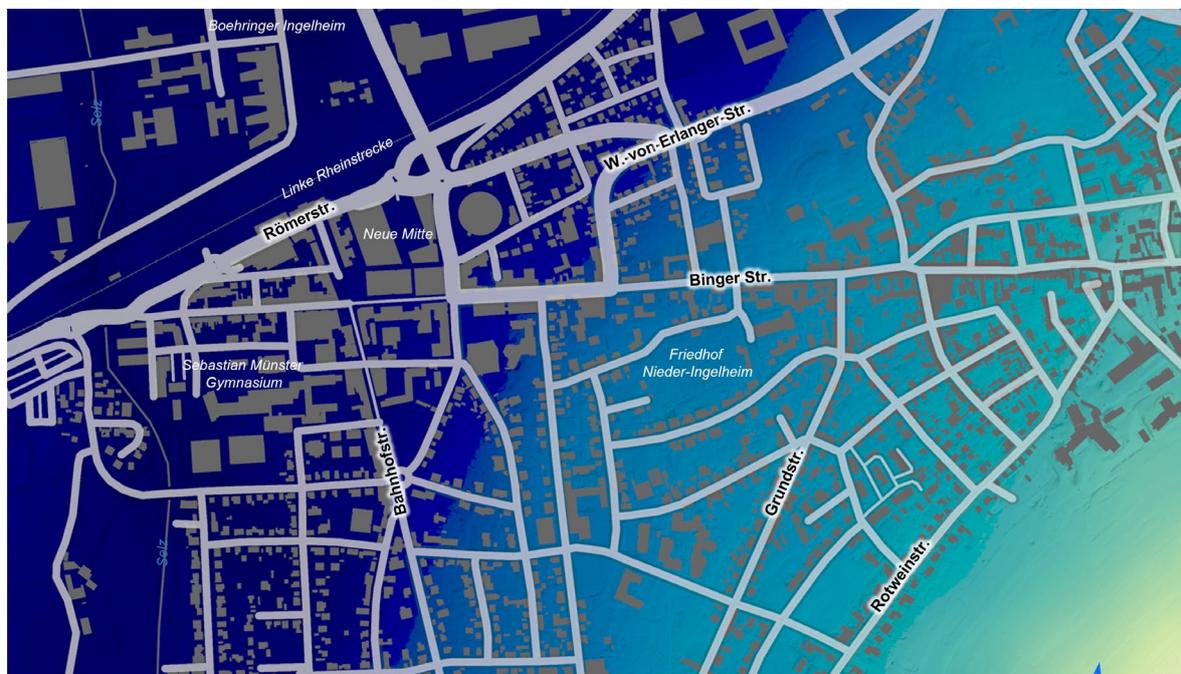


Abbildung 43: Detailansicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 8Std. Simulationszeit" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Am Ende der Simulationsnacht liegt die Kaltluftschichtdicke im Innenstadtbereich bei rd. 80 bis 90 m.

6.4.2 Bodennahe nächtliche Lufttemperatur

Die Darstellung der **bodennahen nächtlichen Lufttemperatur** (siehe Abbildung 44) eignet sich zur Abbildung des städtischen Wärmeinsellektes (vgl. Kapitel 2.2), der sich als Differenz der bodennahen Lufttemperatur zwischen (bebauungsfreien) Umland und dem bebauten Siedlungsraum ausdrückt. In die Berechnung fließen unter anderem die Bebauung sowie die Vegetation und Gewässerstrukturen ein. Im Kontext der unterschiedlich starken Abkühlung von Oberflächen und Räumen wird eine austauscharme Nachtsituation angenommen, da hier die maximal zu erwartenden Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland auftreten. Als Ausgangssituation wird eine austauscharme Wetterlage mit einem Temperaturmaximum von 25 °C (am Tag) und einem Temperaturminimum von 15 °C (in der Nacht) angenommen.

Der unbebaute Außenbereich kühlt in der Nacht erneut auf 15 °C ab. Kleinere Gebäudegruppen im Außenbereich erkalten ebenfalls signifikant; größere Temperaturunterschiede ergeben sich erst bei großflächigeren Ansiedlungen. Die Nutzungsart und bauliche Dichte des Siedlungsbereichs ist für die Überhitzung dieser bebauten Flächen ausschlaggebend. Gewerbe- und Industriegebiete (z.B. in Ingelheim nördlich der Bahntrasse) die sich durch einen hohen Flächenversiegelungsgrad und ein Defizit an Vegetationsstrukturen auszeichnen, weisen ebenso

erhöhte Temperaturen auf wie der stark verdichtete innerstädtische Bereich (> 23 °C).

Die suburbanen Wohngebiete abseits der Stadtmitte und der Industrie- und Gewerbegebiete (z.B. in „Wackernheim“ oder „Großwinternheim“) sind mit meist 18 °C bis 21 °C weniger stark überwärmt als der zentrale Stadtbereich, weisen im Kontrast zum umliegenden Offenland jedoch immer noch erhöhte Lufttemperaturen auf.

Am geringsten sinkt die nächtliche bodennahe Lufttemperatur in den Wohngebieten der Stadtteile „Ingelheim“, „Heidesheim“ und „Frei-Weinheim“.

Der Detailraum (siehe Abbildung 45) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Ingelheimer Innenstadtbereichs, der im Norden einen Teil des Industriegebiets („Boehringer Ingelheim“) zeigt, im Osten über die „Rotweinstraße“ hinausreicht, im Süden an die „Tanusstraße“ und im Westen an die „Selz“ grenzt.

Hierbei sticht der verdichtete innerstädtische Bereich zwischen „Römerstr.“, „Bahnhofstr.“, „Sebastian Münster Gymnasium“ und „Kreisverwaltung Mainz-Bingen“ als Temperaturhotspot mit z.T. gut 23 °C hervor. Mit etwas niedrigeren Temperaturen setzt sich dieser Bereich auch nördlich der Bahntrasse „Linke Rheinstrecke“ ins Industrie- und Gewerbegebiet – um die „Konrad-Adenauer-Straße“ fort.

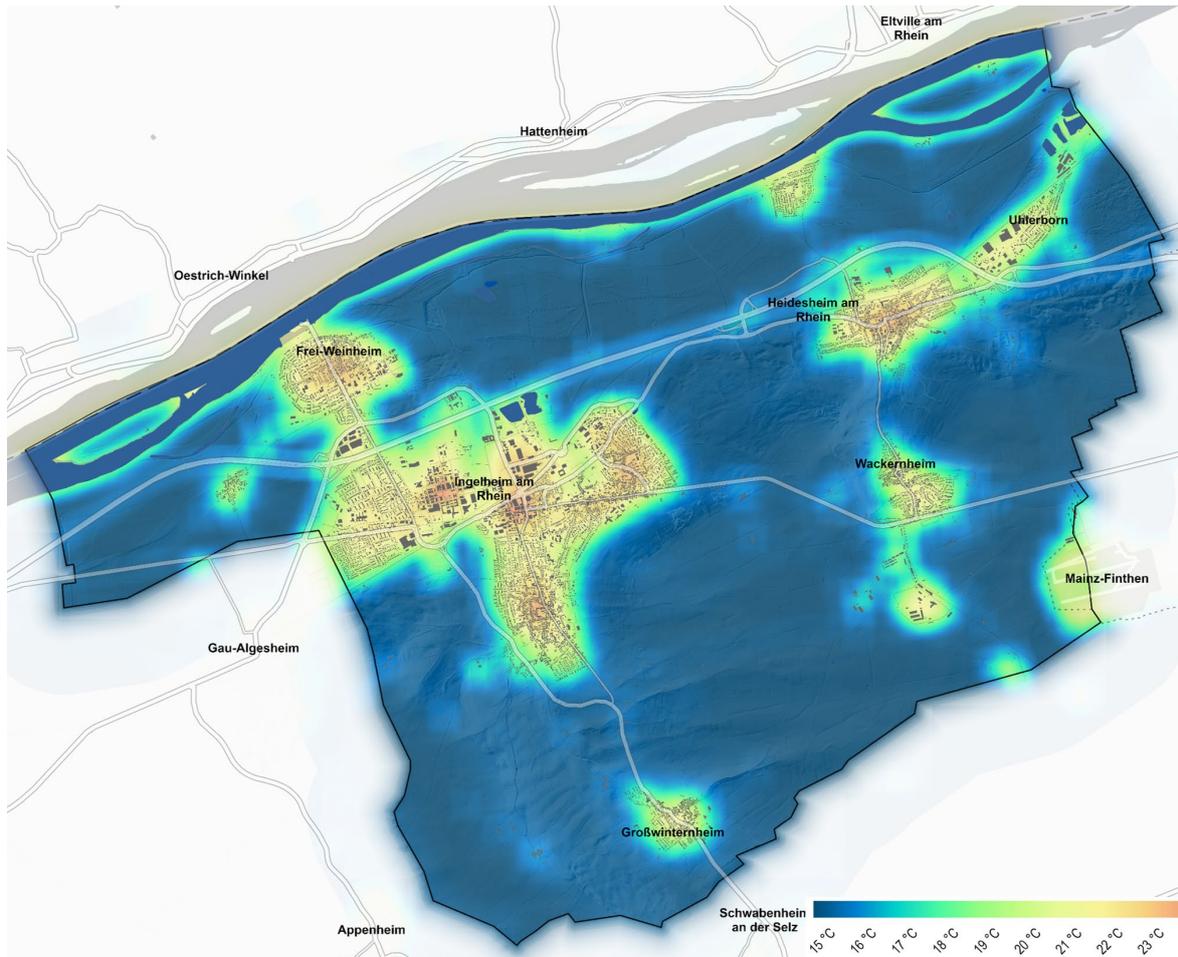


Abbildung 44: Übersicht Themenkarte "Bodennahe Lufttemperatur in °C (nachts)". Der Detailraum sowie die beiden „Gewerbe- und Industriegebiete“ stellen die großflächigsten Areale mit den höchsten Lufttemperaturen von $\geq 23^{\circ}\text{C}$ im städtischen Raum dar.

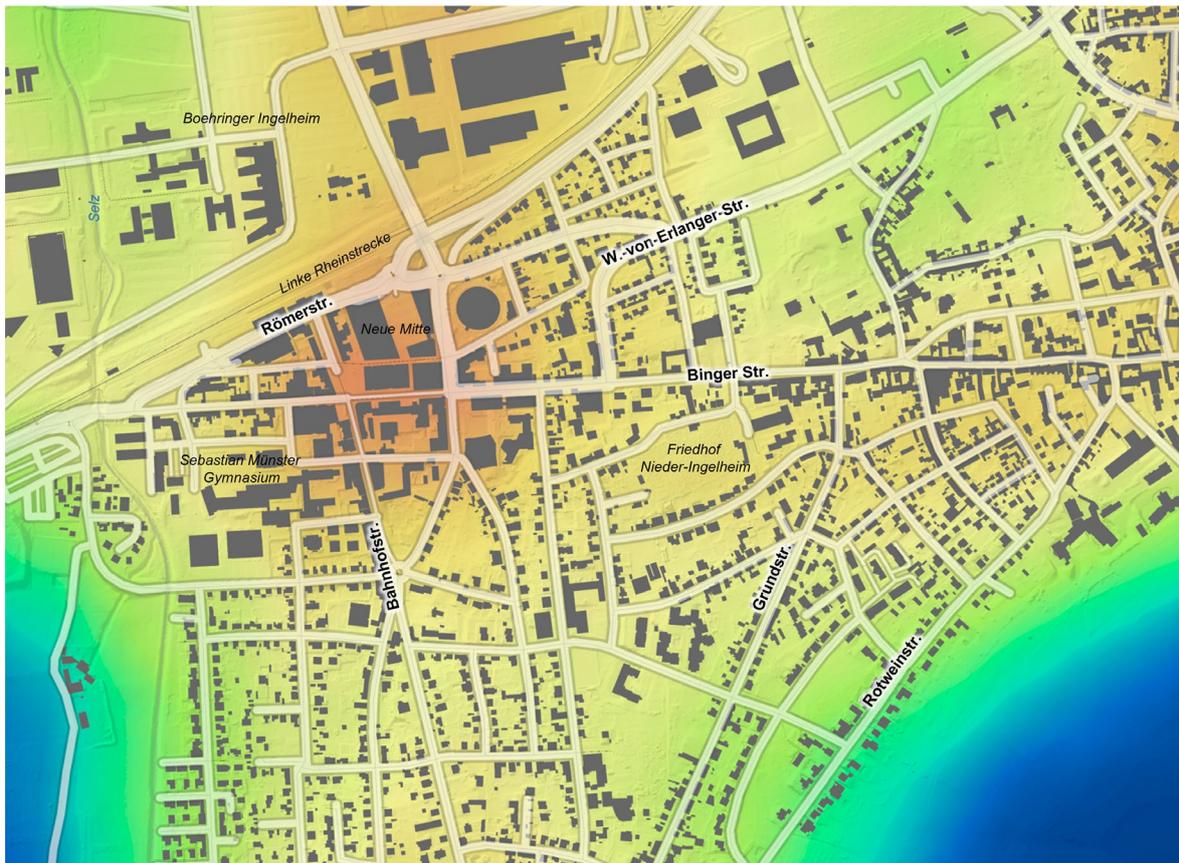


Abbildung 45: Detailansicht Themenkarte "Bodennahe Lufttemperatur in °C (nachts)" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Der innerstädtisch verdichte Raum im Zentrum stellt den Temperatur-Hotspot mit gut 23 °C dar.

7 Klimatischer Bestand und Vergleich

7.1 Klimafunktionskarte (KFK)

Die Klimafunktionskarte stellt eine in Klimatope (siehe Tabelle 12 und Abbildung 46) - Fläche mit einheitlichen geländeklimatischen Eigenschaften - unterteilte Ansicht des Untersuchungs- und Stadtraums von Ingelheim am Rhein dar. Zusätzlich enthält die Karte Informationen zur Ausrichtung und Stärke des bodennahen nächtlichen Strömungsfelds, starken Kaltluftabflüssen sowie zentralen Durchlüftungsachsen. Die Klimatope werden hierbei flächig-farbig dargestellt, Kaltluftentstehungsflächen mit starkem Abfluss durch Punkte und das Strömungsfeld bzw. Durchlüftungsachsen durch unterschiedliche Pfeile symbolisiert.

Der unbebaute Außenraum zeichnet sich durch das „**Freilandklimatop (Kaltluftentstehung)**“ und das „**Waldklimatop (Frischluffentstehung)**“ aus. Das „Freilandklimatop“ beschreibt hoch aktive, vor allem kaltluftproduzierende Flächen im Außenbereich, die durch niedrigen Bewuchs und eine somit geringe Oberflächenrauigkeit geprägt sind. Diese vornehmlich aus Grünland, landwirtschaftlichen Flächen oder Brachen bestehenden Flächen zählen zu den Gunstklimaten mit einer hohen nächtlichen Abkühlungsrate. Das „Waldklimatop“ zeichnet sich hingegen durch Flächen ohne bzw. nahezu ohne Emissionsquellen aus. Sie werden durch einen regulär dichten Baumbestand gekennzeichnet, mit dem eine gleichermaßen hohe (Luftschadstoff)Filterwirkung einhergeht. Entsprechend dieser Charakteristika wird ein Großteil des agrarwirtschaftlich geprägten Untersuchungsraums durch das „Freilandklimatop“ dominiert. Flächen des „Waldklimatops“ sind sporadisch im Außenraum des Stadtgebiets verteilt und liegen insbesondere im Westen der „Landesstraße 428“, am südlichen Rheinufer und im Osten des Stadtteils

Uhlerborns. Die auf diesen Flächen entstehende Kalt- und Frischluft wird durch das bodennahe nächtliche Strömungsfeld und die zentralen Durchlüftungsachsen im Untersuchungsraum verteilt und mitunter bis in den Siedlungsraum weitergeleitet. Gebiete, die den Siedlungsraum aufgrund ihrer siedlungsnahen Kaltluftproduktion in Kombination mit erhöhten bodennahen Windgeschwindigkeiten direkt oder indirekt beeinflussen, grenzen primär südöstlich an den urbanen Raum an. Ein erheblich großer Teil der Freiflächen im Westen des Untersuchungsraums weist diese Charakteristika ebenfalls auf, was mitunter auf die Ausrichtung und Windgeschwindigkeit des bodennahen nächtlichen Strömungsfeldes zurückzuführen ist. Der nächtliche Wind strömt vorwiegend aus südöstlicher (partiell auch aus südwestlicher) Richtung kommend in den Untersuchungsraum hinein und gewinnt im freien Raum zunehmend an Geschwindigkeit. Die Luft wird südlich der „Autobahn 60“ mit Windgeschwindigkeiten von ca. 1,25 m/s bis > 1,5 m/s an den Siedlungsraum herangetragen und dort stark abgebremst; abhängig von der Offenheit des bebauten Raums strömt die Luft mit langsamen Windgeschwindigkeiten von ca. 1,2 m/s bis 0,25 m/s entlang spezifischer Durchlüftungsachsen in den urbanen Raum hinein. Der bebaute Raum sowie die „Autobahn 60“ nehmen hinsichtlich der Windgeschwindigkeit des bodennahen nächtlichen Strömungsfeldes eine Barrierewirkung ein. Das zwischen Ingelheim und Heidesheim hindurchführende Strömungsfeld (1,25 m/s bis > 1,5 m/s) wird nördlich der Autobahn auf Windgeschwindigkeiten von ca. 0,1 m/s – 0,5 m/s reduziert und fließt weiter in Richtung Rhein bzw. nach Frei-Weinheim.

Der Übergang zwischen dem unbebauten Außenraum und dem bebauten urbanen Raum wird

durch das Klimatop „**Misch- und Übergangsklima**“ gekennzeichnet. Hierbei handelt es sich um vegetationsgeprägte Gebiete ausreichender Größe um ein lokales klimatisches Ausgleichspotential zu generieren. Diese Flächen besitzen eine hohe klimaökologische Wertigkeit als Puffer- und Ausgleichsflächen in Nachbarschaft zu klimatisch belasteten Gebieten. Auf diesen Flächen findet eine ausreichende lokale Belüftung und Evapotranspiration statt, wodurch sie insbesondere in den Sommermonaten eine wichtige klimatisch regulierende Funktion übernehmen. Als solches ist das Klimatop in Form von öffentlichen Grün- und Freiflächen in den freien Zwischenräumen des bebauten Raums vorhanden, die in Ingelheim stärker vertreten sind als in den umliegenden Gemeindeteilen. Dem bebauten Raum sind drei Klimatope zugehörig: Das „Vorstadtklima“, „Stadtklima“ und „Innenstadtklima“. Das „**Vorstadtklima**“ bezeichnet baulich geprägte Gebiete mit versiegelten Flächen, aber dennoch viel Vegetation in den Freiräumen und moderatem nächtlichen Abkühlungspotential. Die Belüftung kann hier durch die Bebauung eingeschränkt sein. Das „**Stadtklima**“ bildet sich in verdichteten Gebieten mit großen Baumassen, in denen die Freiräume entweder vegetationsfrei oder stark versiegelt sind. Das Überwärmungsrisiko ist in diesen Räumen erstmals erhöht. Durch ein hohes Überwärmungsrisiko ist dagegen das Klimatop „**Innenstadtklima**“ gekennzeichnet, welches für stark verdichtete Gebiete charakteristisch ist, die durch ein starkes Vegetationsdefizit und nur geringe Retentionseigenschaften geprägt sind. Auch eine eingeschränkte Belüftung kann in Kombination mit den regulär großen Baumassen zu dem hier erhöhten Überwärmungsrisiko beitragen. Die Ausprägung der betreffenden Klimatope hängt direkt

mit der Siedlungsstruktur des Untersuchungsraums zusammen: Gewerbe- und Industriegebiete zeichnen sich generell durch große Baumassen und stark versiegelte Flächen aus, weshalb sie auch im Untersuchungsraum ausnahmslos von einem erhöhten bis hohen Überwärmungsrisiko betroffen sind. Beispielhaft ist hierfür das nördlich der Bahngleise gelegene Gewerbe- und Industriegebiet „Boehringer Ingelheim“ Ingelheims, welches aufgrund seiner städtebaulichen Gestaltung einem großflächigen Überwärmungsrisiko ausgesetzt ist. Die meisten Wohngebiete sind demgegenüber lockerer gestaltet und weniger stark versiegelt; sie entsprechen regulär dem Klimatop „Vorstadtklima“ oder in zentralen Lagen dem „Stadtklima“.

Tabelle 12: Übersicht zu den unterschiedlichen Klimatopen mit ihren grundsätzlichen Charakteristika

KLIMATOP OHNE BEBAUUNG	KLIMATOPE MIT BEBAUUNG
Primäre Kaltluftentstehungsgebiete Freilandklima <ul style="list-style-type: none"> • Hoch aktive, vor allem kaltluftproduzierende Flächen im Außenbereich • Größtenteils mit geringer Rauigkeit und entsprechender Hangneigung 	Überwärmungspotential Vorstadtklima <ul style="list-style-type: none"> • Baulich geprägt mit Versiegelung • Viel Vegetation in den Freiräumen • Ausreichende Belüftung
Primäre Frischluftentstehungsgebiete Waldklima <ul style="list-style-type: none"> • Ohne Emissionsquellen • Dichter Baumbestand und hohe Filterwirkung 	Moderate Überwärmung Stadtklima <ul style="list-style-type: none"> • Dichte Bebauung mit hoher Versiegelung • Wenig Vegetation in den Freiräumen • Belüftungsdefizite
Misch- und Übergangsklimate Klima innerstädtischer Grünflächen <ul style="list-style-type: none"> • Hoher Vegetationsanteil • Geringe diskontinuierliche Emissionen • Pufferbereiche zwischen Klimatopen 	Starke Überwärmung Innenstadtklima <ul style="list-style-type: none"> • Stark verdichtete Innenstadtbereiche • Industrie- und Gewerbeflächen mit wenig Vegetation • Fehlende Belüftung

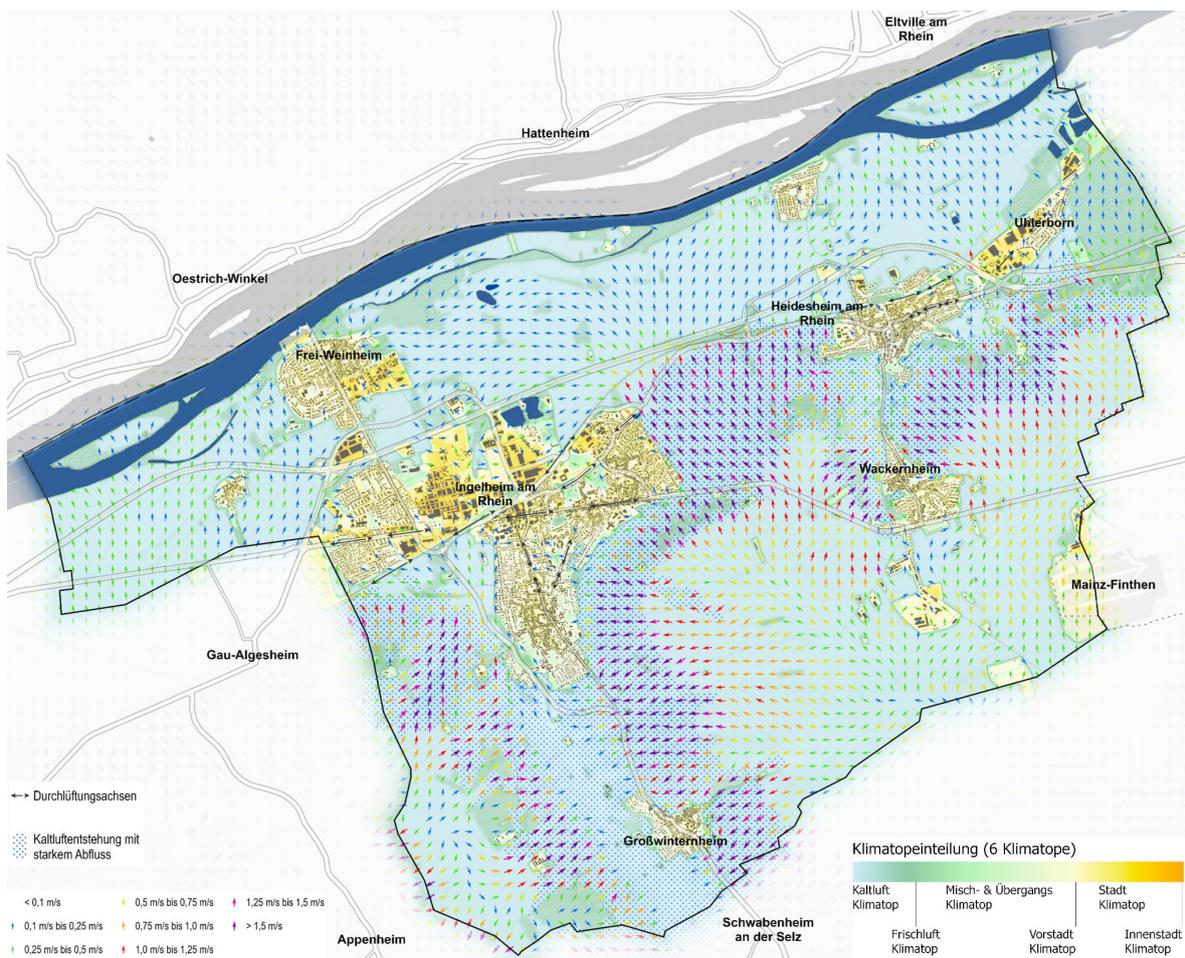


Abbildung 46: Übersicht Klimafunktionskarte (KFK). Der Untersuchungsraum wird hierbei in sechs unterschiedliche Klimatope unterteilt, deren Übergänge aber fließend sind. Drei Klimatope beschreiben den unbebauten Raum, während die übrigen drei Klimatope den bebauten Raum beschreiben.

Der Detailraum (siehe Abbildung 47) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Ingelheimer Innenstadtbereichs, der im Norden einen Teil des Industriegebiets („Boehringer Ingelheim“) zeigt, im Osten über die „Rotweinstraße“ hinausreicht, im Süden an die „Tanusstraße“ und im Westen an die „Selz“ grenzt. Der urbane Raum wird punktuell durch Grün- bzw. Freiflächen wie z.B. den „Friedhof Nieder-Ingelheim“ durchsetzt (Klimatop „Misch- und Übergangsklimat“), während sich der unbebaute Außenraum durch das für die Kaltluftproduktion zuständige „Freilandklimatop“ kennzeichnet. Einige der zentralen Straßenzüge des Detailausschnitts nehmen die Funktion von Durchlüftungsachsen ein. Hierbei handelt es sich um Achsen und Korridore im bebauten Raum, die eine ausreichende Dimensionierung und Offenheit besitzen, um regionale und lokale Anströmungen am Tag aufzunehmen und durch

den Siedlungsraum zu leiten. Dazu zählen die „Binger Straße“, die „Bahnhofstraße“, die „Grund-“ und „W.-von-Erlanger-Straße“ sowie die „Linke Rheinstrecke“ (Bahntrasse), deren Gleise die Innenstadt vom nördlichen Industriegebiet abgrenzen. Dieses ist auf seinen bebauten Flächen ähnlich wie die „Neue Mitte“ im Innenstadtbereich einem erhöhten bis hohen Überwärmungsrisiko ausgesetzt. Auch die verdichteten Räume der Innenstadt sowie die Bebauung an der „Binger Straße“ sind dem Klimatop „Stadtklima“ zugehörig und somit von einem erhöhten Überwärmungsrisiko betroffen. Der weitere Detailraum ist in seiner baulichen Struktur aufgelockerter und weist besonders in stadtrandnahen Lagen als Klimatop „Vorstadtklima“ ein moderates nächtliches Abkühlungspotenzial auf.



Abbildung 47: Detailansicht der Klimafunktionskarte - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Wichtige Durchlüftungsachsen werden mit schwarzen Pfeilen dargestellt, die kleineren Vektorpfeile symbolisieren das mittlere nächtliche Strömungsfeld. Die zusätzliche Punktierung des Kaltluftklimatops im südöstlichen Bereich kennzeichnet einen besonders starken Kaltluftabfluss.

7.2 Vergleich der klimatischen Simulationen

Im Rahmen des Projekts KlimPraxIng war ursprünglich ein direkter Vergleich der beiden, voneinander unabhängigen, Stadtklimasimulationen für die Stadt Ingelheim am Rhein vorgesehen. Dabei handelt es sich um die Ergebnisse einer hybriden Stadtklimaanalyse (SKA) auf Basis eines modernen Geoinformationssystem (umgesetzt durch das Ingenieurbüro Burghardt und Partner, Ingenieure), sowie um eine numerische Simulation der stadtklimatischen Zusammenhänge, die durch den DWD (Deutscher Wetterdienst) erstellt wurde.

Die Idee war, zu überprüfen, inwieweit die Ergebnisse der unterschiedlichen Simulationen deckungsgleiche bzw. vergleichbare Ergebnisse im Kontext der Identifizierung und Bewertung des städtischen Wärmeinseleffekt inklusive der nächtlichen Kaltluftentstehung und Kaltluftbewegungen liefern würden.

Seitens des DWD wurde für die Simulation der Kaltluft- und der Temperaturverhältnisse das Programm MUKLIMO_3 (Software des DWD) verwandt (Ansatz 1).

Ansatz 2 berechnet die bodennahe nächtliche Lufttemperatur (04:00 Uhr) ganzheitlich über einen GIS-gestützten hybriden Ansatz. Dabei wurde die integrierte Kaltluftanalyse mit dem numerischen Simulationsprogramm KLAM_21 (entwickelt vom DWD) durchgeführt und als zusätzliche Informationsebene integriert.

Nachdem die jeweiligen Untersuchungsräume beider Ansätze simuliert und die Ergebnisse miteinander verglichen wurden, zeigte sich, dass ein direkter quantitativer Vergleich der Ergebnisse fachlich nicht belastbar, und somit aus planerischer Sicht auch nicht als sinnvoll erachtet werden kann.

Hierfür sind primär zwei Aspekte ausschlaggebend,

1. die Verwendung unterschiedlicher Eingangsdaten und Rahmenparameter für die Simulationen, sowie
2. die unterschiedlichen Auflösungen mit denen die Simulationen durchgeführt wurden.

Die größte Divergenz zwischen den beiden Ansätzen in Bezug auf die Eingangsdaten, abgesehen von der Aktualität, ist die flächendeckende Einbeziehung des tatsächlichen Vegetationsbestands (öffentliches und privates Grün) mit einer Auflösung von 20cm bei der GIS-gestützten Simulation der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur.

Hinsichtlich der Auflösung der Ergebnisse beider Ansätze ist die MUKLIMO_3-Simulation mit 100m deutlich niedriger aufgelöst als zusammengekommen die Ergebnisse der SKA Ingelheim mit einer Auflösung von 5m.

Eingangsdaten

Für die Simulation mit MUKLIMO_3 (Ansatz 1):

- Copernicus Urban Atlas 2012 (-> Landbedeckungs- und Landnutzungsdaten, kleinste Kartierungseinheiten im städtischen Gebiet 0,25ha und im ländlichen Gebiet 1ha, kleinste Kartierungsbreite 10m, liegt nicht flächendeckend vor)
- Copernicus Corine Land Cover 2012 (-> Landbedeckungs- und Landnutzungsdaten, Satelliten-Daten: IRS P6 LISS III und RapidEye, kleinste Kartierungseinheiten 25ha, kleinste Kartierungsbreite 100m, liegt flächendeckend für Deutschland bzw. Europa vor)
- Copernicus EU-DEM v1.1 (-> EU Digital Elevation Model, Auflösung 25m, Höhengenaugigkeit +/- 7m)
- Copernicus tree cover und imperviousness 2012 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
- 3D Gebäude Daten (LoD1, 2019) für Gebäudegrundfläche, Gebäudehöhe und Wandflächenindex.

Für die Simulation der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur (Ansatz 2):

- Baulich-Räumliche Offenheit des Stadtgebiets (SkyView Faktor)
 - beinhaltet die Bebauung, die Topographie, eine Konstante für die nächtlichen Strömungsverhältnisse
- Tatsächlicher Vegetationsbestand (auf Basis der Auswertung von Nah-Infrarot- Orthophotos (DOP) mit einer Auflösung von 20cm)

Für die Kaltluftanalyse (Kaltluftschichtdicken und bodennahes nächtliches Windfeld) mit KLAM_21 (Ansatz 2):

Landbedeckung und Landnutzung

- Copernicus Urban Atlas 2018 (kleinste Kartierungseinheiten im städtischen Gebiet 0,25ha und im ländlichen Gebiet 1ha, kleinste Kartierungsbreite 10m, enthält den Street Tree Layer (STL), liegt nicht flächendeckend vor)
- Copernicus Corine Land Cover 2018 (-> Landbedeckungs- und Landnutzungsdaten, Satelliten-Daten: Sentinel-2 and Landsat-8 for gap filling, kleinste Kartierungseinheiten 25ha, kleinste Kartierungsbreite 100m, liegt flächendeckend für Deutschland bzw. Europa vor)

Topographie

- DGM1 (Digitales Geländemodell 1m Auflösung, +/- 10cm +5%-20% Gitterweite)

Bebauung

- LoD1 3D-Gebäudedaten (Lagegenauigkeit entspricht der Lagegenauigkeit des Liegenschaftskatasters)

Auflösung

Die Simulation mit MUKLIMO_3 wurde mit einer Auflösung von 100m durchgeführt, während die KLAM_21 Simulation mit 5m Auflösung gerechnet wurde.

Für den GIS-gestützten Ansatz der bodennahen nächtlich Lufttemperatur wurden die Einzelparameter Vegetationsbedeckung mit 0,5m, die räumliche bauliche Offenheit (SkyView Faktor) mit 1,0m berechnet. Die räumliche Auflösung des finalen Datensatzes zur berechneten bodennahen Lufttemperatur beträgt 5,0m.

Obleich sich ein direkter Vergleich der beiden Ansätze aus den oben genannten Gründen ausschließt, kann dennoch ein relativer Vergleich der Ergebnisse erfolgen.

Hierfür wurden beide Ergebnisdatensätze normalisiert (siehe Abbildung 48).

Normalisierter Vergleich der Berechnungsergebnisse zwischen Muklimo3 und dem hybriden GIS-Ansatz

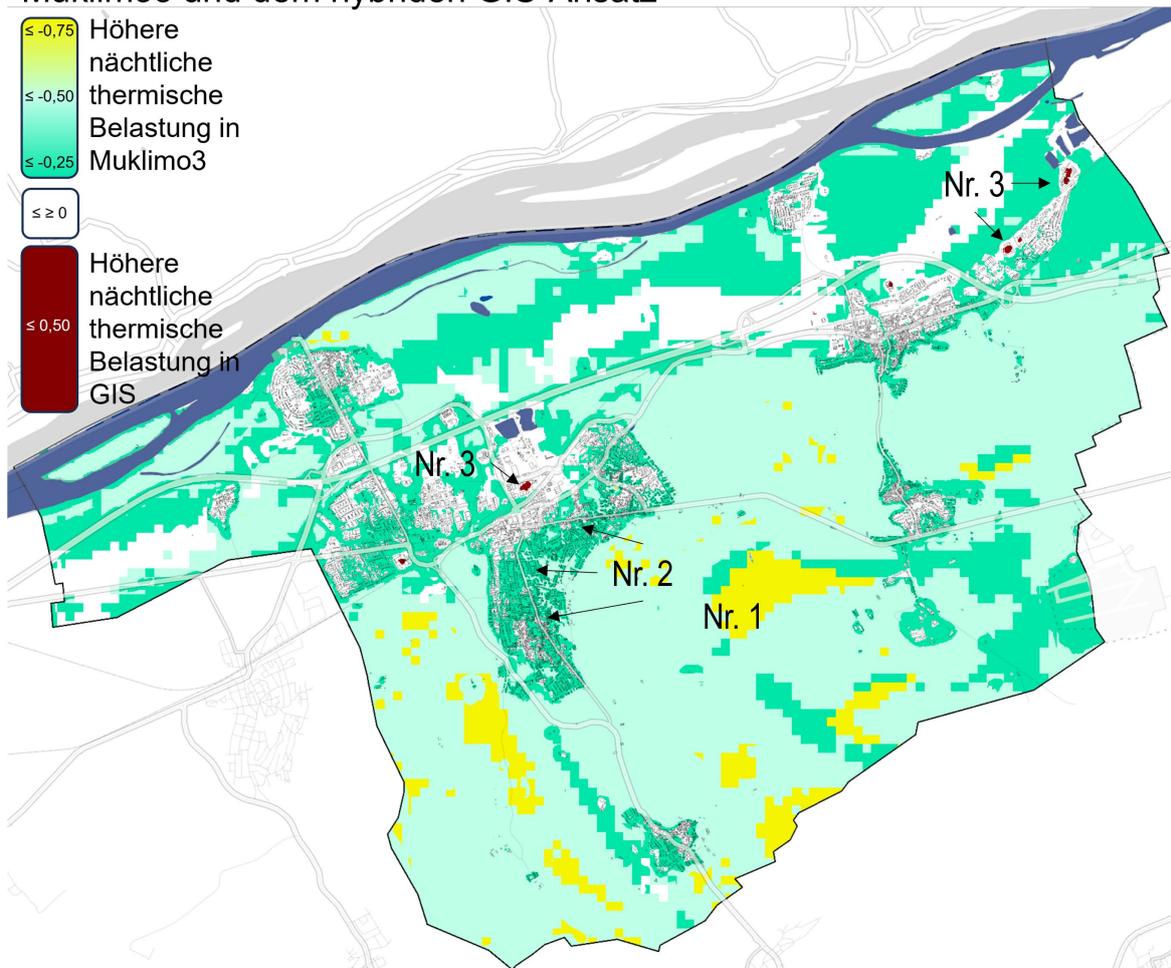


Abbildung 48: Darstellung der normalisierter Ergebnisdatensätze beider Ansätze im Vergleich.

Im Vergleich der normalisierten Werte wird deutlich, dass die Ergebnisse beider Ansätze miteinander korrespondieren bzw. sich ergänzen, aber dabei die, bereits oben genannten, individuellen Charakteristika der Simulationsparameter aufweisen.

So stellt Muklimo3 beispielsweise die thermische Belastung der Offenlandbereiche heterogener bzw. individueller dar als der hybride GIS-Ansatz (siehe Abbildung 48 – Nr.1), bei dem im „thermisch unbelasteten“ Offenland eine homogene Auskühlung angenommen wird.

Gut durchgrünte Siedlungsräume sowie Siedlungsbereiche mit einer hohen Baumassenvolumendichte werden im GIS-Ansatz individueller dargestellt bzw. aufgelöst (siehe Abbildung 48 – Nr. 2 und Nr. 3).

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass beide Ansätze auf ihren jeweiligen Bezugsebenen adäquate und validierte Instrumente zur Darstellung klimatischer Aspekte darstellen

Es hat sich gezeigt, dass unter Berücksichtigung der verwendeten räumlichen Auflösung und der damit verknüpften räumlichen Planungsebenen die Ergebnisse beider unterschiedlichen Analysen kohärent sind.

Im Rahmen von Stadtklimaanalysen, bei denen die Aussagen der Hauptplanwerke Klimafunktionskarte bzw. Klimaanalysekarte und Planungshinweiskarte (KFK und PHK) sich typischerweise auf eine Auflösung von 10m beziehen, sollten keine niedrigeren Auflösungen verwandt werden.

8 Planung und Analysen

8.1 Planungshinweiskarte (PHK)

Die Planungshinweiskarte (siehe Abbildung 49) stellt die Bewertung der vorangegangenen klimatischen Analyse in einer für die Planung verständlichen, konzeptuellen Übersicht über den Untersuchungsraum dar. Sie gibt Auskunft über die grobe Landnutzung des Raums, die mit klimatischen Informationen zu Räumen mit klimatischer Funktion, klimatisch defizitären Räumen mit Handlungsbedarf und zum bodennahen nächtlichen Strömungsfeld ergänzt werden.

Ein Großteil des unbebauten Außenbereichs ist Offenland, welches primär für die Kaltluftproduktion zuständig ist. Diese Flächen nehmen mitunter zwei besondere klimatische Funktionen ein: Die „besondere Kaltluftfunktion“ und der „dominante Kaltluftabfluss“. „Freiräume mit besonderer Kaltluftfunktion“ dienen vorrangig der kanalisierten nächtlichen Kaltluftversorgung, da sie die Sammelkorridore der über die Orographie abfließenden Kaltluft aus den Offenlandbereichen darstellen. Die städtebauliche Entwicklung in diesen Bereichen ist aus klimatischer Sicht bedingt möglich. Es ist darauf zu achten, dass keine dichte flächenhafte Bebauung stattfindet. Bau- und Entwicklungsvorhaben bedürfen in diesen Bereichen einer klimatischen Stellungnahme mit Planungsempfehlungen. Als ein solcher Raum wird die Freiraumachse entlang der „Landesstraße 428“ identifiziert. Sie zieht sich von Süden nach Norden an Großwinternheim vorbei und schließt an den südlichen Teil des bebauten Raums von Ingelheim an. Ihren Charakteristika entsprechend mündet das bodennahe nächtliche Strömungsfeld auf Richtung Osten und Westen in dieser Achse, wodurch sie ihre

besondere klimatische Funktion für den Siedlungsraum erhält.

„Freiräume mit dominantem Kaltluftabfluss“ stellen wichtige Initial- und direkte Abflussräume für nächtlich entstehende Kaltluft dar. Diese gilt es großflächig zu erhalten. Eine Bebauung in diesen Räumen sollte aus klimatischer Sicht vermieden werden. Bei Vorhaben und Planungen sind klimatische Stellungnahmen mit Planungsempfehlungen oder Gutachten notwendig. Hier von gibt es vier Areale im Untersuchungsraum; zwei grenzen westlich und östlich unmittelbar an die Freiraumachse mit besonderer Kaltluftfunktion und zu Teilen an den südöstlichen Ingelheimer Siedlungsraum an. Eine weitere solche Achse liegt im Osten Großwinternheims und einer der größten Freiräume mit dominantem Kaltluftabfluss befindet sich auf den Hangflächen südöstlich von Heidesheim. Dieses Areal grenzt unmittelbar an den bebauten Raum Heidesheims und Wackernheims an und weist ebenso wie die anderen „Freiräume mit dominantem Kaltluftabfluss“ durchschnittlich schnelle Windgeschwindigkeiten (ca. 1,25 m/s - 1,5 m/s) auf, die in Richtung des Siedlungsraums ausgerichtet sind.

Dort, wo die Freiräume besonderer klimatischer Funktionen an den Siedlungsraum grenzen (regulär die südliche / südöstliche Randbebauung), nimmt dieser eine besondere Kaltluftfunktion ein. Die „Siedlungsräume mit besonderer Kaltluftfunktion“ besitzen aufgrund ihrer Lage eine wichtige und unterstützende Rolle in der nächtlichen Kaltluftversorgung des umgebenden Siedlungsraums. Im Kontext der Siedlungsentwicklung sind dies „planerisch sensible“ Bereiche. In Abhängigkeit der bereits bestehenden baulichen Strukturen sollte die Durchgrünung sukzessiv

gefördert werden und auf eine zusätzliche bauliche Nachverdichtung in bereits verdichteten Bereichen verzichtet werden. Eine zum Siedlungsrand hin lockere Bebauung ist zu forcieren. Vorhaben sollten daher zunächst eine klimatische Prüfung durchlaufen.

Innerhalb des bebauten Raums befinden sich verschiedene Räume, die aufgrund defizitärer Merkmale regulierender Eingriffe bedürfen. Hierbei handelt es sich um „Räume mit defizitärer Vegetationsausstattung“, „Räume erhöhter baulicher Dichte“ und „Räume mit den stärksten Überwärmungspotentialen“. In Kontrast zu diesen negativ belasteten Stadträumen sind über den Siedlungsraum „Friedhöfe und städtische Grünanlagen mit besonderer Klimafunktion“ verteilt, welche im urbanen Kontext klimatisch wertvolle und zu schützende Ausgleichsräume darstellen. In Heidesheim folgt eine solche Grünachse dem Bach „Wildgraben“, welcher aus dem Umland in den Siedlungsraum hineinführt und diesen mitunter mit dem dortigen Friedhof verbindet; in Frei-Weinheim und Ingelheim sind diese Räume in unterschiedlich flächiger Ausprägung im Stadtraum vertreten. In Ingelheim zählen der „Friedhof Ober-Ingelheim“ am südöstlichen Stadtrand und der „Friedhof Mitte“ zu den größten Ausgleichsräumen; in Frei-Weinheim übernimmt der dortige Hauptfriedhof diese Funktion.

Hinsichtlich der klimatisch defizitären Stadträume werden insbesondere durch die Überlagerung mehrerer Problemräume die städtischen Areale mit dem größten klimatischen Handlungsbedarf identifiziert. „Räume erhöhter baulicher Dichte“ sind im Siedlungskontext meist an

den zentralen Verkehrsachsen gelegen (z.B. Heidesheim „Binger Straße“; Frei-Weinheim „Rheinstraße“). In Ingelheim ballen sie sich insbesondere im Siedlungsraum um die „Bahnhofstraße“; „Mainzer Straße“, „untere Stiftstraße“ sowie in der Innenstadt und dem nahegelegenen Industriegebiet. In diesen Siedlungsräumen sollten eine zunehmende Verdichtung reduziert werden und gleichzeitig klimaangepasste Entwürfe und Planungen verstärkt vorangetrieben werden. Der urbane Raum kann ebenfalls negativ durch seine defizitäre Vegetationsausstattung herausstechen, was insbesondere in Uhlerborn, dem Zentrum Heidesheims, dem östlichen Raum Frei-Weinheims und dem Industrieareal sowie der Innenstadt Ingelheims der Fall ist. Diese Siedlungsräume stellen potentielle Aufwertungsräume durch zusätzliche Vegetations-einbringungen (z.B. Entsiegelungen oder Straßenbäume) dar und sind vorrangig in Kombination mit einer erhöhten baulichen Dichte für die Überwärmung des urbanen Raums verantwortlich. Die „Räume mit den stärksten Überwärmungspotentialen“ stellen wichtige Handlungsräume für die sukzessive städtische und lokale Klimaanpassung dar. Entsprechend ihrer klimatischen Sensibilität und ihrem klimatisch defizitären Charakter muss die Entwicklung dieser Areale aus klimatischer Sicht besonders sorgfältig vorangetrieben werden. Dies schließt die Ortsmitte Heidesheims, Frei-Weinheims und Ingelheims genauso ein wie die Stadtquartiere am „Marktplatz“ (südlicher Teil Ingelheims) und an der „unteren Stiftstraße“ (östlicher Teil Ingelheims).

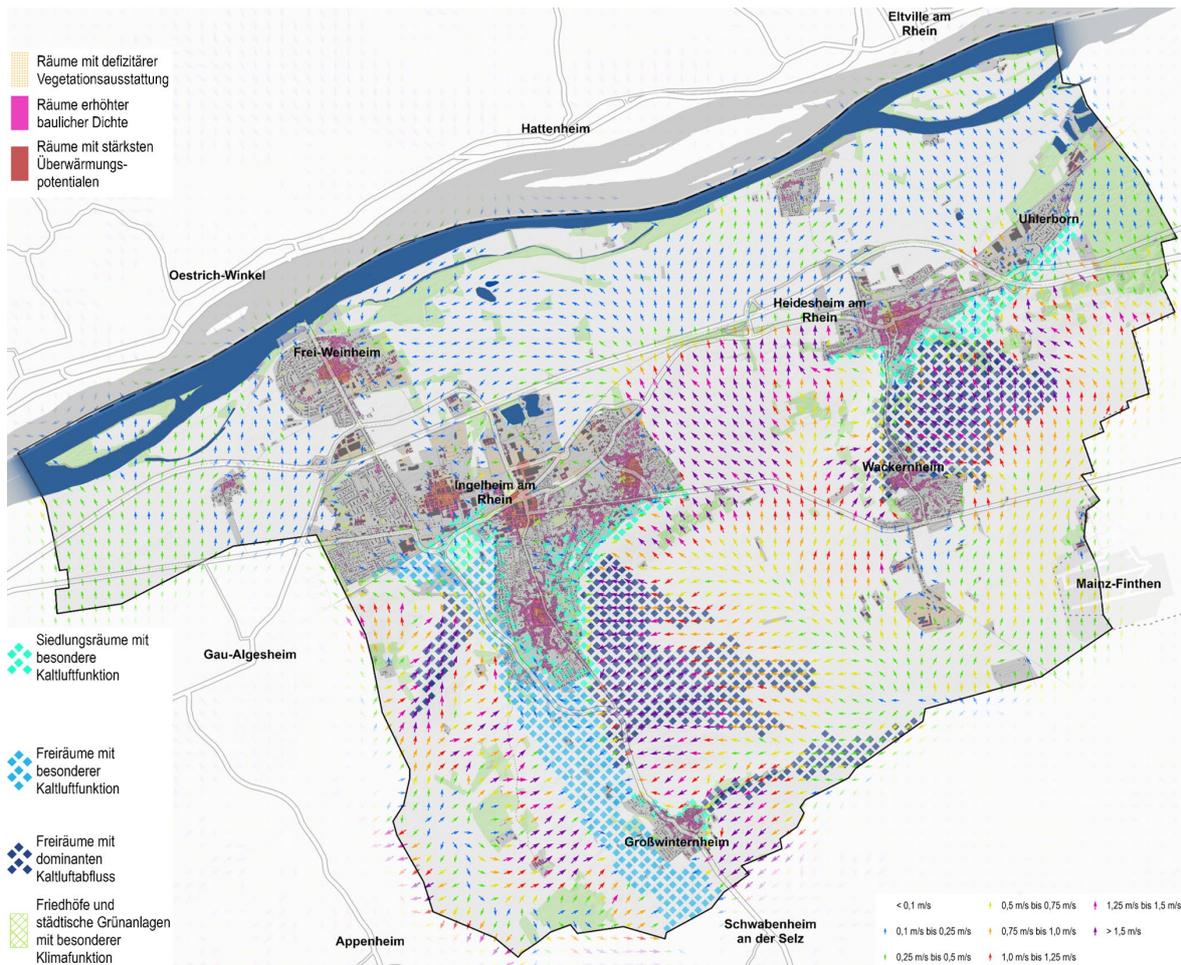


Abbildung 49: Übersicht Planungshinweiskarte (PHK). Zusätzlich zur Landnutzung und dem mittleren nächtlichen Strömungsfeld werden Räume mit klimatischer Funktion (speziell Kaltluft) sowie klimatisch defizitäre Räume mit Handlungsbedarf dargestellt.

Der Detailraum (siehe Abbildung 50) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Ingelheimer Innenstadtbereichs, der im Norden einen Teil des Industriegebiets („Boehringer Ingelheim“) zeigt, im Osten über die „Rotweinstraße“ hinausreicht, im Süden an die „Tanusstraße“ und im Westen an die „Selz“ grenzt. Hier wird die Überlagerung der drei klimatisch defizitären Charakteristika (Vegetationsdefizit, hohe bauliche Dichte, Überwärmung) im Bereich der Stadtmitte besonders prägnant hervorgehoben. Vom Ingelheimer Bahnhof über das Einkaufszentrum an der „Binger Straße“ und die „Friedrich-Ebert-Straße“ bis hin zum „Lavendelkreisel“ entsteht so ein Areal, in dem aus klimatischer Sicht ein dringender

Handlungsbedarf herrscht. Das Industriegebiet im Norden des Fokusraums profitiert insbesondere durch die Einbringung zusätzlicher Vegetationsstrukturen, während klimaangepasste Entwürfe und Planungen in den verdichteten Räumen entlang der „Binger-“ bzw. „Mainzer Straße“ einzubringen sind. Die Siedlungsränder übernehmen primär besondere Kaltluftfunktionen und sind daher planerisch sensible Bereiche, in denen die Durchgrünung gefördert und die bauliche Nachverdichtung minimiert werden sollte. Eine weitere Ausdehnung des Siedlungsraums sollte eine lockere Bebauung priorisieren und vorher eine klimatische Prüfung durchlaufen.

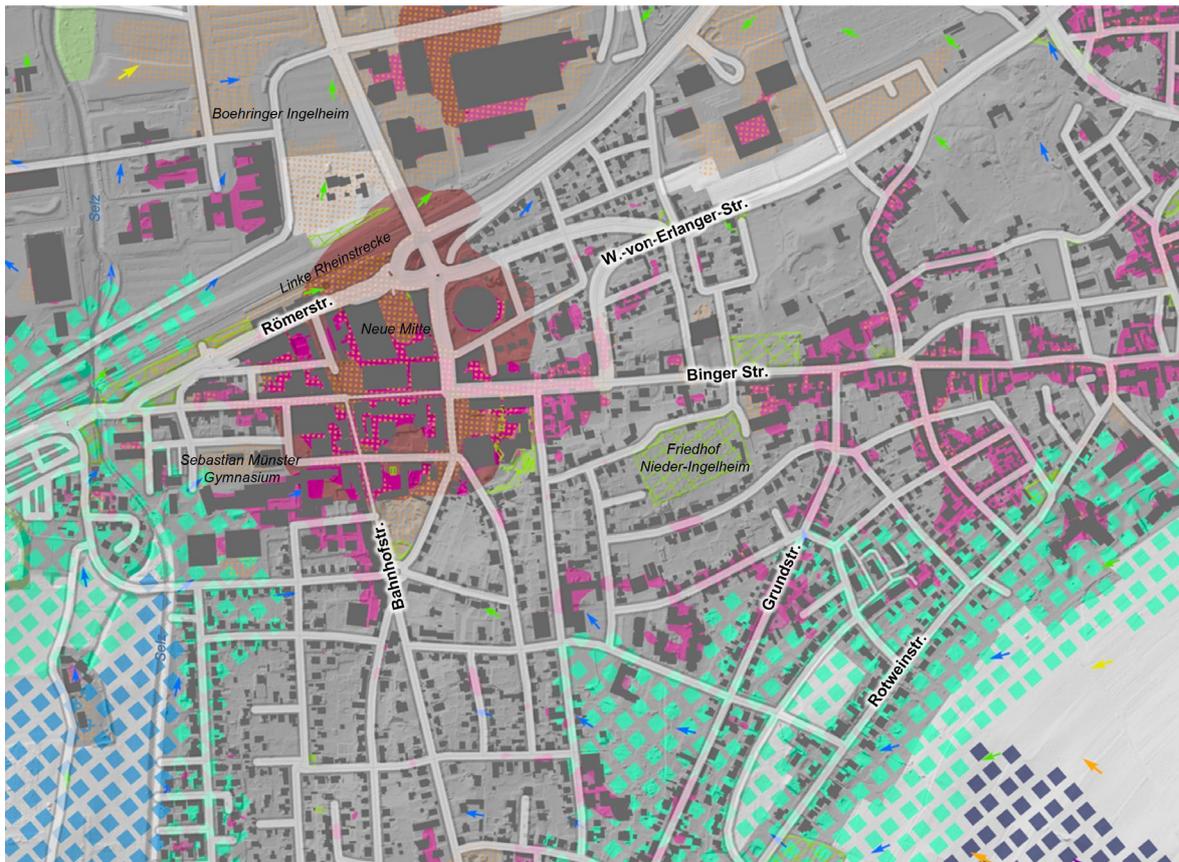


Abbildung 50: Detailsansicht der Planungshinweiskarte - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Das Rautenmuster markiert Räume mit besonderer Kaltluftfunktion im Siedlungsraum (türkis) bzw. Freiraum (hellblau) sowie einem dominanten Kaltluftabfluss (dunkelblau). Klimatisch defizitäre Räume mit Handlungsbedarf sind ebenfalls markiert: Defizitäre Vegetationsausstattung (orange gepunktet), Räume mit erhöhter baulicher Dichte (rosa) und Räume mit stärksten Überwärmungspotential (braun).

8.2 Handlungshinweise und Maßnahmenbeispiele

Die Maßnahmenhinweiskarte (siehe Abbildung 51) identifiziert Räume mit besonderem Handlungsbedarf bzw. besonderer klimatischer Funktionalität und Schutz- bzw. Entwicklungspotential.

Da eine individuelle und kleinteilige Betrachtung (auf einem mikroskaligen Maßstab) im Rahmen einer umgreifenden Stadtklimaanalyse nicht möglich ist, werden die identifizierten Räume entsprechenden Maßnahmengruppen zugeordnet.

Diese Maßnahmengruppen gliedern sich in:

- Durchlüftungsräume (DR)
- Vegetationsanteil (VA)
- Kaltlufträume (KR)
- Thermischer Belastungsraum (TBR)

Jeder Maßnahmengruppe (siehe Tabelle 13) können potentielle (praktische) Umsetzungsbeispiele zugeordnet werden, die entsprechend der räumlichen Priorisierung einen positiven Beitrag zur (klimatischen) Entlastung leisten können.

Im Außenbereich der Stadt Ingelheim am Rhein ist hauptsächlich eine Maßnahmengruppe anzutreffen, die Maßnahmengruppe „Kaltlufträume“. Räume, die hinsichtlich dieser Maßnahmengruppe (KR) identifiziert wurden, umspannen den südlichen Teil von „Ingelheim am Rhein“ sowie den Übergang zwischen „Heidesheim am Rhein“ und „Wackernheim“.

Innerstädtisch finden sich klassischerweise Ausführungsräume für die Maßnahmengruppen

„Thermische Belastungsräume“, „Vegetationsanteil“ und „Durchlüftungsräume“. Hinsichtlich der Maßnahmengruppe „DR“ spielen innerstädtisch die großen, in Ost-West-Richtung – z.T. auch in Nord-Süd-Richtung – verlaufenden Verkehrswege, eine übergeordnete Rolle.

Der Detailraum (siehe Abbildung 52) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Ingelheimer Innenstadtbereichs, der im Norden einen Teil des Industriegebiets („Boehringer Ingelheim“) zeigt, im Osten über die „Rotweinstraße“ hinausreicht, im Süden an die „Tanusstraße“ und im Westen an die „Selz“ grenzt.

Ausführungsräume für Maßnahmen, welche in die Maßnahmengruppe „TBR“ fallen finden sich vornehmlich im verdichteten innerstädtischen Bereich zwischen „Römerstr.“, „Bahnhofstr.“, „Sebastian Münster Gymnasium“ und „Kreisverwaltung Mainz-Bingen“ sowie nördlich der Bahnlinie „Linke Rheinstrecke“ im Bereich des Großmarktes. Maßnahmenbereiche zur Erhöhung des Vegetationsanteils finden sich in den gleichen Gebieten, überspannen aber nördlich der Bahnstrecke größere Teile des Industrie- und Gewerbestandorts. Hinzu kommen außerdem Bereiche entlang der „Binger Str.“ und „Mainzer Str.“ sowie der „W.-von-Erlanger-Straße“ Richtung Osten.

Flächen, für die die Maßnahmengruppe „KR“ relevant ist, finden sich entlang der dargestellten Offenlandbereiche mit angrenzenden Siedlungsraum im Südosten („Rotweinstr.“ und „Grundstr.“) und Südwesten („Selz“ und „Selztalstraße“).

Tabelle 13: Übersicht zu den vier unterschiedlichen Maßnahmengruppen mit allgemeinen Umsetzungsbeispielen. Die identifizierten Räume bzw. Bereiche zu den unterschiedlichen Maßnahmengruppen werden in der Maßnahmenhinweiskarte dargestellt.

MAßNAHMENGRUPPE		ALLGEMEINE UMSETZUNGSBEISPIELE
DR	Durchlüftungsräume	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäudeausrichtung • Belüftungssicherung (z.B. Neubaugebiete) • Sicherung Kaltluft- und Frischluftentstehungsgebiete in Hangbahnen und / oder Luftleitbahnen • ..
VA	Vegetationsanteil	<ul style="list-style-type: none"> • Dachbegrünung • Fassadenbegrünung • Vertikale Verschattung* • Mobile Grünanlagen • Straßenbegleitgrün • Duale Tiefbeete • Sicherung und Schaffung von Grünflächen • Regengärten • Entsiegelung, Schaffung Retentionsflächen* • ..
KR	Kaltlufträume	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäudeausrichtung • Belüftungssicherung (z.B. Neubaugebiete) • Sicherung Kaltluft- und Frischluftentstehungsgebiete in Hangbahnen und / oder Luftleitbahnen • Straßenbegleitgrün • Sicherung und Schaffung von Grünflächen • Entsiegelung, Schaffung Retentionsflächen • ..
TB	Thermischer Belastungsraum	<ul style="list-style-type: none"> • Materialvorgaben • Dachbegrünung • Fassadenbegrünung* • Vertikale Verschattung • Gebäudeausrichtung • Besondere Rücksichtnahme auf Infrastrukturen für Risikogruppen • Belüftungssicherung (z.B. Neubaugebiete) • Angebot klimatisierter Aufenthaltsräume und / oder Trinkwasserangebot • Temporäre Verschattung • Wasser(fläche), natürlich* • Wasser(fläche), künstlich* • Mobile Grünanlagen* • Straßenbegleitgrün • Duale Tiefbeete • Sicherung und Schaffung von Grünflächen • Regengärten • Entsiegelung, Schaffung Retentionsflächen • ..
* eingeschränkt bzw. bedingt		

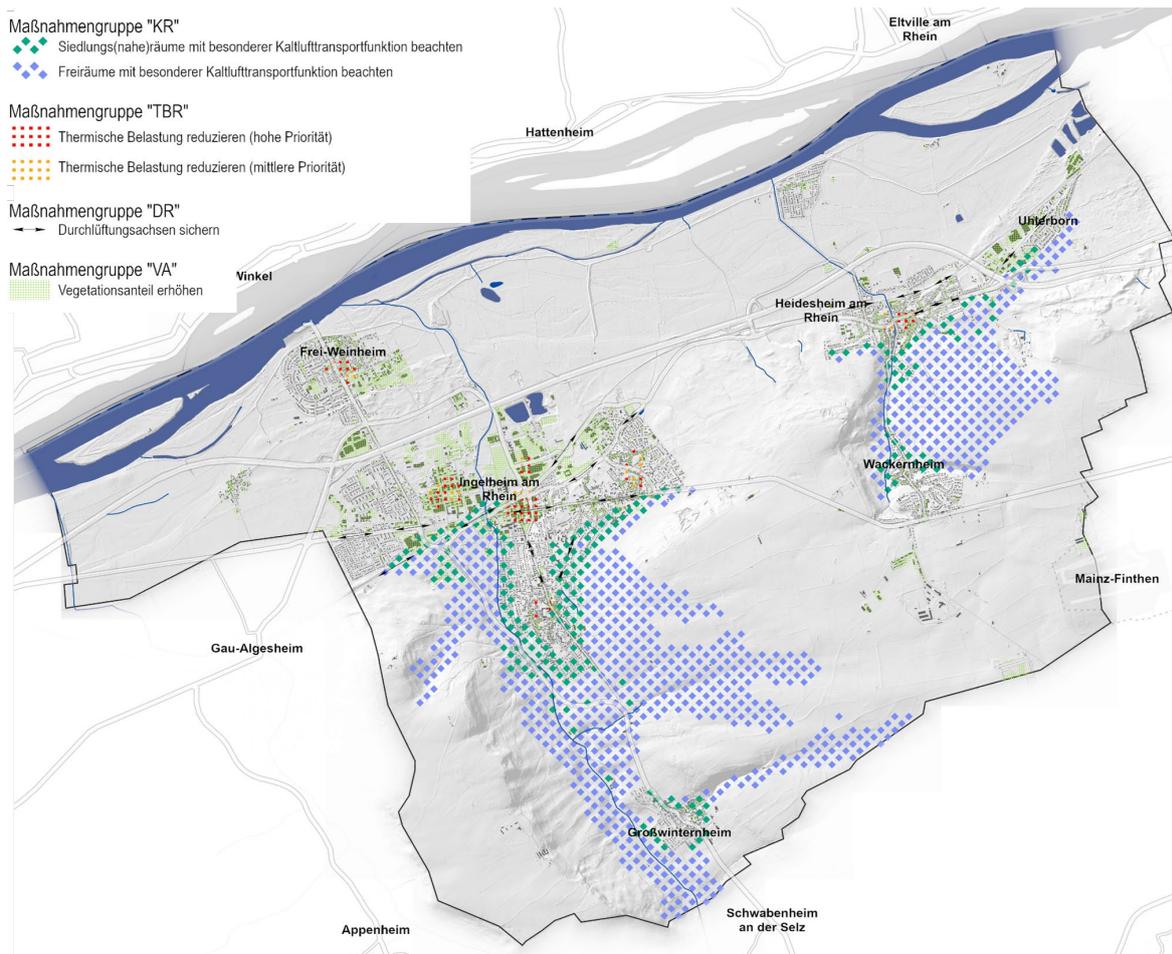


Abbildung 51: In der Maßnahmenhinweiskarte werden für die unterschiedlichen Maßnahmengruppen Räume und Bereiche dargestellt, in denen zukünftig spezifische Klimawandelanpassungsmaßnahmen durchgeführt werden können. Diese Räume wurden unter anderem über die Auswertung der unterschiedlichen Themenkarten, der Klimafunktionskarte sowie der stadtklimatischen Gegebenheiten abgeleitet und identifiziert.



Abbildung 52: Detailansicht Maßnahmenhinweiskarte - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Die Maßnahmengruppe „Kaltluftfräume“ wird über ein Rautenmuster dargestellt, die Gruppe „Thermischer Belastungsraum“ über Quadrate (rot und orange). Räume mit Vegetationsdefiziten werden mittels enger Punktierung (hellgrün) abgebildet.

8.2.1 Detailbetrachtung – Neuplanung der „Präsident-Mohr-Grundschule“

Die Präsident-Mohr-Grundschule, im Straßenbereich „Hammergasse“, „Marktplatz“, „Alte-gasse“ und „Schulstraße“, liegt in einem teilweise klimatisch defizitären Bereich, für den die Reduktion der „Thermischen Belastung“ empfohlen wird (vgl. Maßnahmenhinweiskarte).

Im Kontext der seitens der Stadt geplanten Überarbeitung des Schulareals (Gebäude und Freiflächen) wurden deshalb mikroklimatische Simulationen und Analysen unterschiedlicher Planungsvarianten, speziell hinsichtlich des Faktors thermischen Belastung durchgeführt.

Beispielsweise wurde der Thermische Komfort, dargestellt über die physiologische äquivalent Temperatur (siehe Abbildung 53) für unterschiedliche Entwurfssituationen berechnet. Die physiologische äquivalent Temperatur (PET) zählt zur Gruppe der klimatisch-thermischen Indices und wurde 1999 von Peter Höppe für den Außenraum entwickelt. Mit Hilfe eines klimatisch-thermischen Index lässt sich das thermische Empfinden einer Person im Raum (im Innen- und Außenraum) berechnen und darstellen. Dieses thermische Empfinden wird als Thermischer Komfort beschrieben. Somit kann mit

Hilfe des PET-Index der Thermische Komfort für den Menschen abgebildet werden.

Der PET-Index wird durch die Betrachtung der Energiebilanz des Menschen in Kombination mit den externen Einflussfaktoren Strahlung, Wind, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte gebildet. Neben den externen Einflussfaktoren wirken zudem interne Faktoren, wie Alter, Geschlecht, Gewicht, Kleidung und körperliche Aktivität auf die Energiebilanz ein.

Mit Hilfe eines anderen Analyseansatzes wurde zusätzlich die Anzahl der direkten Sonnenstunden für unterschiedliche Stichtage im Jahresgang auf den Oberflächen, in diesem Fall für den Boden, im Planungsraum ermittelt und graphisch dargestellt. Hierbei wurden beispielsweise unterschiedliche Gestaltungsvarianten des Außenbereichs, bspw. zusätzliche Bäume als Verschattungselemente (siehe Abbildung 54), gegenübergestellt.

Die Ergebnisse dieser mikroklimatischen Simulationen und Analysen können dann gezielt in der weiteren Objektplanung zur Minimierung bzw. der Reduktion der Thermischen Belastung genutzt werden.

Thermischer Komfort
21.06.
16:00 Uhr

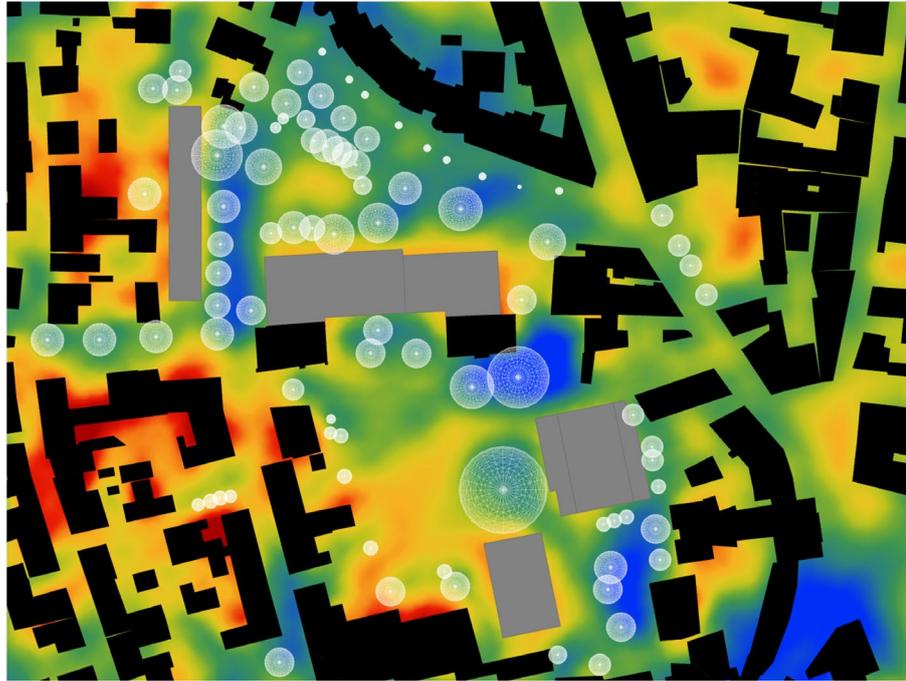
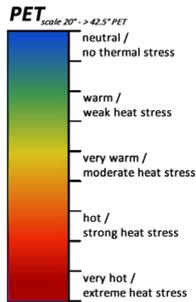


Abbildung 53: Exemplarische Darstellung für eine Berechnung des Thermischen Komforts im Bereich des Planungsraums der Präsident-Mohr-Grundschule. Bei den hellgrau dargestellten Gebäudekörpern handelt es sich um die angenommene Planung, die Bestandsbauten sind schwarz dargestellt.

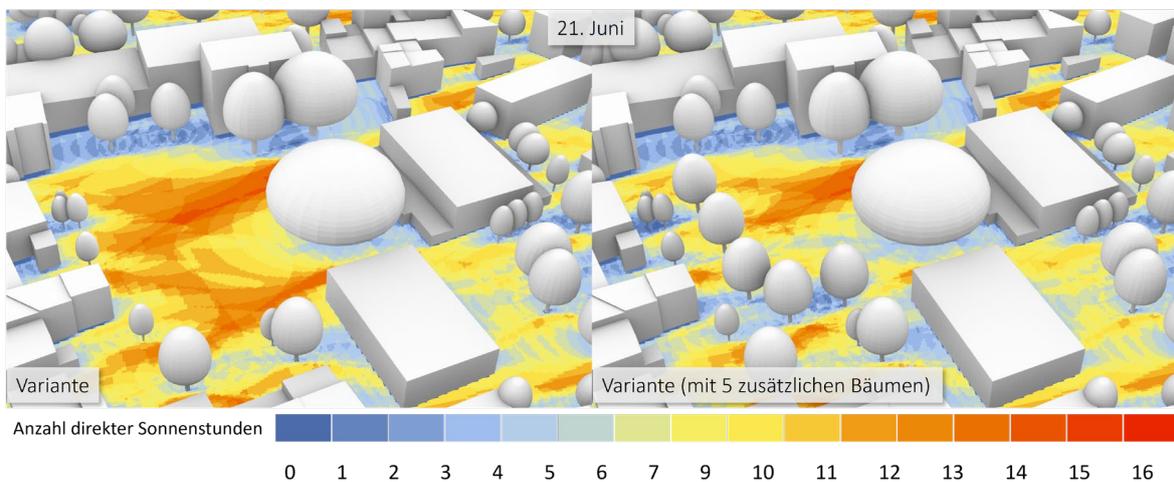


Abbildung 54: Exemplarische Darstellung für eine Berechnung der Anzahl der direkten Sonnenstunden für den 21. Juni für zwei unterschiedliche Ausstattungsvarianten (rechts mit fünf zusätzlichen Bäumen als Verschattungselemente).

8.3 Erreichbarkeit von potentiellen lokalklimatischen Ausgleichsräumen

Um die Erreichbarkeit und das jeweilige Einzugsgebiet von potentiellen lokalklimatischen Ausgleichsflächen zu ermitteln, wurde im Geoinformationssystem für alle städtischen Park-, Friedhofs- und Spielplatzanlagen mit Sitzgelegenheit (Bänke) eine wege- und straßengebundene Netzwerkanalyse durchgeführt (siehe Abbildung 55 und Abbildung 56).

Bei den potentiellen lokalklimatischen Ausgleichsflächen handelt es sich um seitens der Stadt benannte Parkanlagen, Friedhöfe sowie Spielplätze, da diese in der Regel auch über eine

ausgleichende Vegetationsstruktur verfügen. Als Geschwindigkeitsparameter für die Analyse wurden 3 km/h angenommen. Dieser erscheint auf den ersten Blick recht niedrig, hat aber den Vorteil, dass bspw. eingeschränkt mobile Bevölkerungsgruppen miteinbezogen oder Wartezeiten an Ampeln, Kreuzungen etc. kompensiert werden.

Für jede potentielle lokalklimatische Ausgleichsfläche wurde die fußläufige Erreichbarkeit innerhalb ≤ 1 Min. (dunkelgrün), ≤ 3 Min. (grün) und ≤ 5 Min. (hellgrün) berechnet und in unterschiedlichen Farbabstufungen dargestellt.

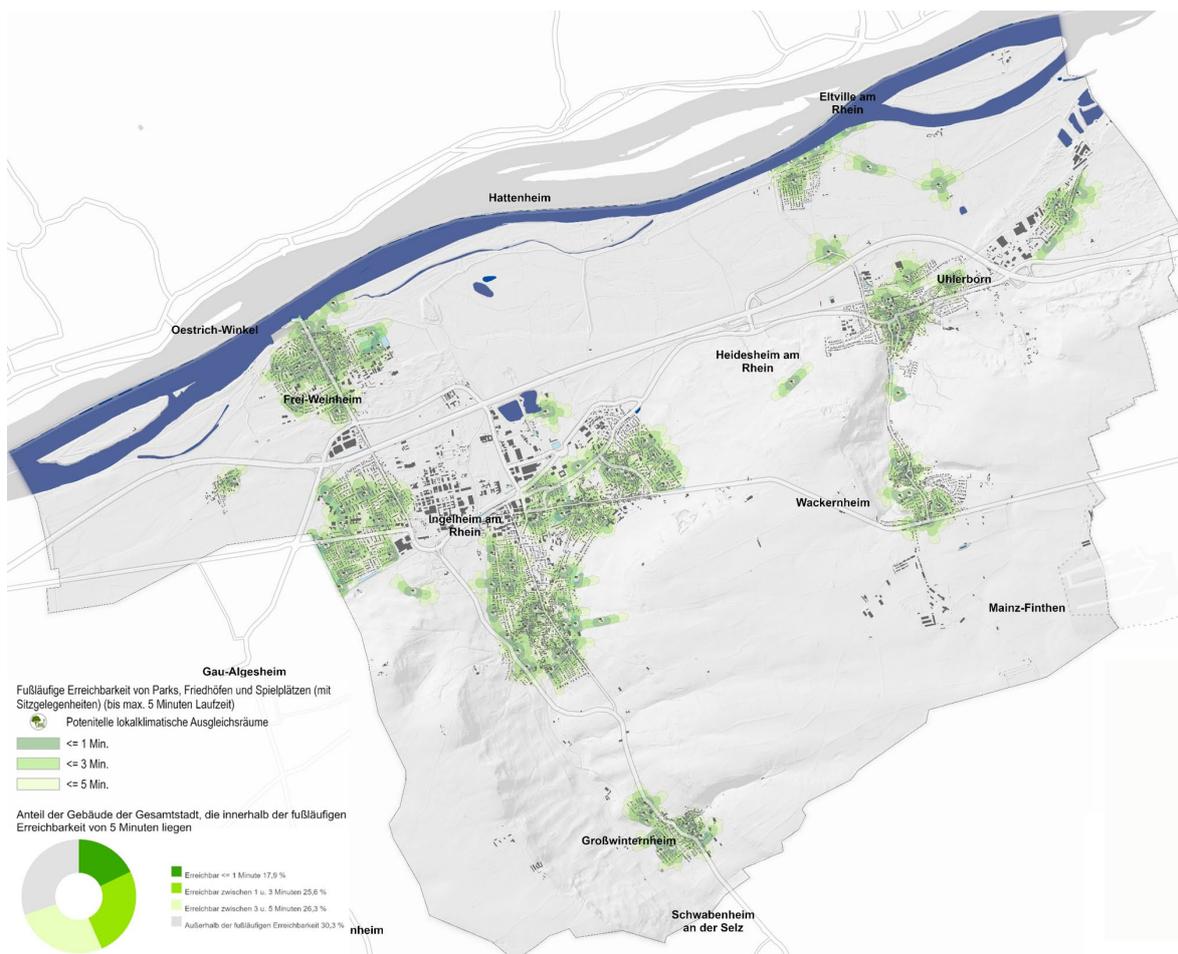


Abbildung 55: Wege- und straßengebundene Netzwerkanalyse von potentiellen lokalklimatischen Ausgleichsflächen (Parks, Friedhöfe und Spielplätze). Die fußläufige Erreichbarkeit wurde auf eine Entfernung von maximal fünf Gehminuten (3 km/h) berechnet und gestaffelt bis eine Gehminute dargestellt.

Hinsichtlich der Verteilung der potentiellen lokalklimatischen Ausgleichsflächen im Siedlungsraum fällt auf, dass Industrie- und Gewerbeflächen erwartungsgemäß über keine bis sehr wenige Ausgleichsflächen verfügen. Aber auch innerhalb der typischen Wohnbebauung sind einige Bereiche hinsichtlich potentieller lokalklimatischer Ausgleichsflächen defizitär ausgestattet. Neben dem verdichteten Zentrum in „Ingelheim“ ist dies beispielsweise auch der keilförmige Bereich zwischen der „Bahnhofstraße“ im Westen und der „Grundstraße“ im Osten. Dies ist für diese Bereiche umso ungünstiger, da sie nicht über direkten Zugang zu den Außenbereichen der Stadt verfügen. Dies ist z.B. im westlichen Siedlungsraum von „Heidesheim am Rhein“

oder der östlichen Wohnbebauung von „Wackernheim“ der Fall. Beide Gebiete sind hinsichtlich der potentiellen lokalklimatischen Ausgleichsflächen defizitär ausgestattet, grenzen aber direkt ans vegetationsbestandene Offenland, welches ebenfalls als Ausgleichsfläche fungieren kann.

Neben der Erreichbarkeit der Ausgleichsflächen wurde zusätzlich berechnet, wie viel Prozent des gesamtstädtischen Gebäudebestands innerhalb der drei Erreichbarkeitszonen für eine oder mehrere Ausgleichsflächen liegen.

17,9 % der Gebäude liegen innerhalb der „1-Minuten-Zone“, 25,6 % der Gebäude innerhalb der „2-Minuten-Zone“ und 26,3 % innerhalb der „5-Minuten-Zone“.

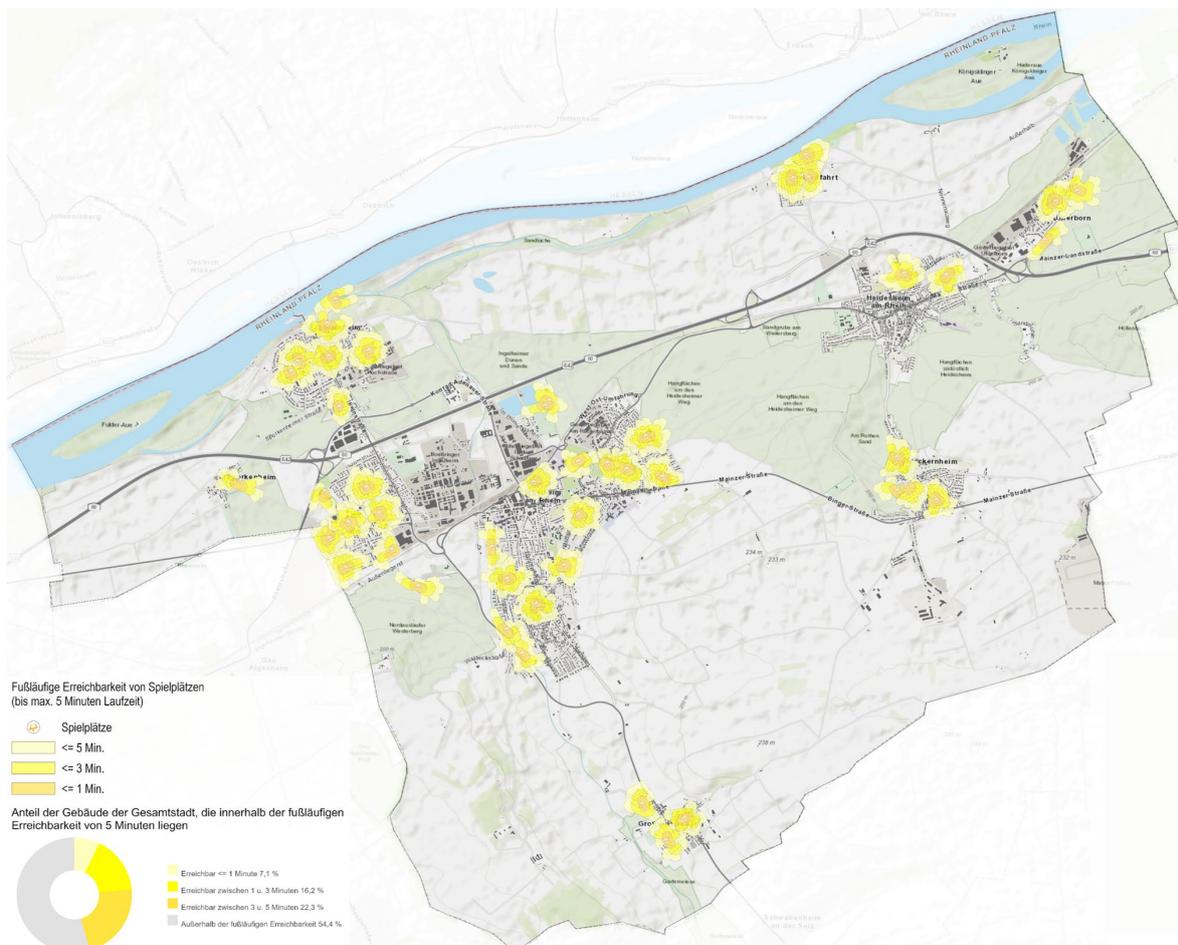


Abbildung 56: Erreichbarkeit von Spielplätzen der Stadt Ingelheim am Rhein. Die fußläufige Erreichbarkeit wurde auf eine Entfernung von maximal fünf Gehminuten (3 km/h) berechnet und gestaffelt bis eine Gehminute dargestellt.

Bei der Karte zu fußläufiger Erreichbarkeit der offiziellen städtischen Spielplätze (siehe Abbildung 56) handelt es sich, ebenso wie bei der Analyse zur Erreichbarkeit von potentiellen lokalklimatischen Ausgleichsräumen, um eine GIS-gestützte Netzwerkanalyse. Für alle benannten Spielplätze der Stadt (Piktogramme in der Karte) wurde die fußläufige Erreichbarkeit (Geschwindigkeit 3km/h) berechnet. Aus orangen Bereichen können die Spielplätze innerhalb einer Minute erreicht werden, aus gelben Bereichen innerhalb von drei bzw. fünf Minuten aus den hellgelben Bereichen.

Aufgrund der Integration des vorhandenen Straßen- und Wegenetzes von Ingelheim am Rhein entsprechen die zeitlichen Angaben realen Wegstrecken. Hinsichtlich der Lokalisation der Spielplätze fällt ihre heterogene Verteilung über den Siedlungsraum auf. Während „Frei-Weinheim“ und „Heidenfahrt“ eine recht gute Ausstattung

mit Spielplätzen haben, stellt sich der Großteil von „Heidesheim am Rhein“, das nach Süden verlängerte Zentrum (entlang der „Bahnhofstraße“) von „Ingelheim“ sowie der Siedlungsbereich westlich der „Turnierstraße“ im Osten und entlang dem „Neuweg“ im Süden eher defizitär dar.

Neben der Erreichbarkeit der Spielplätze wurde zusätzlich berechnet, wie viel Prozent des gesamtstädtischen Gebäudebestands innerhalb der drei Erreichbarkeitszonen für einen oder mehrere Spielplätze liegen.

7,1 % der Gebäude liegen innerhalb der „1-Minuten-Zone“, 16,2 % der Gebäude innerhalb der „2-Minuten-Zone“ und 22,3 % innerhalb der „5-Minuten-Zone“. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass sich die Zahlen auf den gesamten Gebäudebestand der Stadt Ingelheim am Rhein beziehen, also bspw. auch Industrie- und Gewerberäume beinhalten.

9 Zusammenfassung

Bei der Erstellung und Ableitung der Klimafunktions- und Planungshinweiskarte für die Stadt Ingelheim am Rhein handelt es sich um eine klassische Stadtklimaanalyse, welche inhaltlich von 2021 bis 2022 für die Stadt erarbeitet wurde. Das Vorhaben ist ein Bestandteil des geförderten Projekts „KlimPraxIng – Klimawandel in der Praxis am Beispiel der Mittelstadt Ingelheim am Rhein“.

Die Stadtklimaanalyse für Ingelheim am Rhein setzt sich aus mehreren Teilen zusammen, die in unterschiedlichen Projektphasen erarbeitet wurden. Hierbei ist wichtig zu betonen, dass die städtische Verwaltung wie auch die Bürgerinnen und Bürger der Stadt über den gesamten Projektverlauf in unterschiedlicher Form informiert und einbezogen wurden.

Seitens der Stadt Ingelheim am Rhein wurde das Vorhaben von der Abteilung Klimaschutz und Klimaanpassung (Herr Daniel Diehl) geführt, während die fachliche Expertise und die Erarbeitung der Stadtklimaanalyse durch das Planungsbüro Burghardt und Partner, Ingenieure aus Kassel erfolgte.

Der erste Schritt im Vorhaben stellte die Aufnahme und Analyse der klimatischen Bestandsituation der Stadt Ingelheim am Rhein dar. Hierzu wurden langjährige Klimareihen und aktuelle Wetterdaten für die Stadt und die Region ausgewertet. Zusätzlich fand im Sommer 2021 eine lokale Messkampagne mit einer mehrmonatigen Laufzeit statt. Sachdaten und Geodaten für den Untersuchungsraum wurden akquiriert, aufgearbeitet und fachlich analysiert. Erste Produkte aus diesen Analysen stellen die sogenannten Themenkarten dar, die teilweise direkt

klimatische Aspekte, wie z.B. die Kaltluftentstehung und den Kaltlufttransport für die Stadt Ingelheim am Rhein darstellen oder aber einfach lokale Gegebenheiten oder typische Ausprägungsmerkmale des Untersuchungsraums wiedergeben. Alle Karten wurden flächendeckend für den gesamten Untersuchungsraum erstellt und stehen als Mehrwert der städtischen Verwaltung zukünftig auch für beispielsweise nicht klimatische Fragestellungen zur Verfügung. Bezüglich des Untersuchungsraums ist anzumerken, dass sich dieser über die administrative Grenze der Stadt Ingelheim am Rhein hinauserstreckt, so dass Einflussnahmen oder Effekte auf den Planungsraum, das administrative Stadtgebiet, bzw. dessen Klima beachtet wurden.

Auf Grundlage der unterschiedlichen Wetter- und Klimaauswertungen sowie der vorliegenden Themenkarten wurde im Jahr 2022 die Klimafunktionskarte für die Stadt Ingelheim am Rhein fertiggestellt, welche die klimatische Bestandssituation der Stadt beschreibt. Auf Grund seiner klimatischen Charakteristika wird der städtische Raum unterschiedlichen Klimatopen zugeordnet. Die fünf Klimatop-Kategorien orientieren sich an der entsprechenden Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure e.V. (VDI).

Der zweite Schritt im Vorhaben umfasste die Entwicklung der Planungshinweiskarte sowie die Ableitung von entsprechenden Handlungsempfehlungen.

Da die Planungshinweiskarte zukünftig ein gut nutzbares Arbeitsinstrument der städtischen Verwaltung sein soll, wurde die Ausgestaltung des Planwerks in enger Absprache mit der Verwaltung durchgeführt. Die Karte transformiert die klimatische Bestandsaufnahme und Analysen in

einen planungsbezogenen Kontext und steht zukünftig ebenfalls den unterschiedlichen Ämtern der Stadt zur Verfügung. Gleiches gilt für die generierten Sach- und Geodaten, die zukünftig im GIS-System der Stadt zur Verfügung stehen. Zusätzlich zur Planungshinweiskarte wurde eine Maßnahmenhinweiskarte entwickelt, die klimatisch defizitäre Räume im Stadtgebiet identifiziert und diese bestimmten Maßnahmengruppen zuordnet. Jede Maßnahmengruppe enthält wiederum eine Liste von möglichen Umsetzungsmaßnahmen, die als Hilfestellung bzw. Beispiel für die Entwicklung und zukünftige Umsetzung von „passgenauen“ Klimaanpassungsmaßnahmen vor Ort dienen.

Im Rahmen des Projekts „KlimPraxIng“ fanden mehrere Beteiligungsformate (bspw. Workshops, KlimaWerkstatt) für die städtische Verwaltung wie auch die Bürger und Bürgerinnen der Stadt Ingelheim am Rhein statt, bei denen die Stadtklimaanalyse selbst sowie ihre Ergebnisse vorgestellt wurden.

10 Anhang

10.1 Glossar

BEGRIFF	BEDEUTUNG
Absorption	wellenlängenabhängige Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen, bei welcher Strahlungsenergie in Wärmeenergie überführt wird. Die Absorption von Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche ist Ursache für die unterste Heizschicht der Atmosphäre als Energiequelle für alle atmosphärischen Bewegungsvorgänge.
Aerosole	Aerosole sind (meteorologisch gesehen) Bestandteile von Beimengungen der Atmosphäre. Sie beteiligen sich wesentlich am luftchemischen Wirkungskomplex und spielen bei Strahlungsprozessen (Absorption, Streuung, Extinktion) eine wichtige Rolle.
Albedo	Rückstrahlvermögen diffus reflektierender (aber nicht spiegelnder) Oberflächen, angegeben als Verhältnis von reflektierter zu einfallender kurzwelliger Strahlung. Eine Oberfläche mit einer Albedo von 0,3 z.B. reflektiert 30 % der einfallenden Strahlung und absorbiert 70 %. Je heller die Oberfläche, desto größer ist ihre Albedo.
Allochthone Witterung	"fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung, die durch mehr oder weniger unperiodische Änderungen der Wetterelemente (kein ausgeprägter Tagesgang) gekennzeichnet ist.
Autochthone Witterung	"eigenbürtige", durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Witterung, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist.
Bergwind	weht abends, nachts und in der Frühe. Nachts kühlt sich die Luft im Gebirge stärker ab als über der Ebene. Die vergleichsweise schwere Kaltluft fließt die Berghänge hinunter und weht zum Teil sehr kräftig durch die Täler hindurch.
Bioklima	Gesamtheit aller atmosphärischen Einflussgrößen auf den menschlichen Organismus. Entsprechend ihrer Ausprägung und Wirkung werden sie als belastend, schonend oder als Reiz empfunden.
Emission*	die Abstrahlung oder Aussendung elektromagnetischer Wellen oder Teilchen als Strahlung, ebenso wie der Ausstoß fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe in die Außenluft sowie in Wasser oder andere Umweltbereiche
Flurwind*	eine thermisch bedingte kleinräumige Ausgleichsströmung zwischen einer Stadt und ihrer Umgebung
Globale Durchschnittstemperatur	die über die gesamte Erdoberfläche (Land/Wasser) gemittelte Temperatur in einem bestimmten Zeitraum.
Globalstrahlung	die gesamte am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung, also die Summe aus direkter Strahlung und (diffuser) Himmelsstrahlung
Hangwind*	Wind, der unter dem Einfluss der Tageserwärmung an Berghängen entsteht und tagsüber bergaufwärts (Hangaufwind), nachts bergabwärts (Hangabwind) weht. Hangwinde sind in der Regel bei einer ruhigen Strahlungswetterlage besonders gut ausgebildet.
Heißer Tag	ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C beträgt (früher auch Tropentag).
Hitzewelle	eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung. Eine Hitzewelle ist ein Extremereignis, welches die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme und die Infrastruktur schädigen kann.
Immission*	Einwirkung von unmittelbar oder mittelbar durch menschliche Tätigkeit verursachte Emissionen auf die Umwelt.

	Zu den Immissionen gehören vorwiegend Luftverunreinigungen, Geräusche, Gerüche, Erschütterungen, Licht, Strahlen und Wärme.
Klimafaktoren	(auch klimatologische Wirkungsfaktoren) sind Faktoren, welche die Klimaelemente (Temperatur, Luftfeuchte usw.) und damit das Klima eines Ortes beeinflussen.
Kaltluftabfluss	der nächtliche Abfluss von örtlich gebildeter Kaltluft, dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt - trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen auf.
Kaltluftfluss	die in windschwachen, klaren Nächten hangabwärts strömende kalte Luft. Sie sammelt sich am Erdboden und ist dann schwerer als die wärmere Luft der Umgebung. Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft hängt von der Hangneigung, der Bodenrauigkeit und der Größe des Kaltlufteinzugsgebietes, das heißt, von der Größe des Gebietes, in dem Kaltluft produziert wird ab.
Kaltluftstau	die abriegelnde Wirkung eines Hindernisses auf einen Kaltluftfluss. Die Kaltluft kann sich sowohl vor orografischen Hindernissen (z.B. Hügelrücken) als auch vor künstlichen Hindernissen (z.B. Bauwerke, Dämme) stauen.
Klimamodell*	mathematisches Gleichungssystem welches das Klima bzw. dessen Änderungen simuliert. Als Variablen dienen physikalische und chemische Beziehungen.
Klimaprojektion	Analyse der Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten auf das Klima der Erde unter Nutzung von Klimamodellen. Sind in der Lage alle wesentlichen Prozesse der Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Kryosphäre des Planeten zu beschreiben. Mit ihnen können die beobachteten Änderungen des Klimas in der Erdgeschichte analysiert und nachvollzogen werden.
Klimatop	Fläche mit einheitlichen geländeklimatischen Eigenschaften
Kontinentalklima	Klima, welches charakteristisch für das Innere größerer Festlandsmassen ist. Im Allgemeinen ist das Kontinentalklima durch große jährliche und tägliche Schwankungsbereiche der Temperatur, eine geringe relative Feuchte sowie mäßigen oder geringen, unregelmäßig fallenden Niederschlag geprägt.
Lokalklima	Klima an einem konkreten Ort. Es ist eingebettet in das Regionalklima und wird zusätzlich durch Relief und Flächennutzung in der näheren Umgebung des Ortes bestimmt.
Makroklima	Klima, welches von großskaligen Prozessen geprägt ist
Maritimes Klima	Klima von Gebieten, die an die See bzw. das Meer angrenzen oder davon umgeben sind (auch ozeanisches Klima). Geringe Tages- und/oder Jahresgänge der Temperatur und hohe relative Luftfeuchte sind charakteristisch für das maritime Klima.
Mesoklima	Bereich, der zwischen dem Mikroklima und dem Makroklima liegt. Während das Makroklima hauptsächlich von großskaligen und das Mikroklima vor allem von kleinskaligen, lokalen Prozessen beeinflusst ist, ist es im Mesoklima eine Mischung von beiden. Damit umfassen die Skalen der mesoskaligen Phänomene etwa eine horizontale Ausdehnung von ca. 1 bis 2000 km und eine typische Lebensdauer von einer Stunde bis hin zu einer Woche. Geländeform, Hangneigung und Beschaffung der Erdoberfläche sind dabei wichtige Parameter.
Mikroklima	mittlere atmosphärische Zustände und wiederkehrende Phänomene im mikrometeorologischen Maßstabsbereich. Nach Orlanski (1975) werden atmosphärische Prozesse mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern der Mikroskala zugeordnet. Mit Mikroklima ist damit das spezielle Klima eines Areals gemeint, das sich in den bodennahen Luftschichten ausbildet und stark von den vorhandenen Oberflächen (Untergrund, Bewuchs, Bebauung), z.B. deren Rauigkeit und thermischen Eigenschaften, beeinflusst ist.
Rauigkeit***	(auch Rauheit) bezeichnet die Unebenheit von Oberflächen
Regionalklima	eng verwandt mit der Begrifflichkeit Mesoklima. Dabei sind Phänomene mit sehr ähnlichen Raum- und Zeitskalen gemeint, die durch sowohl groß- als auch kleinskalige Prozesse beeinflusst werden, aber auch

	von regionalen Gegebenheiten wie der Geländeform und der Landnutzung abhängen. Beim Regionalklima, im Gegensatz zum Mesoklima, wird deutlicher der Bezug zu natur- oder kulturräumlichen Klimabesonderheiten hergestellt.
Resilienz**	Die Leistungsfähigkeit eines Systems Störungen zu absorbieren, und sich in Phasen der Veränderung so neu zu organisieren, dass wesentliche Strukturen und Funktionen erhalten bleiben.
Retention**	Rückhaltevermögen von unterschiedlichen Oberflächen für flüssiges Wasser.
Sommertag	ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C beträgt
Spektrale Signatur* ^S	für eine Oberfläche typisches Verhältnis der Messwerte in mehreren Spektralbereichen, mit denen Unterschiede in der Reflexionscharakteristik verschiedener Oberflächen erfasst werden können
Städtische Wärmeinsel* ^L	ein typisches Merkmal des Stadtklimas welches durch die Wechselwirkung mehrerer unterschiedlicher Effekte hervorgerufen wird. Durch die starke Aufwärmung tagsüber und die eingeschränkte Abkühlung nachts werden die Städte im Vergleich zum Umland deutlich wärmer.
Strahlungsantrieb* ^S	Maß für die global gemittelten klimarelevanten Störungen des atmosphärischen Strahlungs- und Energiehaushaltes
Strahlungsbilanz*	Differenz zwischen Ein- und Ausstrahlung einer Fläche. Insbesondere terrestrische und solare Strahlung sind dabei von Bedeutung.
Strahlungswetterlage*	eine Form des Hochdruckwetters mit geringer Bewölkung und höchstens mäßigen Winden
Synoptik	ein Teilgebiet der Meteorologie, das in einer großräumigen Zusammenschau die Wetterzustände in ihrer räumlichen Verteilung und zeitlichen Änderung für einen gegebenen Zeitpunkt untersucht (Analyse oder Wetterlage).
Talwind	bei Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Luft im Gebirge stärker als über der Ebene. Dadurch steigt die Luft nach oben und der Luftdruck sinkt über dem Gebirge. Zum Ausgleich beginnt die Luft unterhalb der Gipfel von außen - also durch die Täler - ins Gebirge einzuströmen.
Tropennacht	eine Nacht (18 bis 06 UTC), in der das Minimum der Lufttemperatur ≥ 20 °C beträgt
Übergangsklima*	beschreibt den fließenden Übergang zwischen dem maritimen Klima und dem kontinentalen Klima. Das Übergangsklima kommt überwiegend in Europa vor. Daher ist der Westen dieses Klimas ozeanisch geprägt, während der Osten eher kontinental beeinflusst wird
Überwärmungsakkumulationseffekt* ^L	während längeren Hitzeperioden kann die nächtliche Abkühlung die erhöhte tägliche Wärmeaufnahme von Atmosphäre und Gebäuden nicht mehr kompensieren, d.h. auch die Minima der nächtlichen Temperaturen steigen an
Urban Canopy Layer	Atmosphärenschicht zwischen Erdoberfläche und mittlerer Hausdachhöhe in der Stadt
Vulnerabilität**	der IPCC definiert Vulnerabilität als das Maß, zu dem eine Person, Region oder ein System gegenüber nachteiligen Auswirkungen von Klimaänderungen anfällig ist und nicht damit umgehen kann. Dabei wird die Vulnerabilität bzw. Verwundbarkeit als eine Funktion von Exposition, Sensitivität und Anpassungsfähigkeit verstanden.
Wind Chill-Effekt	Durch eine erhöhte Windgeschwindigkeit tritt in den Fällen eine Abkühlung im Hautbereich auf, in denen die Hauttemperatur über der Lufttemperatur liegt, der sogenannte Wind Chill-Effekt. Dieser Abkühlungseffekt verstärkt sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit.
Windstärke	anhand der Auswirkungen des Windes auf die Wasseroberfläche oder auf Objekte an Land geschätzter Stärkewert. In der international vereinbarten 13-teiligen Beaufort-Skala (0 = Windstille bis 12 = Orkan) sind jedem Stärkewert Windgeschwindigkeitsbereiche zugeordnet.

Sofern nicht anders gekennzeichnet gilt als primäre Quelle das Wetterlexikon des Deutschen Wetterdienst (DWD) (www.dwd.de/lexikon oder www.wetterlexikon.eu).

- * Wetter-Lexikon von wetter.net - Q.met GmbH
(<https://www.wetter.net/wetterlexikon>)
- ** Lexikon der Nachhaltigkeit der Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken
(<https://www.nachhaltigkeit.info>)
- *** Duden - Bibliographisches Institut GmbH (<https://www.duden.de>)
- *L Environmental Sciences Europe – Kuttler 2011 (<http://www.enveurope.com>)
- *S Spektrum – Lexikon der Geowissenschaften (www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften)

10.2 Literaturverzeichnis

- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2022a): Landschaften in Deutschland, <https://geodienste.bfn.de/landschaften?lang=de> (Abruf 10/2022)
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2022b): Landschaftssteckbrief Mainz-Ingelheimer-Rheinebene, <https://www.bfn.de/landschaftssteckbriefe/mainz-ingelheimer-rheinebene> (Abruf 12/2022)
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2022c): Landschaftssteckbrief Rheinhessen, <https://www.bfn.de/landschaftssteckbriefe/rheinhessen> (Abruf 12/2022)
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2022d): Schutzgebiete in Deutschland, <https://geodienste.bfn.de/schutzgebiete?lang=de&layers=LSG%2C-NSG%2C-NLP> (Abruf 12/2022)
- Bründl W., Mayer H., Baumgartner A. (1986): Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten, Abschlussbericht zum Teilprogramm „Klimamessungen München“
- Burghardt R. et al. (2014): Klimabewusste Stadtgestaltung. In: RaumPlanung, Fachzeitschrift für räumliche Planung und Forschung, Ausgabe 01/2014, Informationskreis für Raumordnung, Dortmund
- Burghardt R. (2015), Development of an ArcGIS extension to model urban climate factors, Kassel University Press
- Copernicus Climate Change Service (2019): CORDEX regional climate model data on single levels. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on 13.10.2022), DOI: 10.24381/cds.bc91edc3.
- Copernicus Land Monitoring Service (2022): Urban Atlas – 2018, Online-Quelle URL: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2018> (Abruf 02/2022)
- Deutsche Meteorologische Gesellschaft e.V., Online-Quelle URL: www.dmg-ev.de/publikationen/stellungnahmen (Abruf: 10/2018)
- Deutscher Wetterdienst (DWD): Informationsblatt: Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21, - Stand 03/2016
- Deutscher Wetterdienst (DWD), Online-Quelle URL: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html (Abruf: 05/2022)
- Deutscher Wetterdienst (DWD 2022b): Wetterlexikon „Kontinentalklima“ <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=101486> (Abruf: 08/2022)
- Deutscher Wetterdienst Climate Data Center (DWD CDC 2022a): Raster der Monatsmittel der Lufttemperatur (2m) für Deutschland, Version v19.3
- Deutscher Wetterdienst Climate Data Center (DWD CDC 2022b): Rasterdaten der Monatssumme der Niederschlagshöhe für Deutschland, Version v19.3

- Deutscher Wetterdienst Climate Data Center (DWD CDC 2022c): Jahresraster der Anzahl der Sommertage für Deutschland, Version v19.3.
- Deutscher Wetterdienst Climate Data Center (DWD CDC 2022d): Jahresraster der Anzahl der Frosttage für Deutschland, Version v19.3
- Deutscher Wetterdienst Climate Data Center (DWD CDC 2022): Jahresraster der Anzahl der heißen Tage für Deutschland, Version v19.3
- Deutscher Wetterdienst Climate Data Center (DWD CDC 2022f): Jahresraster der Anzahl der Eistage für Deutschland, Version v19.3
- Deutscher Wetterdienst Climate Data Center (DWD CDC 2022g): Jahresraster der Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm für Deutschland, Version v19.3
- Deutscher Wetterdienst Climate Data Center (DWD CDC 2022h): Jahresraster der Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 30 mm für Deutschland, Version v19.3.
- Dimoudi A. und Nikolopoulou M. (2003): Vegetation in the urban environment: Microclimatic Analysis and Benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69-76
- EPA – U.S. Environmental Protection Agency (2008): Urban Heat Island Basics, in *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*
- Frank W. (1975): Raumklima und thermische Behaglichkeit: Literaturlauswertung, In: *Berichte aus der Bauforschung*, Bd. 104, Berlin
- Gartland L. (2008): Heat Islands Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas in the UK and USA in 2008. Earthscan, London
- GEONet (2002): GIS-basierte Aufbereitung der Modellergebnisse zur Kaltluftsimulation für die Nutzung im Rahmen der Landes- und Regionalplanung in Thüringen; Abschlussbericht
- GEONet (2011): MORO-Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel Leitfaden „Klimaökologie“, Baden-Baden
- Global Wind Atlas Online-Quelle URL: <https://globalwindatlas.info/> (Abruf: 04/2022)
- Graw, Kathrin & Grätz, Angelika & Matzarakis, Andreas (2019). Die Bioklimakarte von Deutschland: Zeitraum 1981 bis 2010. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft*. 79. 269-275. 10.37544/0949-8036-2019-07-08-31.
- Gross G. (1987): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flow and local climate: A numerical study; In: *Boundary-Layer Meteorology*; 28 (4); S. 315-337
- Hendl M. und Endlicher W. (2003): Klimaspektrum zwischen Zugspitze und Rügen, Band 3 – Klima, Pflanzen und Tierwelt, Seite 33

- Hupfer P. und Kuttler W. (Hrsg.) (1998): Witterung und Klima, Vieweg und Teubner Verlag
- Hussain M. und Lee B.E. (1980): A wind tunnel study of the mean pressure forces acting on large groups of low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.6, Iss.3-4, p 207-225
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Kaspar, F., et al. (2003): Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. *Adv. Sci. Res.*, 10, doi:10.5194/asr-10-99-2013, 99–106
- Katzschner L. und Thorsson S. (2009): *Microclimatic Investigations as Tool for Urban Design*, The seventh International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japan
- King E. (1973): Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten; *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 130; 17
- Kuttler W. (2000): Stadtklima. In: Gudehan R.: *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie*. Bd. IB, S. 420-470, Heidelberg
- Kuttler W. (2011): *Climate change in urban areas – part 1*, *Effects Environmental Sciences Europe* 23
- Landkreis Mainz-Bingen (1979): Rechtsverordnung über das Naturschutzgebiet „Sandlache“, <https://naturschutz.rlp.de/Dokumente/rvo/nsg/NSG-7300-025.pdf> (Abruf: 11/2022)
- Landkreis Mainz-Bingen (1992): Rechtsverordnung über das Naturschutzgebiet „Haderaue-Königsklinger Aue“, <https://naturschutz.rlp.de/Dokumente/rvo/nsg/NSG-7300-177.pdf> (Abruf: 11/2022)
- Landkreis Mainz-Bingen (1995a): Rechtsverordnung über das Naturschutzgebiet „Fulder Aue – Ilmen Aue“, <https://naturschutz.rlp.de/Dokumente/rvo/nsg/NSG-7300-019.pdf> (Abruf: 11/2022)
- Landkreis Mainz-Bingen (1995b): Rechtsverordnung über das Naturschutzgebiet „Höllenberg“, <https://naturschutz.rlp.de/Dokumente/rvo/nsg/NSG-7300-181.pdf> (Abruf: 11/2022)
- Landkreis Mainz-Bingen (1996): Rechtsverordnung über das Naturschutzgebiet „Lennebergwald“, <https://naturschutz.rlp.de/Dokumente/rvo/nsg/NSG-7300-187.pdf> (Abruf: 11/2022)
- Landkreis Mainz-Bingen (2003a): Rechtsverordnung über das Naturschutzgebiet „Hangflächen um den Heidesheimer Weg“, <https://naturschutz.rlp.de/Dokumente/rvo/nsg/NSG-7300-215.pdf> (Abruf: 11/2022)
- Landkreis Mainz-Bingen (2003b): Rechtsverordnung über das Naturschutzgebiet „Nordausläufer Westerberg“, <https://naturschutz.rlp.de/Dokumente/rvo/nsg/NSG-7300-216.pdf> (Abruf: 11/2022)

- Landkreis Mainz-Bingen (2003c): Rechtsverordnung über das Naturschutzgebiet "Ingelheimer Dünen und Sande". URL: <https://naturschutz.rlp.de/Dokumente/rvo/nsg/NSG-7300-214.pdf> (Abruf: 11/2022)
- LANUV (2018): Fachbericht 86 – Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
- Liljequist G.H. und Cihak K. (1979): Allgemeine Meteorologie, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig
- Lohmeyer, A. (2008): Klimafunktions- und Klimaplanungskarten, In: Lohmeyer Aktuell, Bd. 20, Karlsruhe
- Matzarakis A., Röckel R., Richter C.-J., Höfl. H.-C., Steinicke W., Streifeneder M., Mayer H. (2008): Planungsrelevante Bewertung des Stadtklimas am Beispiel von Freiburg im Breisgau, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 68, 334-340
- Mayer H. (1992): Stadtklima und Lufthygiene, Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Bd. 4 „Stadtökologie“, 21-30
- Meynen E. und Schmithüsen J. (Hrsg.) (1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands / unter Mitwirkung des Zentralausschusses für Deutsche Landeskunde
- Naturschutzverwaltung Rheinland-Pfalz (2022): https://geodaten.naturschutz.rlp.de/kartendienste_naturschutz/index.php (Abruf: 11/2022)
- Ng E. und Ren C. (2015): The Urban Climatic Map, Routledge, London & New York
- Oke, T.R. (1987): Boundary Layer Climates. 2nd Edition, Methuen Publishers, Lagos
- Oke, T.R. (1988): Street design and urban canopy layer climate, Energy and Buildings 1, 103-113
- Oke T.R. (2006): Towards better scientific communication in urban climate, Theoretical and Applied Climatology volume 84, pages 179–190
- Oke, T.R. (Hrsg.) (2017): Urban Climates, Cambridge University Press
- Robel F., Hoffmann U., Riekert A., (1978): Daten und Aussagen zum Stadtklima von Stuttgart auf der Grundlage der Infrarot Thermographie, Beiträge zur Stadtentwicklung Nr. 15, Landeshauptstadt Stuttgart
- Stadt Ingelheim am Rhein (2020): Vorhabenbeschreibung im Förderantrag „KlimPraxIng – Klimawandel in der Praxis am Beispiel der Mittelstadt Ingelheim am Rhein“
- Stadt Ingelheim am Rhein (2021): Einwohnerstatistiken, https://www.ingelheim.de/fileadmin/Content/Rathaus_Politik/Wahlen_und_Statistik/Einwohnerstatistiken/Einwohner_Stand_31.12.2021.pdf (Abruf 12/2022)

- Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz (2021): Kreisdatenprofile Kreis Mainz-Bingen. https://www.statistik.rlp.de/fileadmin/dokumente/kreisdatenprofil/ergebnisse/20220921_KRS339_Mainz-Bingen.pdf (Abruf 12/2022)
- Ssymank, A. (1994): Neue Anforderungen im europäischen Naturschutz: Das Schutzgebietssystem Natura 2000 und die FFH-Richtlinie der EU. – Natur und Landschaft 69 (Heft 9): 395-406
- Topographic Map: Deutschland, <https://de-de.topographic-map.com/maps/649q/Deutschland/> (Abruf: 08/2022)
- Unger, J. und Gál, T. (2009): Detection of ventilation paths using high resolution roughness parameter mapping in large urban areas. Building and Environment 44, 198-206
- University of Reading (2022): Show Your Stripes – Warming Stripes 1881 bis 2021, Online-Quelle URL: <https://showyourstripes.info/s/europe/germany/bayern>
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2003): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1
- VM BW (Hrsg.) (2012): Städtebauliche Klimafibel – Hinweise für die Bauleitplanung, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg
- Weather Base (o.J.): Paris, France. Online verfügbar unter: <http://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=94170&cityname=Paris-Ile-de-France-France> (Abruf 10/2022)

10.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Klimaebenen im typischen Planungskontext. Je nach klimatischer Ebene unterscheiden sich Einflussgrößen, Fragestellungen, Bezugsraum und Anwendungsmöglichkeiten.	11
Abbildung 2: Darstellung der typischen Temperaturentwicklungen (nicht während einer Hitzewelle) am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit von der Umgebung. Die orangen Graphen stellen die Oberflächen- (durchgehend) und Lufttemperaturen (gestrichelt) am Tag dar, die blauen Graphen beide Temperaturen bei Nacht. Hierbei zeigt sich deutlich die unterschiedliche Wärmespeicherkapazität verschiedener Materialien oder Objekte. Am Tag steigt die Temperatur des Teichwassers (Pond) kaum bzw. nur sehr langsam an, auf Grund der guten Wärmespeicherkapazität des Wasserkörpers fällt sie in der Nacht, ohne Strahlungseintrag, aber auch nicht bzw. nur kaum ab. Ein gegensätzliches Beispiel stellen Industrieanlagen oder -hallen (Warehouse or Industrial) dar. I.d.R. bestehen die Dächer dieser Bauten aus Metall und erhitzen sich am Tag, bei Strahlungseintrag, sehr stark. Nachts kühlen sie sich dagegen recht schnell ab, u.a. auch weil die Gebäude keine Massivbauten sind und keine große Masse besitzen (EPA 2008).....	13
Abbildung 3: Schematische Darstellung unterschiedlicher temperaturrelevanter Faktoren und Effekte im urbanen Raum, die zur Ausprägung der städtischen Wärmeinsel beitragen (DWD 2017).....	13
Abbildung 4: Darstellung der Zirkulation von Hang- (helle Pfeile) sowie Berg- und Talwinden (dunkle Pfeile) in Abhängigkeit zur Tageszeit (Liljequist und Cihak 1979).....	15
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Windprofile über dem Stadtkern, dem Stadtrand, dem freien Land (Robel et al., 1978).....	16
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Beeinflussung des log. Windprofils im urbanen Bereich. Z_0 beschreibt die Rauigkeitslänge in Metern, Z_d die Nullpunktverschiebung in Metern, u_z die Windgeschwindigkeit (blauer Pfeil mit gleicher Geschwindigkeit, aber auf unterschiedlicher Höhe = vertikale Streckung des Profils) und den Raum unterhalb der mittleren Gebäude-höhe (UC).....	18
Abbildung 7: Darstellung unterschiedlicher Strömungsregime (isolierte Rauigkeitsströmung (a), Wirbelüberlagerungsströmung (b) und die abgehobene Strömung (c)) (nach Oke 1988, basierend auf Daten von Hussain und Lee 1980).....	20
Abbildung 8: Darstellung eines Flurwindsystems am Beispiel des Stadt-Umland-Windsystems. Während einer strahlungsarmen Nacht steigen die wärmeren "Stadtluft"-Massen auf (geringere Dichte) um nach Abkühlung (höhere Dichte) wieder abzusinken. Zusammen mit den nach Sonnenuntergang entstehenden Kaltluftmassen des ruderalen Raums etabliert sich so ein sensibles Flurwindsystem (Sogwirkung durch den Luftdruckgegensatz).....	23
Abbildung 9: Der den Kaltluftabfluss querenden Damm mit Straße (links) wird zum Hindernis und blockiert bzw. staut den Kaltluftstrom auf. Die den Kaltluftabfluss querende Brücke mit Straße (rechts) bremst bzw. staut den Kaltluftstrom nicht (VM BW 2012).	23
Abbildung 10: Die unterschiedlichen Planungsebenen mit ihrem administrativen Bezug sowie den korrespondierenden klimatischen Fragestellungen und den möglichen Auflösungen.	25

- Abbildung 11: Schematische Darstellung der grundsätzlichen Herleitung von KFK und PHK. Die Eingangsdaten bilden diskrete stadt- und landschaftsplanerische Informationen ab, die Themenkarten repräsentieren (klimarelevante) räumliche Ableitungen.29
- Abbildung 12: Vier Themenkartengruppen (links) mit deren Hilfe unterschiedlichste klimatische Informationen (rechts) für den Untersuchungsraum dargestellt werden können.....29
- Abbildung 13: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines GIS. Unterschiedlichste Eingangsdaten (Raster- oder Vektordaten) können miteinander verschnitten und analysiert werden, um ein möglichst genaues digitales Abbild der Realität zu schaffen.30
- Abbildung 14: Topographisches Profil der Stadt Ingelheim am Rhein und der näheren Umgebung. Die weiß-roten Bereiche stellen die Höhenzüge („Mainzer Berg“ 247,8 m ü. NN, östlich und „Westerberg“ 247,5 m ü. NN, westlich der „Selz“) und die türkis-blauen Bereiche die Niederungen des Rheins (rd. 80 m ü. NN) dar.33
- Abbildung 15: Lage der Stadt Ingelheim am Rhein (hellblauer Marker) im Kontext der naturräumlichen Großregionen Deutschlands nach Meynen und Schmithüsen (2012).34
- Abbildung 16: Lage der Stadt Ingelheim am Rhein (schwarzer Marker) im Kontext der der Großlandschaften nach Ssymank et al (1994).....35
- Abbildung 17: Schutzgebiete im Bereich Ingelheim am Rhein (schwarze Linie). (Rot eingefärbt = NSG; Grün punktiert = LSG; Rot schraffiert = FFH-Gebiet; Blau schraffiert = Vogelschutzgebiet) (BfN 2022).37
- Abbildung 18: Ausschnitt zur Übersichtskarte „klimatischen Gliederung Deutschland“ (Hendl und Endlicher 2003). Die Stadt Ingelheim am Rhein (Marker) liegt in einer Zone des submaritimen Klimas und am Rand eines niederschlagsbenachteiligten Bereichs (rote Punkte, < 600 mm/Jahr)38
- Abbildung 19: Ausgewählte Rasterzelle der Datensätze zur Temperatur und Niederschlag sowie der Ereignistage39
- Abbildung 20: Wetterstation 01580 Geisenheim. Die Windmessungen der Station wurden für die Auswertung des langjährigen Mittels der Windstärke und der Windrichtung in Abhängigkeit der Tages- bzw. Nachtzeit sowie der Jahreszeiten herangezogen.48
- Abbildung 21: Übersicht zur ganzjährigen durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 3,12 m/s bzw. 4,44 m/s in der Region Ingelheim am Rhein (3 km x 3 km) auf einer Höhe von 10 m (links) bzw. 50 m (rechts) ü. Grund (GWA 2022). Deutlich ist der aus Süden kommende Verlauf des Selz-Tals, flankiert von den kleineren Höhenzügen zu erkennen.....53
- Abbildung 22: Darstellung der ganzjährigen Anströmung (nicht die Windstärke) auf einer Höhe von 10 m ü. Grund für Ingelheim am Rhein (GWA 2022).53
- Abbildung 23: Übersicht Themenkarte "Landnutzung". Unterschiedlich stark verdichtete Siedlungsbereich werden in abgestuften Rottönen dargestellt, Industrie- und Gewerbeflächen in Violett. Mit hoher Vegetation bestandene Bereiche werden in unterschiedlichen Grün- bzw. Orangetönen und Offenlandbereiche gelblich wiedergegeben.56

- Abbildung 24: Detailansicht Themenkarte "Landnutzung" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Zentral von West nach Ost verläuft die „Binger Str.“ durch stark verdichtete Siedlungsbereiche sowie Industrie- und Gewerbeflächen bzw. öffentliche Einrichtungen (violett). Nördlich der Bahnstrecke dominieren die Industriefläche von „Boehringer Ingelheim“. Vegetationsbezogene Flächen (Grüntöne) sind spärlich im Zentrum vorhanden, wie bspw. der „Friedhof Nieder-Ingelheim“ oder weiter östlich, südlich der Wilhelm-von-Erlanger-Straße57
- Abbildung 25: Übersicht Themenkarte "Topographie". Deutlich erkennbar ist das Richtung Süden ansteigende Geländeprofil, welches nur durch die Schneise entlang der L 422 bzw. dem Bachlauf der „Selz“ unterbrochen wird.....58
- Abbildung 26: Detailansicht Themenkarte "Topographie" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Das Geländeprofil steigt von Nordwesten Richtung Südosten stetig an. Im Bereich der Detailansicht liegt die Geländehöhe ungefähr zwischen 90 m und 115 m über NHN.59
- Abbildung 27: Prinzip des SkyView Faktors (SVF). Je stärker das Sichtfeld, z.B. durch umgebende Bebauung eingeschränkt ist, desto niedriger ist der SVF.....60
- Abbildung 28: Übersicht Themenkarte "Bauliche und räumliche Offenheit". Der SkyView-Faktor ist eine dimensionslose Größe und wird in Werten zwischen 0 und 1 wiedergegeben. Werte um den Bereich 1 (hellorange bis durchsichtig) stellen eine baulich und räumliche Offenheit von fast 100 % dar. Rot und bis ins Blaue dargestellte Bereiche haben eine sehr niedrige baulich und räumliche Offenheit.....61
- Abbildung 29: Detailansicht Themenkarte "Bauliche und räumliche Offenheit" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Dieser Innenstadtbereich, besonders entlang der „Binger Str.“ und im Kreuzungsbereich mit der „Bahnhofsstr.“ ist auf Grund seiner dichten Bebauung von einem sehr niedrigen SVF (rot bis blau) geprägt62
- Abbildung 30: Übersicht Themenkarte "Bauvolumendichte". Die Bauvolumendichte beschreibt die Dichte der Bebauung im dreidimensionalen Raum. Eine hohe Bauvolumendichte wird in Rot-Tönen dargestellt, während eine geringe Bauvolumendichte in hellen Gelb-Tönen erscheint.63
- Abbildung 31: Detailansicht Themenkarte "Bauvolumendichte" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Hohe Werte für die Bauvolumendichte konzentrieren sich zwischen dem nördlichen Teil der „Bahnhofsstraße“ und der „Gartenfeldstr.“ bzw. „Konrad-Adenauer-Str.“ sowie nördlich der Bahntrasse auf dem Gelände von „Boehringer Ingelheim“64
- Abbildung 32: Übersicht Themenkarte "Vegetationserfassung". Zusätzlich zu den offiziellen vegetationsbehafteten Nutzungsklassen des Urban Atlas (2018) wurden vitale Vegetationsstrukturen über die Analyse von Nah-Infrarotluftbilder identifiziert, um das gesamte Grünvolumen des Untersuchungsraums zu erfassen.....65
- Abbildung 33: Detailansicht Themenkarte "Vegetationserfassung" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Vegetation, welche über die NDVI-Methode erfasst wurde (hierzu zählt auch das private Grün) erscheint in blass grün. Seitens der Stadt wurden zusätzlich Friedhöfe (grüne Schraffur) und Park- bzw. Grünanlagen (grün gepunktet) benannt. Hellgrüne und türkisgrüne Flächen entstammen dem Urban Atlas (2018) und sind dort als städtische Grünflächen bzw. Sport- und Freizeitanlagen klassifiziert.66

- Abbildung 34: Übersicht Themenkarte "Städtische Durchgrünung auf Flurstücksebene". Entsprechend dem analysierten Durchgrünungsgrad werden die Flurstücke in unterschiedlichen Farben dargestellt. Blass gelb steht für eine Durchgrünung von weniger als 10 %. Vegetationsdominierte Flächen im Außenbereich werden im Kontext der prozentualen Durchgrünung nicht aufgeschlüsselt und automatisch der Klasse 91 % bis 100 % zugeteilt. 68
- Abbildung 35: Detailansicht Themenkarte "Städtische Durchgrünung auf Flurstücksebene" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Je dunkler die Grünfärbung, desto höher der Durchgrünungsgrad des Flurstücks. Defizitäre Bereiche mit unter 20% Durchgrünung finden sich in den östlichen Teilen des Industriegebietes „Auf dem Gänsberg“ / „Am Gebrannten Hof“ sowie in der „Neuen Mitte“. 69
- Abbildung 36: Übersicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 15min. Simulationszeit". Das bodennahe nächtliche Windfeld ist zu Beginn der Nacht im Außenbereich noch sehr heterogen ausgeprägt und weist auch durchgängig Windgeschwindigkeiten > 0,1m/s auf. Eine deutliche Kaltluftschicht ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorhanden. 73
- Abbildung 37: Detailansicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 15min. Simulationszeit" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Zu diesem Zeitpunkt existieren noch keine Kaltluftschichten im Innenstadtbereich. 73
- Abbildung 38: Übersicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 2Std. Simulationszeit". Das bodennahe nächtliche Windfeld wird zunehmend homogener, während eines gleichzeitigen Rückgangs der Windgeschwindigkeiten. Die Tal- und Senkenbereiche füllen sich zunehmend mit im Offenland entstehender Kaltluft. 74
- Abbildung 39: Detailansicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 2Std. Simulationszeit" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". 74
- Abbildung 40: Auszug aus der Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 4Std. Simulationszeit". Die rheinnahen Siedlungsräume verfügen mittlerweile eine Kaltluftschichtdicke von rd. 50 m. Das Windfeld beruhigt sich zunehmend..... 75
- Abbildung 41: Detailansicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 4Std. Simulationszeit" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Die Kaltluftschichtdicke steigt im Innenstadtbereich weiter an. 75
- Abbildung 42: Auszug aus der Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 8Std. Simulationszeit". Am Ende der Simulationsnacht liegt die Kaltluftschichtdicke in den rheinnahen Bereichen bei rd. 100 m..... 76
- Abbildung 43: Detailansicht Themenkarte "Nächtliche Kaltluftproduktion und Kaltlufttransport nach 8Std. Simulationszeit" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Am Ende der Simulationsnacht liegt die Kaltluftschichtdicke im Innenstadtbereich bei rd. 80 bis 90 m. 76
- Abbildung 44: Übersicht Themenkarte "Bodennahe Lufttemperatur in °C (nachts)". Der Detailraum sowie die beiden „Gewerbe- und Industriegebiete“ stellen die großflächigsten Areale mit den höchsten Lufttemperaturen von $\geq 23^{\circ}\text{C}$ im städtischen Raum dar. 78

- Abbildung 45: Detailansicht Themenkarte "Bodennahe Lufttemperatur in °C (nachts)" - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Der innerstädtisch verdichtete Raum im Zentrum stellt den Temperatur-Hotspot mit gut 23 °C dar..... 79
- Abbildung 46: Übersicht Klimafunktionskarte (KFK). Der Untersuchungsraum wird hierbei in sechs unterschiedliche Klimatope unterteilt, deren Übergänge aber fließend sind. Drei Klimatope beschreiben den unbebauten Raum, während die übrigen drei Klimatope den bebauten Raum beschreiben..... 82
- Abbildung 47: Detailansicht der Klimafunktionskarte - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Wichtige Durchlüftungsachsen werden mit schwarzen Pfeilen dargestellt, die kleineren Vektorpfeile symbolisieren das mittlere nächtliche Strömungsfeld. Die zusätzliche Punktierung des Kaltluftklimatops im südöstlichen Bereich kennzeichnet einen besonders starken Kaltluftabfluss. 83
- Abbildung 48: Darstellung der normalisierter Ergebnisdatensätze beider Ansätze im Vergleich..... 86
- Abbildung 49: Übersicht Planungshinweiskarte (PHK). Zusätzlich zur Landnutzung und dem mittleren nächtlichen Strömungsfeld werden Räume mit klimatischer Funktion (speziell Kaltluft) sowie klimatisch defizitäre Räume mit Handlungsbedarf dargestellt..... 90
- Abbildung 50: Detailansicht der Planungshinweiskarte - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Das Rautenmuster markiert Räume mit besonderer Kaltluftfunktion im Siedlungsraum (türkis) bzw. Freiraum (hellblau) sowie einem dominanten Kaltluftabfluss (dunkelblau). Klimatisch defizitäre Räume mit Handlungsbedarf sind ebenfalls markiert: Defizitäre Vegetationsausstattung (orange gepunktet), Räume mit erhöhter baulicher Dichte (rosa) und Räume mit stärksten Überwärmungspotential (braun)..... 91
- Abbildung 51: In der Maßnahmenhinweiskarte werden für die unterschiedlichen Maßnahmengruppen Räume und Bereiche dargestellt, in denen zukünftig spezifische Klimawandelanpassungsmaßnahmen durchgeführt werden können. Diese Räume wurden unter anderem über die Auswertung der unterschiedlichen Themenkarten, der Klimafunktionskarte sowie der stadtklimatischen Gegebenheiten abgeleitet und identifiziert. 94
- Abbildung 52: Detailansicht Maßnahmenhinweiskarte - Kernbereich von "Ingelheim am Rhein". Die Maßnahmengruppe „Kaltluftfräumer“ wird über ein Rautenmuster dargestellt, die Gruppe „Thermischer Belastungsraum“ über Quadrate (rot und orange). Räume mit Vegetationsdefiziten werden mittels enger Punktierung (hellgrün) abgebildet. 95
- Abbildung 53: Exemplarische Darstellung für eine Berechnung des Thermischen Komforts im Bereich des Planungsraums der Präsident-Mohr-Grundschule. Bei den hellgrau dargestellten Gebäudekörpern handelt es sich um die angenommene Planung, die Bestandsbauten sind schwarz dargestellt. . 97
- Abbildung 54: Exemplarische Darstellung für eine Berechnung der Anzahl der direkten Sonnenstunden für den 21. Juni für zwei unterschiedliche Ausstattungsvarianten (rechts mit fünf zusätzlichen Bäumen als Verschattungselemente)..... 97
- Abbildung 55: Wege- und straßengebundene Netzwerkanalyse von potentiellen lokalklimatischen Ausgleichsflächen (Parks, Friedhöfe und Spielplätze). Die fußläufige Erreichbarkeit wurde auf eine

Entfernung von maximal fünf Gehminuten (3 km/h) berechnet und gestaffelt bis eine Gehminute dargestellt.....	98
Abbildung 56: Erreichbarkeit von Spielplätzen der Stadt Ingelheim am Rhein. Die fußläufige Erreichbarkeit wurde auf eine Entfernung von maximal fünf Gehminuten (3 km/h) berechnet und gestaffelt bis eine Gehminute dargestellt.	99

10.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele für typische Einflüsse (linke Spalte) und deren (Aus-)Wirkungen (rechte Spalte) im städtischen Raum.....	10
Tabelle 2: Beispiele für Z_0 und Z_d für unterschiedliche Oberflächen (nach Oke 2017).....	18
Tabelle 3: Zuordnung unterschiedlicher Höhen-Weiten-Verhältnisse zu den entspr. Strömungsregimen	20
Tabelle 4: Zusammenstellung verschiedener Kaltluftentstehungsraten aus unterschiedlichen Studien in Abhängigkeit zur Art des Untergrunds (k. A. = keine Angaben).....	22
Tabelle 5: Vier grundlegende Aspekte und deren Ursprung bzw. ihren Abhängigkeiten, die zur Bewertung der Klima-funktionen herangezogen werden.....	26
Tabelle 6: Differenzbewertung der monatlichen Durchschnittstemperaturen [$^{\circ}\text{C}$] von den unterschiedlichen 30jährigen Mitteln. Innerhalb eines Vergleichs (Zeile), z.B. (1) zu (4) zeigt die zunehmende Farbintensität die größte Differenz an. Im genannten Vergleich ist die monatliche Durchschnittstemperatur [$^{\circ}\text{C}$] im April um $+1,7^{\circ}\text{C}$ am stärksten angestiegen, gefolgt vom Monat Juni mit $+1,6^{\circ}\text{C}$	40
Tabelle 7: Differenzbewertung der monatlichen Niederschlagssummen [mm] von den unterschiedlichen 30jährigen Mitteln. Innerhalb eines Vergleichs (Zeile), z.B. (1) zu (4) zeigen Grüntöne eine Erhöhung des Niederschlags im letzten 30jährigen Mittel, während Rottöne eine Abnahme anzeigen.....	42
Tabelle 8: Ereignistage zur Lufttemperatur und die dazugehörigen Definitionen	43
Tabelle 9: Zeitliche und saisonale Grenzwerte der Datenauswertung der DWD-Station	48
Tabelle 10: Ergebnisübersicht zur Auswertung der zeitlichen und saisonalen Windverhältnisse. Hierbei sind, besonders für die Nacht, die orographischen Einflüsse auf den Standort der Station in Geisenheim zu beachten.....	48
Tabelle 11: Übersicht zu den einzelnen Themenkarten in den entsprechenden Kategorien	54
Tabelle 12: Übersicht zu den unterschiedlichen Klimatopen mit ihren grundsätzlichen Charakteristika	82
Tabelle 13: Übersicht zu den vier unterschiedlichen Maßnahmengruppen mit allgemeinen Umsetzungsbeispielen. Die identifizierten Räume bzw. Bereiche zu den unterschiedlichen Maßnahmengruppen werden in der Maßnahmenhinweiskarte dargestellt.....	93

10.5 Diagrammverzeichnis

- Diagramm 1: Darstellung der monatlichen Durchschnittstemperatur [°C] in einer Höhe von 2 m über Grund für unterschiedliche 30jährige Mittel. (1) 1962 bis 1991 (graue), (2) 1972 bis 2001 (blau), (3) 1982 bis 2011 (grün) und (4) 1992 bis 2021 (orange). Deutlich erkennbar ist ein Anstieg der Monatsmittelwerte zur Lufttemperatur seit 1962. Eine größere Darstellung des Diagramms ist im Anhang zu finden.....40
- Diagramm 2: Darstellung der 30-jährigen Mittel der Monatssummen zum Niederschlag [mm]. Darstellung der monatlichen Niederschlagssummen für unterschiedliche 30jährige Mittel. (1) 1962 bis 1991 (graue), (2) 1972 bis 2001 (blau), (3) 1982 bis 2011 (grün) und (4) 1992 bis 2021 (orange). Auffällig ist eine zunehmende Abnahme der Niederschläge in den Monaten März bis Juni und September. Eine größere Darstellung des Diagramms ist im Anhang zu finden.....41
- Diagramm 3: Darstellung der jährlichen Anzahl der Sommertage (LT Max. ≥ 25 °C, gelbe Linie) und Heißen Tage (LT Max. ≥ 30 °C, rote Linie) seit 1951 bis 2021. Die jeweiligen Trendlinien sind gepunktet dargestellt, verzeichnen aber für beide Ereignistage einen Anstieg. Eine größere Darstellung des Diagramms ist im Anhang zu finden.44
- Diagramm 4: Darstellung der jährlichen Anzahl der Frosttage (LT Min. < 0 °C, blaue Linie) und der Eistage (LT Max. < 0 °C, violette Linie) seit 1951 bis 2021. Die jeweiligen Trendlinien sind gepunktet dargestellt, verzeichnen aber für beide Ereignistage einen Abfall. Eine größere Darstellung des Diagramms ist im Anhang zu finden.44
- Diagramm 5: Anzahl der jährlichen Tage mit Niederschlagsmengen ≥ 20 mm (hellblau) und ≥ 30 mm (orange) innerhalb von 24Stunden seit 1951 bis 2021. Die dargestellte Anzahl der Tage ist nicht automatisch mit Starkregenereignissen gleichzusetzen, da Starkregen laut Definition einen anderen Zeitbezug (siehe Infokasten) hat. Eine größere Darstellung des Diagramms ist im Anhang zu finden.....46
- Diagramm 6: Windstärke und Windrichtung während des Tages im Winter. Die Haupanströmungsrichtung ist Süd-Südwest mit Süd-West und Ost-Nordostkomponenten.....49
- Diagramm 7: Windstärke und Windrichtung während des Tages im Frühling. Die Haupanströmungsrichtung ist Süd-West mit Nord-Nordwest und Ostkomponenten49
- Diagramm 8: Windstärke und Windrichtung während des Tages im Sommer. Die Haupanströmungsrichtung ist Süd-West mit West und leichten Nord-Nordwest sowie Ostkomponenten.....50
- Diagramm 9: Windstärke und Windrichtung während des Tages im Herbst. Die Haupanströmungsrichtung ist Süd-Südwest mit Süd-West und Ost-Nordostkomponenten.....50
- Diagramm 10: Windstärke und Windrichtung während der Nacht im Winter. Die Haupanströmungsrichtung ist Süd-Südwest mit Süd-West und Ost-Nordostkomponenten.....51
- Diagramm 11: Windstärke und Windrichtung während der Nacht im Frühling. Die Haupanströmungsrichtung ist Süd-West mit Süd-Südwest und Nord-Nordwest- sowie Ost-Nordostkomponenten51

Diagramm 12: Windstärke und Windrichtung während der Nacht im Sommer. Die
Hauptanströmungsrichtung ist Nord-Nordwest.52

Diagramm 13: Windstärke und Windrichtung während der Nacht im Herbst. Die
Hauptanströmungsrichtung ist Nord-Nordwest und leichten Ost-Nordostkomponenten.....52

10.6 Diagramme

Diagramm 1 – Monatsmittelwerte Lufttemperatur 30-jährige Mittel

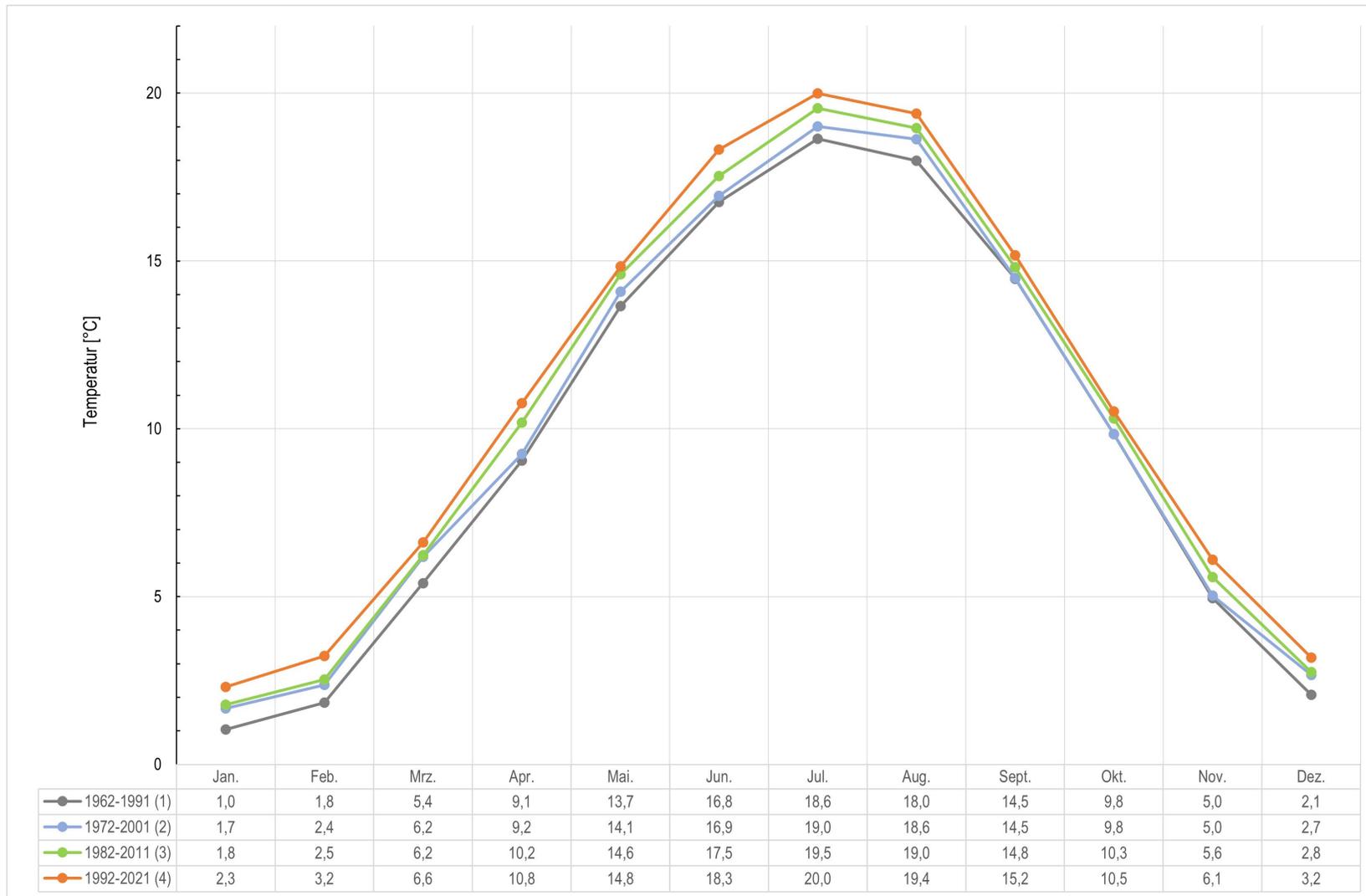


Diagramm 2 – Monatssummen Niederschlag 30-jährige Mittel

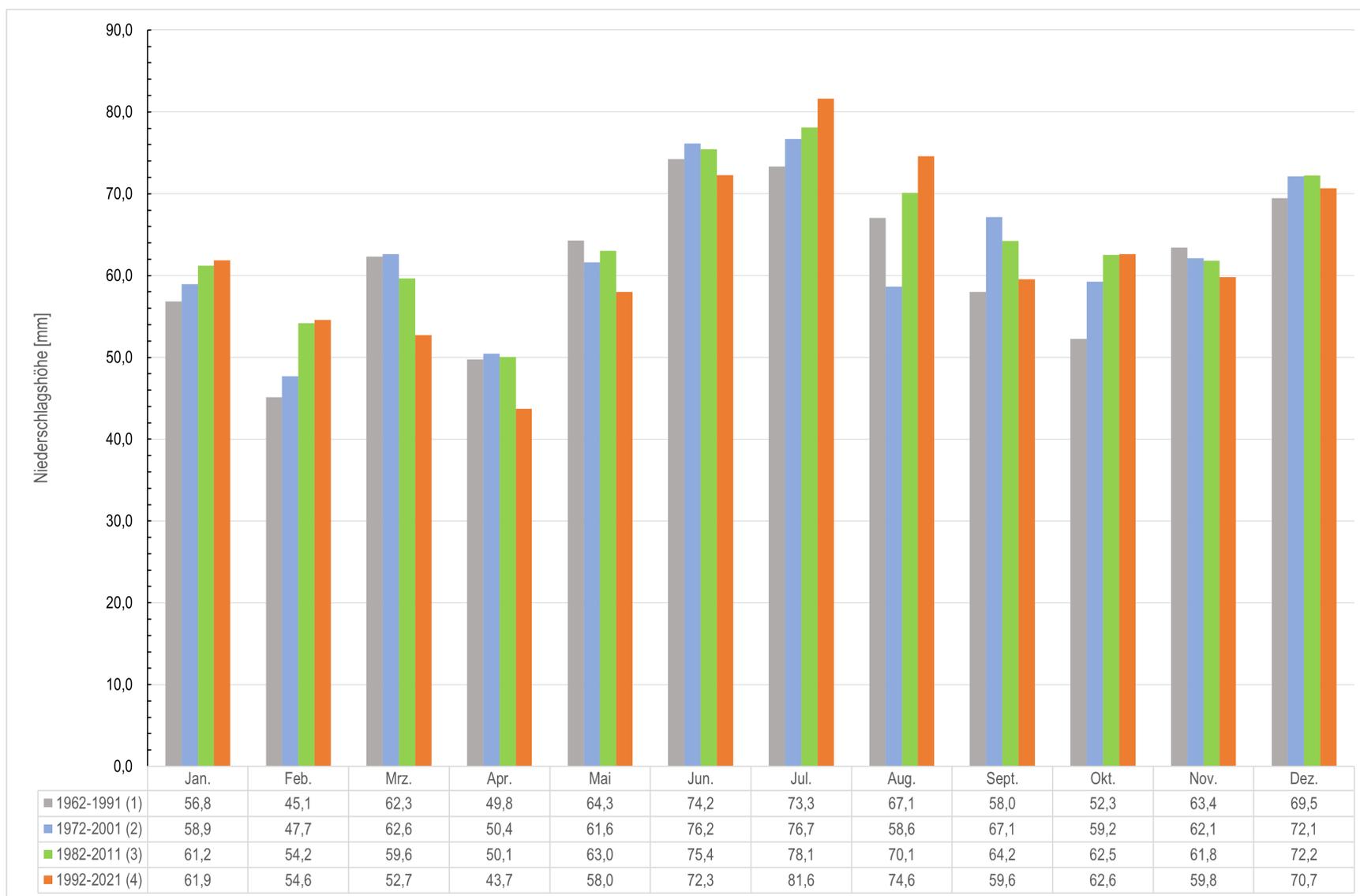


Diagramm 3 – Anzahl Sommertage und Heiße Tage

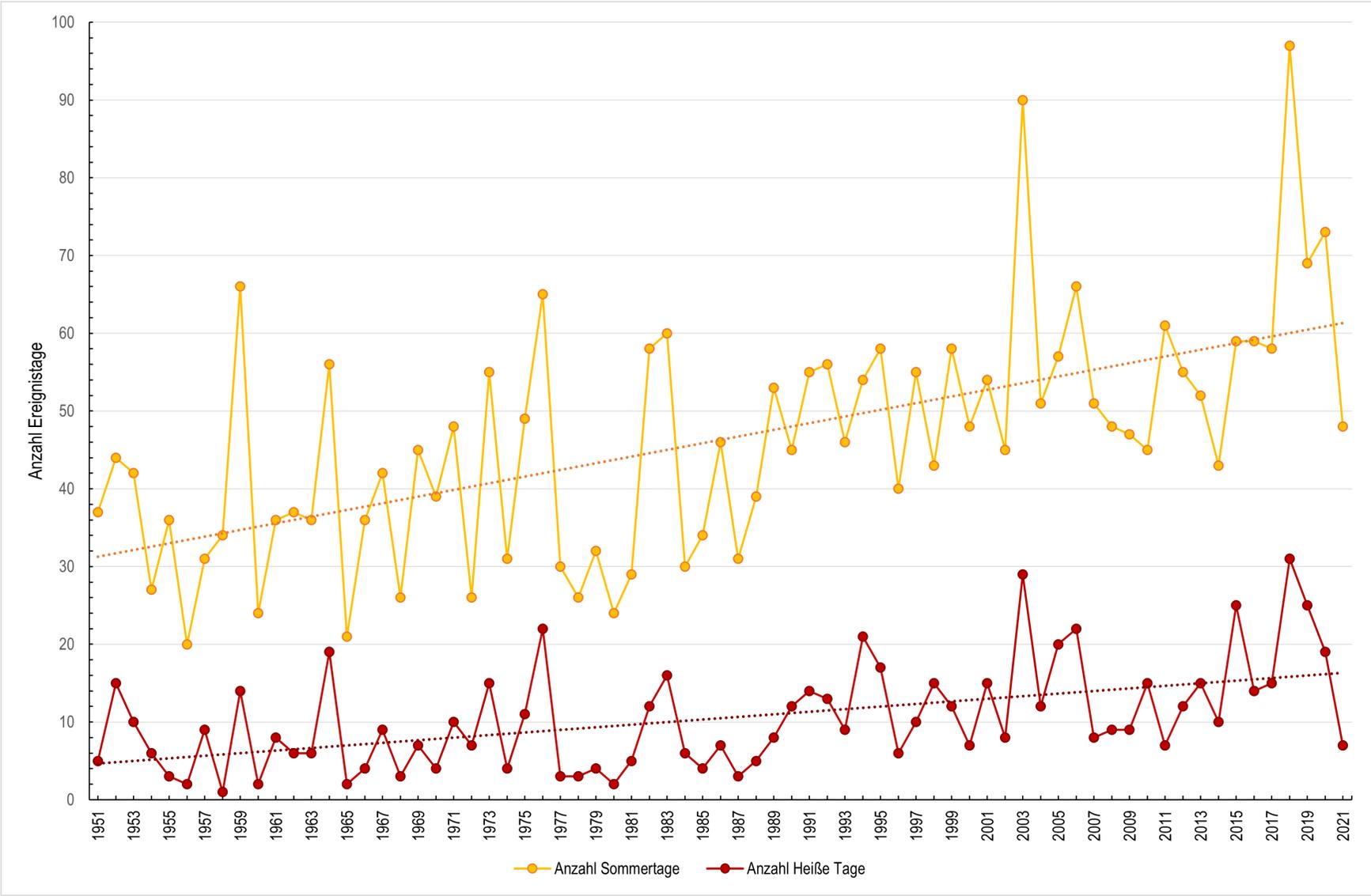


Diagramm 4 – Anzahl Frosttage und Eistage

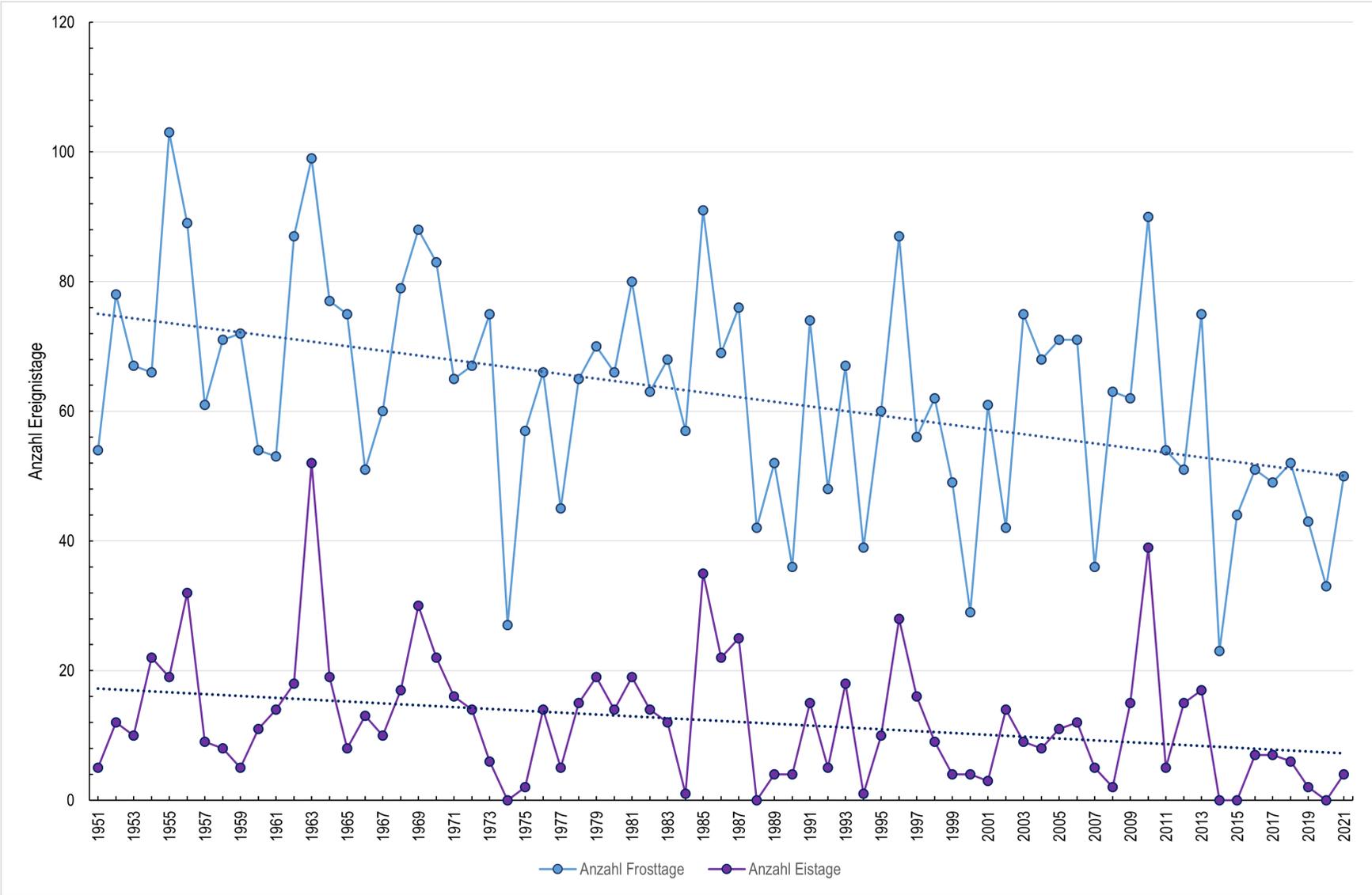


Diagramm 5 – Anzahl Tage Niederschlagsmengen >20mm und >30mm

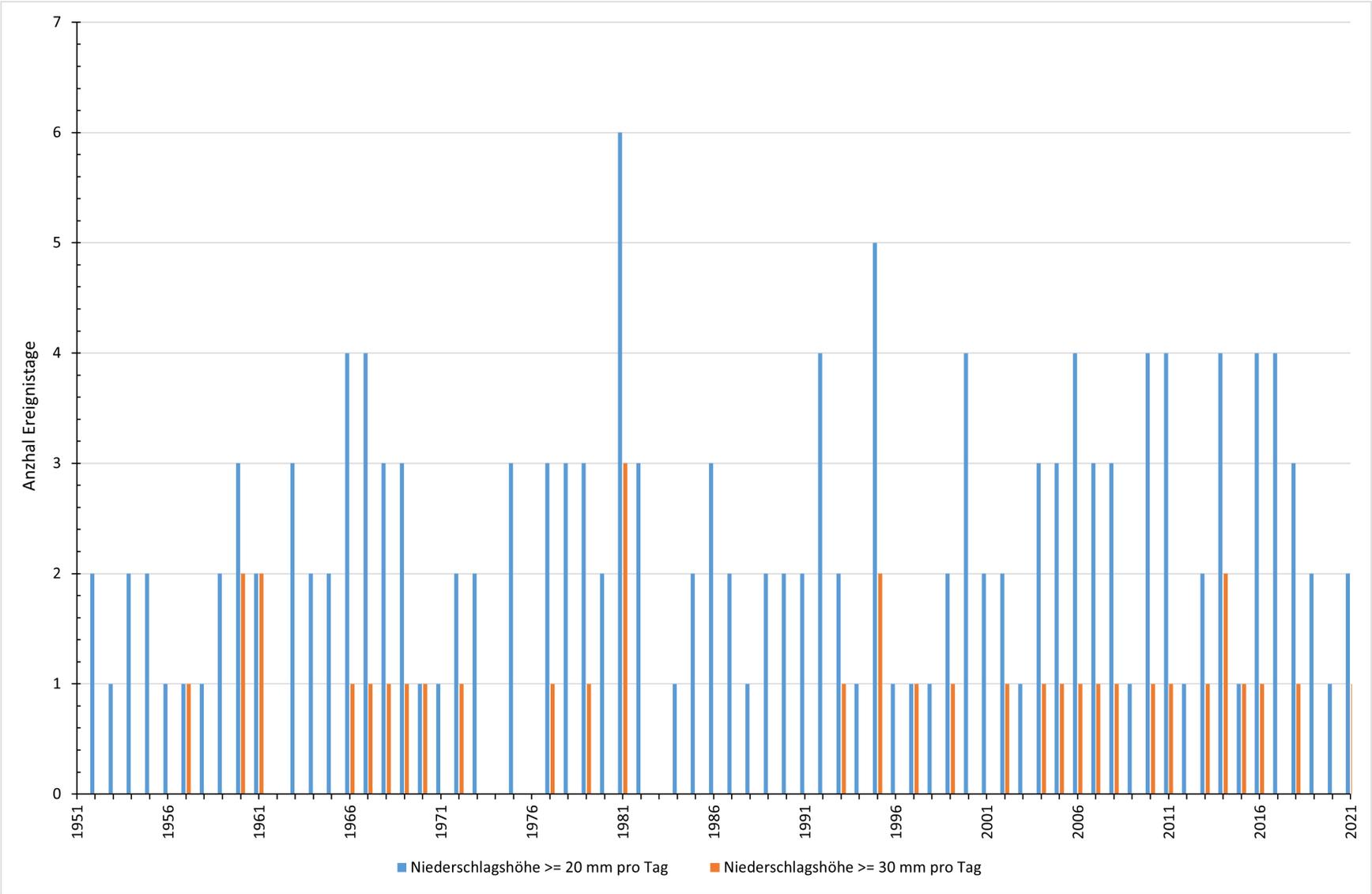


Diagramm 6 – Windstärke und Windrichtung (Tag | Winter)

Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel (1990-2020)
während des Tages für den Winter (DJF)
nach den Daten der Messstation 01580 (DWD) Geisenheim

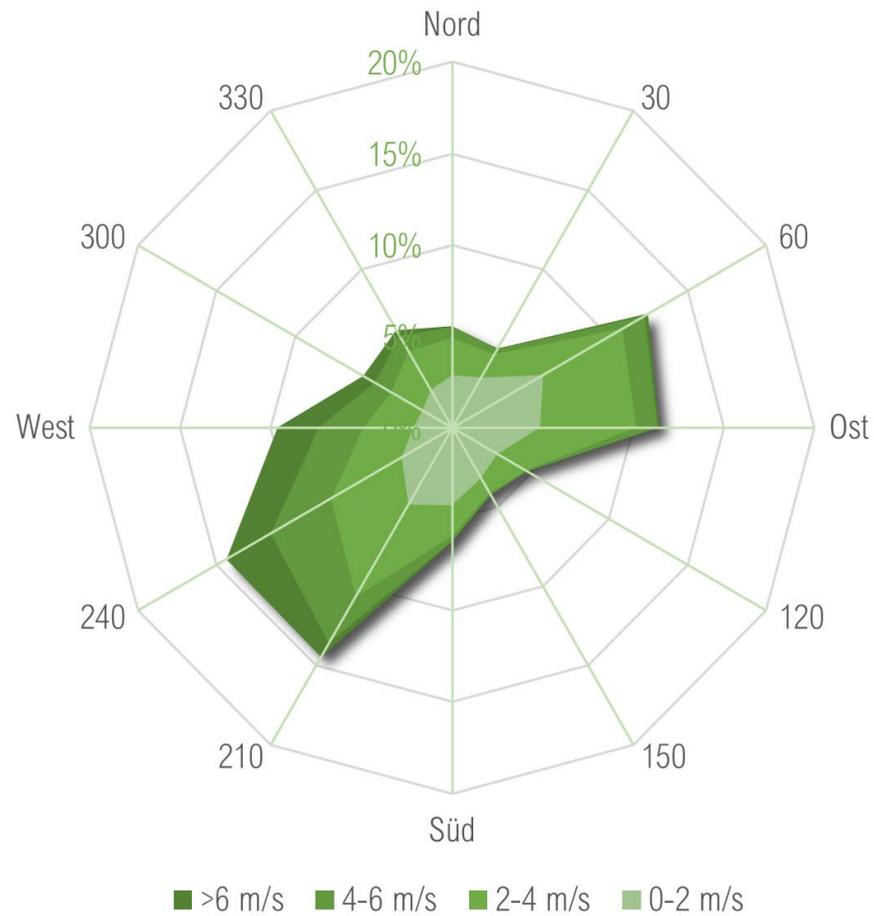


Diagramm 7 – Windstärke und Windrichtung (Tag | Frühling)

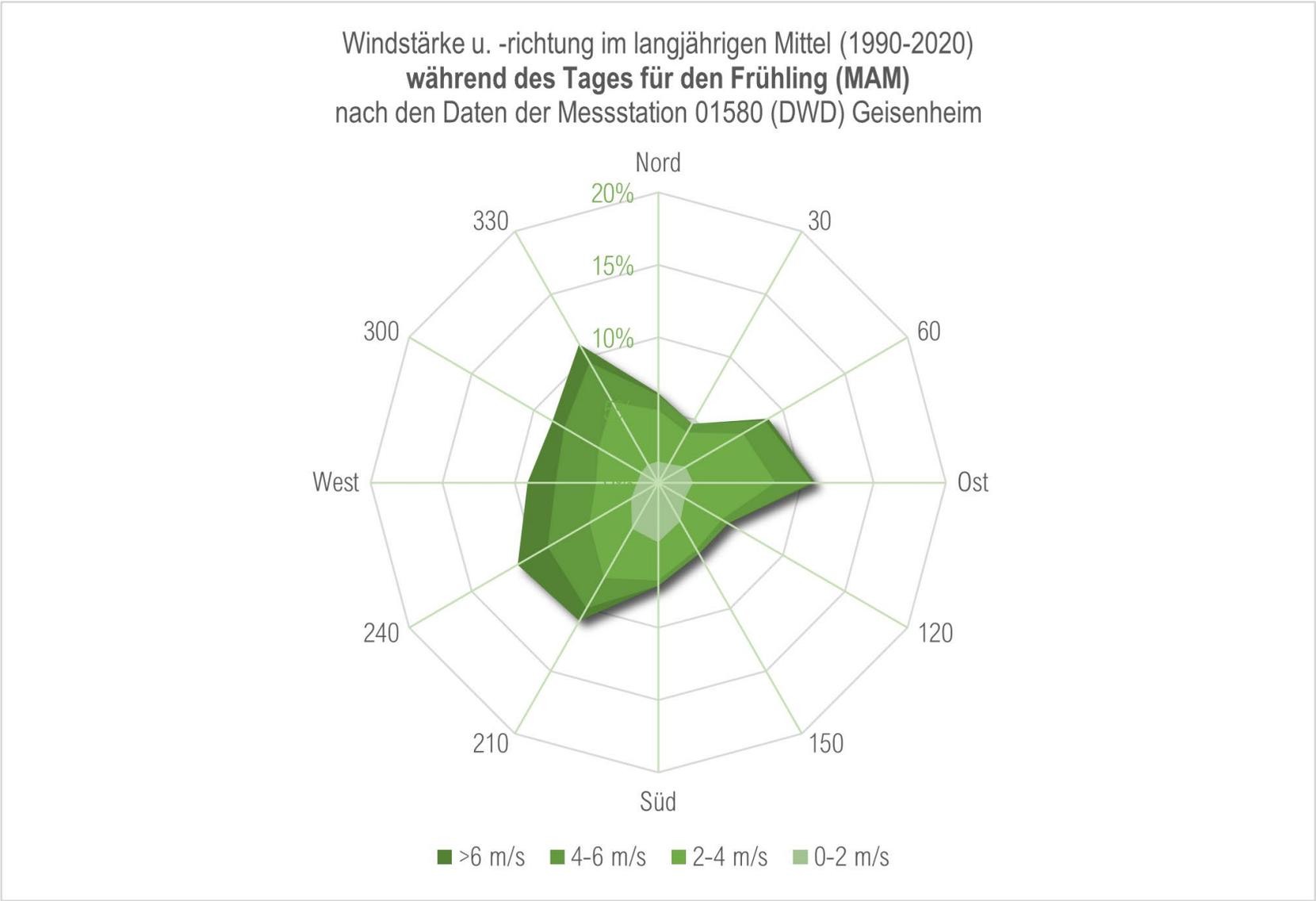


Diagramm 8 – Windstärke und Windrichtung (Tag | Sommer)

Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel (1990-2020)
während des Tages für den Sommer (JJA)
nach den Daten der Messstation 01580 (DWD) Geisenheim

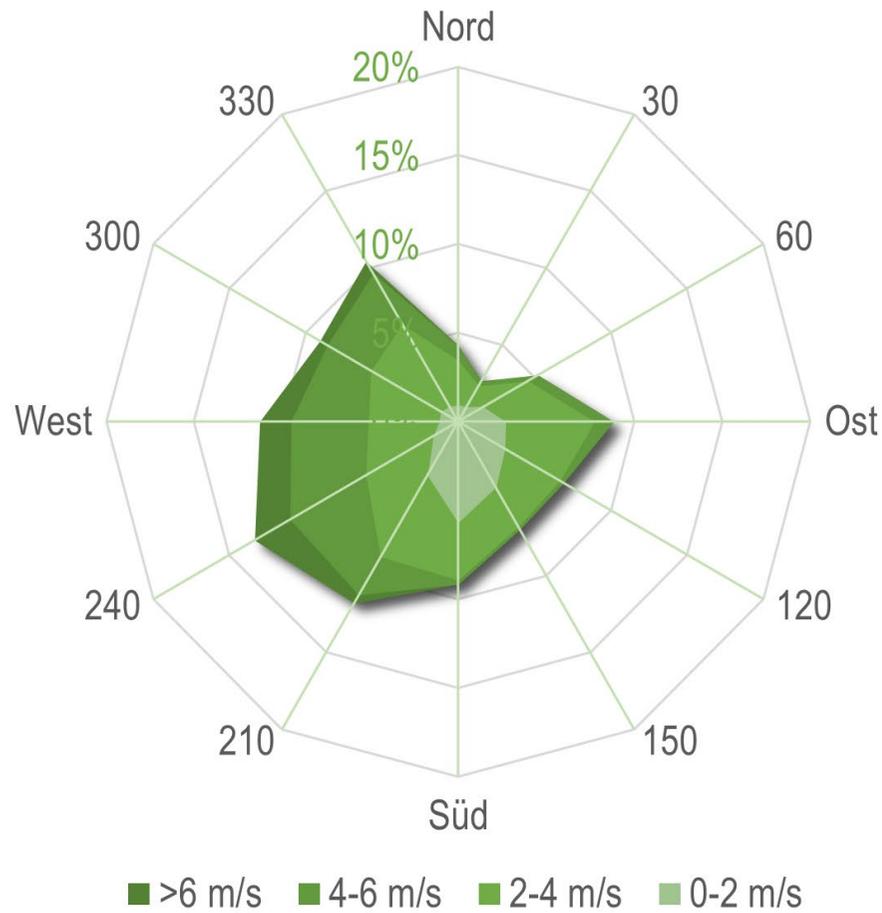


Diagramm 9 – Windstärke und Windrichtung (Tag | Herbst)

Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel (1990-2020)
während des Tages für den Herbst (SON)
nach den Daten der Messstation 01580 (DWD) Geisenheim

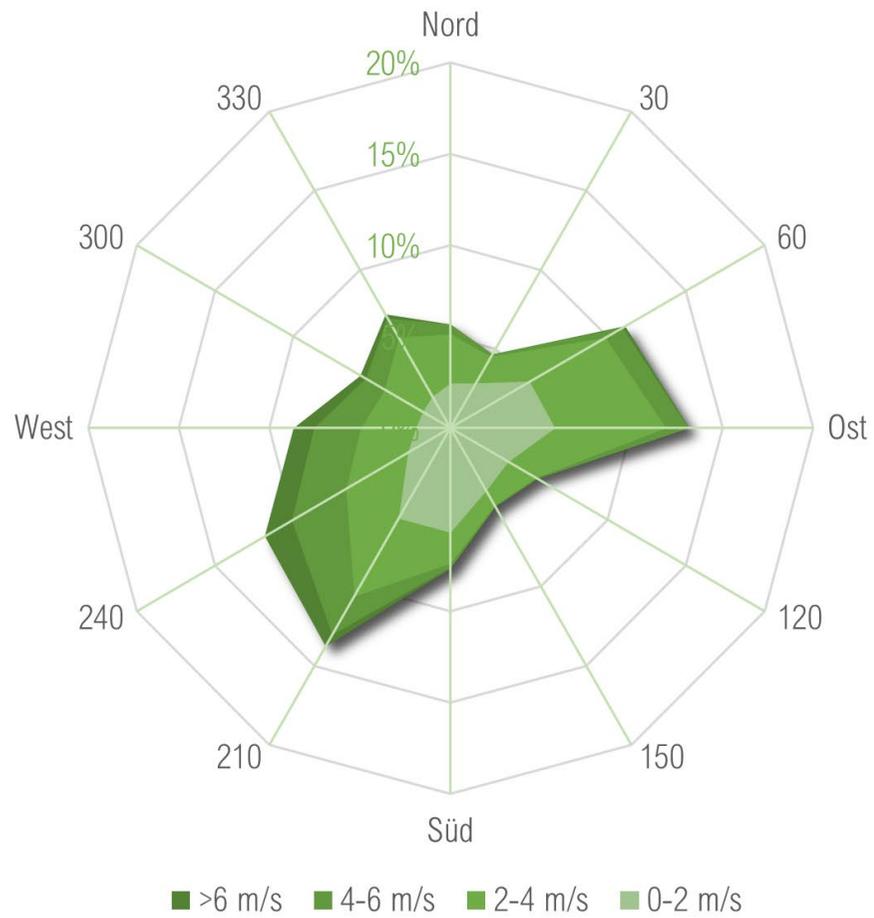


Diagramm 10 – Windstärke und Windrichtung (Nacht | Winter)

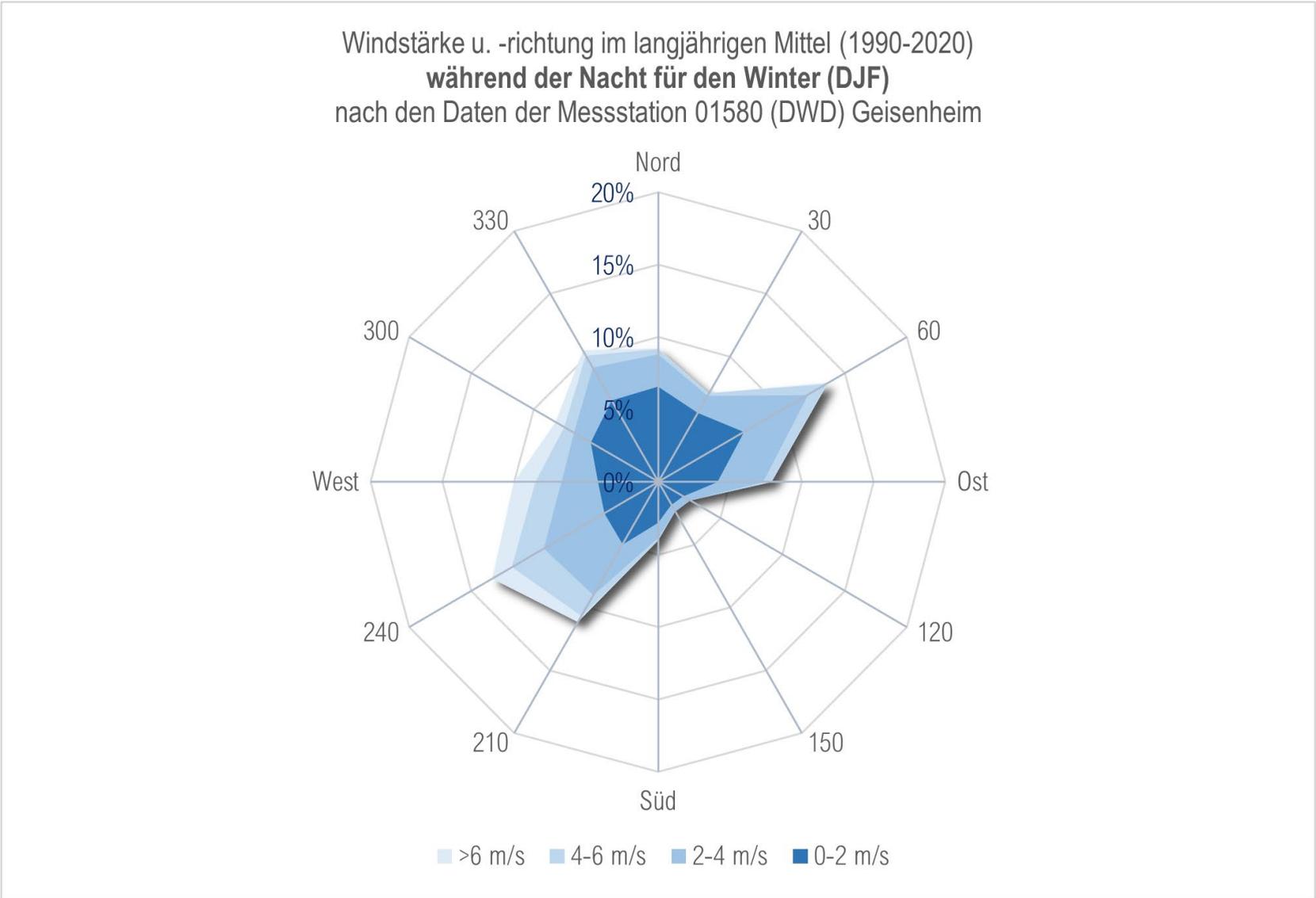


Diagramm 11 – Windstärke und Windrichtung (Nacht | Frühling)

Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel (1990-2020)
während der Nacht für den Frühling (MAM)
nach den Daten der Messstation 01580 (DWD) Geisenheim

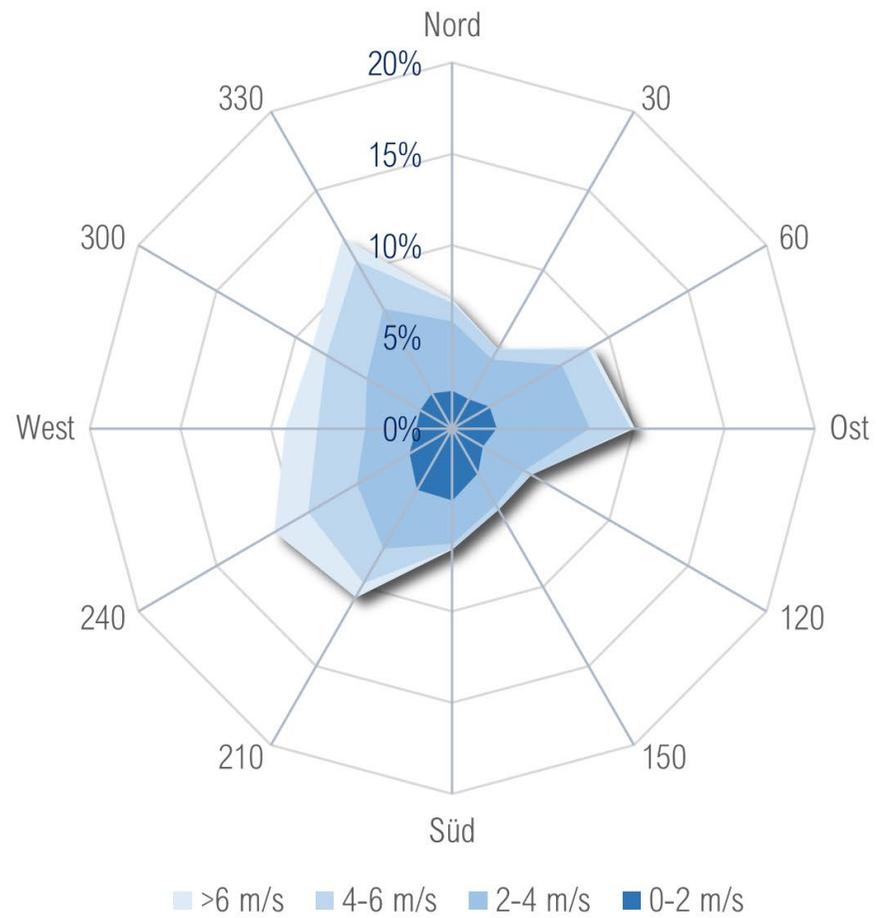


Diagramm 12 – Windstärke und Windrichtung (Nacht | Sommer)

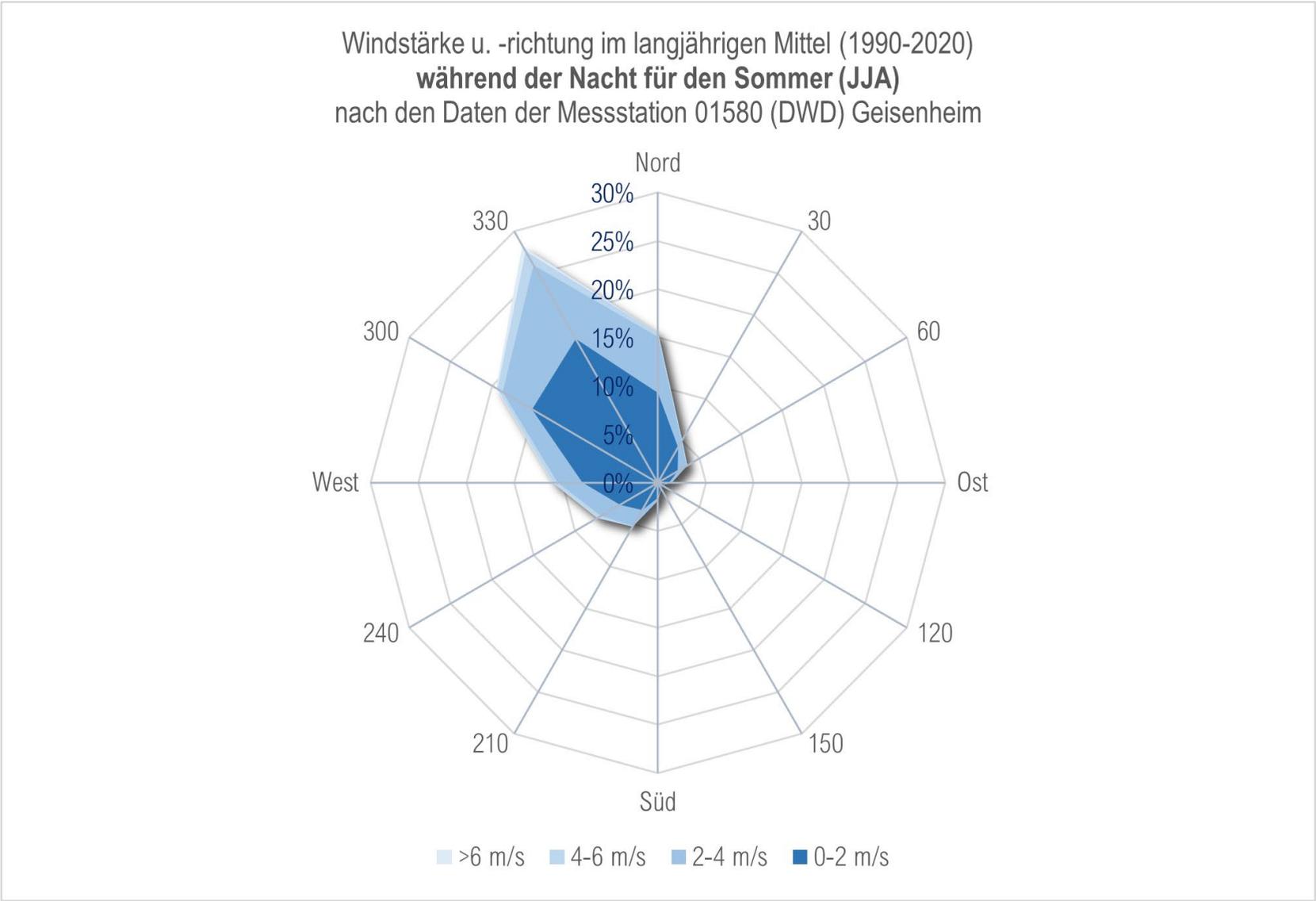


Diagramm 13 – Windstärke und Windrichtung (Nacht | Herbst)

Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel (1990-2020)
während der Nacht für den Herbst (SON)
nach den Daten der Messstation 01580 (DWD) Geisenheim

