

Endbericht
zur modellgestützten Klimaanalyse Ibbenbüren
im Kontext

**„Entwicklung eines Stadtklimamodells und
Erstellung eines Handlungsleitfadens für die Bauleitplanung
zu den Themen Klimawandel & Klimawandelfolgenanpassung
für die Stadt Ibbenbüren“**

Auftraggeber: Stadt Ibbenbüren
Alte Münsterstraße 16
49477 Ibbenbüren

Durchführung: Ingenieurbüro Rau
Bottwarbahnstraße 4
74081 Heilbronn
METCON UMB Dr. Bigalke
Jappopweg 9h
25421 Pinneberg

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	1
2	Thematische Einführung.....	2
2.1	Relevanz des Stadtklimas in der Umweltplanung.....	2
3	Untersuchungsumfang der modellgestützten Klimaanalyse.....	5
4	Recherche und Auswertung vorhandener Klimadaten.....	7
4.1	Lageüberblick und Charakteristik.....	7
4.2	Allgemeine klimatische Situation.....	8
5	Numerische Kaltluftsimulationen zur Ermittlung von Kaltluftsystemen in typischen Strahlungs Nächten.....	14
5.1	Allgemeine Modellbeschreibung.....	14
5.2	Eingangsdaten.....	14
5.3	Modellgebiet und räumliche Auflösung.....	15
5.4	Ergebnisse Numerische Kaltluftsimulationen.....	17
6	Numerische Simulationen zur Ermittlung der stadtweiten bodennahen Temperaturverteilung bei sommerlichen Strahlungswetterlagen.....	26
6.1	Allgemeine Modellbeschreibung.....	26
6.2	Konzept der Modellrechnungen.....	27
6.3	Rechengebiet.....	28
6.4	Meteorologische Eingangsdaten.....	29
6.5	Ergebnisse der numerischen Temperatursimulationen.....	30
7	Planungsanwendungen.....	36
7.1	Klimaanalysekarte.....	36
7.1.1	Klimaanalysekarte – Inhalte der ersten Darstellungsebene (Klimatope).....	37
7.1.1.1	Gewässer-, Seenklima.....	37
7.1.1.2	Freilandklima.....	38
7.1.1.3	Waldklima.....	39
7.1.1.4	Klima innerstädtischer Grünflächen.....	40
7.1.1.5	Vorstadtklima.....	41
7.1.1.6	Stadtrandklima.....	41

7.1.1.7	Stadtklima.....	42
7.1.1.8	Innenstadtklima	43
7.1.1.9	Gewerbe-, Industrieklima.....	44
7.1.1.10	Straßenraum und Bahnanlagen.....	45
7.1.2	Klimaanalysekarte – Inhalte der zweiten Darstellungsebene (Klimatische Funktionen).....	45
7.1.2.1	Luftleitbahn (Ventilationsbahn)	46
7.1.2.2	Kaltluftabfluss	46
7.1.2.3	Hindernis für den Kaltluftabfluss (Barrieren, Strömungsriegel).....	46
7.1.2.4	Potenzielle Kaltluftproduktionsfläche	47
7.1.2.5	Potenzielle Kaltluftentstehung oberhalb Baumkronen.....	47
7.1.2.6	Potenzielle Kaltluftwirkbereiche / Eindringtiefe.....	47
7.2	Planungshinweiskarte	49
7.2.1	Planungshinweiskarte – Inhalte der ersten Darstellungsebene (Planräume)	49
7.2.1.1	Industrieklimatischer und gewerblicher Lastraum	49
7.2.1.2	Klimatischer Lastraum	50
7.2.1.3	Klimatischer Ungunstraum.....	50
7.2.1.4	Übergangsbereich zwischen Last- und Ausgleichsraum.....	51
7.2.1.5	Klimatischer Ausgleichsraum.....	51
7.2.1.6	Innerstädtische Grünflächen.....	52
7.2.1.7	Wald- und Forstgebiete	52
7.2.2	Planungshinweiskarte – Inhalte der zweiten Darstellungsebene (Planungshinweise).....	52
7.2.2.1	Luftleitbahn erhalten	53
7.2.2.2	Belüftungsbahnen, Kaltluftströmungen	53
7.2.2.3	Keine weitere Bebauung oder Emittenten.....	54
7.2.2.4	Maßvolle Bebauung unter Berücksichtigung klimatischer Belange möglich	54
7.2.2.5	Vernetzung städtischer Grünzüge.....	54
7.2.2.6	Grünvernetzung Austausch fördern bzw. herstellen.....	55
8	Klimaprojektion für den Raum Ibbenbüren	57

8.1	Klima von heute und bereits beobachtete Änderungen	57
8.2	Klimaprojektionen.....	57
9	Literaturverzeichnis	64
10	Anhang.....	66

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Qualitative Merkmale von Klimatopen (nach VDI 3781 (2015) und DÜTEMEYER et al. 2013).	2
Tab. 8-1:	Zu- und Abnahmen der jährlichen Werte der Kenngrößen für die nahe und ferne Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode für das Szenario RCP8.5.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4-1:	DTK Lageübersicht Ibbenbüren mit roter Gemarkungsgrenze.....	7
Abb. 4-2:	Beispielhafter Auszug aus dem Klimaatlas NRW. (Abrufdatum 23.06.2022)	8
Abb. 4-3:	Windrosen der DWD-Stationen um Ibbenbüren. Die gelben Kreise markieren die Standorte der Messstationen Rheine-Bentlage (West), Münster-Osnabrück (Süd) und Belm (Ost).....	10
Abb. 4-4:	Darstellung der synthetischen Windrosen im Kernstadtbereich Ibbenbüren.	10
Abb. 4-5:	Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte (nachts) der Klimaanpassung-Karte NRW (Abrufdatum: 01.09.2022).	12
Abb. 4-6:	Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte (tags) der Klimaanpassung-Karte NRW (Abrufdatum: 01.09.2022).	13
Abb. 5-1:	Geländehöhen (m ü. NHN) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen. Der Umriss der Gemeindegrenze von Ibbenbüren ist schwarz markiert.	16
Abb. 5-2:	Flächennutzungsklassen im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen. Der Umriss der Gemeindegrenze von Ibbenbüren ist schwarz markiert.	17
Abb. 5-3:	Mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s) und überlagerte Strömungsvektoren 1 Stunde nach Sonnenuntergang.	20
Abb. 5-4:	Kaltluftschichtdicke (m) und überlagerte Strömungsvektoren 1 Stunde nach Sonnenuntergang.....	21

Abb. 5-5:	Kaltluftvolumenstromdichte ($\text{m}^3/(\text{m}^*\text{s})$) und überlagerte Strömungsvektoren 1 Stunde nach Sonnenuntergang.....	21
Abb. 5-6:	Mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s) und überlagerte Strömungsvektoren 2 Stunden nach Sonnenuntergang.....	22
Abb. 5-7:	Kaltluftschichtdicke (m) und überlagerte Strömungsvektoren 2 Stunden nach Sonnenuntergang.....	22
Abb. 5-8:	Kaltluftvolumenstromdichte ($\text{m}^3/(\text{m}^*\text{s})$) und überlagerte Strömungsvektoren 2 Stunden nach Sonnenuntergang.....	23
Abb. 5-9:	Mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s) und überlagerte Strömungsvektoren 4 Stunden nach Sonnenuntergang.....	24
Abb. 5-10:	Kaltluftschichtdicke (m) und überlagerte Strömungsvektoren 4 Stunden nach Sonnenuntergang.....	24
Abb. 5-11:	Kaltluftvolumenstromdichte ($\text{m}^3/(\text{m}^*\text{s})$) und überlagerte Strömungsvektoren 4 Stunden nach Sonnenuntergang.....	25
Abb. 6-1:	Geländehöhen in m NHN im METRAS-PCL-Rechengebiet.....	29
Abb. 6-2:	Strömungsvektoren um 21 Uhr lokaler Zeit bei einer typischen hochsommerlichen Strahlungswetterlage.....	33
Abb. 6-3:	Strömungsvektoren um 4 Uhr lokaler Zeit bei einer typischen hochsommerlichen Strahlungswetterlage.....	33
Abb. 6-4:	Strömungsvektoren um 12 Uhr lokaler Zeit bei einer typischen hochsommerlichen Strahlungswetterlage.....	34
Abb. 6-5:	Strömungsvektoren um 14 Uhr lokaler Zeit bei einer typischen hochsommerlichen Strahlungswetterlage.....	34
Abb. 6-6:	Bodennahe Lufttemperaturverteilung in der Nacht (4:00 UTC) bei sommerlicher Strahlungswetterlage mit Strömungsvektoren, idealisierte Einzelsituation.....	35
Abb. 6-7:	Bodennahe Lufttemperaturverteilung am Tag (14:00 UTC) bei sommerlicher Strahlungswetterlage mit Strömungsvektoren, idealisierte Einzelsituation.....	35
Abb. 7-1:	Klimaanalysekarte Ibbenbüren.....	48
Abb. 7-2:	Planungshinweiskarte Ibbenbüren.....	56
Abb. 8-1:	Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur bezogen auf 1986–2005 (IPCC 2013/2014 [11]).....	59

-
- Abb. 8-2: Ensembleprojektionen zur Bandbreite der Auftrittshäufigkeiten klimatischer Ereignistage für den Raum Steinfurt. Für den Referenzzeitraum (1971–2000) sind die Mittelwerte angezeigt. Die Zeiträume für die nahe (2036–2065) und ferne (2069–2098) Zukunft zeigen jeweils Minimum, Median und Maximum bezogen auf die Gesamtheit der RCP 8.5-Szenarien-Simulationen..... 61
- Abb. 8-3: Ensembleprojektionen zur Bandbreite der Auftrittshäufigkeiten klimatischer Ereignistage für den Raum Steinfurt. Für den Referenzzeitraum (1971–2000) sind die Mittelwerte angezeigt. Die Zeiträume für die nahe (2036–2065) und ferne (2069–2098) Zukunft zeigen jeweils Minimum, Median und Maximum bezogen auf die Gesamtheit der RCP 8.5-Szenarien-Simulationen. 62

1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Für die Stadt Ibbenbüren wird im Rahmen des Projekts „Entwicklung eines Stadtklimamodells und Erstellung eines Handlungsleitfadens für die Bauleitplanung zu den Themen Klimawandel & Klimawandelfolgenanpassung“ in Zusammenarbeit mit „energielenker projects GmbH“ aus Greven eine modellgestützte Klimaanalyse mit dem Ziel der Erstellung einer Klimaanalysekarte sowie einer Planungshinweiskarte durchgeführt.

Durch die Schaffung dieser Informationsgrundlage für die Identifizierung von gefährdeten Gebieten hinsichtlich sommerlicher Überwärmung an Hitzetagen, die Ausführung von Anpassungsmaßnahmen sowie die Erstellung eines Handlungsleitfadens für klimaangepasste Bauleitplanung sollen der Stadtplanung Informationen zu den Themen Klimawandel und Klimafolgenanpassung bereitgestellt werden.

Die Klimaanalysekarte sowie die Planungshinweiskarte werden GIS-basiert aufbereitet. Diese Werkzeuge ermöglichen es der Umwelt- und Bauleitplanung, zukünftige Flächeneingriffe bezüglich der gesetzlich verankerten Umweltschutzgüter „Klima“ und „Luft“ im Rahmen einer Ersteinschätzung zu beurteilen und deren klimaökologische Relevanz zu ermitteln, um ggf. mit erforderlichen Verbesserung- oder Schutzmaßnahmen reagieren zu können.

Dieser Bericht behandelt folgende Positionen der im Angebot 20210723-1 aufgeführten Leistungsbeschreibung:

2. Modellgestützte Analyse
3. Klimafunktionskarte
4. Planungshinweiskarte
5. Darstellung der Klimaprojektion für die nahe und ferne Zukunft
6. Projektbericht (Teilbericht „Stadtklimaanalyse“)

2 Thematische Einführung

2.1 Relevanz des Stadtklimas in der Umweltplanung

Ein urbaner Siedlungsraum verursacht im Vergleich zu seiner nicht bebauten Umgebung klimatische und lufthygienische Veränderungen, die allgemein unter dem Begriff Stadtklima zusammengefasst werden. Entstehungsursachen des Stadtklimas sind die dreidimensionale Vergrößerung der Erdoberfläche durch die städtische Bebauung, die damit verbundene weitest gehende Versiegelung der Oberfläche bei gleichzeitiger Reduzierung der Vegetations- und Wasserflächen sowie anthropogene Emissionen von Wärme und Spurenstoffen aus den Quellen Verkehr, Hausbrand und Industrie. Basierend auf diesen Voraussetzungen verursachen die Eigenschaften der versiegelten Oberflächen, deren Aufheizungstendenz und eingeschränktes Evaporationsvermögen sowie die stadtbedingte Erhöhung der Oberflächenrauigkeit vielfältige Modifikationen des lokalen urbanen Klimas gegenüber dem Umland wie z.B. Modifikationen der relativen Überwärmung und Trockenheit, aber auch eine Veränderung des Strahlungs- und Energiehaushaltes und die Beeinflussung der Austauschverhältnisse.

Das Stadtklima wird somit wesentlich durch die **Flächennutzungsstruktur** geprägt, wobei es zwischen den einzelnen Flächennutzungstypen deutliche Unterschiede gibt. Diese lassen sich in Grundtypen klassifizieren, die durch ähnliche Flächennutzung sowie ähnliche mikroklimatische und lufthygienische Bedingungen charakterisiert sind und dann als **Klimatope** bezeichnet werden. Die **Tab. 2-1** enthält eine Übersicht der Klimatope mit qualitativen Angaben zu ihren stadtklimatisch-lufthygienischen Eigenschaften.

Tab. 2-1: Qualitative Merkmale von Klimatopen (nach VDI 3781 (2015) und DÜTEMEYER et al. 2013).

Klimatop	Thermischer Komfort	Kaltluftproduktion	Durchlüftung, Ventilation	Luftqualität	Gesamtklimaqualität	Klassifizierung
Gewässer-, Seenklima	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	Gunstraum
Freilandklima	sehr gut	sehr gut	gut	sehr gut	sehr gut	Gunstraum
Waldklima	gut	sehr gut	schlecht	sehr gut	gut	Gunstraum
Klima innerstädtische Grünflächen, Parks	mittel	sehr gut	schlecht	gut	mittel - gut	Gunstraum
Vorstadtklima, Gartenstadt, Dorf	mittel	mittel	schlecht	gut	mittel	
Stadtrandklima	schlecht	sehr schlecht	schlecht	gut	mittel - schlecht	Ungunstraum
Stadtklima, verdichtete Bebauung	sehr schlecht	sehr schlecht	sehr schlecht	mittel	schlecht	Ungunstraum
Innenstadtklima	sehr schlecht	sehr schlecht	sehr schlecht	sehr schlecht	sehr schlecht	Ungunstraum
Gewerbe-, Industrieklima	sehr schlecht	sehr schlecht	sehr schlecht	schlecht	sehr schlecht	Ungunstraum

Das Stadtklima bildet sich am deutlichsten während windschwacher und strahlungsreicher **Wetterlagen** aus, die vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen (sog. antizyklonalen Großwetterlagen) entstehen und durch ausgeprägte Tagesgänge der meisten meteorologischen Elemente gekennzeichnet sind. Ausgeprägte Tagesgänge bedeutet in diesem Fall starke Einstrahlung tagsüber und meist stärkere Ausstrahlung und damit Abkühlung in den Nachtstunden. In Mitteleuropa, weisen durchschnittlich derzeit etwa 20% der Tage und 30% der Nächte eines Jahres die Charakteristika von Strahlungswetter auf. Auf Grund der Klimaänderung ist in den nächsten Jahren mit einer kontinuierlichen Zunahme der Strahlungswetterlagen mit einer damit einhergehenden Zunahme von Hitzetagen und Tropennächten zu rechnen. Zu der erwähnten räumlichen Abgrenzung des Stadtklimas ergibt sich somit auch eine zeitliche Abhängigkeit des Stadtklimas, die an die Dauer der meist nach Tagen zu bemessenden Witterungsabschnitte gebunden ist.

Das Stadtklima wirkt in vielfältiger Weise negativ, aber auch positiv auf die in Städten lebenden Bewohner sowie Pflanzen und Tiere. So sind bspw. im Sommer insbesondere während **Hitzewellen** Nachteile für die Stadtbewohner zu erwarten. Andererseits führen höhere Stadttemperaturen im Winter zu einem geringeren Heizenergiebedarf. Bei Pflanzen bewirken die höheren Stadttemperaturen vorgezogene Blüh- und Reifephase sowie eine Verlängerung der Vegetationsperioden im Vergleich zum Umland. Während niederschlagsarmer und heißer **Trockenphasen** kann jedoch auch die **Vegetation** Hitzestress erleiden. Zudem leistet diese dann mangels aktiver Verdunstung keinen Beitrag zur Senkung der Wärmebelastung in ohnehin schon überwärmten Bebauungsstrukturen.

Mit zunehmender Größe einer Stadt treten die stadtklimatischen Effekte sowie deren nachteiligen Wirkungen deutlicher hervor. Für Ibbenbüren mit einer Einwohnerstärke von ca. 54.000 lässt sich in etwa ein Wärmeinseleffekt für den bodennahen Bereich (Temperaturdifferenz zwischen Kernstadtbereich und Umland/Freiland) von maximal etwa 4 bis 5 Kelvin ableiten.

Da Ibbenbüren in ein **ausgeprägtes Relief** eingebettet ist, beeinflusst die Geländeform das lokale Klima zusätzlich. Das bodennahe Windfeld wird beispielsweise beeinflusst, indem die Strömungsrichtung durch die Hangneigungsrichtungen und Talverläufe der Haupt- und Seitentäler vorgegeben wird (Kanalisation) und dabei deutlich vom regional typischen Windfeld abweichen kann. Zudem kann in austauscharmen Strahlungsnächten an den Hängen **Kaltluft** gebildet werden, die sich in den Talverbänden sammelt und als mächtiger Kaltluftstrom abfließt und zur Ventilation der Stadt beitragen kann. Das Zusammenspiel von Reliefform, geeigneter Sonnenexposition der Hänge und die Möglichkeit der strahlungsnächtlichen Kaltluftbildung führt zur regelmäßigen Ausbildung ausgeprägter **Berg-Tal-Windsysteme**, welche die lokalen Windverhältnisse dominieren können.

Aufgrund der im Allgemeinen ungünstigen stadtklimatischen Eigenschaften gilt es daher im Rahmen der umweltgerechten Gestaltung von Bauvorhaben in der **Bau- und Umweltplanung**, die **Schutzgüter „Klima“** und **„Luft“** besonders zu berücksichtigen (BauGB (2017) §1 Abs. 5 und 7), um diese Mängel so weit wie möglich zu reduzieren. Dabei ist seit der BauGB-Novelle 2011 bei Bauvorhaben auch dem Nachhaltigkeitsprinzip in verstärktem Maße Rechnung zu tragen, indem neben Maßnahmen zum Klimaschutz auch solche zur **Klimawandelanpassung** schon heute zu ergreifen sind (BauGB (2017) §1a Abs. 5).

Die Verbesserung des Klimas innerhalb der Bebauung kann durch Maßnahmen vor Ort im Rahmen der **Quartiergestaltung** erreicht werden. Hierzu zählen Flächenentsiegelungen, Anlegen von Vegetations-, Gewässerflächen und Parks sowie Dach- und Fassadenbegrünungen. Diese Maßnahmen fördern die Verdunstung, die durch Energieentzug aus den die Luft erwärmenden Oberflächen die Lufttemperatur bei Hitzeereignissen deutlich senken kann. Ferner können Vegetationsflächen durch Absetzen von Spurenstoffen (insbesondere Staub) zur Verbesserung der Luftqualität beitragen. Auch gezielte Verschattungen im Außenbereich und helle Gebäudefassaden sowie vergrößerte Gebäudeabstände können insbesondere der sommerlichen Wärmebelastung entgegenwirken.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung des Stadtklimas ist die Integration und die Ankopplung von **Freiflächen** am Stadtrand an die städtische Bebauung. Die „Freilandklimatope“ besitzen günstige bzw. unbelastete klimatisch-lufthygienische Eigenschaften und dienen in austauscharmen Strahlungsnächten der **Kaltluftproduktion**. **Innerstädtische Grünflächen** weisen i.d.R. günstigere Klimaeigenschaften als die umgebende Bebauung auf und sollten möglichst vernetzt werden. Weitere Flächennutzungstypen mit günstigen klimatisch-lufthygienischen Eigenschaften sind Wälder und Gewässer.

Die **planerische Relevanz** von Freilandflächen, Parks, Wäldern und Gewässern ist insbesondere dann gegeben, wenn die Möglichkeit besteht, diese an die angrenzende Bebauung mit ungünstigeren mikroklimatischen Bedingungen anzukoppeln bzw. zu vernetzen.

Ziel der Umweltplanung hinsichtlich des Stadtklimas ist es daher, das ungünstige Klima in den belasteten versiegelten und bebauten Bereichen zu verbessern, indem Quartiere klimagerecht gestaltet sowie die klimatisch günstigen, unversiegelten Flächen im Umland gesichert und deren positive Wirkung auf die versiegelten und bebauten Bereiche erhalten, verbessert und gefördert werden.

Für eine nachhaltige und klimawandelgerechte Stadtentwicklung ist jedoch die genaue Kenntnis der aktuellen lokalklimatischen Verhältnisse erforderlich, wie sie im Rahmen der **modellgestützten Klimaanalyse** für Ibbenbüren erarbeitet wurde.

3 Untersuchungsumfang der modellgestützten Klimaanalyse

Basis für die Beurteilung möglicher Auswirkungen des Klimawandels für eine Kommune sowie für die Entwicklung sachgerechter Maßnahmen zur zukünftigen Anpassung an die Klimawandelfolgen stellen **gesamtstädtische Klimaanalysen** dar, in denen die meteorologischen Verhältnisse (Temperatur, Wind, rel. Feuchte etc.) sowie Klimasysteme (Kaltluftströmungen, ggf. Flurwindsysteme¹) erhoben, analysiert und bewertet werden. Dies geschieht in aller Regel durch eine Kombination von meteorologischen Messungen über einen begrenzten Zeitraum (in aller Regel über ein Jahr) und numerischen Modellrechnungen. Die Messungen dienen dazu, für unterschiedliche typische Klimatope innerhalb einer Stadt die zeitliche Entwicklung einzelner Klimaparameter zu erfassen. Daraus ableitbar sind hinsichtlich der einzelnen Klimatope innerhalb eines Stadtgebietes für das Messjahr typische Kenntage wie Anzahl von Hitzetagen, Tropennächten etc. sowie statistische Größen zum Niederschlag. Die Messungen geben somit den zeitlichen Verlauf an einzelnen repräsentativen Punkten wieder, aber nicht für den gesamten Raum. Die numerischen Modellsimulationen dagegen liefern für repräsentative Zeitpunkte ein räumliches Ergebnis. Insofern ist es möglich, die nur für einzelne Punkte vorliegenden Informationen für einen längeren Zeitraum mit Hilfe der für wenige Zeitpunkte vorliegenden räumlichen Information zu verknüpfen.

Die Bestandsaufnahme für Ibbenbüren wurde entsprechend des Auftrags alleine auf geeigneten **numerischen Modellsimulationen** aufgebaut. Die modellgestützte Klimaanalyse beinhaltet daher folgende Untersuchungsschritte, die aufeinander aufbauen:

Schritt 1: Recherche und Auswertung vorhandener meteorologischer Daten im Großraum Ibbenbüren zur zeitlich längerfristigen Einschätzung der klimatischen Verhältnisse für den Istzustand (keine eigenen Messungen im Rahmen des Projektauftrags).

Schritt 2: Numerische Simulationen zur Ermittlung der stadtweiten bodennahen Temperaturverteilung sowie Windgeschwindigkeiten für typische Wetterlagen mit relevanter Ausprägung der Klimaparameter

Schritt 3: Numerische Kaltluftsimulationen zur Ermittlung von Kaltluftsystemen in typischen Strahlungsnächten.

Schritt 4: Erstellung einer **Klimaanalysekarte** abgeleitet aus den recherchierten Daten und den numerischen Simulationen.

Schritt 5: Erarbeiten von Handlungsempfehlungen und Umsetzung in eine **Planungshinweiskarte**. Die Planungshinweise lösen sich von der ausschließlich

¹ Flurwindsysteme sind thermische Windsysteme, die sich bedingt durch Temperaturdifferenzen zwischen einer Stadt und ihrem Umland bzw. zwischen wärmeren und kühleren Stadtteilen ausbilden.

klimawissenschaftlichen Darstellung und konzentriert sich auf die klimaökologische Bewertung einzelner Gebietsbereiche. In Abhängigkeit der jeweiligen Klimaeigenschaften werden Handlungsempfehlungen zur Verbesserung ungünstiger Gebiete und Flächen oder zum Schutz bzw. Erhalt günstiger Gebiete und Flächen aufgezeigt. Die Klimatope aus der Klimaanalyse werden dabei in Ungunst- bzw. Lasträume sowie in Gunst- bzw. Ausgleichsräume eingeteilt. Aufgezeigt werden lokale Planungshinweise die im Wesentlichen aus den numerischen Modellrechnungen abgeleitet werden sowie bereits bekannte zukünftige Änderungen der Flächennutzung.

4 Recherche und Auswertung vorhandener Klimadaten

Das lokale Klima ist zum einen stark von der Flächennutzung, zum anderen vom Relief abhängig. Und schließlich weist das Klima eine hohe zeitliche Variabilität auf. Um das Klima für die Gemarkung Ibbenbüren in seiner Gesamtheit zu erfassen, werden lokale Klimainformationen in sowohl räumlich als auch zeitlich hoher Auflösung benötigt. In dieser modellgestützten Klimaanalyse kamen im Wesentlichen numerische Verfahren zum Einsatz, um Informationen zum Kaltluftgeschehen und zur räumlichen Temperaturverteilung bei potenzieller Wärmebelastung zu erhalten. Des Weiteren wurden frei zugängliche Klimainformationen für den Raum Ibbenbüren berücksichtigt. Diese sind in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

4.1 Lageüberblick und Charakteristik

Die Gemarkung Ibbenbüren wird von der A30 sowie der Bahnlinie von Südost nach Nordwest durchzogen. Nordöstlich am Rande des Kernstadtbereichs befindet sich das markante Kraftwerks- und Zechengelände „Schafberg“ mit ausgedehnten Kohlehalden. Wesentliche Industrie-/Gewerbegebiete befinden sich nördlich der Bahntrasse. Südöstlich des Kernstadtbereichs befindet sich der Aasee. Ausgedehnte Waldflächen des Teutoburger Waldes erstrecken sich südlich parallel zur BAB 30. Markante topografische Merkmale bilden hier die Dörenther Klippen.

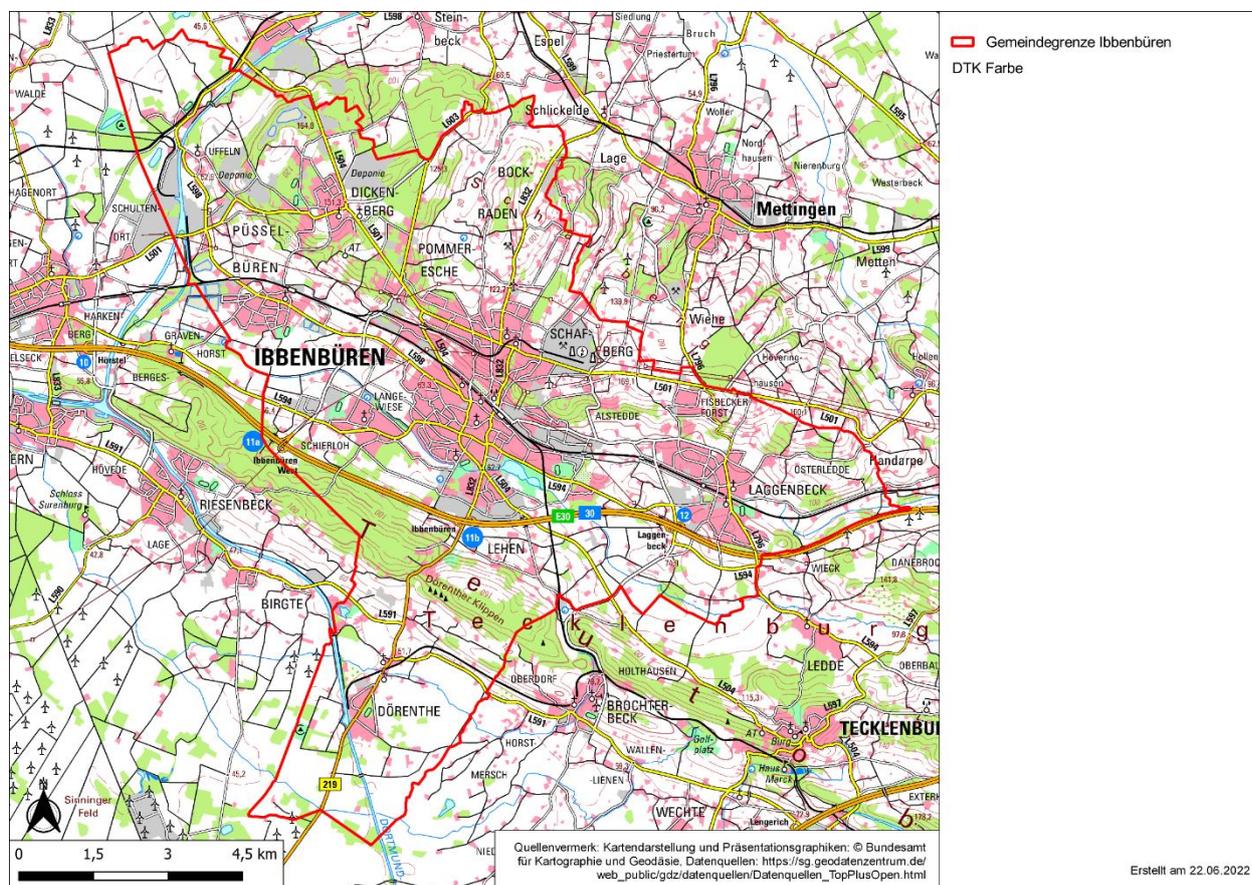


Abb. 4-1: DTK Lageübersicht Ibbenbüren mit roter Gemarkungsgrenze.

4.2 Allgemeine klimatische Situation

Der Klimaatlas NRW² weist in niedriger Auflösung (1 km x 1 km) diverse Kenngrößen zur klimatischen Situation aus. Hinsichtlich der Lufttemperatur werden mittlere Temperaturwerte für 30-Jahres Zeiträume ab 1881 (in 10-Jahresschritten) und Prognosen bis 2100 angegeben. Ergänzend dazu werden ebenfalls meteorologische Kenntage ausgewiesen. Nachfolgen sind als Beispiel Kenntage für den Zeitraum 1991-2020 gegeben:

- Hitzetage 5-10 (Hitzetag: Tag, an dem die maximale Lufttemperatur einen Wert $\geq 30^\circ$ annimmt.)
- Sommertage 30-40 (Sommertag: Tag, an dem die maximale Lufttemperatur einen Wert $\geq 25^\circ$ annimmt.)
- Frosttage 60-70 (Frosttag: Tag, an dem die minimale Lufttemperatur einen Wert $< 0^\circ$ annimmt.)
- Eistage 5-20 (Eistag: Tag, an dem die maximale Lufttemperatur einen Wert $< 0^\circ$ annimmt.)

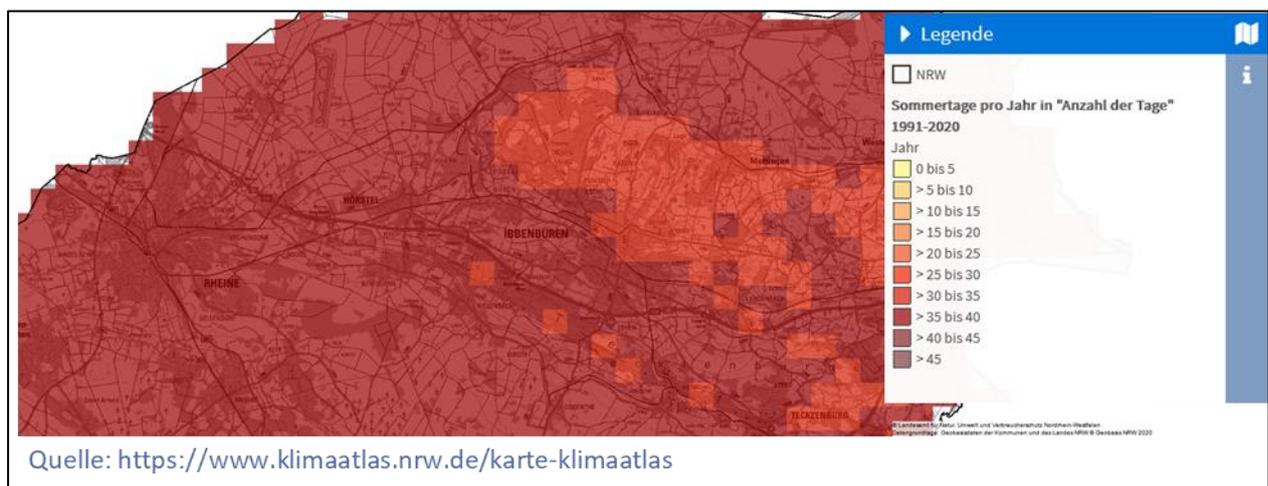


Abb. 4-2: Beispielhafter Auszug aus dem Klimaatlas NRW. (Abrufdatum 23.06.2022)

Auch für den Niederschlag werden Summen für 30-Jahres Zeiträume ab 1881 (in 10-Jahresschritten) angegeben. Unterschieden kann dabei jeweils die Ansicht der Daten gemittelt über das gesamte Jahr, ein Quartal oder die einzelnen Monate.

Als Angaben zu langjährigen Windverhältnissen wird lediglich die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund für den Zeitraum 1981-2000, ebenfalls in einem 1 km x 1 km Raster, angegeben. Die höchsten Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe sind in den Bereichen der Höhenzüge ausgewiesen sowie auf den größeren Freiflächen südöstlich des Ibbenbürener Stadtkerns. Im Bereich der Dörenther Klippen liegt demnach die mittlere

² Klimaatlas NRW, <https://www.klimaatlas.nrw.de/karte-klimaatlas>, Abrufdatum: 13.06.2022

Windgeschwindigkeit bei 4,5 bis 4,75 m/s. Zum Stadtzentrum hin wird eine Abnahme der Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund bis auf etwa 2,8 m/s angegeben.

Winddaten werden ebenfalls durch den Energieatlas NRW³ zur Verfügung gestellt. Diese sind in Höhen von 100 bis 225 m über Grund abrufbar. Die mittlere Windgeschwindigkeit in 100 m über Grund Höhe liegt im Stadtkern im Bereich von 5,5 bis 5,75 m/s. Zum Bereich des südlich verlaufenden Gebirgszuges nimmt die Windgeschwindigkeit ab. Die mittleren Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe fällt hier auf 4,5 m/s ab.

Daten von Windmessstationen innerhalb der Gemarkung von Ibbenbüren standen keine zur Verfügung. Daher wurden die Messdaten von Stationen in der Umgebung hinsichtlich Windrichtungsverteilung und Jahresmittlere Windgeschwindigkeit analysiert und ausgewertet (Abb. 4-3).

- Stationen Rheine-Bentlage mit 3,1 m/s (DWD-04174),
- Münster-Osnabrück mit 3,1 m/s (DWD-01766),
- Belm mit 3,1 m/s (DWD-00342).

Aufgrund der großen Entfernung der Messstationen zur Gemarkungsgrenze wurden zusätzlich noch die synthetischen Windrosen der Fa. metSoft [1] für den Bereich Ibbenbüren ausgewertet (Abb. 4-4). Diese zeigen über dem Stadtgebiet ein Hauptmaximum bei Winden aus Südsüdwest bis Westsüdwest und ein Nebenmaximum, je nach Lage im Stadtgebiet, aus Nordost bis Südost. Die Verteilungen zeigen die größte Ähnlichkeit mit der Windverteilung an der südlich des Stadtgebietes gelegenen Station Münster/Osnabrück. Die langjährigen jahresmittleren Windgeschwindigkeiten 10 m über Verdrängungshöhe liegen im Bereich des tiefer gelegenen Stadtgebietes bei ca. 3 bis 3,5 m/s und nehmen im Bereich der nördlichen Randhöhen bis auf 4 m/s zu.

³ Energieatlas NRW, <https://www.energieatlas.nrw.de/site/planungskarten/wind>, Abrufdatum: 13.06.2022

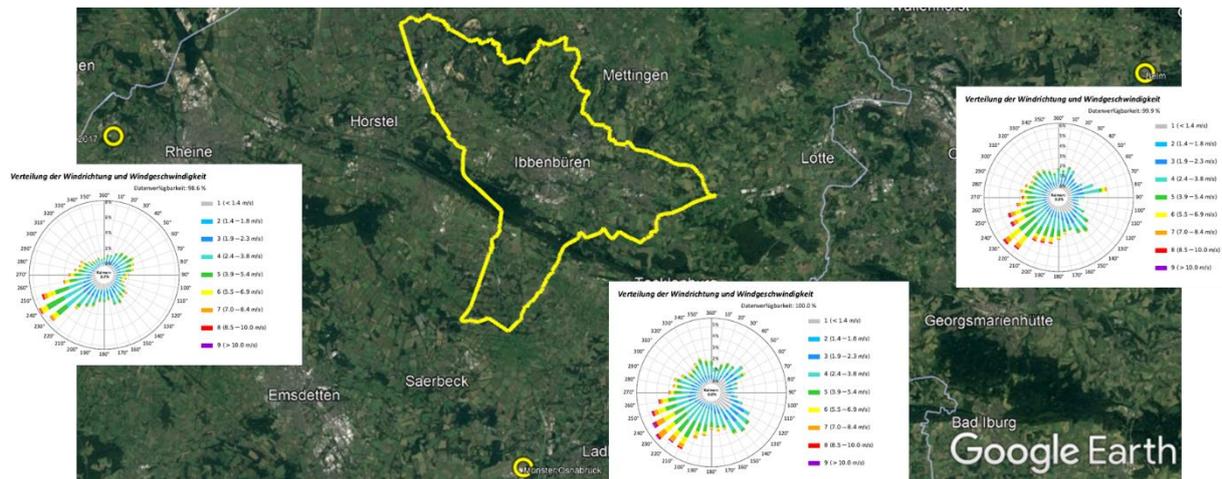


Abb. 4-3: Windrosen der DWD-Stationen um Ibbenbüren. Die gelben Kreise markieren die Standorte der Messstationen Rheine-Bentlage (West), Münster-Osnabrück (Süd) und Belm (Ost).

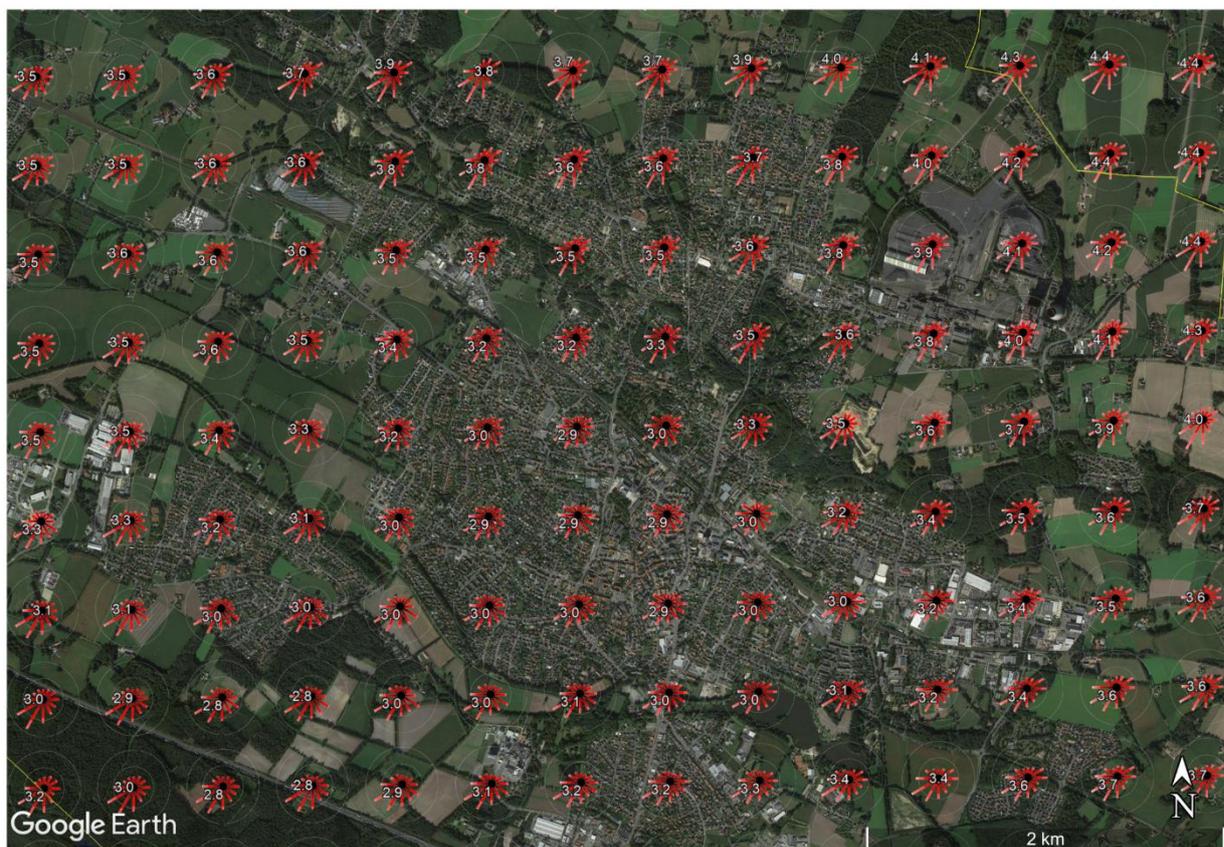


Abb. 4-4: Darstellung der synthetischen Windrosen im Kernstadtbereich Ibbenbüren.

Neben dem Klimaatlas liegen Daten aus dem Fachinformationssystem Klimaanpassung (FIS)⁴ vor. Hinter den Karten des FIS stehen Modellergebnisse, die mit FITNAH in 100 m Auflösung

⁴ Fachinformationssystem Klimaanpassung, <http://www.klimaanpassung-karte.nrw.de/>, Abrufdatum: 21.06.2022

berechnet wurden. In der Karte zur Klimaanpassung werden die Kaltluft und thermische Belastung im Raum Ibbenbüren dargestellt. Unterteilt ist die Klimaanalysekarte in eine Nacht- und Tagsituation.

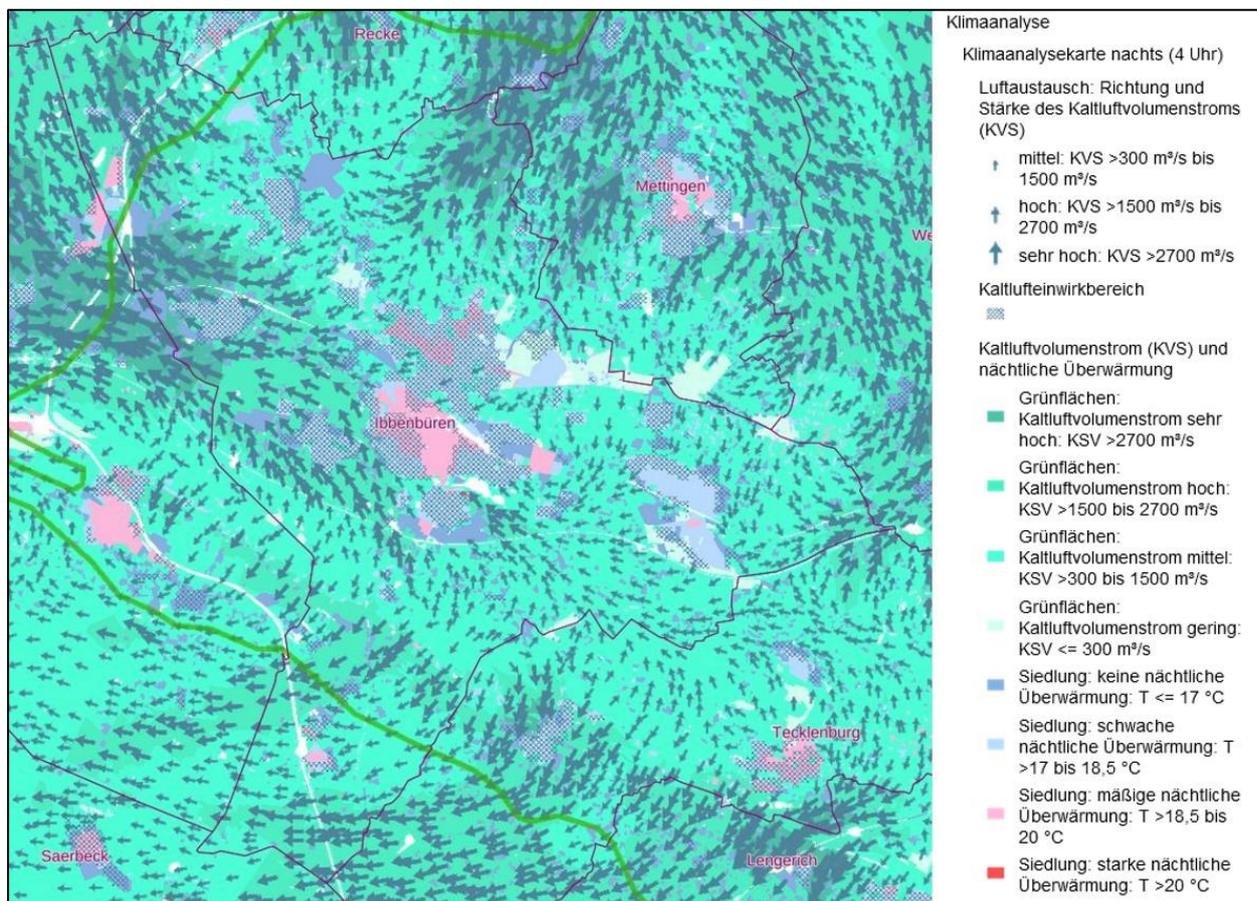
Für die Nachtsituation (Abb. 4-5) werden Richtung und Stärke des Kaltluftvolumenstroms sowie die nächtliche Überwärmung ausgegeben. Dabei werden große Teile der bebauten Bereiche Ibbenbürens als Kaltlufteinwirkungsbereich gekennzeichnet. Es „fehlen“ in diesen bebauten Gebieten allerdings, zumindest in den Randbereichen, die Pfeile für den Kaltluftvolumenstrom (an dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Angabe eines Kaltluftvolumenstroms ohne Bezug auf ein Breitenmaß keinen Sinn ergibt). Entsprechend der Karte fließt Kaltluft aus südöstlicher Richtung, parallel zu den Klippen, auf den Stadtkern zu. Eine kräftige Kaltluftströmung fließt südlich des Stadtkerns von Südost nach Nordwest parallel zu den Klippen. Er gewinnt an Stärke und erreicht an der nordwestlichen Gemeindegrenze seine maximale Ausprägung. Östlich des Stadtzentrums fließt Kaltluft von Nord nach Süd. Der größte Teil der Kaltluft, die sich in den Hangbereichen der Anhöhen im Norden der Gemeinde Ibbenbüren bildet, fließt nach Norden ab. Die sich entlang der Ausläufer des Teutoburger Waldes bildende Kaltluft fließt in südwestliche Richtung ab. Durch die Kaltluftzufuhr aus südöstlicher Richtung wird gemäß diesen Untersuchungsergebnissen eine mäßige nächtliche Überwärmung nur im Stadtkern ausgewiesen, am Stadtrand kommt es nur zu einer schwachen nächtlichen Überwärmung.

Die thermische Belastung ist am Tage, im Besonderen am Nachmittag, am größten. Die Siedlungsflächen sind, bis auf wenige Ausnahmen im Osten, mit starker thermischer Belastung am Tag mit einer physiologischen Äquivalenttemperatur (PET)⁵ von über 35-41°C ausgewiesen (Abb. 4-6). Außerhalb der Siedlungsflächen werden die höchsten thermischen Belastungen am Tag im Bereich der weitreichenden Wiesen und Felder ohne Baumbestand (Verschattung) erreicht. Hier führt eine PET von >41°C zu sehr starken thermischen Belastungen. Hier dominiert auf Grund der nicht bis wenig verschatteten Flächen die direkte Sonneneinstrahlung die thermische Belastung.

Das FIS und der Klimaatlas geben zusammenfassend einen groben Überblick über die klimatische Istsituation im Raum Ibbenbüren. Zu beachten ist aber, dass beide Quellen in ihren Kartendarstellungen keine kleinräumige Auflösung der Daten, insbesondere in dem eigentlich interessierenden Stadtgebiet, liefern. Kleinräumige und lokal auftretende Phänomene werden somit nicht aufgelöst. Geht es z.B. darum im Detail Gebiete mit guter und schlechter Frischluftzufuhr zu unterscheiden, ist eine genauere Auflösung erforderlich.

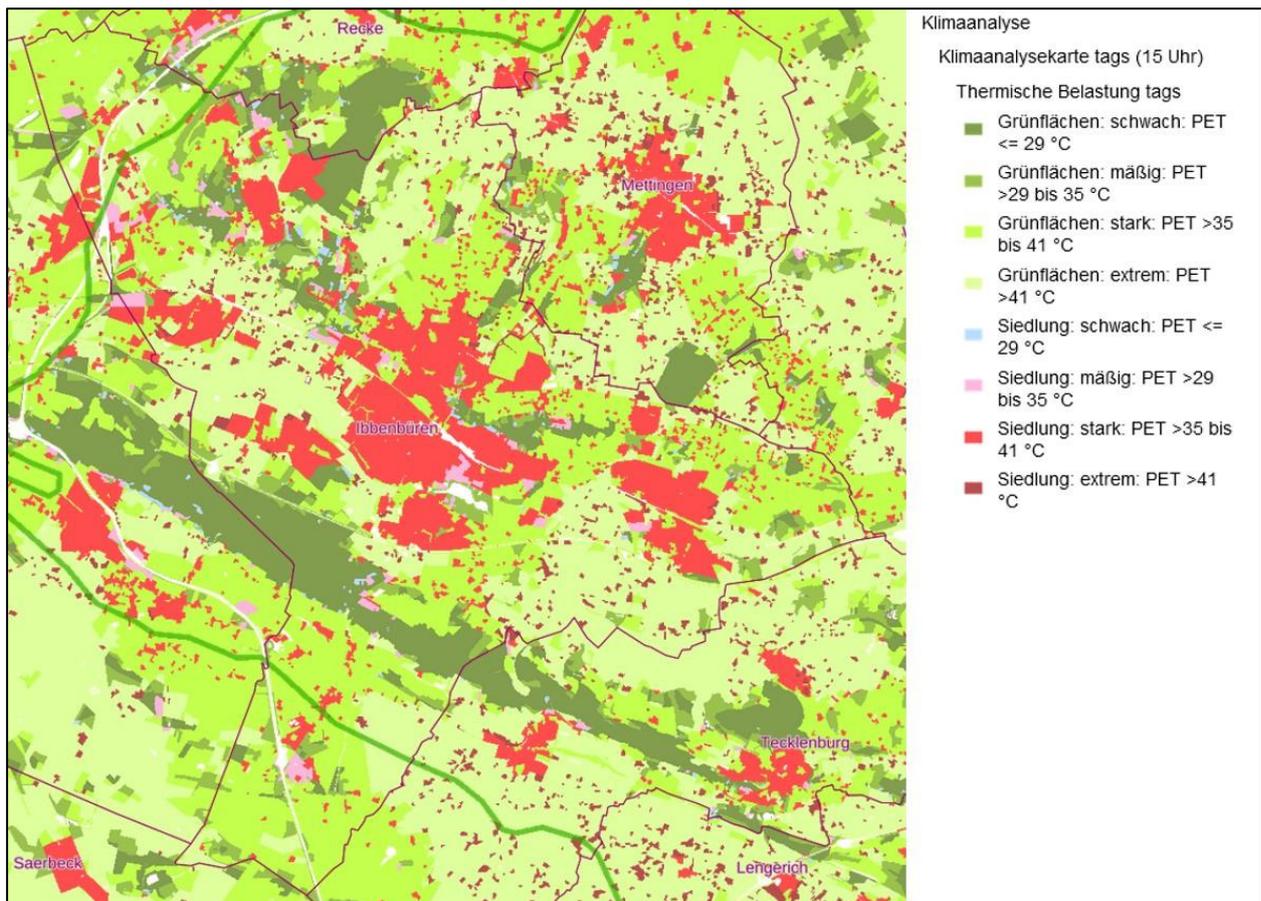
⁵ Die PET ist eine Maßzahl für das thermische Empfinden, welche im Optimum etwa 20°C annimmt. In die Berechnung der PET fließen verschiedene meteorologische Messgrößen, humanphysiologische Kenngrößen, die Art der ausgeführten körperlichen Aktivität und die Bekleidungsart mit ein. Hohe PET-Werte stehen für eine hohe thermische Belastung.

Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass wie oben beschrieben in der FIS-Klimaanalyse (Abb. 4-5) für die Nachtsituation sowohl Kaltluftvolumenströme als auch Überwärmungsbereiche zusammen dargestellt werden. Dabei werden in der FIS-Klimaanalyse die Kaltluftvolumenströme nur im Bereich der Grünflächen ausgewiesen, obwohl sie auch in den Randbereichen der Siedlungsgebiete noch abgeschwächt wirksam sein können. Die Überwärmungsbereiche dagegen sind nur im Bereich der Siedlungsgebiete eingetragen, obwohl auch hier ein "Eindringen" in den Randbereich der Grünflächen stattfinden wird. Diese Abgrenzung erscheint nicht ganz plausibel, da bei dieser Darstellung Kaltluftströmungen, die beispielsweise in Siedlungsgebiete eindringen oder diese tangieren, nicht gezeigt werden. Insofern sind diese Ergebnisse für die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführte stadtklimatische Analyse als Basis für die Erstellung einer Klimaanalysekarte und Planungshinweiskarte lediglich als sekundäre Erkenntnisquelle geeignet.



Quelle: FIS Klimaanpassung NRW – Klimaanalyse NRW, Herausgeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW unter Verwendung von Daten von © GeoBasis-DE/BKG 2020, © Geobasis NRW 2020, Planet Observer © LANUV 2020, Datenlizenz Deutschland - Zero - Version 2.0.

Abb. 4-5: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte (nachts) der Klimaanpassung-Karte NRW (Abrufdatum: 01.09.2022).



Quelle: FIS Klimaanpassung NRW – Klimaanalyse NRW, Herausgeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW unter Verwendung von Daten von © GeoBasis-DE/BKG 2020, © Geobasis NRW 2020, Planet Observer © LANUV 2020, Datenlizenz Deutschland - Zero - Version 2.0.

Abb. 4-6: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte (tags) der Klimaanpassung-Karte NRW (Abrufdatum: 01.09.2022).

5 Numerische Kaltluftsimulationen zur Ermittlung von Kaltluftsystemen in typischen Strahlungsnächten

5.1 Allgemeine Modellbeschreibung

Das für die Kaltluftberechnungen eingesetzte Modell METKAT ist ein numerisches Modell zur Simulation von Kaltluftabflüssen in topographisch gegliedertem Gelände. Es basiert auf den so genannten Flachwassergleichungen, die eine vereinfachte, vertikal integrierte Form der Bewegungsgleichungen darstellen [2]. Mit Hilfe dieser Gleichungen ist es möglich, Strömungskomponenten, Schichtdicken und Flüsse als vertikale Integralwerte über die Kaltluftschicht in hoher Horizontalauflösung zu berechnen. Die grundlegenden Gleichungen sind in Abschnitt 10 (Anhang) beschrieben. Der Vorteil eines solchen Modells liegt in den geringen Anforderungen an Rechenkapazitäten und Speicherplatz.

In METKAT werden folgende Einflüsse auf das Verhalten von Kaltluftabflüssen berücksichtigt:

- landnutzungsspezifische Kaltluftproduktion
- landnutzungsspezifische Strömungsabbremmung aufgrund der Rauigkeit (Reibung)
- Einfluss von Gebäuden als Einzelhindernisse
- Einflüsse der umgebenden Strömung auf die lokalen Verhältnisse (Advektion)
- Einflüsse von Dichtedifferenzen und Erdrotation auf die Strömung (Coriolis- und Auftriebskräfte)
- Einmischen umgebender Luft am oberen Rand der Kaltluftschicht aufgrund von Impuls- und Temperaturdifferenzen (Entrainment)

Typische Anwendungsmöglichkeiten von METKAT sind z.B.:

- Analyse lokaler oder regionaler Kaltluftströmungen / Belüftungssituationen
- Messnetzplanung zum Nachweis / zur Quantifizierung von Kaltluftflüssen
- Abschätzung der Auswirkung von Landschaftseingriffen oder Baumaßnahmen auf Kaltluftströme / Belüftungssituationen
- Abschätzung von Immissionen im Einflussbereich von Kaltluftabflüssen
- Bereitstellung von Strömungsdaten zur weiteren Verwendung in Ausbreitungsmodellen.

5.2 Eingangsdaten

Die Kaltluftrechnungen mit METKAT basieren auf folgenden Daten:

- Geländehöhen + Gebäudehöhen 5 m - Raster für das gesamte Modellgebiet: dgm1_E402-422_N5781-5801_EPSG-25832_5m+Hoeihen-LOD1-Geb.asc
- Landnutzungsklassen 5 m - Raster für das gesamte Modellgebiet: ALKIS-Nutzung_E402-422_N5781-5801_EPSG-25832_5m_METKAT-Klassen+Geb.asc

5.3 Modellgebiet und räumliche Auflösung

Das Modellgebiet wurde so festgelegt, dass der wesentliche Einzugsbereich der Kaltluft und die für die Abflussrichtungen wichtigen Hänge erfasst werden. Es deckt insgesamt eine Fläche von 20 km x 20 km ab:

UTM Ost: 32 402 000 - 32 422 000

UTM Nord: 5 781 000 - 5 801 000

Die Abb. 5-1 zeigt die Geländehöhen, die Abb. 5-2 die für das Modell METKAT aufbereiteten Flächennutzungsklassen für das gesamte Modellgebiet. Die Gemeindegrenze von Ibbenbüren ist als schwarze Linie dargestellt.

Südlich und östlich des Stadtgebiets von Ibbenbüren liegen die nordwestlichen Ausläufer des Teutoburger Waldes, die sich als schmale Höhenzüge auf Geländehöhen von etwa 130 m erheben. Die höchste Erhebung innerhalb des Modellgebiets liegt mit einer Geländehöhe von ca. 200 m südöstlich von Ibbenbüren im Ortsbereich von Tecklenburg vor. Das Stadtgebiet von Ibbenbüren selbst liegt auf Geländehöhen von etwa 60 m bis 70 m ü. NHN, bevor das Gelände mit dem Schafberg in nordöstliche Richtung wieder auf bis zu 180 m ansteigt. Der Schafberg ist eine vergleichsweise breite Erhebung, die sich nahezu entlang der gesamten nordöstlichen Gemeindegrenze von Ibbenbüren erstreckt. Damit werden die wesentlichen Einzugsbereiche der Kaltluft nördlich, südlich und östlich des Stadtgebiets von Ibbenbüren erfasst. Im östlichen Gemeindegebiet von Ibbenbüren verläuft ein schmaler Einschnitt zwischen Schafberg und Teutoburger Wald. Nordöstlich des Schafbergs fällt das Gelände langsam auf etwa 60 m ab. Auch in westliche Richtung fällt das Gelände langsam auf ca. 30 m bis 40 m ab. In westliche Richtung erstreckt sich das Modellgebiet damit so weit, dass das Abflussgebiet der Kaltluft weiträumig erfasst ist.

Die gewählte Rasterweite von 5 m ermöglicht es zum einen, ein relativ großes Gebiet abzudecken und zum anderen die Bebauung und deren Einfluss auf die Kaltluftströmung im Modellgebiet hinreichend aufzulösen. Um die Bebauung in dem Modellgebiet explizit berücksichtigen zu können, wurden die Gebäude als Einzelhindernisse im Modell eingesetzt. Dafür wurden die Gebäudehöhen zu den Geländehöhen addiert. In bebauten Gebieten findet keine Kaltluftproduktion statt. Vielmehr wird die heranströmende Kaltluft durch Wärmeabstrahlung der Gebäude, wie auch über den (wärmeren) Wasserflächen, allmählich aufgezehrt.

Innerhalb von Siedlungsflächen mit explizit aufgelöster Bebauung wird die thermodynamische Wirkung der Gebäude bereits durch die Auflösung als einzelne Strömungshindernisse und den Abbau von Kaltluft berücksichtigt. Die Flächen zwischen den Gebäuden weisen andere Eigenschaften auf, als sie die METKAT-Klassen für Bebauung repräsentieren. Daher wurden alle Flächen zwischen den Gebäuden als „halb versiegelte Flächen“ definiert. Das entspricht in erster

Näherung dem typischen Mix von Bodeneigenschaften, die auf den Flächen zwischen den Gebäuden vorherrschen.

Die Modellrechnungen werden auf Basis dieser Eingangsdaten für eine windstille Nacht ohne überlagerten großräumigen Wind durchgeführt. Sie setzen nach Sonnenuntergang ein und werden über vier Stunden fortgesetzt. Nach dieser Zeit haben sich die charakteristischen Verteilungen von Kaltluftabflüssen und Wind ausgebildet und ändern sich nur noch wenig. Die Temperaturdifferenz zwischen Kaltluftschicht und darüber liegender wärmerer Luftschicht wird mit 2,5 K angesetzt.

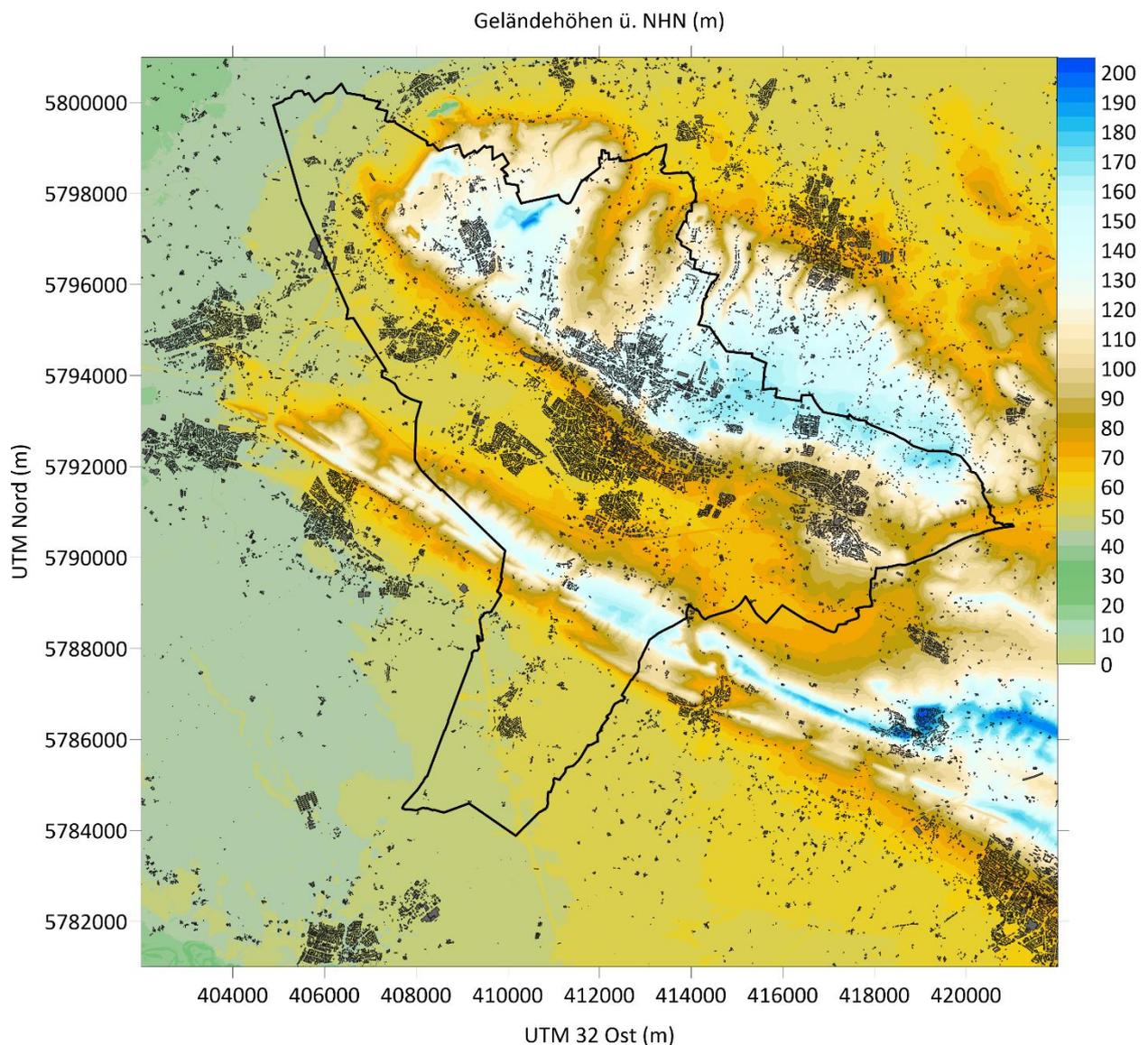


Abb. 5-1: Geländehöhen (m ü. NHN) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen. Der Umriss der Gemeindegrenze von Ibbenbüren ist schwarz markiert.

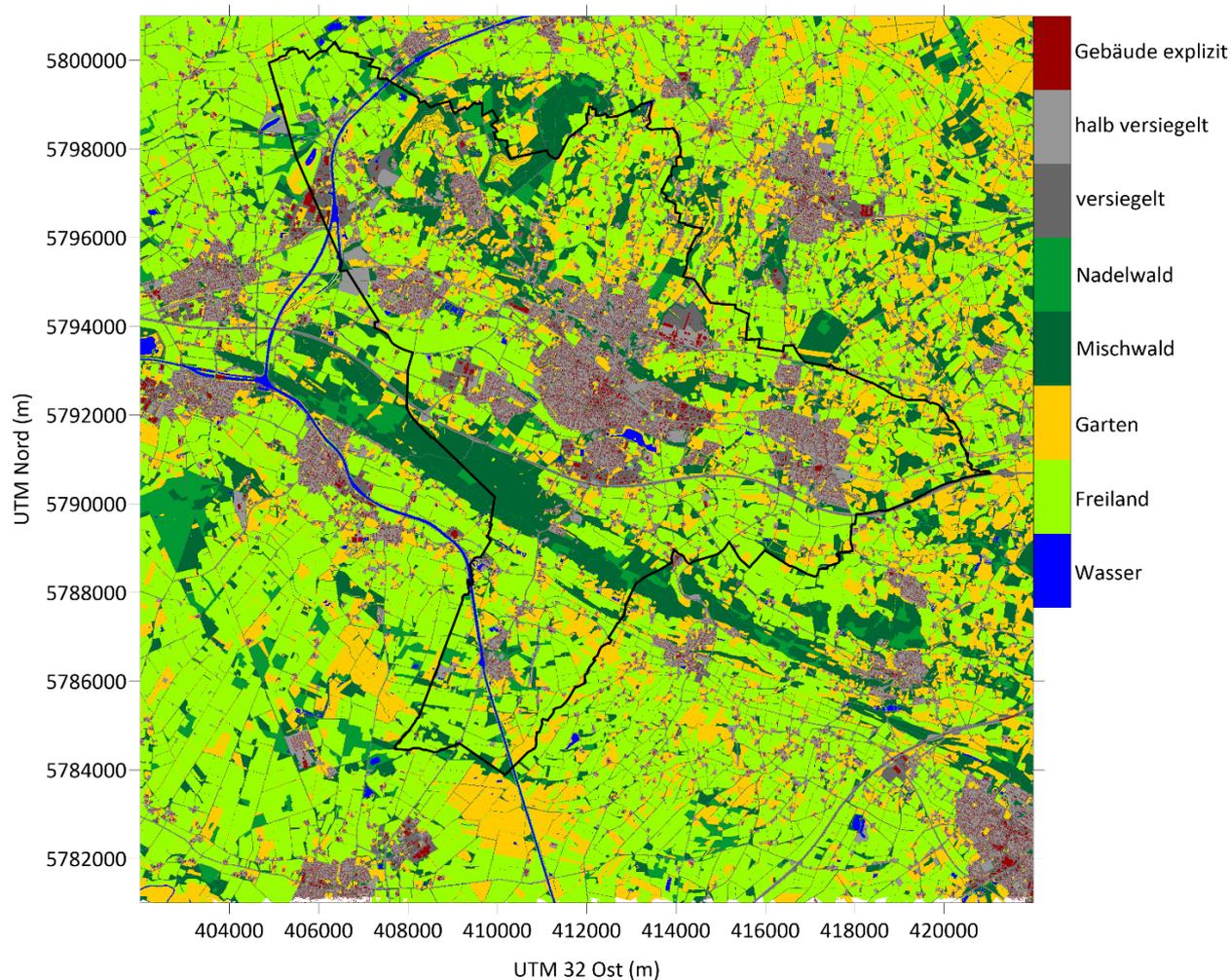


Abb. 5-2: Flächennutzungsklassen im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen. Der Umriss der Gemeindegrenze von Ibbenbüren ist schwarz markiert.

5.4 Ergebnisse Numerische Kaltluftsimulationen

Die größtenteils unversiegelten Flächen außerhalb des Stadtgebiets von Ibbenbüren stellen aufgrund ihrer nächtlichen Auskühlung potentielle Kaltluftproduktionsflächen dar. Da die bodennah abgekühlte Luft eine höhere Dichte aufweist, beginnt sie im Bereich der Hanglagen der Geländeneigung folgend abzufließen.

Während der ersten Stunden nach Sonnenuntergang spielen dabei die lokalen Kaltluftabflüsse, die sog. Hangabwinde, eine wichtige Rolle. Im weiteren Nachtverlauf werden kleinräumige Kaltluftabflüsse von großräumigen Kaltluftsystemen dominiert, die sich aus den vielen kleinräumigen lokalen Kaltluftabflüssen in dem Kaltlufteinflussgebiet aggregieren. Um sowohl das lokale Kaltluftgeschehen zu Beginn der Nacht als auch die großräumigen Kaltluftsysteme in den späteren Nachtstunden bewerten zu können, werden im folgenden Simulationszeitpunkte von 1 Stunde, 2 Stunden und 4 Stunden nach Sonnenuntergang ausgewertet. Die Abb. 5-3, Abb. 5-6 und Abb. 5-9 zeigen die über die Kaltluftschichtdicke gemittelte Kaltluftgeschwindigkeit sowie

überlagerte Strömungsvektoren im Auswertebereich für die Simulationszeitpunkte von 1 Stunde (Abb. 5-3), 2 Stunden (Abb. 5-6) und 4 Stunden (Abb. 5-9) nach Sonnenuntergang. In den Abb. 5-4, Abb. 5-7 und Abb. 5-10 ist die Schichtdicke der Kaltluft zu entsprechenden Simulationszeitpunkten dargestellt. Die Abb. 5-5, Abb. 5-8 und Abb. 5-11 zeigen darüber hinaus die Volumenstromdichte der Kaltluft im Auswertebereich. Diese ist eine Bewertungsgröße für die Durchlüftungsverhältnisse. Sie drückt aus, welches Luftvolumen pro Zeit- und Flächeneinheit herangeführt bzw. ausgetauscht wird.

In den frühen Abendstunden, insbesondere während der ersten Stunde nach Sonnenuntergang, dominieren Hangabwinde die Strömungssituation im Modellgebiet. Die Strömungsvektoren zeigen, wie die Kaltluft im Bereich der Hänge entlang der Hangneigung abfließt. Die Strömungsgeschwindigkeiten betragen dabei in den engen Seitentälern des Teutoburger Walds und des Schafbergs bereits 1,5 – 2 m/s (Abb. 5-3). Sowohl von den nördlich gelegenen Hängen des Schafbergs als auch von den südlich angrenzenden Hängen des Teutoburger Walds fließen schwache Kaltluftströmungen in das Stadtgebiet von Ibbenbüren. Aus den südöstlich gelegenen Höhenlagen fließt ein vergleichsweise mächtiger Kaltluftstrom mit einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 1 m/s in den südöstlichen Stadtbereich. In den bebauten Bereichen von Ibbenbüren zeigt sich eine Reduktion der Kaltluftgeschwindigkeiten, bevor die Kaltluft nordwestlich des Stadtgebiets relativ großflächig entlang der Geländeneigung abfließt.

Die beschriebenen Charakteristiken lassen sich auch in der räumlichen Verteilung der Kaltluftmächtigkeit erkennen (Abb. 5-4). Grundsätzlich sind die Schichtdicken der Kaltluft auf den Bergen und an den Hängen gering, weil sie von dort recht schnell abfließen. Erreicht ein Kaltluftabfluss eine Senke oder flaches Gelände, so nimmt die Strömungsgeschwindigkeit ab und die Kaltluftschicht kann unter Umständen bis auf große Höhe anwachsen. Im Extremfall (bei Aufstau) kann sich ein Kaltluftsee bilden. An den Hängen der umgebenden Höhenzüge werden nach einer Stunde Simulationszeit großflächig Kaltluftschichtdicken unter 5 m berechnet. An den Stellen, an denen Kaltluft von mehreren Seiten zusammenfließt, werden bereits größere Schichtdicken von bis zu 30 m südöstlich des Stadtgebiets von Ibbenbüren erreicht. In sehr schmalen Seitentälern oder auch in Abbaugruben sind vereinzelt auch noch größere Schichtdicken von bis zu 50 m zu erkennen. Über den bebauten Bereichen des Stadtgebiets bilden sich im Vergleich zu den Freiflächen in der Umgebung geringere Kaltluftschichtdicken von großflächig weniger als 10 m aus.

In den frühen Abendstunden sind die Kaltluftabflüsse von den umgebenden Hängen in das Stadtgebiet von Ibbenbüren hinein noch vergleichsweise schwach und die Kaltluftschichtdicken liegen großflächig bei weniger als 15 m. Entsprechend werden im gesamten Gemeindegebiet von Ibbenbüren in der ersten Stunde nach Sonnenuntergang auch vergleichsweise geringe Kaltluftvolumenstromdichten von weniger als $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ berechnet (Abb. 5-5). Lediglich ein

Kaltluftstrom aus den südöstlichen Höhenlagen des Teutoburger Walds fließt zu diesem frühen Simulationszeitpunkt mit bis zu $15 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ in das südöstliche Stadtgebiet hinein. An den Nordhängen des Schafbergs sind aufgrund der sehr schmalen Seitentäler Volumenstromdichten von bis zu $40 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ zu erkennen, die in nördliche Richtung abströmen.

Die Abb. 5-6 bis Abb. 5-8 zeigen die Kaltluftsituation zu einem Simulationszeitpunkt von etwa 2 Stunden nach Sonnenuntergang. Im gesamten Modellgebiet sind weiterhin die der Geländeneigung folgenden Kaltluftabflüsse zu erkennen. Die Hangabwinde aus dem südlich gelegenen Teutoburger Wald und dem Schafberg in das Stadtgebiet von Ibbenbüren hinein münden in den mittlerweile stärker ausgeprägten Kaltluftstrom aus südöstlicher Richtung (Abb. 5-6). Die Kaltluft fließt über das Stadtgebiet von Ibbenbüren hinweg in nordwestliche Richtung ab. Dabei treten Fließgeschwindigkeiten von bis zu $1,2 \text{ m/s}$ über den bebauten Bereichen des Stadtgebiets auf. Südlich des Teutoburger Walds und nördlich des Schafbergs sind weiterhin hohe Fließgeschwindigkeiten in den engen Seitentälern zu erkennen, durch die die Kaltluft der Geländeneigung folgend in nordöstliche bzw. in südwestliche Richtung abfließt.

Im südöstlichen Stadtbereich von Ibbenbüren sind die Kaltluftschichtdicken zu einem Simulationszeitpunkt von 2 Stunden nach Sonnenuntergang auf bis zu 35 m angewachsen (Abb. 5-7). Auch im restlichen Bereich der langegezogenen Senke zwischen Teutoburger Wald und Schafberg fließt die Kaltluft von mehreren Seiten zusammen, sodass sich Schichtdicken von großflächig bis zu 25 m ausbilden können. In den ersten beiden Stunden nach Sonnenuntergang nimmt somit insbesondere über dem Stadtgebiet von Ibbenbüren sowohl die Fließgeschwindigkeit als auch die Schichtdicke der Kaltluft zu. Entsprechend erhöht sich auch die Volumenstromdichte der Kaltluft über dem Stadtgebiet von Ibbenbüren auf bis zu $35 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ (Abb. 5-8). Weitere mächtige Kaltluftströme sind im nördlichen Bereich des Modellgebiets zu erkennen. Dabei fließt ein Großteil der an den Hängen des Schafbergs produzierten Kaltluft in nordöstliche Richtung ab. Südwestlich des Teutoburger Walds stellt sich eine eher schwache Strömung ein, die großflächig der geringen Geländeneigung folgend in westliche Richtung abfließt.

Nach 4 Stunden ist das großräumige Kaltluftsystem vollständig ausgebildet (Abb. 5-9 bis Abb. 5-11). Die Kaltluftströmung, die aus südöstlicher Richtung über Ibbenbüren hinweg nach Nordwesten strömt, hat sich weiter verstärkt und überströmt die bebauten Stadtgebiete großflächig mit Fließgeschwindigkeiten von ca. $1,5 \text{ m/s}$ (Abb. 5-9). Am Talausgang dreht die Strömung und umströmt die Erhebung des nordwestlichen Bereichs des Schafbergs. Im Vergleich zu den frühen Abendstunden haben sich die Hangabwinde südlich und nördlich des Stadtgebiets von Ibbenbüren deutlich abgeschwächt und die Schichtdicke der Kaltluft ist im gesamten Bereich zwischen den beiden Erhebungen des Teutoburger Walds und des Schafbergs großflächig auf bis zu 40 m angewachsen (Abb. 5-10). Stellenweise ist im Stadtgebiet von

Ibbenbüren sogar eine noch höhere Kaltluftschichtdicke von bis zu 45 m zu erkennen. Auch auf der Südseite der nordwestlichen Ausläufer des Teutoburger Walds sowie auf der Nordseite des Schafbergs liegen Kaltluftschichtdicken von 30 – 40 m vor. Die Volumenstromdichte des mächtigen Kaltluftstroms, der entlang der Geländeneigung in nordwestliche Richtung über das Stadtgebiet von Ibbenbüren abfließt, beträgt stellenweise mehr als $40 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ (Abb. 5-11).

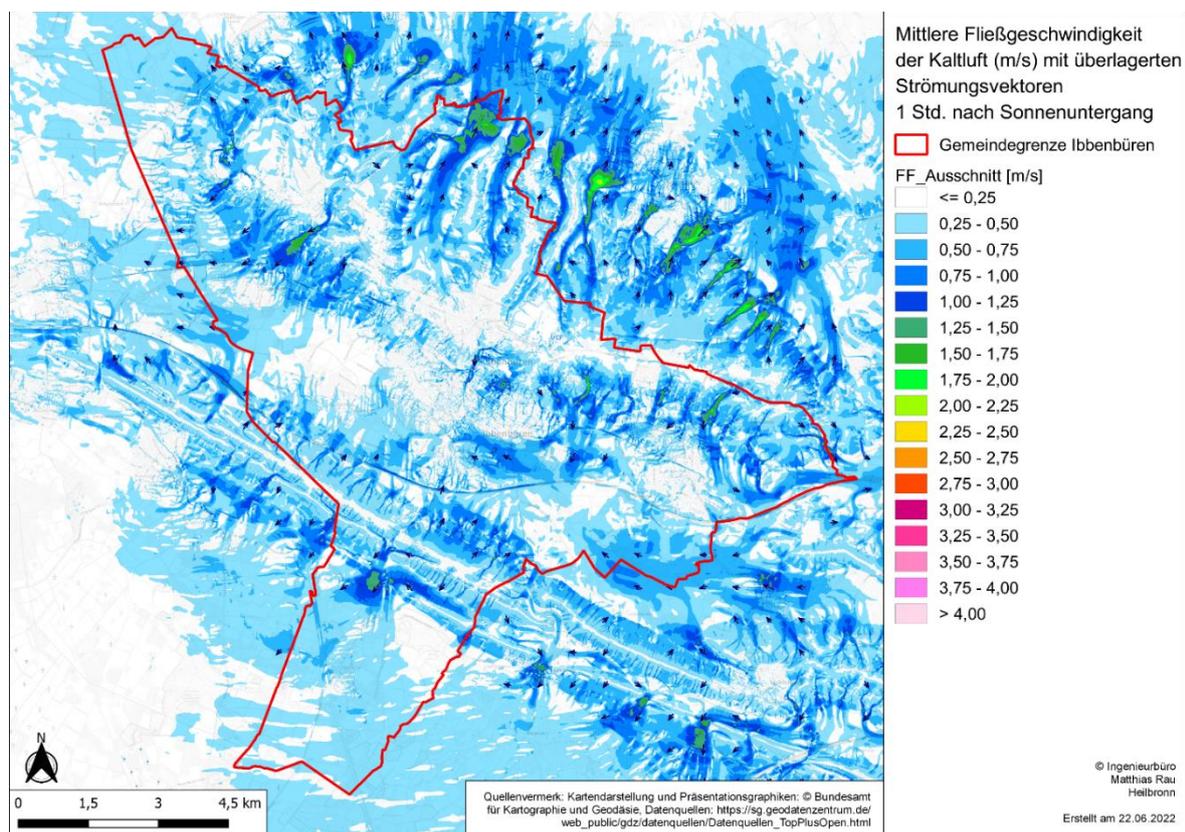


Abb. 5-3: Mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s) und überlagerte Strömungsvektoren 1 Stunde nach Sonnenuntergang.

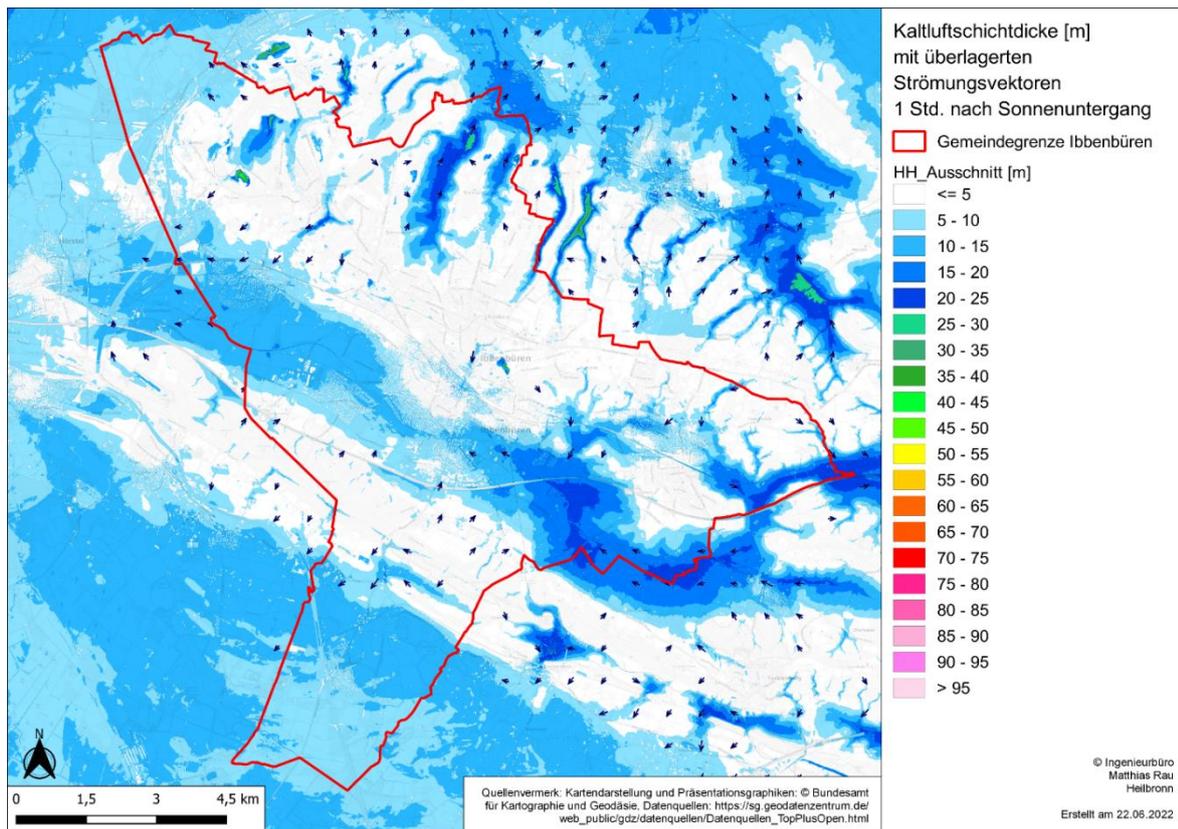


Abb. 5-4: Kaltluftschichtdicke (m) und überlagerte Strömungsvektoren 1 Stunde nach Sonnenuntergang.

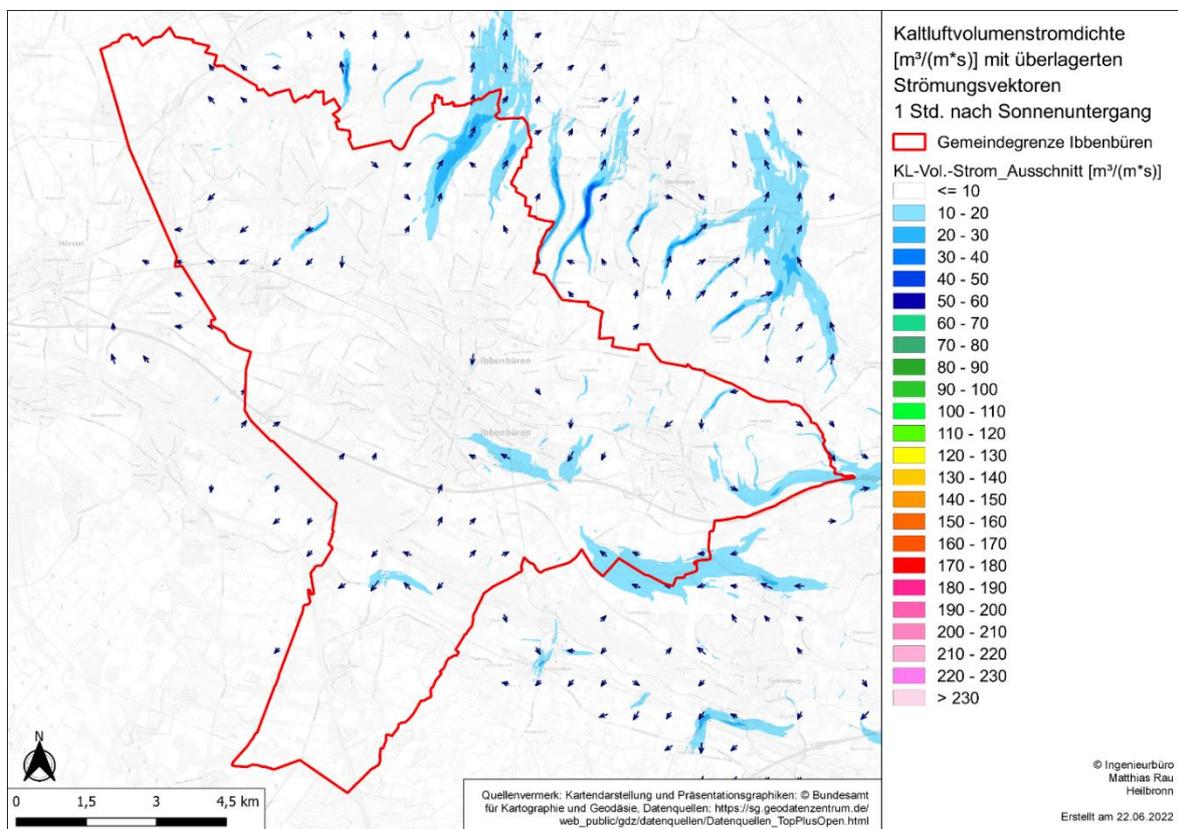


Abb. 5-5: Kaltluftvolumenstromdichte (m³/(m*s)) und überlagerte Strömungsvektoren 1 Stunde nach Sonnenuntergang.

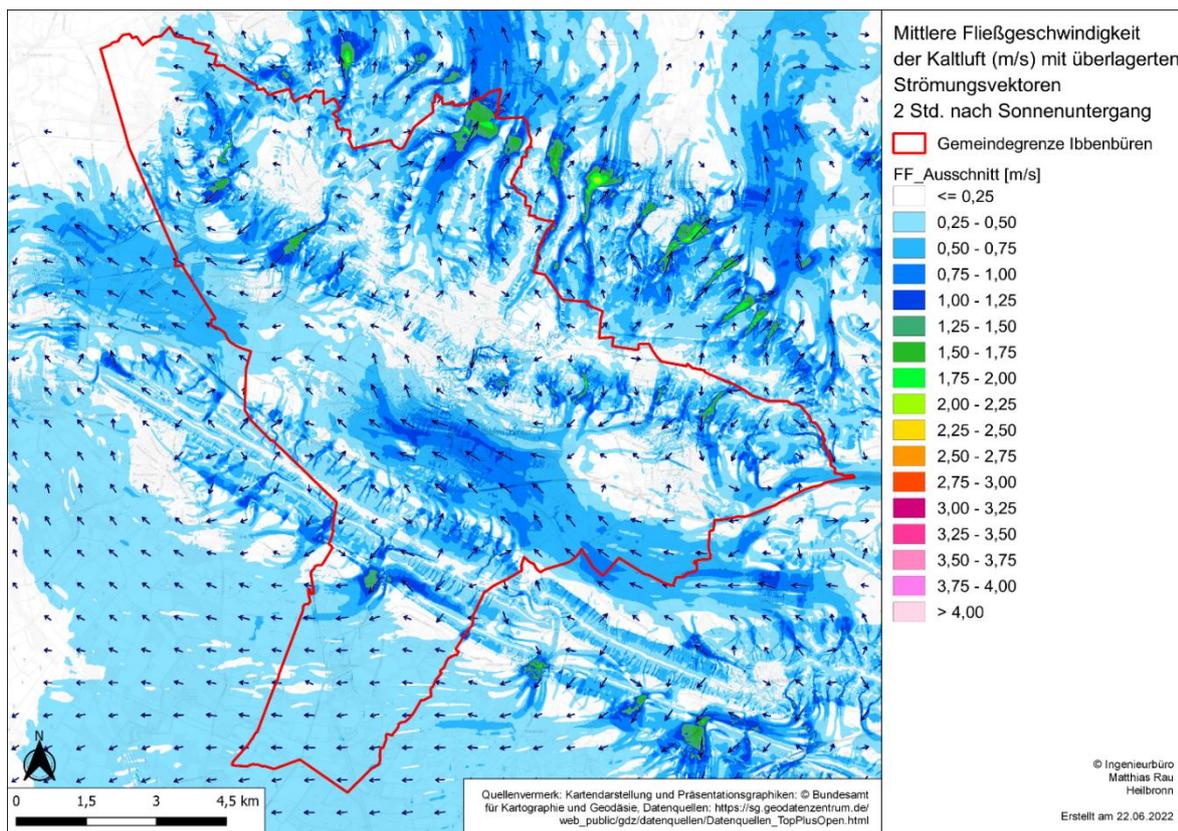


Abb. 5-6: Mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s) und überlagerte Strömungsvektoren 2 Stunden nach Sonnenuntergang.

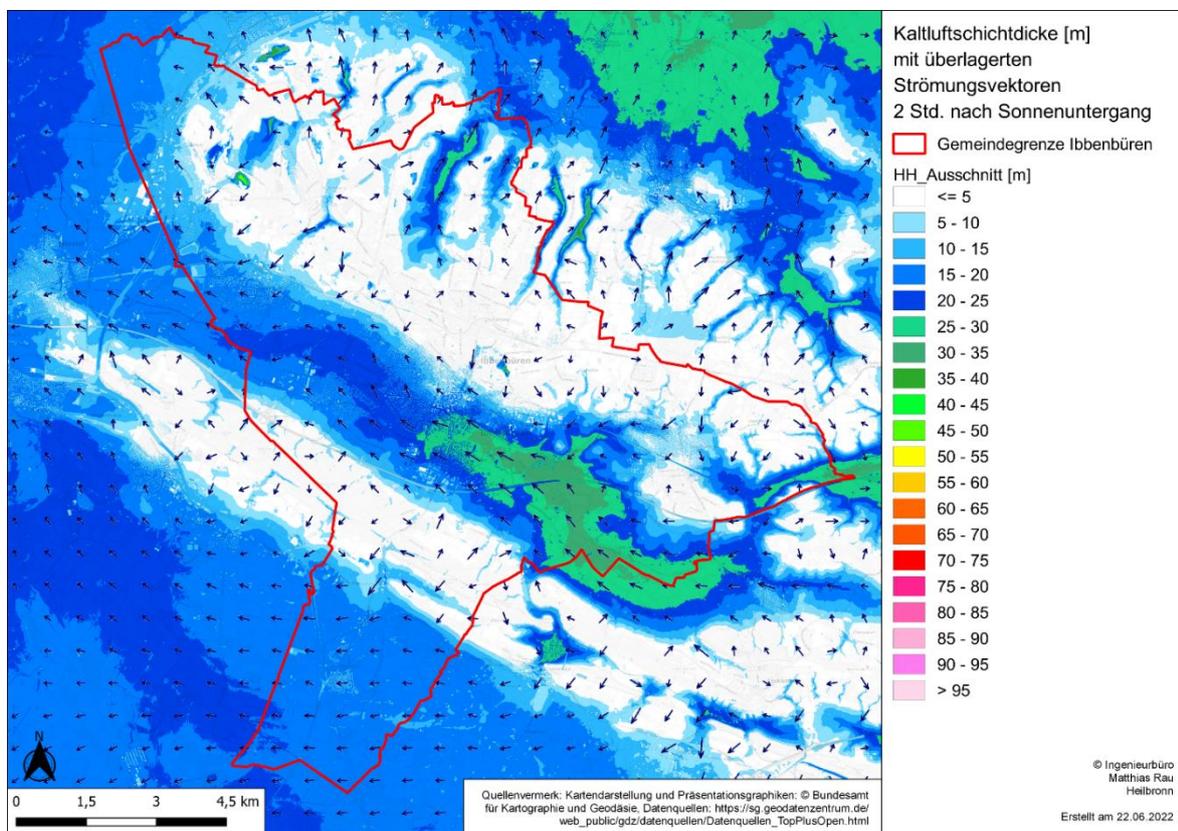


Abb. 5-7: Kaltluftschichtdicke (m) und überlagerte Strömungsvektoren 2 Stunden nach Sonnenuntergang.

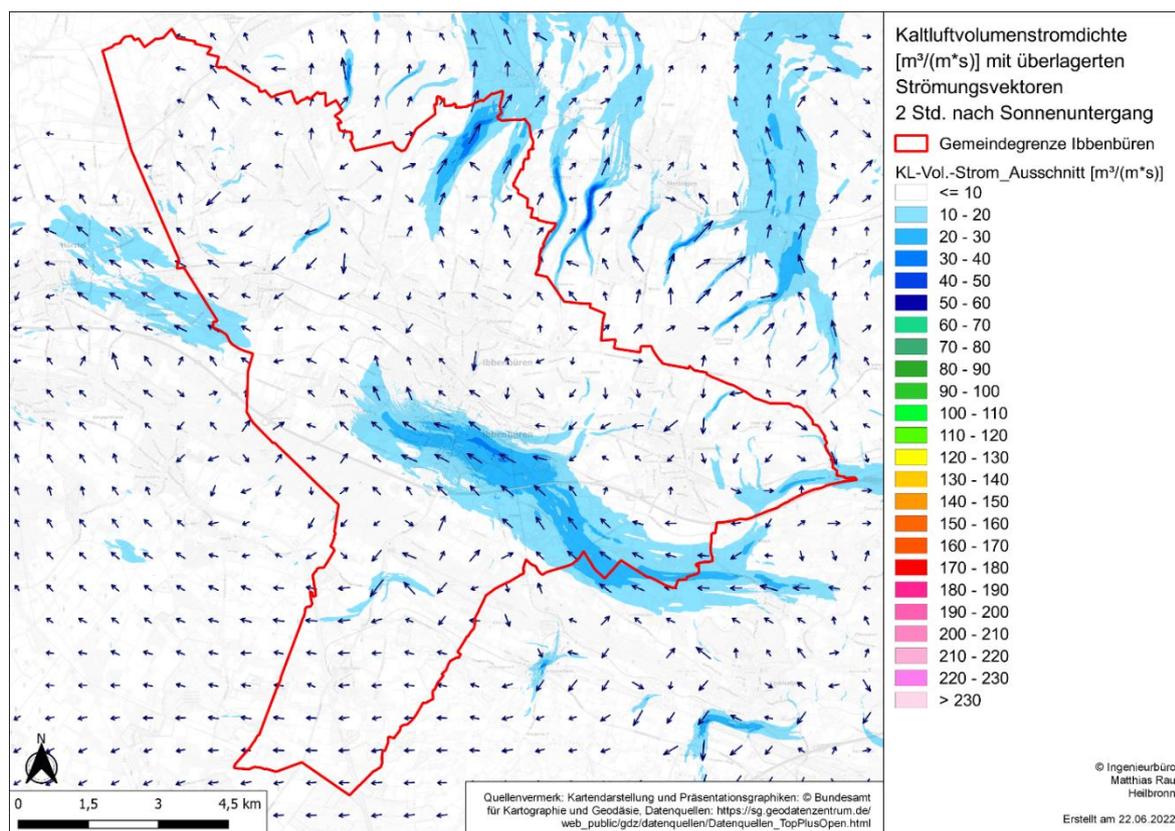


Abb. 5-8: Kaltluftvolumenstromdichte ($m^3/(m*s)$) und überlagerte Strömungsvektoren 2 Stunden nach Sonnenuntergang.

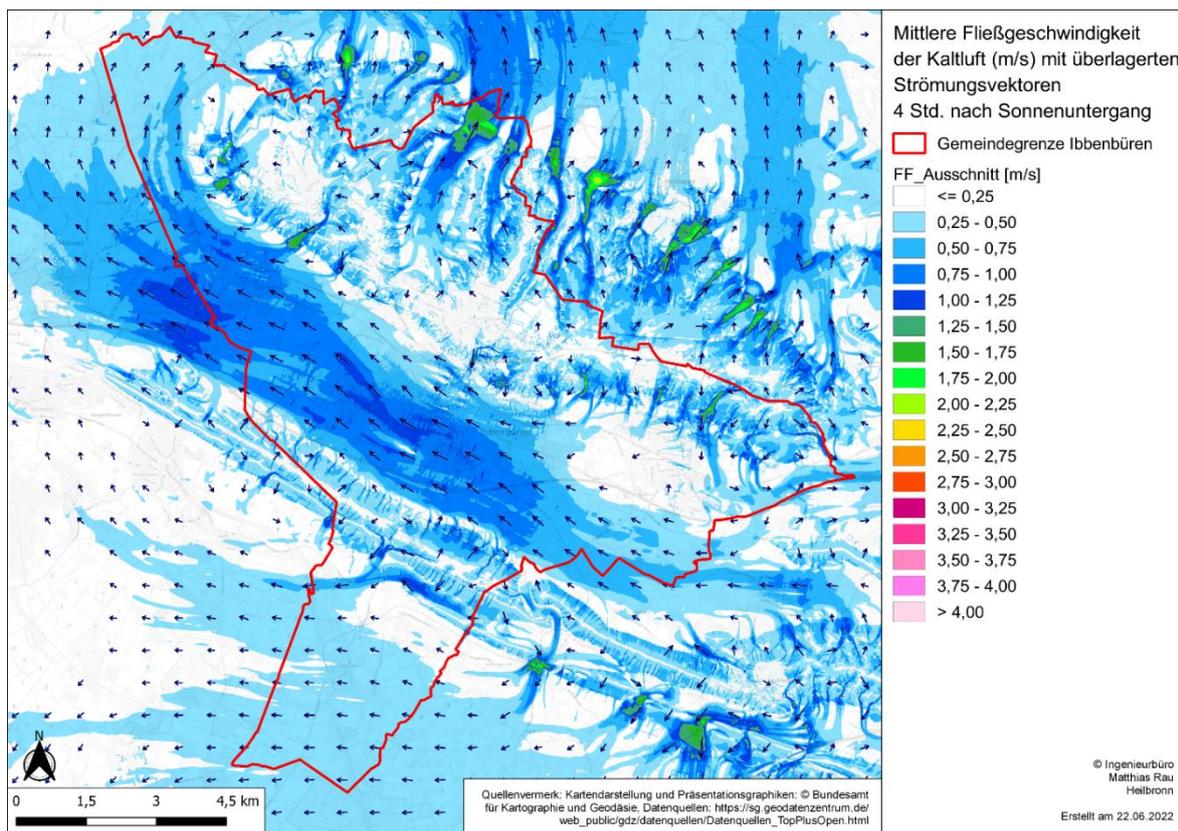


Abb. 5-9: Mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s) und überlagerte Strömungsvektoren 4 Stunden nach Sonnenuntergang.

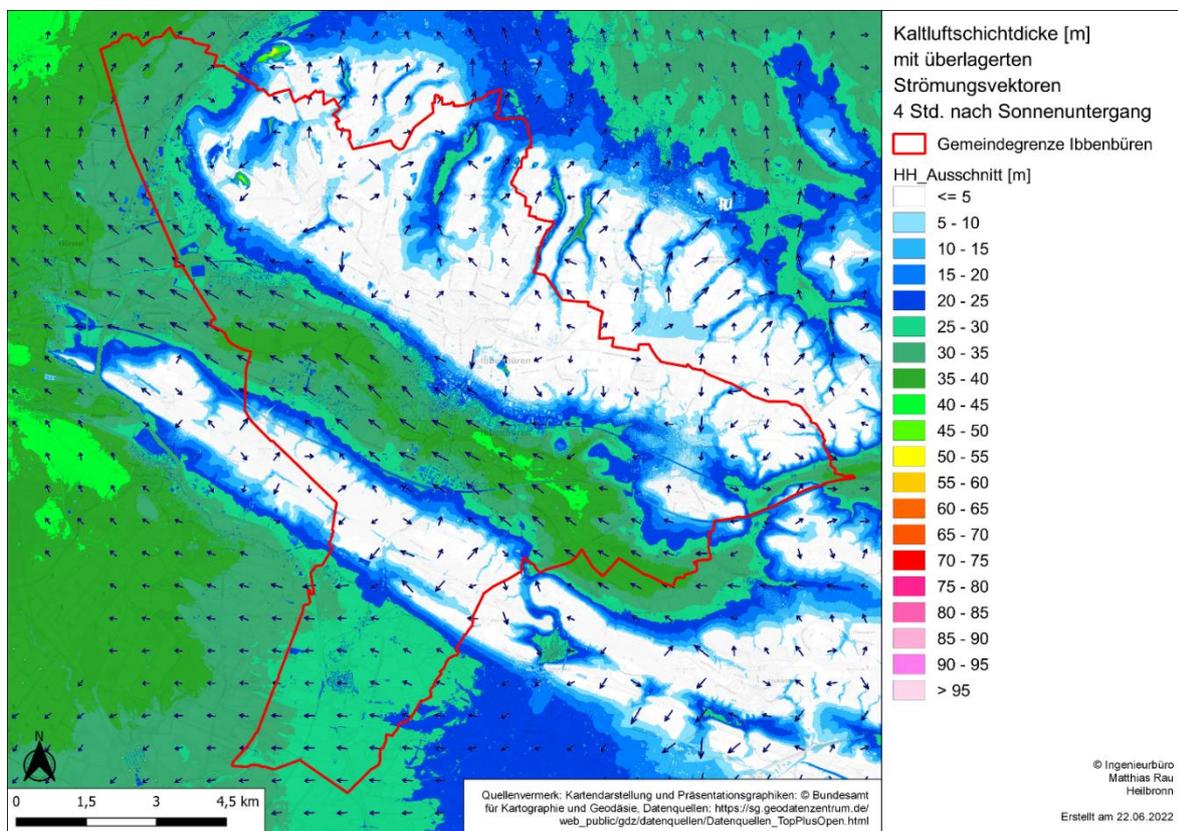


Abb. 5-10: Kaltluftschichtdicke (m) und überlagerte Strömungsvektoren 4 Stunden nach Sonnenuntergang.

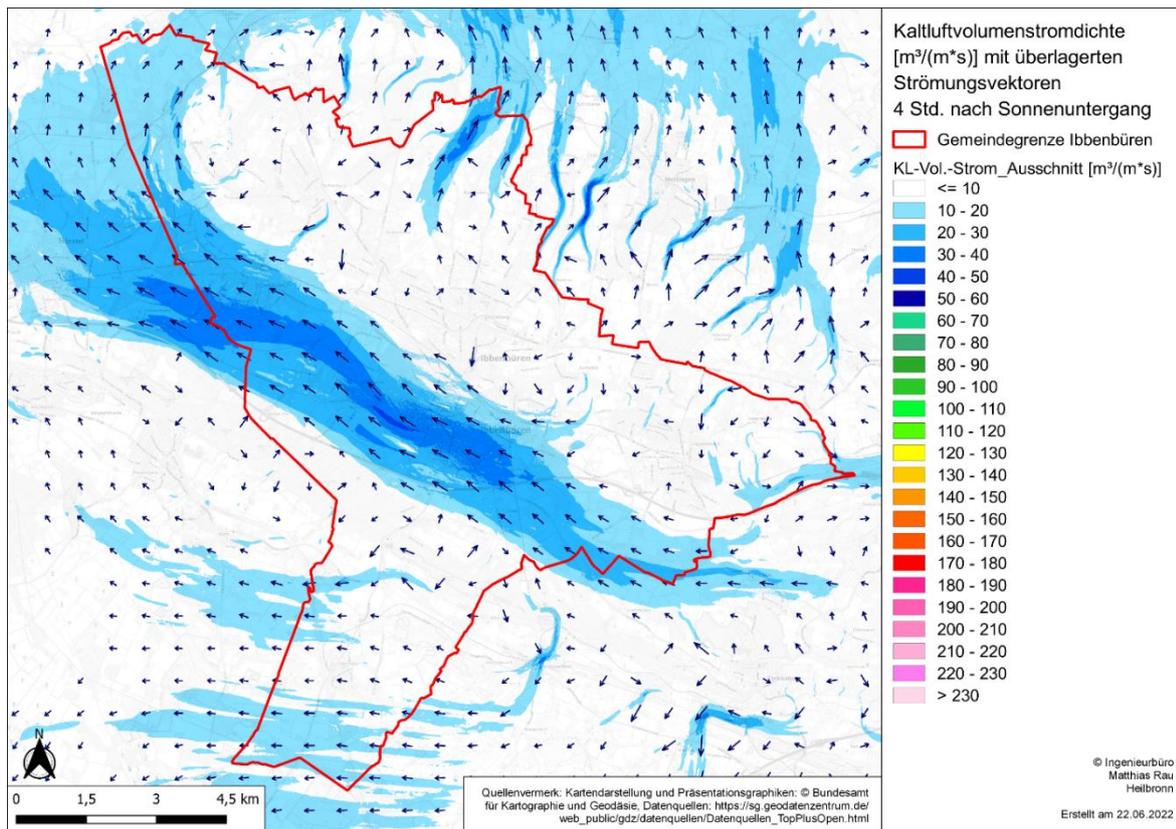


Abb. 5-11: Kaltluftvolumenstromdichte (m³/(m*s)) und überlagerte Strömungsvektoren 4 Stunden nach Sonnenuntergang.

6 Numerische Simulationen zur Ermittlung der stadtweiten bodennahen Temperaturverteilung bei sommerlichen Strahlungswetterlagen

6.1 Allgemeine Modellbeschreibung

Das prognostische mesoskalige Strömungsmodell [3] beruht auf dem wissenschaftlichen Modell METRAS, das am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg entwickelt wurde. Die Entwicklung der frei verfügbaren Version METRAS-PCL wurde durch das Umweltbundesamt gefördert [4]. METRAS-PCL ist gemäß VDI 3783 Blatt 7 [5] evaluiert.

Das Modell beruht auf den physikalischen Erhaltungsgleichungen für Impuls, Temperatur und Feuchte, die in Flussform dreidimensional gelöst werden. Die Modellgleichungen werden unter den in der Mesoskala allgemein gültigen Näherungen (u.a. anelastische Approximation, Boussinesq-Approximation) numerisch gelöst. Im Unterschied zu einigen anderen prognostischen mesoskaligen Modellen arbeitet METRAS-PCL mit weitgehend offenen seitlichen Rändern. Die Modellergebnisse im Prognosegebiet können sich dadurch besser an die topographischen Gegebenheiten im gesamten Modellgebiet anpassen und werden weniger von festen Vorgaben an den Rändern beeinflusst. Prognostische Berechnungsgrößen sind der Wind, die potentielle Temperatur, die spezifische Feuchte sowie Oberflächentemperatur und -feuchte.

Die subskaligen turbulenten Flüsse werden in METRAS-PCL über eine Schließung 1. Ordnung parametrisiert. Für die bodennahen turbulenten Flüsse wird die Gültigkeit der Obukhov-Ähnlichkeitstheorie angenommen. Innerhalb einer Modellgitterzelle können mehrere Oberflächen- und Bewuchstypen in unterschiedlichen prozentualen Anteilen vorkommen.

Die Bilanz der Energieflüsse an der Bodenoberfläche wird über eine Flussmittelungsmethode gemäß einem Blendhöhenkonzept berechnet. Dabei werden die Energieflüsse für jede Bodennutzungs-kategorie separat berechnet und anschließend mit den prozentualen Anteilen der jeweiligen Kategorie gewichtet gemittelt. Aufgrund dieser Berechnungsmethodik wird vom Modell keine Temperatur in 2 m berechnet. Berechnungsgrößen sind dagegen die bodennahe Lufttemperatur direkt über der Oberfläche, die im Mittel über die in der Gitterzelle enthaltenen Bodennutzungs-kategorien gilt, und die in 10 m Höhe gültige Schichtmitteltemperatur der unteren Modellebene, die vom Boden bis in 20 m Höhe reicht. Diese Unterscheidung ist für die Interpretation der berechneten Temperaturen von Bedeutung und wird dort noch einmal aufgegriffen.

Als meteorologische Eingangsdaten zur Initialisierung des Modells können, je nach beabsichtigter Anwendung, der Bodendruck, die mittlere Bodentemperatur, die Wassertemperatur von Seen und

Flüssen und vertikale Profile des geostrophischen Windes⁶, der potentiellen Temperatur und der relativen Feuchte vorgegeben werden.

Im *stationären* Simulationsmodus berechnet METRAS-PCL dreidimensionale Windfelder, wie sie sich im dynamischen Gleichgewicht unter den gegebenen topographischen (Geländere relief, Landnutzung) und großräumigen meteorologischen Bedingungen einstellen. Im *instationären* Simulationsmodus werden zusätzlich die zeitabhängigen Energieflüsse am Boden berücksichtigt. In diesem Modus werden thermische Windsysteme, Temperatur und Feuchte sowie weitere diagnostisch abgeleitete Größen berechnet.

Aufgrund der umfassenden Modellphysik können mit METRAS PC alle auf der regionalen Skala relevanten Prozesse realitätsnah berechnet werden. Die horizontale räumliche Auflösung liegt typischerweise zwischen 50 m und 1 km, die typische vertikale Auflösung bei 20 m bodennah bis 1 km am Modelloberrand. Das Modellgitter kann in alle Raumrichtungen nicht-äquidistant gewählt werden. Innerhalb des auszuwertenden Untersuchungs- bzw. Prognosegebiets sollte das Gitter horizontal äquidistant sein. Innerhalb jeder Gitterzelle werden die mittlere Geländehöhe sowie die prozentualen Anteile der in METRAS-PCL vorgesehenen derzeit 42 Oberflächenbedeckungsklassen vorgegeben.

6.2 Konzept der Modellrechnungen

Auf Basis von prognostischen Modellierungen mit METRAS-PCL soll eine charakteristische sommerliche Strahlungswetterlage (sog. autochthone Wetterlage) in ihrer Wirkung auf die Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Tagesverlauf untersucht werden.

Mit Hilfe solcher Modellrechnungen können typische Charakteristiken untersucht werden, jedoch weder die Verhältnisse unter einer konkreten meteorologischen Einzelsituation noch im klimatologischen Mittel. Letzteres wäre zwar möglich, erforderte aber eine sehr aufwändige Modellierung aller statistisch relevanten Wetterlagen mit anschließender statistischer Auswertung.

Zur Untersuchung einer charakteristischen sommerlichen Strahlungswetterlage wurde eine instationäre Modellrechnung ohne großräumigen Wind bei unbewölktem Himmel für einen typischen Hochsommertag durchgeführt. Bei einer instationären Modellrechnung werden die Energieflüsse am Boden unter Berücksichtigung kurzweiliger Einstrahlung, langweiliger Ausstrahlung, den Flüssen sensibler und latenter Wärme sowie dem Bodenwärmefluss zeitabhängig berücksichtigt. In die Berechnung der kurzweiligen Einstrahlung geht auch die Abschattung durch Topographie innerhalb des Modellgebiets ein.

⁶ Der geostrophische Wind ist proportional zum horizontalen Druckgradienten und entspricht dem großskaligen, von Reibung unbeeinflussten Wind.

6.3 Rechengebiet

Die Festlegung von Rechengebieten stellt immer einen Kompromiss dar, der sich aufgrund limitierter Rechenressourcen gebietet. Einerseits ist eine möglichst feine räumliche Auflösung erwünscht. Andererseits ist eine Mindest-Modellgebietsgröße nötig, um alle für die Untersuchung relevanten topographischen Strukturen zu erfassen und im Auswertebiet weitgehend frei von Einflüssen der Modellgebietsränder auf die Modellergebnisse zu sein.

Zur Festlegung eines geeigneten Rechengebiets wurden vorab mehrere Testrechnungen durchgeführt. Anhand dieser Rechnung wurde die endgültige räumliche Auflösung und Größe des Modellgebiets festgelegt. Das letztlich verwendete Modellgebiet erstreckt sich in West-Ost-Richtung etwa von Rheine bis Osnabrück und in Süd-Nord-Richtung von Greven bis zu einer Linie Hopsten-Bramsche. Es schließt den Schafberg nördlich von Ibbenbüren komplett ein und umfasst einen Großteil des Teutoburger Waldes. Von Südwesten bis Nordosten setzt sich die weitgehend flache Norddeutsche Tiefebene fort. (Abb. 6-1). Der Teutoburger Wald setzt sich nach Südosten hin über mehr als 100 km in ähnlicher Struktur und Höhe fort, so dass von diesem Höhenzug keine anders gearteten Einflüsse auf die Strömungsverhältnisse im Auswertebiet erwartet werden können, als sie ohnehin durch die gewählte Gebietsgröße schon erfasst sind.

Die Modellgebietsgröße liegt damit bei 35,5 x 33,0 km². Die räumliche Auflösung ist im gesamten Modellgebiet mit 100 m äquidistant.

Der obere Rand des Modellgitters liegt in 8 km Höhe. Die vertikale Auflösung beträgt bodennah bis in 120 m Höhe 20 m, darüber wachsen die Gitterweiten an und erreichen in etwa 5 km Höhe die maximale Gitterweite von 1 km.

Die unterste Modellschicht, in der auch die Auswertung der Modellergebnisse erfolgt, reicht also vom Boden bis in 20 m Höhe. Alle Modellergebnisse stellen Mittelwerte über diese Schicht dar.

Die Geländehöhen sowie die Landnutzungen stammen aus den mit METRAS-PCL von der Universität Hamburg zur Verfügung gestellten Datensätzen für Deutschland [4].

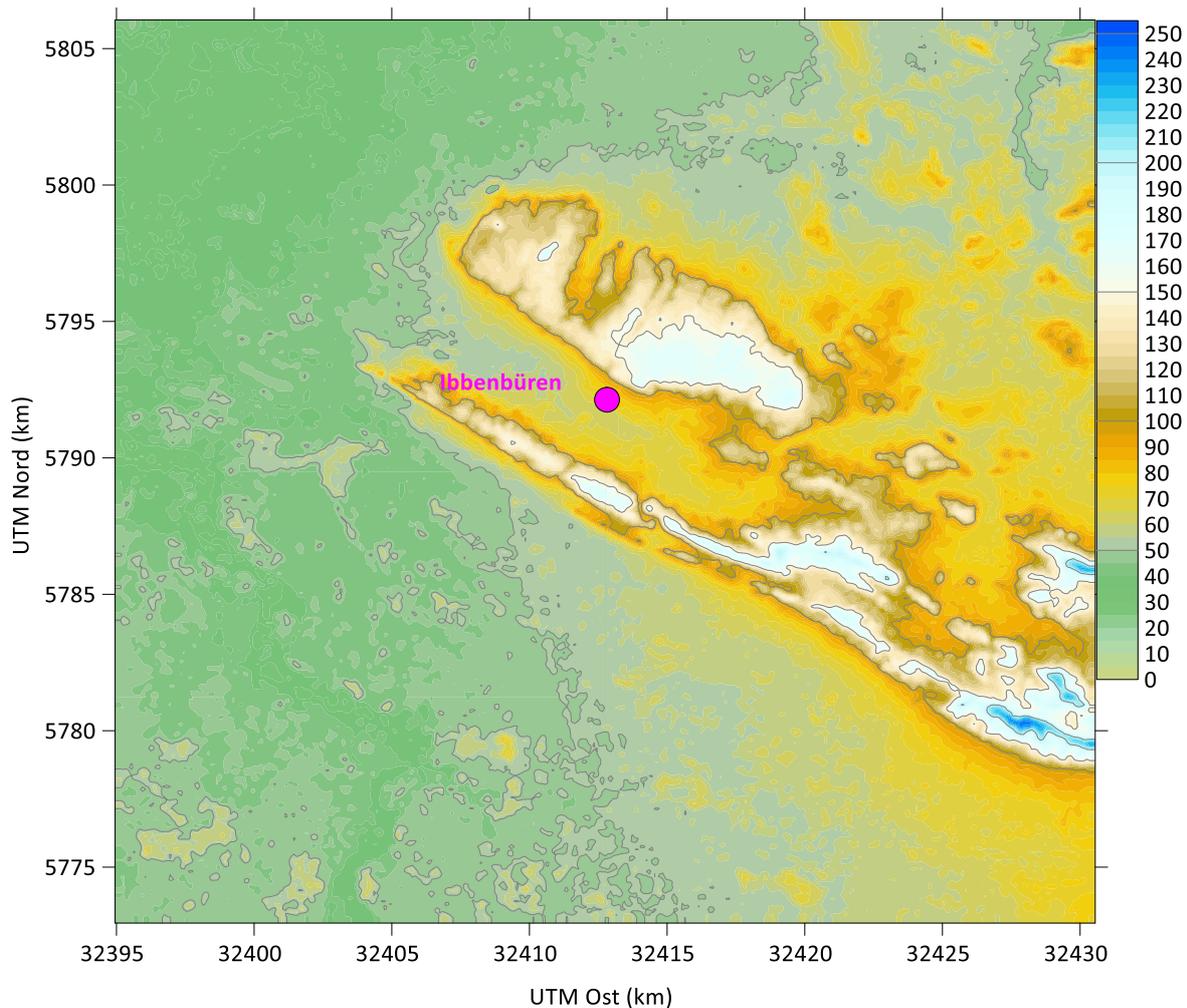


Abb. 6-1: Geländehöhen in m NHN im METRAS-PCL-Rechengebiet.

6.4 Meteorologische Eingangsdaten

Für die instationäre Modellrechnung wurden die charakteristischen Verhältnisse eines Hochsommertags unter einer autochthonen Wetterlage bei ungestörter Einstrahlung und ohne übergeordneten Wind angesetzt. Die Simulationsrechnung startet am 1. August um 18⁰⁰ wahre Ortszeit und wird über 36 Stunden bis zum 3. August 6⁰⁰ fortgeführt. Gemäß den typischen Bedingungen am späten Nachmittag wird zu Simulationsbeginn eine gut durchmischte, neutral geschichtete Grenzschicht zwischen Boden und 1.800 m Höhe vorgegeben. Darüber ist die Atmosphäre gemäß Definition einer Standardatmosphäre bis zum oberen Rand mit einem potentiellen Temperaturgradienten von 0,0035 K/m leicht stabil geschichtet. Der Bodendruck beträgt 1.013 hPa, die bodennahe Lufttemperatur 25°C. Die Wassertemperatur der Seen und Flüsse wird mit 23°C vorgegeben. Die gleiche Temperatur herrscht in den oberen Bodenschichten bis 50 cm Tiefe. Die Böden sind mit Feuchtigkeit gesättigt. Die relative Feuchte wird im gesamten Modellgebiet mit 5 % vorgegeben. Damit ist Wolken- und Niederschlagsbildung während der Simulationsrechnung ausgeschlossen.

6.5 Ergebnisse der numerischen Temperatursimulationen

Die Abbildungen Abb. 6-2 bis Abb. 6-5 zeigen anhand von Vektordarstellungen die Strömungssituation zu einzelnen Zeitpunkten im Tagesverlauf.

Kurze Zeit nach Sonnenuntergang (Abb. 6-2) bilden sich unter dem Einfluss der langwelligen Ausstrahlung und Abkühlung der Erdoberfläche zunächst Hangabwinde entlang des Schafbergs und Teutoburger Walds aus. In der zweiten Nachthälfte (Abb. 6-3) hat sich ein über mehrere Stunden ähnliches, großräumigeres Windsystem eingestellt. Zwischen den beiden Höhenzügen besteht ein Südostwind, der über Ibbenbüren streicht und sich nach Nordwesten hin noch verstärkt. Die Hangabwinde an den Südseiten von Schafberg und Teutoburger Wald sind weitgehend durch die hangparallele Strömung abgelöst worden. Diese grundlegende Charakteristik stimmt, wenn im Detail auch abweichend, gut mit den Ergebnissen der Kaltluft-Berechnungen überein, wie ein Vergleich der Abb. 5-9 mit der Abb. 6-3 zeigt.

Die Tagessituation unterscheidet sich hiervon grundlegend. Die starke Sonneneinstrahlung führt schon am Vormittag zum Einsetzen von Konvektion. Wo sich Konvektionszellen bilden, kommt es bodennah zum Zusammenströmen von Luft, so genannten Konvektionszonen. Diese Konvektionszonen sind chaotisch und zufällig über das Modellgebiet verteilt und ändern sich in Form und Lage permanent. Deshalb stimmen auch die Strömungsmuster zwischen 12 Uhr (Abb. 6-4) und 14 Uhr (Abb. 6-5) nur in dieser grundlegenden Charakteristik, nicht aber der konkreten Lage und Form überein.

Grundsätzlich sind die modellierten Temperaturen nicht ohne weiteres mit üblicherweise in 2 m Höhe gemessenen Temperaturen zu vergleichen. Im Wesentlichen liegt dies in der vertikalen Auflösung des Modells begründet. Das Modell berechnet die Lufttemperaturen nur als Mittelwerte über die bodennahe Luftschicht bis 20 m über Grund. Im Mittel zeigt diese Schicht eine sehr viel geringere Amplitude im Tagesgang, da das vertikale Temperaturprofil bei der betrachteten meteorologischen Situation zwischen Boden und 20 m Höhe nicht linear verläuft, sondern besonders im unteren Bereich in der zweiten Nachthälfte eine starke Inversion aufweist. Tagsüber ist die bodennahe Luftschicht dagegen übermäßig erwärmt. Außerdem rechnet das Modell nicht hindernisauflösend und kann deshalb die Situation innerhalb von Straßenschluchten oder Innenhöfen und auch nicht im Stammbereich von Wäldern auflösen. Es bildet aber die Energieflüsse zwischen Oberflächen und unterer Atmosphärenschicht realitätsnah ab.

Die hier dargestellten Temperaturen wurden aus den Modellergebnissen durch Kombination von Bodentemperaturen und Schichtmitteltemperatur zwischen 0 m und 20 m über Grund abgeleitet. Sie repräsentieren insbesondere in ihrer räumlichen Struktur gut die charakteristischen bodennahen Temperaturverhältnisse, können aber aus den genannten Gründen nicht die Verhältnisse innerhalb der Hindernisschicht (Stammraum, Innenhöfe usw.), in der Temperaturmessungen üblicherweise durchgeführt werden, exakt wiedergeben. Tendenziell sind

die tatsächlichen räumlichen Gradienten in der Hindernisschicht nachts etwas größer, tags etwas geringer als in den dargestellten Temperaturverteilungen.

In der Abb. 6-6 ist die bodennahe Temperaturverteilung um 4 Uhr, d.h. ungefähr zum Zeitpunkt der stärksten Abkühlung kurz vor Sonnenaufgang, zu sehen. Der Zeitpunkt korrespondiert mit dem Strömungsfeld aus Abb. 6-3.

Da die Wassertemperaturen von Seen, Flüssen und Kanälen bei warmen 23°C liegen, heben sie sich in der Nacht als warme Bereiche hellrosa hervor. Deutlich zu erkennen ist bspw. der Aasee in Ibbenbüren. Das lange rosarote Band von Temperaturen knapp unter 20°C markiert den Dortmund-Ems-Kanal sowie den von Norden her einmündenden Mittellandkanal. Die Kanäle können bei gut 100 m Breite vom Modellgitter nur näherungsweise aufgelöst werden, sie erwärmen andererseits ihre Umgebung nachts auch nicht so stark wie größere Wasserflächen.

Im engeren Stadtgebiet von Ibbenbüren fallen mehrere räumliche Strukturen in den Temperaturen auf. Westlich und südwestlich des Aasees gibt es drei orangene Gebiete, deren Temperaturen sich mit 18°C bis 19°C leicht von der kühleren Umgebung abheben. Hierbei handelt es sich um das zentrale und westliche Stadtgebiet von Ibbenbüren und um die Stadtteile Schierloh und Lehen.

Auch der Ortsteil Laggenbeck im Osten hebt sich mit den beiden Siedlungsbereichen nördlich und südlich der Bahnstrecke etwas wärmer aus der Umgebung heraus. Die Bahnstrecke mit dem begleitenden Grünzug ist dagegen knapp ein Grad kühler als die Siedlungsflächen.

Demgegenüber gibt es zwei größere Gebiete nördlich und nordöstlich sowie ein Gebiet südlich des Aasees, deren grün bis hellgrüne Farbe 16°C bis 17°C entspricht. Bei den nördlichen Gebieten handelt es sich um das Gewerbegebiet an der Laggenbecker Straße und die Fläche des Umspannwerks. Das südliche Gebiet ist das Gewerbegebiet an der Gutenbergstraße. Außerdem fällt das Gelände des Steinkohlekraftwerks Ibbenbüren durch eine gegenüber der Umgebung etwa 1 K niedrigere Temperatur auf. Auf den ersten Blick ist es erstaunlich, dass sich ausgerechnet die Gewerbeflächen kühler aus der Umgebung herausheben. Allerdings sind diese Flächen hochversiegelt und trocken mit sehr geringem Vegetationsanteil bei gleichzeitig geringer Wärmeleitfähigkeit der Oberflächen. Sie heizen sich deshalb tagsüber stark auf, strahlen dafür nachts aber auch sehr effektiv im langwelligen Bereich aus und kühlen dadurch besser ab als feuchtere und leitfähigere Flächen.

Die räumliche Verteilung der mittäglichen Höchsttemperaturen um 14 Uhr (UTC⁷) ist in Abb. 6-7 enthalten. Der Zeitpunkt korrespondiert mit dem Strömungsfeld aus Abb. 6-4.

⁷ Die Differenz der mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ), die die MEZ während des Sommerhalbjahrs in Europa ersetzt, zur UTC beträgt +2 Stunden.

Tagsüber sind die Wasserflächen des Aasees, des Dortmund-Ems-Kanals und des Mittellandkanals sowie weiterer Gewässer kühler als die Umgebung. Sie heben sich deshalb bläulich hervor. Kühler sind auch die bewaldeten Höhenzüge.

Betrachtet man das Stadtgebiet und die direkte Umgebung von Ibbenbüren, so stechen einige Flächen als besonders warm hervor. Die hellrosa Farben markieren Temperaturen über 34°C. Das große Kraftwerksgelände im Norden heizt sich tagsüber wegen der großflächigen Versiegelung und dunkler Flächen sehr stark auf. Ähnliches gilt wegen des hohen Versiegelungsgrades und der geringen Feuchtigkeit für die Gewerbegebiete an der Laggenbecker Straße im Nordosten sowie an der Rudolf-Diesel-Straße und Gutenbergstraße im Süden. Auch der zentrale Stadtbereich um den Bahnhof mit den großflächigen Versiegelungen (Busbahnhof) erwärmt sich besonders stark. Andererseits sind erwartungsgemäß die Grünzüge in Fortsetzung des Aasees und, etwas schwächer ausgeprägt, auch entlang der Bahnstrecke kühler als die Umgebung. Positiv hebt sich auch hervor, dass ein großer Teil des Stadtbereichs als „Gartenstadt“ nur sehr aufgelockert bebaut und mit hohem Grünanteil ausgestattet ist. Der hohe Grünanteil reduziert die tägliche Erwärmung deutlich im Vergleich zum stärker versiegelten Kernbereich und zu den Gewerbeflächen.

Das Gewerbegebiet am Mittellandkanal bei Uffeln hebt sich als weiteres thermisch hoch belastetes Gebiet hervor. Etwas wärmer ist es auch im Bereich der Ortschaft Laggenbeck, insbesondere in deren Gewerbegebiet.

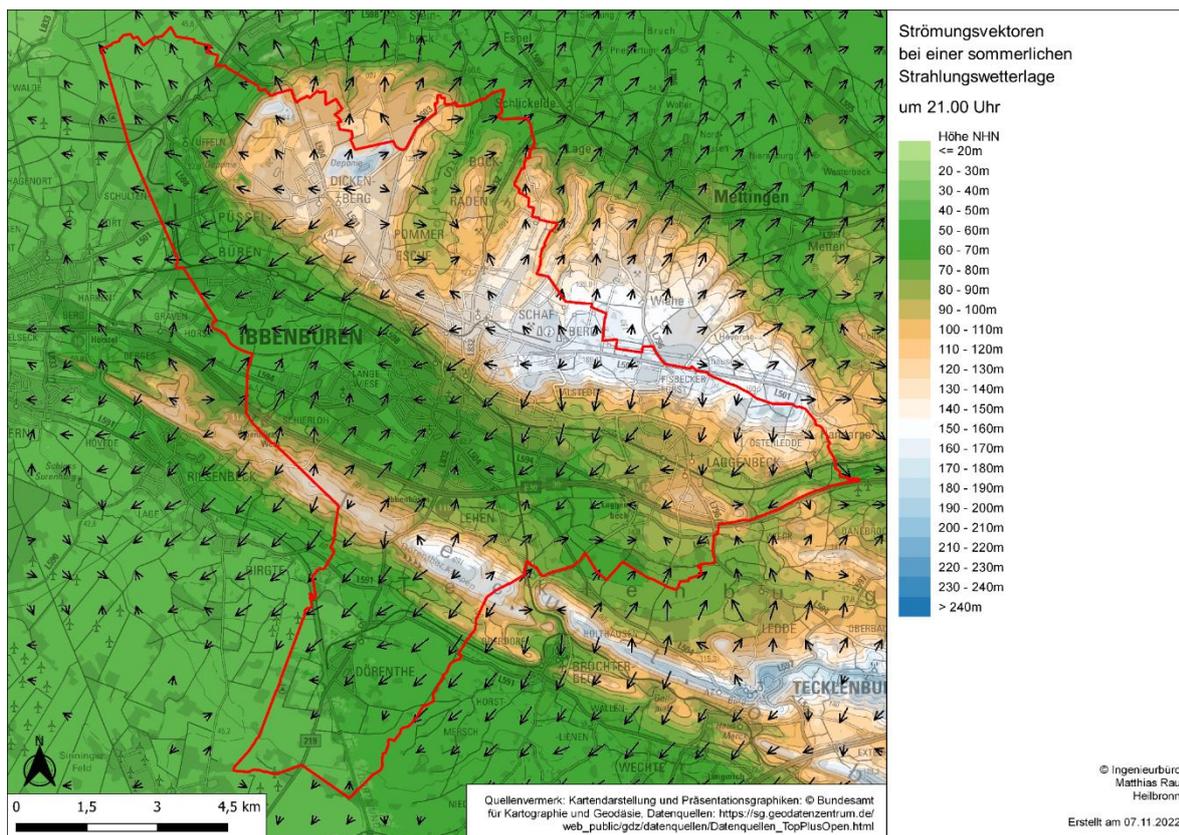


Abb. 6-2: Strömungsvektoren um 21 Uhr lokaler Zeit bei einer typischen hochsommerlichen Strahlungswetterlage.

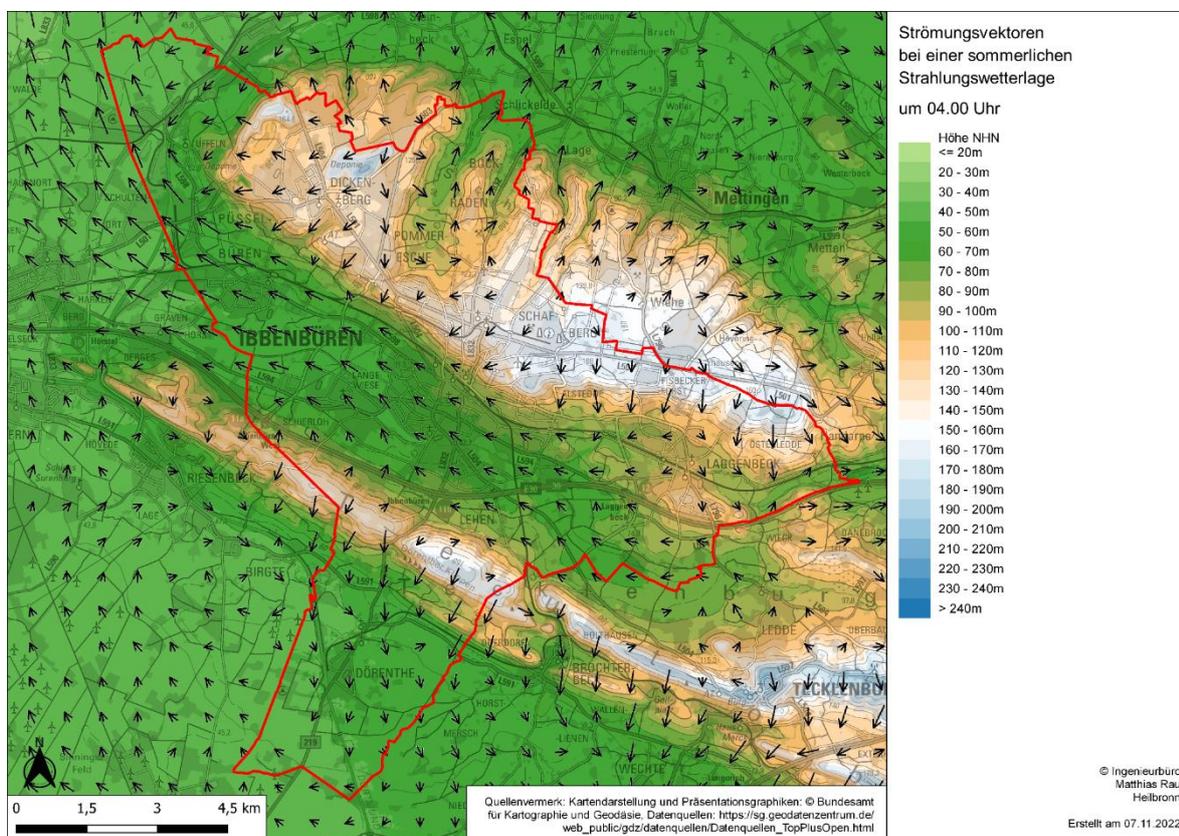


Abb. 6-3: Strömungsvektoren um 4 Uhr lokaler Zeit bei einer typischen hochsommerlichen Strahlungswetterlage.

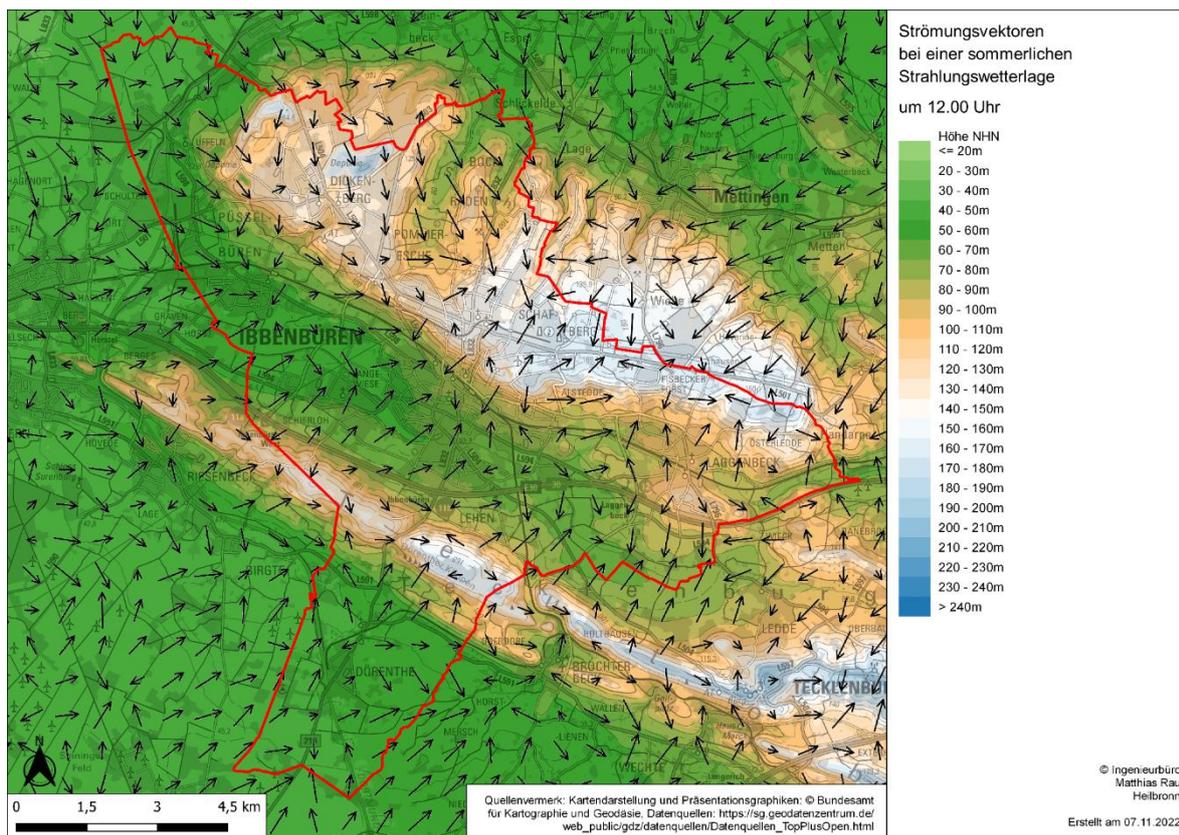


Abb. 6-4: Strömungsvektoren um 12 Uhr lokaler Zeit bei einer typischen hochsommerlichen Strahlungswetterlage.

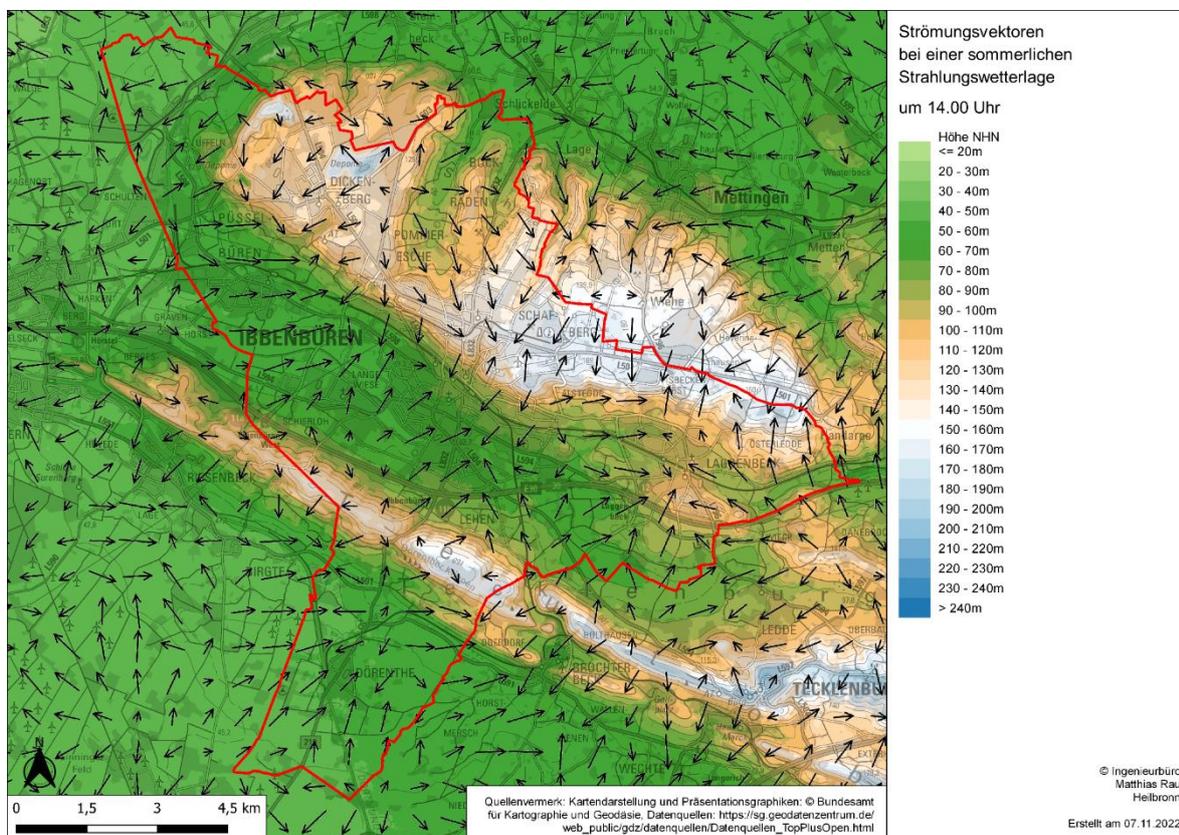


Abb. 6-5: Strömungsvektoren um 14 Uhr lokaler Zeit bei einer typischen hochsommerlichen Strahlungswetterlage.

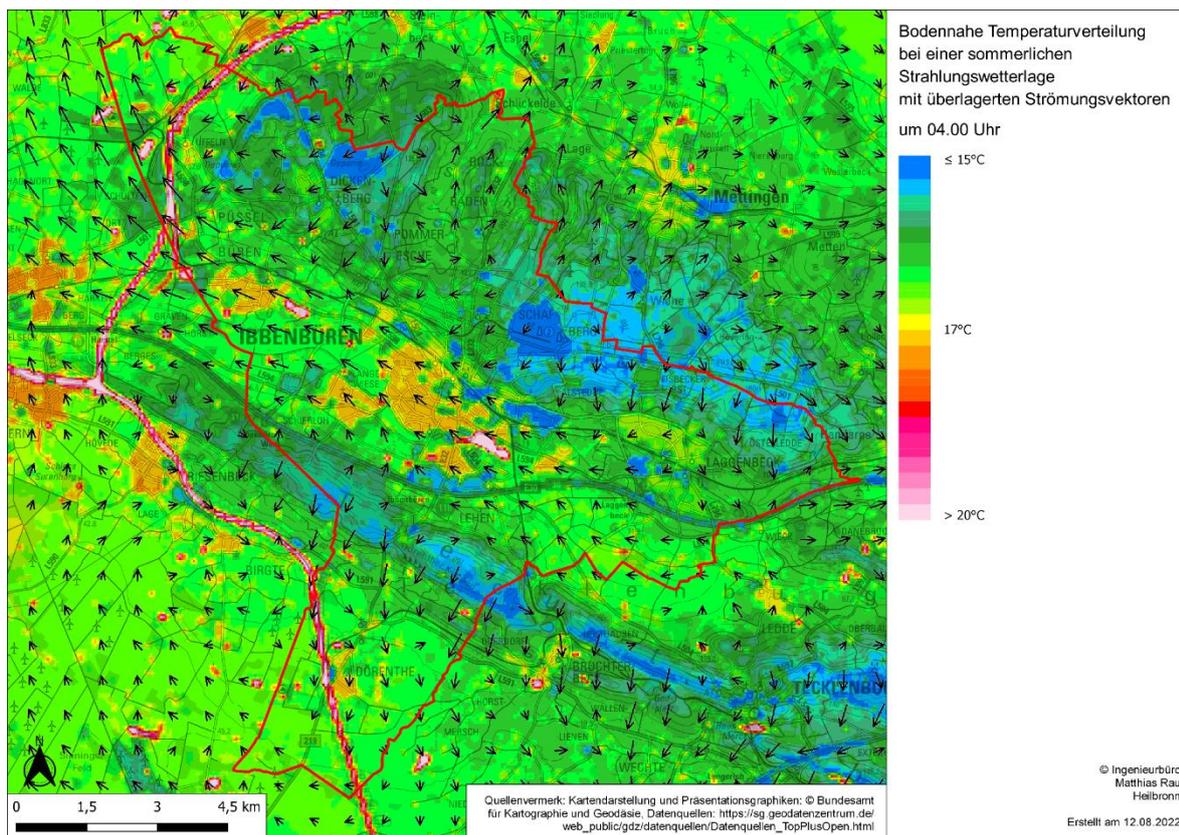


Abb. 6-6: Bodennahe Lufttemperaturverteilung in der Nacht (4:00 UTC) bei sommerlicher Strahlungswetterlage mit Strömungsvektoren, idealisierte Einzelsituation.

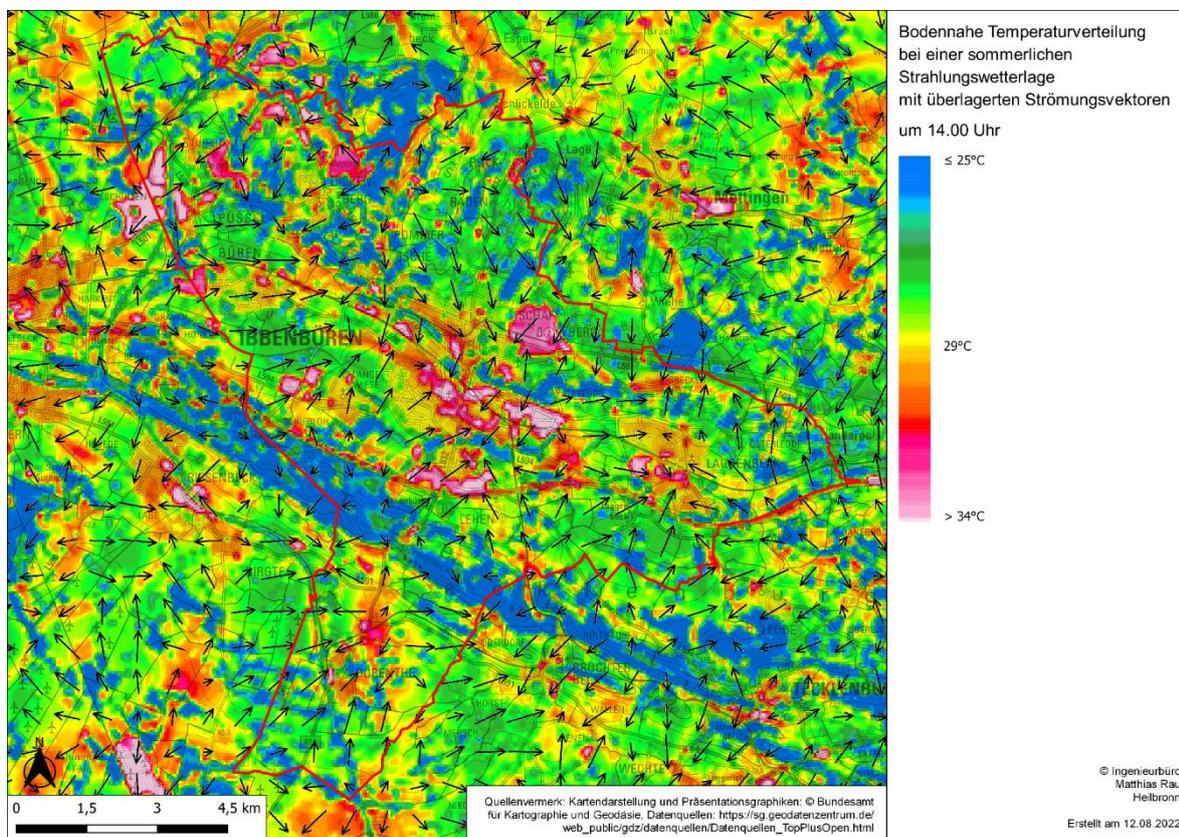


Abb. 6-7: Bodennahe Lufttemperaturverteilung am Tag (14:00 UTC) bei sommerlicher Strahlungswetterlage mit Strömungsvektoren, idealisierte Einzelsituation.

7 Planungsanwendungen

Die für Ibbenbüren charakteristischen klimatischen Sachverhalte, die auf Basis der Modellrechnungen detailliert analysiert und aufbereitet wurden, werden in der Klimaanalysekarte und der Planungshinweiskarte dergestalt aufbereitet, dass die wichtigsten klimatischen Informationen und Planungshinweise auf einem Blick abgerufen werden können.

Die Aufbereitung der Klimainformationen zu Karten erfolgt auf Grundlage der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 (VDI 2015), welche Empfehlungen für die Darstellung klimatischer Sachverhalte für die räumliche und städtische Planung aufzeigt und in Deutschland allgemein anerkannt ist. Hierbei wird in zwei Schritten vorgegangen:

- Die klimatischen Sachverhalte werden zunächst kartografisch in Form einer „**Klimaanalysekarte**“ abgebildet (s. **Abb. 7-1**). Diese beinhaltet die wissenschaftliche Darstellung des räumlichen klimatischen Wirkungsgefüges aus Flächennutzung, Relief und lokalem Klima sowie den dazwischen bestehenden räumlichen Klimafunktionen und Wechselbeziehungen.
- Aus der Klimaanalysekarte werden Handlungsempfehlungen erarbeitet, die in der „**Planungshinweiskarte**“ dargestellt werden (s. **Abb. 7-2**). Diese löst sich von der rein wissenschaftlichen Darstellung und konzentriert sich auf die klimaökologische Bewertung einzelner Gebietsbereiche. In Abhängigkeit der jeweiligen Klimaeigenschaften werden Handlungsempfehlungen zur Verbesserung ungünstiger Gebiete und Flächen oder zum Schutz bzw. Erhalt günstiger Gebiete und Flächen aufgezeigt.

7.1 Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte stellt eine bewertende, flächenhafte Übersicht der klimatischen Verhältnisse in Form von der Zuteilung einzelner Teilbereiche des Stadtgebietes von Ibbenbüren zu Klimatopen dar und bildet die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in der Planungshinweiskarte. Dargestellt sind in der Klimaanalysekarte die sich aus den kleinräumigen Simulationen ergebenden wesentlichen Luftleitbahnen, Kaltluftabflüsse, Kaltluftproduktionsflächen, Kaltluftwirkbereiche und Kaltluftentstehungsgebiete. Im vorliegenden Fall sind die klimatischen Funktionen auf den Umfang beschränkt, der durch die Simulationsergebnisse abgedeckt werden kann.

Die klimatische Differenzierung des Untersuchungsgebietes beruht in erster Linie auf dem Relief und der Topographie einschließlich der aktuellen Flächennutzung in Ibbenbüren unter Berücksichtigung der Ergebnisse der im Rahmen dieser numerischen Klimaanalyse durchgeführten verschiedenen Klimasimulationen.

Die Basisdaten für die Simulationen wurden aus dem Geodatenportal NRW abgerufen. Es sind im Wesentlichen ALKIS-Daten zur tatsächlichen Flächennutzung, Daten zu Gebäudekubaturen und Gebäudehöhen (LOD1-Daten) und fein aufgelöste Höhendaten (DGM1 bzw. DGM5) für das Stadtgebiet bzw. Modellgebiet.

- Auf Basis der Berechnungsergebnisse und obig angegebenen Basisdaten sind folgende Themen in der Klimaanalysekarte darstellbar:
 - Flächenhafte Differenzierung des Stadtgebietes in verschiedene Klimatope unter Berücksichtigung von Wärmeinseln im Wirkraum.
 - Darstellung von Kaltlufteinzugs- und Kaltluftstaugebieten im Ausgleichs- sowie im Wirkraum, Eindringtiefen der Kaltluft bzw. Hindernisse für den Kaltluftabfluss.
 - Darstellung von Luftaustauschsystemen wie Luftleitbahnen, Talabwinde und Kaltluftabflüsse.
 - Weitere aus den vorhandenen Daten ableitbare spezifische Klimaeigenschaften.

Die Klimaanalysekarte beinhaltet zwei Darstellungsebenen, die im Folgenden näher erläutert werden.

7.1.1 Klimaanalysekarte – Inhalte der ersten Darstellungsebene (Klimatope)

Die **erste Darstellungsebene** beinhaltet die flächenhafte Differenzierung des Stadtgebietes anhand verschiedener Klimatope. Klimatope sind Raumeinheiten, die durch ähnliche Flächennutzung sowie ähnliche mikroklimatische und lufthygienische Bedingungen charakterisiert sind. Diese beinhalten vergleichbare Versiegelungsgrade, Bebauungsstrukturen, Grünflächenanteile, Vegetationsstrukturen und Emittentengruppen. Die Grenzen der in der Klimaanalysekarte ausgewiesenen Klimatope sind entgegen der Darstellung nicht als flächenscharf zu betrachten, sondern unterliegen vielmehr ineinandergreifenden, fließenden Übergängen der entsprechenden Klimatopcharakteristika. Die Ausweisung der Klimatope in der aktualisierten Klimaanalysekarte erfolgte auf Grundlage der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 [6].

7.1.1.1 Gewässer-, Seenklima

Charakteristik

Aufgrund der hohen Wärmekapazität von Wasser kommt es an den Oberflächen von Gewässern zu nur schwachen tagesperiodischen Temperaturschwankungen, das heißt, Wasserflächen werden am Tag als eher kühl und nachts als vergleichsweise warm empfunden. Sie können daher das lokale Klima stark beeinflussen. Jedoch bleibt ihr klimatischer Einfluss in der Regel, mit Ausnahme bei Land-/Seewindsystemen infolge des eingebundenen Luftmassentransports,

lediglich auf das Gewässer selbst und die unmittelbaren Randbereiche beschränkt. Abgeschwächt zeigt sich dieses Verhalten auch im jahreszeitlichen Rhythmus, wodurch z. B. Städte im Einflussbereich großer Gewässer eine geringere Anzahl von Frosttagen aufweisen können. Ein zusätzlich positiver Effekt für die klimatische Situation wird durch die geringe Rauigkeit von Gewässerflächen bewirkt, wodurch Austausch und Ventilationsverhältnisse begünstigt werden. Dadurch ist unter Umständen eine Wirkung als Luftleitbahn möglich.

Innerhalb der Stadtgrenze von Ibbenbüren sind drei markante Gewässer zu nennen, und zwar der Aasee, der Dortmund-Ems-Kanal und der Mittellandkanal. Die Wirkung ist im Wesentlichen auf den Uferbereich beschränkt. Die Bedeutung der Gewässerläufe liegt jedoch in ihrer Funktion als potenzielle Grundstruktur einer innerstädtischen Grünflächenvernetzung sowie in lokalen positiven Effekten hinsichtlich des Feuchtehaushalts in bebautem Gebiet.

Hinweise für die Planung

- Undurchlässige Strukturen (z. B. geschlossene Bebauung oder dichte Hecken bis hin zu Waldflächen) entlang der Uferzonen vermeiden.

Legende

Flächenfarbe Dunkelblau.

7.1.1.2 **Freilandklima**

Charakteristik

Freilandklimatope stellen sich überwiegend über unbewaldeten vegetationsbestandenen Außenbereichen ein. Sie zeichnen sich durch ungestörte Tagesgänge von Lufttemperatur und -feuchte und weitgehend unbeeinträchtigte Windströmungsbedingungen aus und wirken als Kaltluftentstehungsgebiete. Da in den Freilandbereichen selten Emittenten vorkommen und bei geeigneten Wetterlagen in den Nachtstunden Kaltluftmassen gebildet werden, können diese Bereiche eine hohe Ausgleichsfunktion für die human-biometeorologisch und lufthygienisch belasteten bebauten Bereiche besitzen.

Flächennutzung: Landwirtschaftliche Nutzfläche, Weide- oder Wiesengelände, Brachen o. Ä. mit Versiegelungsgrad <10%.

Vegetationsarten: Überwiegend niedrige Vegetation, einzelstehende Bäume, kleine Strauchgruppen.

Lufthygiene: Im Allgemeinen geringere Belastung; durch Verdünnung und Deposition ein mögliches Luftregenerationsgebiet und dadurch Verbesserung der Luftqualität; im Sommer Gefahr erhöhter Ozonkonzentration.

Hinweise für die Planung

- Aufforstungs- und Siedlungsmöglichkeiten entsprechend den lokalklimatischen Verhältnissen, jedoch zudem Bedeutung der Flächen für den großräumigen Luftaustausch beachten (z. B. in Stadtrandlage); Erhaltung des Kaltluftentstehungspotenzials.

Legende

Flächenfarbe Hellblau.

7.1.1.3 **Waldklima**

Charakteristik

Das Klima im Stammraum eines Walds wird durch den Energieumsatz der Erdoberfläche im Waldbestand (verminderte Ein- und Ausstrahlung) bestimmt. Dichte und höher wachsende Baumvegetation führt zu gedämpften Tagesgängen von Lufttemperatur und -feuchte sowie zu niedrigen Windgeschwindigkeiten im Bestand. Das Kaltluftentstehungsgebiet befindet sich oberhalb des Kronenraums. Deshalb sind Waldgebiete auf geeigneten Flächen relevant für die Entstehung von Kaltluft/Frischluff und deren Dynamik. Allerdings ist die Kaltluftproduktion im Vergleich zu unbewaldeten und vegetationsbestandenen Freilandgebieten geringer. Waldflächen erweisen sich aufgrund sehr geringer thermischer und human-biometeorologischer Belastungen als wertvolle Regenerations- und Erholungsräume. Darüber hinaus übernehmen Wälder bei geringen oder fehlenden Emissionen die Funktion als Frischluft- und Reinluftgebiete, können jedoch aufgrund der hohen Rauigkeit keine Luftleitfunktion übernehmen.

Relief:	Modifiziert das Waldklima zusätzlich.
Flächennutzung:	Überwiegend durch Laub- oder Nadelwald bestimmt (≥90%).
Oberflächenstruktur:	Überwiegend hohe, geschlossene Struktur. Das Kronendach der Bäume ist die Hauptumsatzfläche für energetische Prozesse.
Vegetationsarten:	Siehe Flächennutzung bzw. Karten der Forsteinrichtungswerke.
Lufthygiene:	Im Allgemeinen geringere Belastung; Filterfunktion für Luftschadstoffe, aber dadurch auch Gefahr der Eigenschädigung der Bestände; im Sommer Gefahr erhöhter Ozonkonzentration.

Hinweise für die Planung

- Erhalten und ausbauen, soweit lokalklimatisch verträglich (siehe Hindernisse für den Kaltluftabfluss).

- Funktion bei benachbarten Gebieten mit höher belasteter Luft als Immissionsschutzwald (Luftregeneration).

Legende

Flächenfarbe Dunkelgrün.

7.1.1.4 **Klima innerstädtischer Grünflächen**

Charakteristik

Die klimatischen Verhältnisse ausreichend großer innerstädtischer Park- und Grünanlagen sind zwischen denen von Freiland- und Waldklima einzustufen. Dabei variiert die klimatische Reichweite von Parkflächen in Abhängigkeit von der Größe und Form der Parkanlagen, deren Ausstattung sowie von der Anbindung an die Bebauung oder an Durchlüftungsbahnen.

Die Klimawirksamkeit von Grünflächen beschränkt sich je nach Größe, Relief und Rauigkeit auf die Fläche selbst (Mikroklimaeffekt), kann jedoch auch stadtklimatisch positive Fernwirkungen aufweisen.

Verschiedene Untersuchungen und Modellierungen haben gezeigt, dass mikroklimatische Kühlungseffekte in Abhängigkeit der Verdunstungsleistung und Beschattung auch bei geringer Flächengröße nachweisbar sind. Bei einer engen Vernetzung können auch kleinere Grünflächen zur Abmilderung von Wärmeinseln beitragen, indem sie den Luftaustausch fördern.

Relief: Tal- oder Kuppenlagen können die Wirkung von Grünflächen verändern.

Flächennutzung: Wiesenflächen, Kleingärten, Parks, Friedhöfe und Sportanlagen (nur, wenn begrünt); Versiegelungsgrad meist <20%.

Lufthygiene: In der Regel geringere Belastung als die umgebende Stadt. Filterfunktion der Grünanlagen ist abhängig von der räumlichen Ausdehnung und der Art der Vegetation.

Hinweise für die Planung

- Erhalten und möglichst vernetzen.
- Offene Randbebauung erhalten oder anstreben (zur Förderung des Luftaustauschs).

Legende

Flächenfarbe Hellgrün.

7.1.1.5 **Vorstadtklima**

Charakteristik

Das Klimatop ist dem Übergangsbereich zwischen Freilandklima und dem Klima bebauter Flächen zuzuordnen und wird durch eine grün geprägte Flächennutzung und Oberflächenstruktur geformt. Es überwiegt der Einfluss des unbebauten Geländeanteils. Dieser Klimatoptyp ist charakteristisch für Vorstadtsiedlungen, Gartenstädte oder Ortsränder, die darüber hinaus oft im unmittelbaren Einflussbereich des Freilands stehen und dadurch günstige bioklimatische Verhältnisse aufweisen. Das Klima in den Vorstadtsiedlungen zeichnet sich durch eine leichte Dämpfung der Tagesgänge der Klimaelemente Lufttemperatur, -feuchte, Wind und Strahlung aus. Die Windgeschwindigkeit ist niedriger als im Freiland, aber höher als in der Innenstadt.

Relief: Modifikationen durch Tal- oder Kuppenlagen überlagern häufig die kleinklimatischen Verhältnisse in der aufgelockerten Bebauung. Daher sind klimawirksame Reliefformen unbedingt mit zu berücksichtigen.

Flächennutzung: Einzel- und Doppelhäuser, zum Teil in Zeilenbauweise, geringe Bauhöhe (ein- bis dreigeschossig), Garten- und Freilandnutzung. Versiegelungsgrad im Allgemeinen 20 % bis 30 %.

Lufthygiene: In Abhängigkeit von der Umgebung geringere bis mäßigere Belastung.

Hinweise für die Planung

- Weitere Versiegelung vermeiden, Arrondierung möglich.
- Emissionsarme Energieversorgung anstreben.

Legende

Flächenfarbe Hellgelb.

7.1.1.6 **Stadtrandklima**

Charakteristika

Das Stadtrandklima unterscheidet sich vom Vorstadtklima durch eine dichtere Bebauung und einen geringeren Grünflächenanteil. Dennoch handelt es sich um Bereiche mit einer lockeren Bebauung und einer relativ günstigen Durchgrünung. Hieraus resultiert eine nur schwache Ausprägung von Überwärmung, zumeist kann von einem ausreichenden Luftaustausch sowie eher günstigen bioklimatischen Bedingungen in diesen Gebieten ausgegangen werden.

Flächennutzung: Einzelhäuser, Wohnblocks bis Blockbebauung; im Allgemeinen niedrige Bauhöhen (ca. dreigeschossig, vereinzelt bis zu fünfgeschossig), hoher

Anteil an Garten und Freilandnutzung. Versiegelungsgrad ca. 30% bis 50%.

Relief: Auch im Stadtrandklimatop spielen Reliefunterschiede häufig eine wichtige mikroklimatische Rolle. Vorhandener Reliefeinfluss ist mit aufzunehmen.

Oberflächenstruktur: Vor allem durch Bebauung geprägt, teilweise Bildung von „Straßenschluchten“. Einzelbäume (z.B. im Straßenraum) und Baumgruppen vorhanden.

Lufthygiene: Etwas stärker als Vorstadtklima belastet.

Hinweise für die Planung

- Besonders in diesen Klimatopen ist die Grünflächenvernetzung zum Freiland zu erhalten oder zu schaffen.
- Hohe, geschlossene Bauformen und verriegelnde Bebauung zum Umland vermeiden.
- Emissionsarme Energieversorgung anstreben.

Legende

Flächenfarbe hellorange

7.1.1.7 **Stadtklima**

Charakteristik

Charakteristisch für das Stadtklima ist eine überwiegend dichte, geschlossene Zeilen- und Blockbebauung mit überwiegend höheren Baukörpern und Straßenschluchten. Bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad, die ausgeprägten Oberflächenrauigkeiten und geringen Grünflächenanteile ist der Stadtkörper während austauscharmer Strahlungsnächte überwärmt. Tagsüber treten hohe strahlungsbeeinflusste Lufttemperaturen auf, die zu Hitzestress führen können. Die dichtere städtische Bebauung verursacht Wärmeinseln mit eingeschränkten Austauschbedingungen, die mit zeitweise ungünstigen human-biometeorologischen Verhältnissen und erhöhter Luftbelastung verbunden sind und das Stadtklima prägen.

Flächennutzung: Wohnbebauung, Wohnblocks und Blockbebauung bis fünfgeschossig, vereinzelt höhere Bebauung; Garten- und Freilandnutzung gering; Versiegelungsgrad im Allgemeinen 50% bis 70%.

Relief: Nimmt bei diesem Klimatop im Allgemeinen eine untergeordnete Rolle bei den Klimafaktoren ein und ist nur in besonderen Fällen mit aufzunehmen.

Lufthygiene: Mäßig bis stark belastet, schlechte Durchlüftung.

Hinweise für die Planung

- Entsiegelung, Blockentkernung und -begrünung, Fassaden-, Dachbegrünungen anstreben.
- Hohe Verkehrsdichte in engen Straßenschluchten vermeiden, Verkehrsberuhigung und emissionsarme Energieversorgung anstreben.

Legende

Flächenfarbe Orange.

7.1.1.8 **Innenstadtklima**

Charakteristik

Kennzeichnend für das Innenstadtklima sind ein hoher Versiegelungsgrad, hohe Oberflächenrauigkeit sowie ein geringer Grünflächenanteil, der lediglich durch Einzelbäume im Straßenraum sowie kleine Rasenflächen, zum Teil mit Strauchvegetation als Straßenbegleitgrün, charakterisiert ist. Aufgrund dieser Eigenschaften weist das Innenstadtklima die stärksten mikroklimatischen Veränderungen im Stadtgebiet auf. Hierzu zählt vor allem der starke Wärmeinseleffekt, bedingt durch die Wärmespeicherfähigkeit der städtischen Oberflächen und die starken Windfeldveränderungen, die sich in den straßenparallelen Be- und Entlüftungssituationen widerspiegeln. Human-biometeorologisch sehr ungünstig.

Flächennutzung: Verwaltungs-, Geschäfts- und Wohnbebauung; mehrgeschossige Baublöcke, in Altbauquartieren als geschlossene Blockbebauung realisiert, Hochhäuser; Vegetation überwiegend als Straßenbäume und Straßenbegleitgrün; Versiegelungsgrad meist >70%.

Relief: Bis auf wenige Ausnahmen vernachlässigbar

Lufthygiene: mäßig bis hoch belastet.

Hinweise für die Planung

- Siehe Stadtklima, Vorrang für emissionsarme Energieversorgung.

Legende

Flächenfarbe Rot.

7.1.1.9 **Gewerbe-, Industrieklima**

Charakteristik

Gewerbebetriebe mit den dazugehörigen Produktions-, Lager- und Umschlagstätten prägen das Mikroklima. Bedingt durch den Versiegelungsgrad in Kombination mit erhöhten Emissionen an Produktionsstätten kommt es verstärkt zu lufthygienischen und human-bioklimatischen Belastungssituationen. Zu diesen Flächen zählen auch Sonderflächen wie militärisch genutzte Flächen sowie in Ibbenbüren auch die Kohlenhalden am Schafberg usw. Eine weitere Untergliederung in die zwei Kategorien Gewerbe mit Logistik und Dienstleistungen einerseits und produzierendes Gewerbe andererseits bietet sich an, falls lufthygienische Fragestellungen wie Emissionshöhen und -verteilungen mit betrachtet werden sollen.

Relief: Kann zu Modifikationen des Mikroklimas führen. Wenn Reliefformen klimawirksam werden, sind besondere Signaturen wichtig (z. B. Industrieemittenten in Tallagen).

In Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad lassen sich zwei Typisierungen unterscheiden:

Offeneres Gebiet (Gewerbe)

Flächennutzung: Halden, Industrie und Gewerbebrachen, Gleisanlagen; Versiegelungsgrad im Allgemeinen <70%.

Oberflächenstruktur: Vor allem Hallen (ein- bis dreigeschossig), kleinere Verwaltungsbauten und Produktionsanlagen, Lagerflächen.

Vegetationsarten: Wiesen- und Rasenflächen als Abstandsgrün, zum Teil auch Baum- und Strauchanpflanzungen, Brachflächen.

Lufthygiene: Belastung stark von der Nutzung und den Emissionsbedingungen abhängig.

Dichteres Gebiet (Industrie)

Flächennutzung: Halden, Gleisanlagen, Industriebrachen; Versiegelungsgrad im Allgemeinen >70%.

Oberflächenstruktur: Stark differierende Bauwerkshöhen; Hallen (ein- bis fünfgeschossig), Verwaltungsbauten, alte Industriebauten, Produktionsanlagen, große Lagerflächen.

Vegetationsarten: Besonders in den Randbereichen (z. B. als Immissionsschutzpflanzungen) auch dichte Baum- und Heckenstrukturen, Wiesen- und Rasenflächen, ansonsten Abstandsgrün oder Brachflächen.

Lufthygiene: Belastung stark von der Nutzung und den Emissionsbedingungen abhängig.

Hinweise für die Planung

- Dach- und Fassadenbegrünung.
- Entsiegeln und Begrünung von Parkplätzen.
- Flächenbegrünung, Grünvernetzung.
- Entsiegelung allgemein.
- Durchgängige Belüftungsstrukturen erhalten/schaffen.
- Beschränkung auf emissionsarme Betriebe.
- Emissionsarme Energieversorgung, z. B. Fernwärme.

Legende

Flächenfarben Hellgrau (*Offeneres Gebiet (Gewerbe)*)
 Dunkelgrau (*Dichteres Gebiet (Industrie)*).

7.1.1.10 ***Straßenraum und Bahnanlagen***

Ohne Bewertung

Legende

Flächenfarben Weiß (Straßenraum)
 Violett gestreift (Bahnanlagen)

7.1.2 *Klimaanalysekarte – Inhalte der zweiten Darstellungsebene (Klimatische Funktionen)*

In der **zweiten Darstellungsebene** werden klimatische Funktionen untersuchter Flächen innerhalb des Stadtgebietes sowie ihre positiven oder negativen Wechselwirkungen aufgezeigt, deren Wirkung auf die lokalen Verhältnisse und eine potentielle Fernwirkung auf angrenzende Flächennutzungen durch numerische Simulationen untersucht und nachgewiesen werden konnten. Hierzu zählen insbesondere Kaltluftproduktions- und -sammelgebiete sowie Kaltluftflüsse und Luftleitbahnen, ferner Gebietsbereiche mit erhöhter Inversionshäufigkeit und Wärmeinselcharakter. Bei der Erstellung der Klimaanalysekarte wurden die Vorgaben der VDI 3787, Blatt 1, berücksichtigt.

7.1.2.1 **Luftleitbahn (Ventilationsbahn)**

Zusammenhängende Flächen mit geringer Rauigkeit, d.h. wenigen Strömungshindernissen, einer weitgehend linienhaften Ausrichtung und breitem Querschnitt (Längen-/Breitenverhältnis von mindestens 20:1 [7]) können in Städten insbesondere während schwachwindiger, autochthoner Wetterlagen die Funktion als Luftleitbahn einnehmen und über den Transport kühlerer sowie lufthygienisch unbelasteter Luft der Belüftung von Siedlungsgebieten dienen. Breite, geradlinige Flussauen und Kanäle stellen besonders geeignete Flächennutzungen für Luftleitbahnen dar. Es gilt zu beachten, dass Luftleitbahnen ggfs. auch klimatisch und/oder lufthygienisch belastet sein können.

Legende

Darstellung der Luftleitbahnen über nicht gefüllte (geränderte) Pfeile.

- Blau -> Lufthygienisch unbelastet;
- rot -> lufthygienisch belastet.

7.1.2.2 **Kaltluftabfluss**

Die Dynamik lokal gebildeter Kaltluft wird entweder durch einen gravitativen Antrieb infolge der Geländeausrichtung, durch Temperaturoegensätze verschiedener Flächennutzungsstrukturen oder einen schwachen Gradientenwind induziert. In der vorliegenden Klimaanalysekarte werden lediglich Kaltluftabflüsse dargestellt, die im Rahmen der Klimaanalyse während autochthoner Strahlungsnächte nachgewiesen bzw. modelltechnisch erfasst wurden.

Legende

Darstellung der Kaltluftabflüsse (Hangabwinde) über gefüllte Pfeile in Blau.

7.1.2.3 **Hindernis für den Kaltluftabfluss (Barrieren, Strömungsriegel)**

Natürliche und anthropogene Hindernisse, die den Kaltluftabfluss beeinflussen, z. B. Bäume, Wälder, Hecken, größere Bauwerke, Aufschüttungen, natürliche (z. B. Wälder) oder künstliche (z. B. Dämme) Verriegelungen können für den Kaltluftabfluss (Strömungsriegel) ein Hindernis darstellen, wenn das Verhältnis von Kaltluftmächtigkeit und mittlerer Hindernishöhe den Wert 2,5-3 deutlich unterschreitet. Vor dem Hinderniskann sich ein Kaltluftstau (Kaltluftstau, -see) ausbilden.

Legende

Darstellung über eine markierte blaue Zackensignatur.

7.1.2.4 **Potenzielle Kaltluftproduktionsfläche**

Weitgehend unversiegelte Oberflächen, wie Äcker, Wiesen und Weiden oder Brachflächen zeichnen sich während autochthoner Wetterlagen durch eine negative nächtliche Ausstrahlung aus. Dies führt im Vergleich zu den urban überprägten Gebieten zur Bildung bodennah kühlerer Luftschichten. Diese Kaltluft kann bei entsprechender Dynamik (s. Kaltluftabfluss) in angrenzende Siedlungskörper eindringen und zur Belüftung und Abkühlung dieser städtisch geprägten Bereiche beitragen.

Legende

Darstellung mit blauer waagerechter Schraffur.

7.1.2.5 **Potenzielle Kaltluftentstehung oberhalb Baumkronen**

Typisch für das Gesamtbild des Stadtgebietes von Ibbenbüren sind die an die Bebauung angrenzenden Freiflächen sowie die Waldflächen im Bereich von Hanglagen. Da die Kaltluftproduktion oberhalb eines Waldbestandes schwächer ausgeprägt ist als über unbewaldeten Freiflächen (Wiesen- und Ackerflächen), werden diese Flächen gesondert markiert.

Legende

Darstellung mit blauer diagonaler Schraffur.

7.1.2.6 **Potenzielle Kaltluftwirkbereiche / Eindringtiefe**

Umfasst denjenigen Flächensaum oder Fläche des Siedlungsgebiets, in dem von außen einfließende bodennahe Kaltluft maximal vordringen kann. Die in der Bebauung liegende Grenze der Eindringtiefe verläuft dort, wo entweder der Kaltlufttransport aufgrund Strömungsriegel bildender Hindernisse (Gebäude, Hecken, Wälder, Wälle, Dämme, etc.) zum Erliegen kommt oder die Kaltluft durch die vorhandene wärmere Flächennutzung soweit erwärmt wurde, dass keine weitere Abkühlung mehr möglich ist. Bei ausreichender vertikaler Mächtigkeit (mehrfaches der Bebauungshöhe) und ausreichender Strömungsgeschwindigkeit können Kaltluftströme Siedlungsgebiete vollständig durchlüften.

Wie in dieser Untersuchung dargestellt, bildet sich in typischen Strahlungs Nächten ein ausgeprägtes Kaltluftsystem, das große Teile des Stadtgebietes von Ibbenbüren durch- und überströmt.

Legende

Darstellung als schwarze Schrägschraffur.

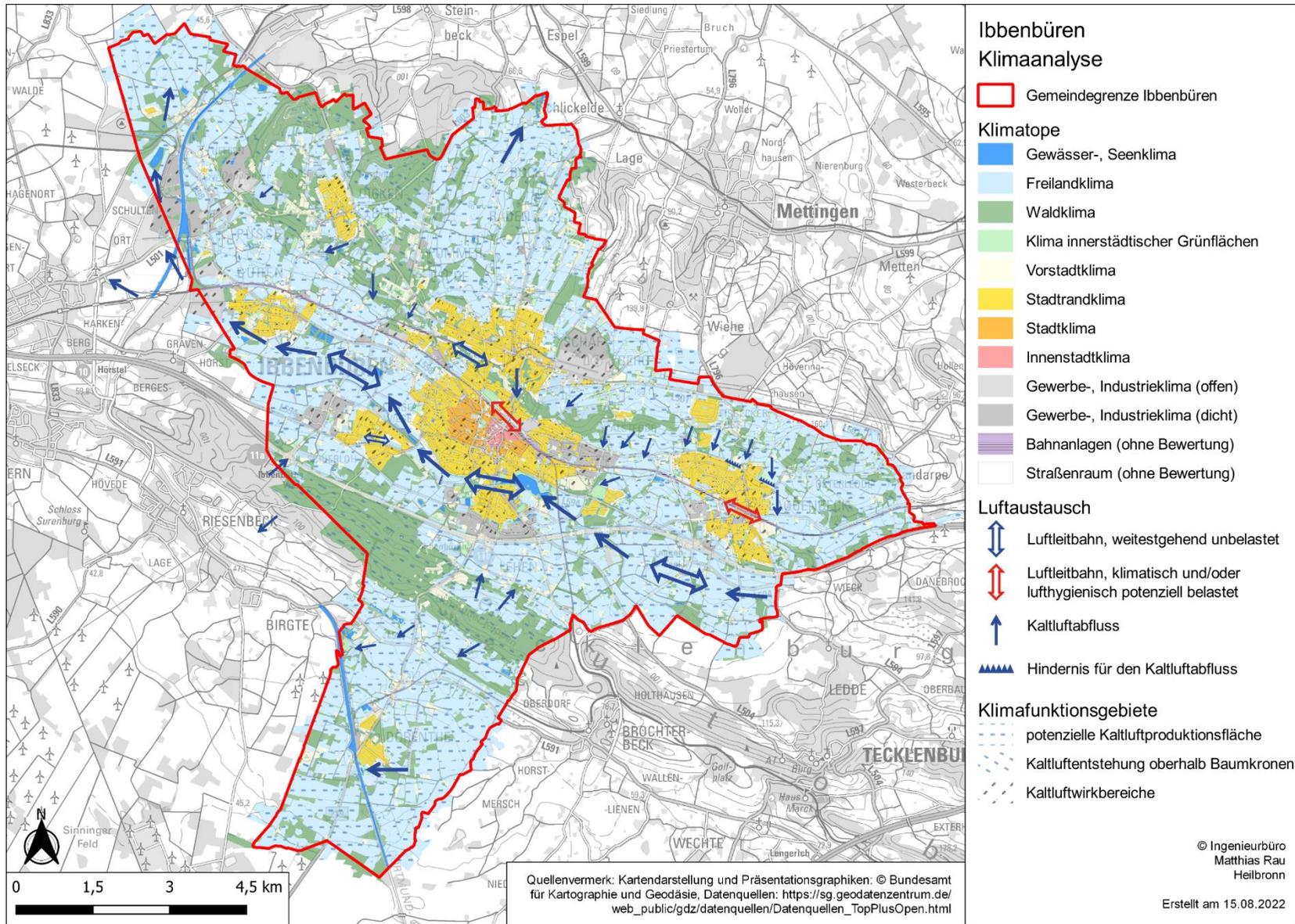


Abb. 7-1: Klimaanalysekarte Ibbenbüren.

7.2 Planungshinweiskarte

Die Erstellung der Planungshinweiskarte der Stadt Ibbenbüren erfolgte auf Grundlage der Klimaanalysekarte (Abb. 7-1). Somit beruht die Ableitung von Planungshinweisen zur Verbesserung bzw. Sicherung der klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse ebenfalls auf der Topographie und aktuellen Flächennutzung im Stadtgebiet von Ibbenbüren sowie den Ergebnissen der durchgeführten numerischen Simulationsrechnungen.

Bei der Erstellung der Planungshinweiskarte werden die VDI-Richtlinien 3785 Bl.1, 3787 Bl. 1, 3787 Bl. 2, 3787 Bl. 4 berücksichtigt.

Im Folgenden werden analog zur Beschreibung der Klimaanalysekarte die verschiedenen Darstellungsebenen der Planungshinweiskarte vorgestellt und diskutiert. Die Planungshinweiskarte (Abb. 7-2) setzt sich aus zwei Ebenen zusammen.

7.2.1 Planungshinweiskarte – Inhalte der ersten Darstellungsebene (Planräume)

In der **ersten Darstellungsebene** werden anhand von **Planräumen** (ähnlich den Klimatopen) Bereiche innerhalb des Stadtgebietes wiedergegeben, für die Planungshinweise aufgrund der weitestgehend einheitlichen Strukturen eine flächenhafte Gültigkeit aufweisen. Hierbei werden unter anderem klimatische Last-, und Ausgleichsräume voneinander abgegrenzt. Die klimatischen **Lasträume** umfassen dabei einerseits die Bereiche, welche in der Klimaanalysekarte als Innenstadtklima ausgewiesen sind. Zum anderen sind auch die Industrie- / Gewerbegebiete den klimatischen Lasträumen zuzuordnen. Des Weiteren werden versiegelte Bereiche innerhalb der Stadtklimatope, wie beispielsweise Areale angrenzend an die Innenstadt, als klimatische Ungunstraum ausgewiesen, während die locker bebauten Stadtrandklimatope der Siedlungskörper und Gebiete mit vergleichsweise günstigen klimatischen und lufthygienischen Verhältnissen als Übergangsbereich zwischen Last- und Ausgleichsraum bezeichnet werden. Die klimatischen **Ausgleichsräume** umfassen neben den größeren innerstädtischen Grünflächen und den hauptsächlich landwirtschaftlich genutzten Freiräumen im Umland (Freiland) zudem die ebenfalls gesondert ausgewiesenen Gewässer sowie Wald- und Forstgebiete. Da die den Last- und Ausgleichsräumen zugrundeliegenden Klimatope analoge Gebietsgrenzen aufweisen, sind die Grenzen der Planräume ebenfalls nicht flächenscharf, sondern markieren einen Übergangsbereich von einem Planraum zum nächsten.

7.2.1.1 **Industrieklimatischer und gewerblicher Lastraum**

In Industrie- / Gewerbegebieten ist insbesondere, wenn sich diese in unmittelbarer Umgebung und im Luv von Wohnsiedlungen befinden, auf eine Ansiedlung möglichst emissionsarmer

Betriebe zu achten. Zudem sollten die Emissionen aus dem Schwerlastverkehr und der Abwärme reduziert werden. Eine Erhöhung des Grünflächenanteils, auch in Form von Dach- und Fassadenbegrünungen, ist ebenso erstrebenswert wie die Entsiegelung und Begrünung großflächiger Industrie- und Gewerbebrachen sowie von Parkplatzflächen. Das nördlich gelegene Kraftwerksgelände ist bspw. als gewerblicher Lastraum eingestuft. Bei einer Weiterentwicklung bzw. Umnutzung sind hier in jedem Fall lokalklimatische Belange zu beachten und Maßnahmen zur lokalklimatischen Aufwertung, wie beispielweise die Minimierung von versiegelten Flächen und großflächige Begrünungsmaßnahmen zu ergreifen

Legende

Flächenfarbe Grau.

7.2.1.2 **Klimatischer Lastraum**

In den klimatischen Lasträumen treten die negativen Ausprägungen des Stadtklimas am deutlichsten hervor. Diese Planräume beschränken sich im Wesentlichen auf den Innenstadtbereich. Zur Verbesserung der klimatischen und lufthygienischen Situation in diesen urban geprägten Siedlungsgebieten sollte der Anteil verdunstungsaktiver Flächen, dazu gehören Grün-, Frei- und Wasserflächen, erhöht werden. Von einer weiteren Verdichtung der Bebauung innerhalb der klimatischen Lasträume ist abzusehen. Hingegen sollten nach Möglichkeit Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen (z. B. von Innenhöfen) erfolgen. Bei fehlender Entsiegelungs- und Rückbaumöglichkeiten können Dach- und Fassadenbegrünungen als Alternative zur Steigerung des Grünflächenanteils dienen. Insbesondere in stark frequentierten Straßen mit eingeschränkten atmosphärischen Austauschbedingungen sind zudem eine Emissionsminderung sowie die Auflockerung der Randstrukturen zu forcieren, um der Spurenstoffanreicherung in diesen Bereichen entgegen zu wirken. Zur weiteren Verbesserung der klimatischen und lufthygienischen Situation sollte die Be- und Entlüftung durch Verbindung mit klimatischen Ausgleichsräumen im Umland in Form von Luftleitbahnen und Grünflächenvernetzungen gefördert werden.

Legende

Flächenfarbe Rot.

7.2.1.3 **Klimatischer Ungunstraum**

Klimatische Ungunsträume sind die an die Innenstadt angrenzenden bebauten Bereichen. Eine zunehmende Verdichtung der vorhandenen Bebauungsstruktur ist generell zu vermeiden. Bei unabwendbaren Bebauungsmaßnahmen sollten jedoch bestehende Luftleitbahnen und

Grünflächenvernetzungen erhalten bleiben und ein Frei- und Grünflächenausgleich unter Einsatz von Dach-, Fassaden- und Straßenraumbegrünungen geschaffen werden. Des Weiteren sind in diesen Bereichen ebenfalls die Entsiegelung und Begrünung von Innenhöfen sowie die Auflockerung von Randstrukturen und eine Emissionsminderung in Straßen mit erhöhtem Verkehrsaufkommen und/oder eingeschränkten atmosphärischen Austauschbedingungen anzustreben. Die Vernetzung mit Freiflächen im städtischen Umland ist auch für die Be- und Entlüftung der klimatischen Ungunsträume von großer Bedeutung, da diese insbesondere auch das Bindeglied zwischen den Last- und Ausgleichsräumen darstellen.

Legende

Flächenfarbe Orange.

7.2.1.4 Übergangsbereich zwischen Last- und Ausgleichsraum

Als Übergangsbereiche mit sowohl positiven als auch negativen klimatisch-lufthygienischen Ausprägungen sind weiträumig die zumeist locker bebauten und mit erhöhtem Grün- und Freiflächenanteil versehenen Siedlungsbereiche anzusehen, welche sich um die klimatischen Last- und Ungunsträume erstrecken. Insbesondere am Siedlungsrand ist zur Erhaltung und Verbesserung des Austauschs zwischen den Last- und Ausgleichsräumen eine Riegelbebauung zu vermeiden. Bei weiteren Bauungsmaßnahmen ist unbedingt die Vernetzungsfunktion der Grünflächen zu beachten und zu bewahren. Insgesamt sollte der vorhandene Grün- und Freiflächenanteil sowie deren Vernetzung in Richtung Siedlungskerne erhalten bleiben bzw. ausgebaut werden.

Legende

Flächenfarbe Gelb.

7.2.1.5 Klimatischer Ausgleichsraum

Die klimatischen Ausgleichsräume umfassen die hauptsächlich landwirtschaftlich genutzten Freiräume im Umland der urban geprägten Siedlungskörper. Sie stellen wichtige klimatische und lufthygienische Ausgleichspotentiale dar und sollten daher möglichst erhalten bleiben und ausgebaut werden. Von entscheidender Bedeutung ist jedoch die Vernetzung dieser Ausgleichsräume mit den klimatischen Last- und Ungunsträumen innerhalb des Stadtgebietes. Hierzu ist die Erhaltung bestehender Luftleitbahnen, die Schaffung neuer Be- und Entlüftungsschneisen sowie die Auflockerung und Beseitigung von Strömungshindernissen erforderlich. Zudem sollte die Ansiedlung weiterer Emittenten in diesen Bereichen verhindert werden.

Legende

Flächenfarbe Hellblau.

7.2.1.6 **Innerstädtische Grünflächen**

Innerstädtische Grünflächen stellen lokalklimatische Ausgleichsflächen innerhalb der Siedlungsstrukturen dar. Zur Förderung der ausgleichenden Wirkung ist neben dem Erhalt und der möglichen Erweiterung von Grünflächen eine Vernetzung von Grünflächen sowohl untereinander als auch mit dem Freiland anzustreben. Falls möglich sollte auch die Neuanlage von Parks, beispielsweise auf alten Industrie- und Gewerbebrachen, als Ziel gesetzt werden. Wichtige Grünflächen/Parks innerhalb des Stadtgebietes sind bspw. die Grünzüge in Fortsetzung des Aasees, das ausgedehnte Begleitgrün entlang von Bahntrassen, der Zentralfriedhof nördlich der Bahntrasse und die Grün- und Waldflächen entlang des alten Bahndamms der Zechenbahn mit Unterbrechungen bis hin zum Mühlsteinbruch. Positiv ist in jedem Fall, dass ein großer Teil des Stadtbereichs als „Gartenstadt“ nur sehr aufgelockert bebaut und mit hohem Grünanteil ausgestattet ist.

Legende

Flächenfarbe Hellgrün.

7.2.1.7 **Wald- und Forstgebiete**

Größere geschlossene Wald- und Forstgebiete, die das Stadtgebiet von Ibbenbüren umsäumen und teilweise auch zwischen den Siedlungsbereichen erhalten wurden, dienen als Frischluftproduzenten und mit Einschränkung auch als Kaltluftproduzenten (**s. Kap. 7.1.1**). Sie können bei entsprechender Vernetzung mit den klimatischen Last- und Ungunsträumen daher ebenfalls als klimatische Ausgleichsräume fungieren. Eine Ansiedlung von Emittenten kann die Funktion der Frischluftproduktion beeinträchtigen und ist daher zu vermeiden.

Legende

Flächenfarbe Dunkelgrün.

7.2.2 Planungshinweiskarte – Inhalte der zweiten Darstellungsebene (Planungshinweise)

In der **zweiten Darstellungsebene** werden eine Reihe spezifischer Planungshinweise von zumeist lokaler Relevanz (Lokale Hinweise) ausgewiesen, wie etwa die Erhaltung von Luftleitbahnen, die Vermeidung weiterer Bebauung oder Ansiedlung von Emittenten oder aber die Vernetzung städtischer Grünzüge bzw. die Förderung von Grünvernetzung. Ferner werden

jedoch auch Bereiche ausgewiesen, in denen eine maßvolle Bebauung unter Berücksichtigung klimatischer Belange möglich erscheint.

Alle in der Karte dargestellten Hinweise beinhalten jeweils mehrere **Handlungsempfehlungen** zur Verbesserung des Klimas. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Anwendung einzelner Maßnahmen i.d.R. nur geringe bis keine Effekte hervorruft. Die Verbesserung des Klimas wird umso effektiver, je mehr Maßnahmen gebündelt angewendet werden können.

7.2.2.1 **Luftleitbahn erhalten**

Bei Luftleitbahnen, auch als Ventilations- oder Durchlüftungsbahnen bezeichnet, handelt es sich um Flächen, die aufgrund geringer Rauigkeit (keine hohen Gebäude, nur einzelstehende Bäume oder Gewässerflächen), größerer Breite und nur leicht gekrümmte Ausrichtung den bodennahen Luftmassenaustausch zwischen Umland und Stadt ermöglichen. Vor allem bei Schwachwindlagen können Luftleitbahnen von großer Bedeutung für die klimatische Entlastung innerstädtischer Gebiete sein. Das Relief kann die Funktion als Luftleitbahn unterstützen. Breite, geradlinige Straßen oder Bahnanlagen können Luftleitbahnen darstellen. Luftleitbahnen können je nach Nutzung und Emissionen lufthygienisch beeinträchtigt sein. Eine bedeutende Luftleitbahn in Ibbenbüren ist die Bahnlinie, die Ibbenbüren von Ost nach West durchquert. Von einer Riegelbebauung entlang dieser Luftleitbahnen sowie einer Ansiedlung von Emittenten sollte abgesehen werden. Hingegen ist eine Förderung bzw. Herstellung einer Freiflächenvernetzung mit den angrenzenden Siedlungsgebieten zu realisieren.

Legende

Schwarzer geränderter Doppelpfeil.

7.2.2.2 **Belüftungsbahnen, Kaltluftströmungen**

Hierbei handelt es sich um weite, rauigkeitsarme Flächen im Freilandbereich, die während strahlungsächtlicher Kaltluftbildung aufgrund der Reliefgestalt einen weiträumigen, gerichteten Kaltluftabfluss in Richtung Bebauung begünstigen. Um einen ungestörten Kaltlufttransport zu gewährleisten, sind die Senken und ihre Hänge außerhalb der Bebauung weitgehend von Strömungshindernissen (höhere oder riegelbildende Bebauung, Baumhecken Gehölzen) freizuhalten. Die (weitere) Ansiedlung von Emittenten (Bspw. Geruchsintensive Tierhaltung, Biogasanlagen) ist zu vermeiden. In Ibbenbüren bildet sich im Laufe einer Strahlungsnacht eine ausgeprägte Kaltluftströmung südlich des Innenstadtgebietes von Südost nach Nordwest mit einer hohen Mächtigkeit. Diese ist in der Planungshinweiskarte ausgewiesen.

Legende

Blauer gefüllter Pfeil.

7.2.2.3 ***Keine weitere Bebauung oder Emittenten***

Es gibt Teilgebiete, in denen von einer weiteren Ausweisung und Ausweitung von Bebauung/Wohngebieten sowie der Ansiedlung von Emittenten abzusehen ist, da diese Teilgebiete eine wichtige bzw. sensible Funktion als Lüftungs-/Grünschneise oder aber als Kaltluftproduzent spielen. Das Gebiet nördlich von Laggenbeck sowie nördlich der Laggenbecker Straße sollte bspw. von einer weiteren Bebauung möglichst freigehalten werden.

Legende

Weißes Gebäudesymbol auf schwarzem Grund.

7.2.2.4 ***Maßvolle Bebauung unter Berücksichtigung klimatischer Belange möglich***

In locker bebauten Gebieten mit vergleichsweise günstigen klimatischen und lufthygienischen Verhältnissen (geringe nächtliche Überwärmung; keine größeren Emissionsquellen) ist eine maßvolle Bebauung unter Berücksichtigung klimatischer Belange möglich. Eine maßvolle Nachverdichtung, allerdings unter Berücksichtigung lokalklimatischer Belange, wird bspw. am südlichen und westlichen Rand von Laggenbeck für möglich gehalten.

Legende

Schwarzes Gebäudesymbol auf weißem Grund

7.2.2.5 ***Vernetzung städtischer Grünzüge***

Die Wirkung der innerstädtischen Grünflächen kann durch Vernetzung untereinander gestärkt werden, da sich ihre Wirkung dann auf größere Gebietsbereiche ausdehnt. Wenn die Grünflächen zusätzlich an das Freiland angebunden werden können (z.B. über Ventilationsbahnen), ist durch den Zufluss positiv wirkender Freilandluft eine weitere Verbesserung des Klimas in der Bebauung möglich. Im Stadtgebiet von Ibbenbüren sind bereits vernetzende Grünzüge vorhanden. Aber auch locker bebaute Teilgebiete mit höherem Grünflächenanteil bieten die Möglichkeit eines weiteren Erhalts und Ausbaus. In der Planungshinweiskarte ist die **Vernetzung städtischer Grünzüge** mit Markierungslinien aus aneinandergereihten grünen Halbkreisen markiert. In den markierten Gebietsbereichen ist aufgrund der bereits relativ lockeren Bebauung und des hohen Grünflächenanteils das Vernetzungspotenzial gegeben und ausbaufähig. Dazu sollten die auf engem Raum, aber verstreut liegenden Grünflächen zu parkähnlichen Freiflächen mit hohem Wiesen- und geringem Gehölzanteil unter Einbeziehung von Hausgärten und Innenhöfen mit

einbezogen werden. Weitere Bebauung und Emittenten sind möglichst zu vermeiden. Für den Baubestand in diesem Bereich sind Dach- und Fassadenbegrünung empfehlenswert, um die Wirkradien der Grünzüge zu stärken. Für die weitere Vernetzung untereinander und zur Anbindung an Luftleibahnen sind ggf. Bauungsriegel aufzubrechen, da möglichst eine „Durchgängigkeit“ dieser Grünzüge geschaffen bzw. erhalten werden sollte.

Legende

Grüne Markierungslinien aus aneinandergereihten Halbkreisen.

7.2.2.6 Grünvernetzung Austausch fördern bzw. herstellen

An einigen Stellen sind Hinweise für die Entwicklung von Grünvernetzungen gegeben. Die dargestellten grünen Doppelpfeile stellen eine anzustrebende ideale Grünvernetzung dar. Die Grünvernetzungen spielen eine wichtige Rolle, um zum einen Grün- und Freiflächen innerhalb der Bebauung miteinander in Bezug zu setzen und zum anderen Grünflächen innerhalb des Stadtgebietes an das Freiland anzukoppeln.

Legende

Grüner Doppelpfeil unterschiedlicher Länge.

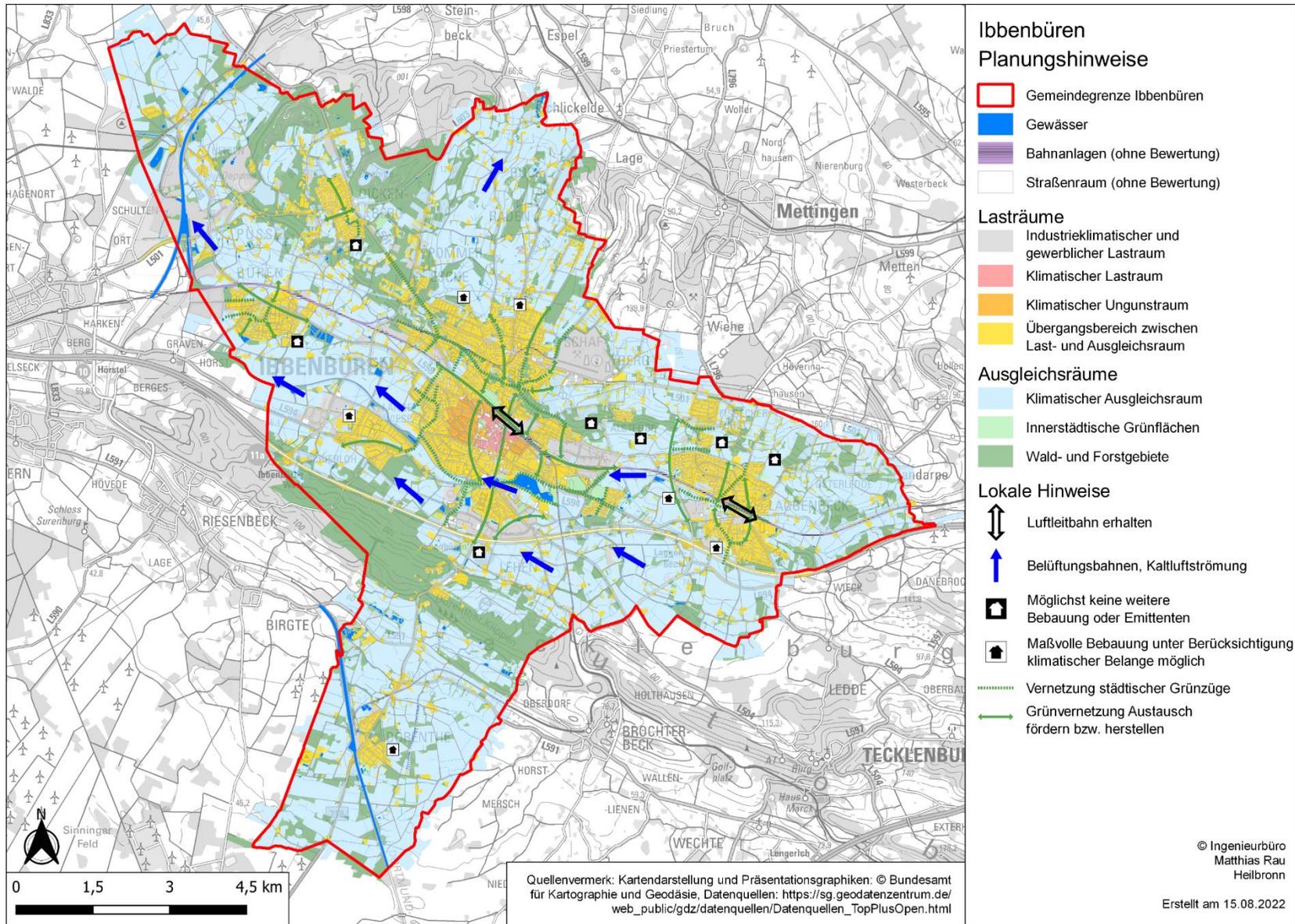


Abb. 7-2: Planungshinweiskarte Ibbenbüren.

8 Klimaprojektion für den Raum Ibbenbüren

8.1 Klima von heute und bereits beobachtete Änderungen

Ibbenbüren ist Teil des Landkreises Steinfurt, welcher in der gemäßigten Klimazone liegt. Für die aktuelle Situation des Klimas in Ibbenbüren werden die klimatischen Mittelwerte über den gesamten Landkreis über die Referenzzeitraum von 1971 bis 2000 betrachtet. In diesem Zeitraum lag die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur bei 9,6°C. Die geringste monatliche Durchschnittstemperatur lag dabei im Januar, die höchste im Juli vor. Die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme betrug für den Referenzzeitraum 1971 – 2000 ca. 780 mm, wobei die geringsten Niederschläge im April und die höchsten im Dezember auftraten. Aus langjährigen Beobachtungsdaten von Klimastationen im Landkreis Steinfurt ergeben sich für den Referenzzeitraum folgende Werte für typische Ereignistage [8]:

Sommertage (mindestens 25°C):	26,0 Tage/Jahr
Heiße Tage (Lufttemperatur mindestens 30°C):	4,8 Tage/Jahr
Tropische Nächte (Lufttemperatur minimal 20°C):	0,1 Tage/Jahr
Maximale Dauer von Hitzeperioden:	2,7 Tage
Eistage	11,9 Tage/Jahr
Frosttage	57,5 Tage/Jahr
Niederschlag \geq 20 mm/Tag:	3,1 Tage/Jahr.

Vergleicht man zwei 30-Jahreszeiträume (1951-1980 und 1986-2015) miteinander, so lässt sich im Kreis Steinfurt bereits eine Zunahme der Lufttemperatur von durchschnittlich 0,9°C feststellen. Dabei ist anzumerken, dass bei dem viel diskutierten 1,5°-Ziel immer die Zunahme gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter gemeint ist. Davon fallen alleine auf diese beiden 30-Jahreszeiträume bereits 0,9°C. Beim Niederschlag wird im Vergleich der beiden Zeitperioden eine mittlere Zunahme von ca. 53 mm/Jahr festgestellt, die aber statistisch nicht signifikant ist.

8.2 Klimaprojektionen

Um das Ausmaß und die Auswirkungen der zukünftig zu erwartenden globalen Erwärmung auf Ibbenbüren abschätzen zu können bzw. um die Notwendigkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen für die Stadt Ibbenbüren schlussendlich zu begründen, werden Klimawandelprojektionen des IPCC (2018) ausgewertet und dargestellt. Das IPCC lässt im Rahmen der Grundlagenforschung den Treibhauseffekt und den dadurch bedingten Klimawandel mit verschiedenen mathematischen Verfahren simulieren. Hierbei werden in numerischen Klimasimulationsmodellen die physikalischen Prozesse der Atmosphäre unter Berücksichtigung

der Einflüsse verschiedener Klimafaktoren (u.a. globale atmosphärische und marine Zirkulationssysteme, Land-Meer-Verteilung, Relief, Topografie, Vegetation, Flächennutzung und Treibhausgasemissionen) im globalen Maßstab rechnerisch nachgebildet. Zur Beurteilung der zukünftigen Treibhausgasemissionen müssen deren Emissionen für die Zukunft realistisch abgeschätzt werden. Da jedoch nicht bekannt ist, wie sich die anthropogenen Treibhausgasemissionen entwickeln, wurden diesbezüglich sogenannte Emissionsszenarien entwickelt, die verschiedene potenzielle Entwicklungswege der Treibhausgasemissionen aufzeigen. Dabei werden ausgehend von der Theorie, dass die Treibhausgasemissionen das Resultat der globalen Gesellschaft und ihres Handelns sind, Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Weltwirtschaft, der Bevölkerungsentwicklung, des Umweltschutzes und der Energiegewinnung getroffen, aus denen die Treibhausgasemissionen der kommenden Jahrzehnte abgeleitet werden [9]. Auf Basis dieser Szenarien wird anschließend das zukünftige Klima modelliert (sog. Klimaprojektion).

Es gibt vier Treibhausgasemissionsszenarien, von denen drei in der öffentlichen und politischen Diskussion überwiegend von näherem Interesse sind. Diese sog. RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) beschreibt das [10] folgendermaßen:

Das Szenario RCP 2.6 beinhaltet eine mögliche optimale Treibhausgasemissionsentwicklung, welche die Zwei-Grad-Obergrenze im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter als globalen Mittelwert (nachfolgend 2K-Ziel genannt) berücksichtigt (s. Abb. 8-1). Die Festlegung der Zwei-Grad-Obergrenze ist ein politisches Ziel, bei dem die Wissenschaft davon ausgeht, dass bei einer Erwärmung unterhalb dieser Temperatur die Klimafolgen durch intensiven Klimaschutz noch beherrschbar wären. Demnach soll die Erderwärmung auf "deutlich unter zwei Grad" begrenzt werden. Seit Paris wird diskutiert, unter dem globalen Mittelwert von 1,5 °C zu bleiben, was aus heutiger Sicht bereits als unrealistisch eingestuft wird.

Das zweite Szenario RCP 4.5 folgt einem höheren Emissionsausstoß als das Zwei-Grad-Szenario, setzt allerdings einen verstärkten Klimaschutz als bisher voraus. In diesem Szenario wird mit einem weltweiten mittleren Temperaturanstieg von ca. 3 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau bis 2100 gerechnet.

Das dritte Szenario RCP 8.5 entspricht am ehesten der gegenwärtigen Emissionsentwicklung und ist deshalb bekannt als das „business as usual“ Szenario (nachfolgend B.a.u. genannt). Es betrachtet eine mögliche Klimaentwicklung bei gleichbleibend hohen Treibhausgasemissionen ohne wesentliche zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen. Daraus ergibt sich global ein räumlich differenzierter Temperaturanstieg zwischen 3,6 °C und 4,1 °C im Zeitabschnitt 2011 bis 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter. Dieses Szenario ist der ungünstigste Fall der weltweiten Emissionsentwicklung.

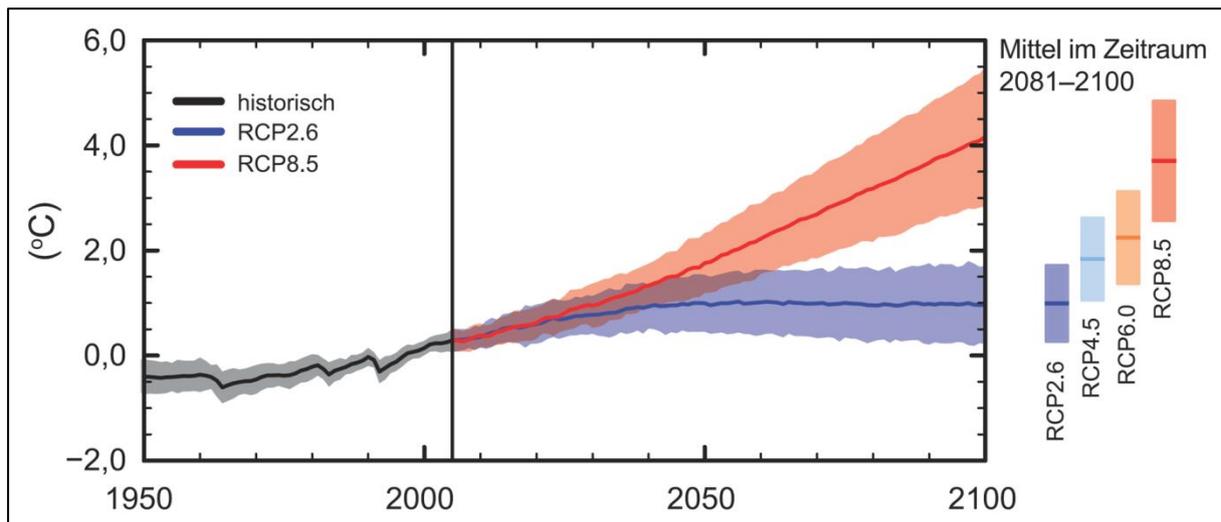


Abb. 8-1: Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur bezogen auf 1986–2005 (IPCC 2013/2014 [11]).

Da die Projektionen des IPCC auf globaler Ebene mit lediglich einem groben räumlichen Raster von einigen Zehnern Quadratkilometern berechnet wurden, ist für regionale Aussagen eine räumliche Verfeinerung der Daten erforderlich. Dieses als „Downscaling“ bezeichnete Verfahren wurde für Deutschland mittels diverser regionaler Klimamodelle durchgeführt [12].

Die projizierten Klimaänderungen, die im Klimaausblick des Climate Service Center Germany (GERICS) für den Landkreis Steinfurt [8] präsentiert werden, basieren auf regionalen Klimaprojektionen, die im Rahmen der EURO-CORDEX-Initiative (<http://www.euro-cordex.net>) sowie des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes REKliEs-DE (<http://reklies.hlnug.de>) erstellt wurden. Die EURO-CORDEX und ReKliEs-De Simulationen liegen dabei auf einem Gitter mit einer räumlichen horizontalen Auflösung von 12 km x 12 km vor und geben somit über das Stadtgebiet Ibbenbüren gemittelte Werte wieder.

Die für die einzelnen RCP-Szenarien durchgeführten Klimaprojektionen zeigen im Ergebnis eine Bandbreite der zukünftig zu erwartenden Wertebereiche der Klimaparameter auf. Diese mögliche Streuung wird in aller Regel durch den 80%-Wert bzw. den 20%-Wert beschrieben.

Den 80% und den 20%-Wert bezeichnet man als so genannte klimatische Leitplanken oder Eintrittswahrscheinlichkeiten, die die mögliche Bandbreite der Modellergebnisse bei gleichen Rahmenbedingungen für die Modellergebnisse darstellen. Das 20. Perzentil bzw. 80. Perzentil bedeuten, dass 20% aller Modellergebnisse unterhalb dieses 20%-Wertes und 20% oberhalb dieses 80%-Wertes liegen.

Die Fachwelt ist sich mittlerweile einig, dass realistisch von dem nicht ambitionierten Ansatz (RCP 8.5) ausgegangen werden sollte. Mit diesem Ansatz ist gegenüber dem Pariser Abkommen

(1,5°-Ziel) ein deutlich höherer mittlerer Temperaturanstieg zu erwarten. Im Folgenden werden aus diesem Grund nur die Ergebnisse für dieses Szenarium dargestellt.

Ausgehend von einer durchschnittlichen bodennahen Lufttemperatur im Landkreis Steinfurt im Zeitraum 1986 – 2015 von 9,6°C projizieren die Klimamodelle für das Szenario RCP 8,5 bis in die nahe Zukunft bereits im Mittel eine Zunahme von 1,8°C, bezogen auf die Referenzperiode 1971 – 2000, wobei die Modelle zwischen einer mittleren Zunahme von 1,2°C bis 2,9°C schwanken. Für die ferne Zukunft (Ende des Jahrhunderts) wird eine Zunahme von im Mittel 3,3°C mit Schwankungen zwischen 2,4°C und 4,8°C projiziert.

Die Abb. 8-2 zeigt die Bandbreite der zukünftig zu erwartenden Auftrittshäufigkeiten typischer klimatischer Ereignistage (Sommertag, heißer Tag und Tropennacht) für das Szenario RCP 8,5. Die Werte für den Referenzzeitraum 1971 – 2000 sind ohne 20%- und 80%-Wert aus der Zusammenstellung in Kapitel 8.1 entnommen.

Für das RCP 8.5-Szenarium wird bei den Sommertagen die Auftrittshäufigkeit bis zur Mitte des Jahrhunderts von im Mittel 26 Tagen in der Referenzperiode im Median um etwa 35% auf 35 Tage in der nahen Zukunft sowie zum Ende des Jahrhunderts um im Median etwa 80% auf 47 Tage vorhergesagt. Mindestens ist entsprechend der Modelle bis zur Jahrhundertmitte mit einem Anstieg um 3 Tage (12%) und bis zum Jahrhundertende um 13 Tage (46%) zu rechnen, im ungünstigsten Fall bis zur Mitte des Jahrhunderts um 40 Tage (54%) und bis zum Ende des Jahrhunderts um 76 Tage (fast 200%).

Bei den heißen Tagen, die insbesondere in Hinblick auf eine Beeinträchtigung der Handlungsfelder menschliche Gesundheit, Infrastruktur und Wirtschaft zu beachten sind, ist bis zur Mitte des Jahrhunderts ein Anstieg von im Mittel 4,8 Tagen/Jahr in der Referenzperiode im Median um etwa 60% auf 7,6 Tage/Jahr in der nahen Zukunft sowie zum Ende des Jahrhunderts um im Median etwa 150% auf fast 12 Tage/Jahr zu rechnen. Die Projektionsrechnungen schwanken sehr. So geben die einzelnen Modelle für die heißen Tage für die nahe Zukunft einen Anstieg zwischen 0,3 Tagen/Jahr und 18,2 Tagen/Jahr an, für die ferne Zukunft zwischen 2,0 Tagen/Jahr und 39,8 Tagen/Jahr. Ebenso wichtig ist in diesem Zusammenhang, die Andauer von möglichen Hitzeperioden. Diese beträgt für den Referenzzeitraum im Mittel 2,7 Tage. Hier werden für die nahe und die ferne Zukunft Zunahmen zwischen 0 Tagen und 5,1 Tagen (nahe Zukunft) bzw. 1 Tag und maximal 9,8 Tagen angegeben. Eine länger andauernde Hitzeperiode ist, insbesondere bzgl. der menschlichen Gesundheit als kritisch einzustufen, da keine Erholung, insbesondere in den Nachtstunden, stattfinden kann.

Bei den Tropennächten, bei denen die Temperatur in keiner Nachtstunde unter 20°C absinkt, ist ein Anstieg auf durchschnittlich 1,2 Nächte in der nahen Zukunft (maximal 14,3 Nächte /Jahr) und durchschnittlich 4,3 Nächte/Jahr in der fernen Zukunft (maximal 35,2 Tage/Jahr) zu erwarten.

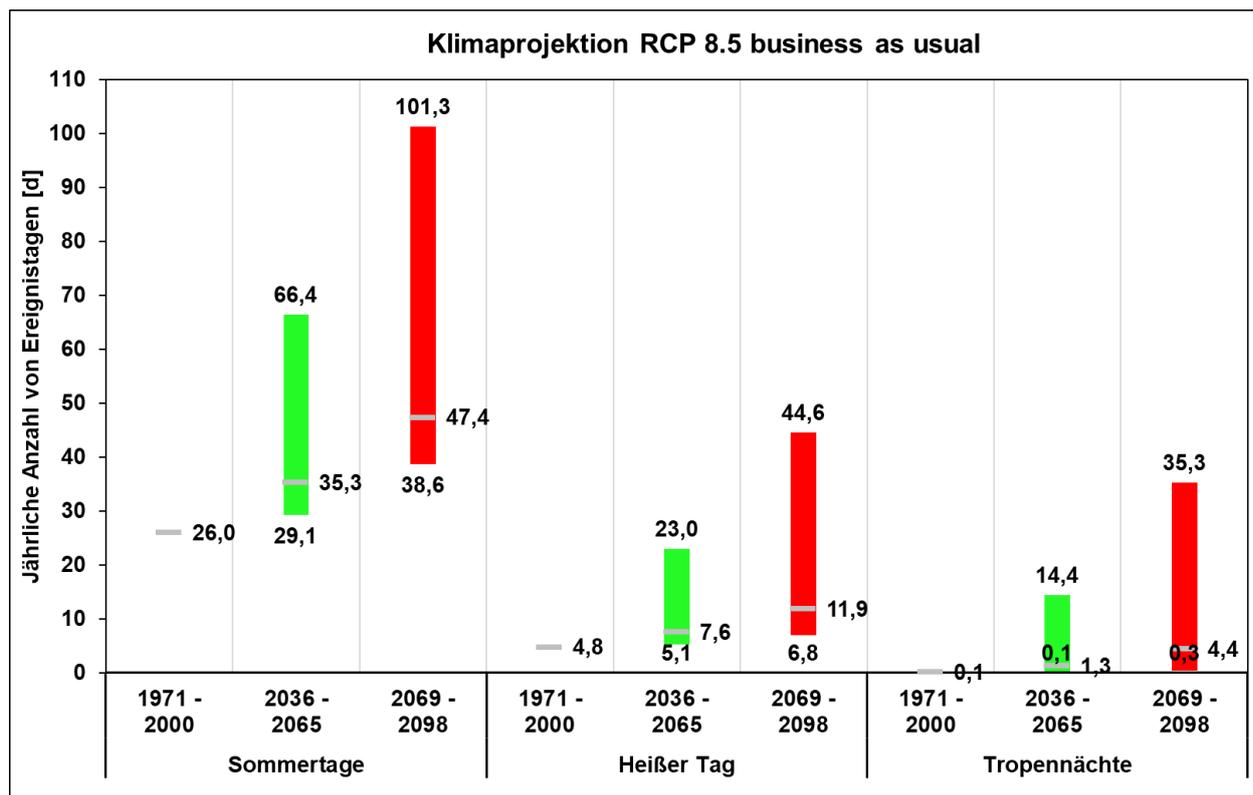


Abb. 8-2: Ensembleprojektionen zur Bandbreite der Auftrittshäufigkeiten klimatischer Ereignistage für den Raum Steinfurt. Für den Referenzzeitraum (1971–2000) sind die Mittelwerte angezeigt. Die Zeiträume für die nahe (2036–2065) und ferne (2069–2098) Zukunft zeigen jeweils Minimum, Median und Maximum bezogen auf die Gesamtheit der RCP 8.5-Szenarien-Simulationen.

Die **Abb. 8-3** zeigt die Bandbreite der zukünftig zu erwartenden Auftrittshäufigkeiten weiterer typischer klimatischer Ereignistage (Eistage, Frosttage und Tage mit einem Niederschlag > 20mm/Tag) für das Szenario RCP 8,5. Die Werte für den Referenzzeitraum 1971 – 2000 sind wieder ohne 20%- und 80%-Wert aus Kapitel 8.1 entnommen.

Im Gegensatz zu einer steigenden Wärmebelastung prognostiziert das RCP 8.5-Szenarium erwartungsgemäß eine Abnahme von Eis- sowie Frosttagen. Bei Frosttagen handelt es sich um die Tage, dessen Tagesminimumtemperatur unter 0°C liegt. Eistage sind die Tage mit einer maximalen Tagestemperatur unter 0°C. Die minimale Abnahme der Anzahl der Eistage liegt dabei bei 3,8 Tagen/Jahr in der nahen Zukunft und bei 5,7 Tagen/Jahr in der fernen Zukunft. Für beide Zukunftszeiträume fällt der Wert bei maximaler Abnahme auf null Tage/Jahr. Dabei werden im Zeitraum der fernen Zukunft eine Anzahl von Null Eistagen bereits mit dem Median der Simulationsfälle erreicht. Für die nahe Zukunft liegt der Median der Anzahl der Eistage bei 2,7 Tagen/Jahr. Die Abnahme der Frosttage ist für das RPC 8.5-Szenario nicht ganz so stark wie die Abnahme der Eistage. So fällt die Anzahl der Frosttage im Median in der nahen Zukunft auf 28,8 Tage/Jahr. Die minimale Abnahme beträgt dabei 15,9 Tage/Jahr und die maximale Abnahme

49,3 Tage/Jahr. Für die ferne Zukunft findet eine weitere Abnahme der Frosttage statt, und zwar wird eine Anzahl der Frosttage im Median bei 11,3 Tagen. Die Simulationen zeigen Abnahmen im Bereich von 22,8 bis 92,4 Tagen.

Das RCP8.5-Szenario zeigt neben den Anstiegen und Abfällen der genannten Kenntage eine Zunahme der Tage mit sehr hohen Niederschlägen (≥ 20 mm). In diesem Fall driften die Ergebnisse der einzelnen Simulationen weniger stark auseinander wie bei den temperaturbasierten Kenntagen. Für die nahe Zukunft wird eine Zunahme der Tage mit Niederschlägen ≥ 20 mm von mindestens ca. 10% prognostiziert. Die Anzahl der Tage liegt für die Simulationen zwischen 2,8 und 5,1 Tagen pro Jahr. Im Median beträgt die Anzahl der Tage mit Niederschlägen ≥ 20 mm pro Jahr 3,9 Tage. In der fernen Zukunft steigt der Median auf 4,7 Tage, wobei die Schwankung der Anzahl der Tage zwischen 3,6 und 6,8 Tagen/Jahr liegt.

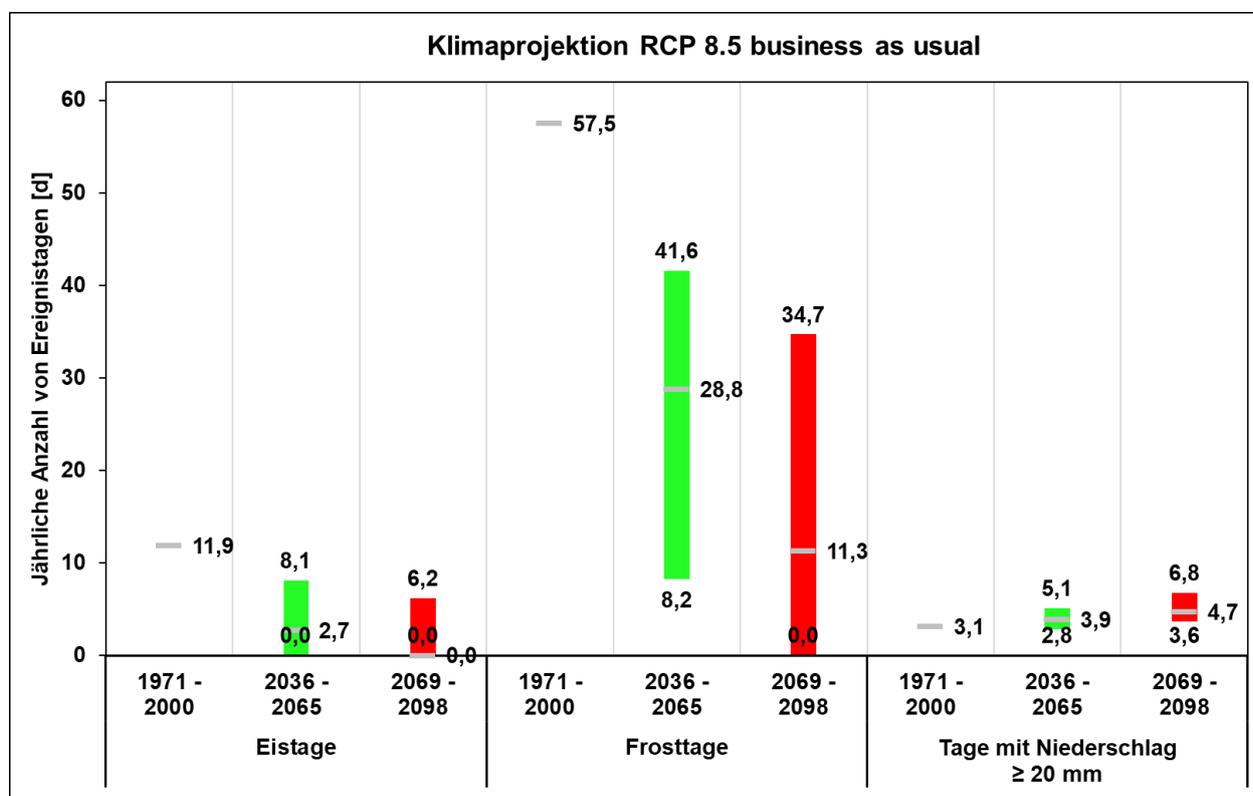


Abb. 8-3: Ensembleprojektionen zur Bandbreite der Auftrittshäufigkeiten klimatischer Ereignistage für den Raum Steinfurt. Für den Referenzzeitraum (1971–2000) sind die Mittelwerte angezeigt. Die Zeiträume für die nahe (2036–2065) und ferne (2069–2098) Zukunft zeigen jeweils Minimum, Median und Maximum bezogen auf die Gesamtheit der RCP 8.5-Szenarien-Simulationen.

Die Ergebnisse der Projektionsrechnungen basieren, wie beschrieben, auf Mittelwerten über eine größere Bezugsfläche. Bauliche oder lokale topographische Effekte werden somit nicht näher aufgelöst. Das bedeutet, dass der lokale Wärmeinseleffekt, der sich innerhalb stark bebauter und versiegelter Gebiete infolge der Wärmespeicherung tagsüber und der verzögerten Wärmeabgabe

nachts an heißen Tagen ausgebildet, nicht enthalten ist und somit noch verschärfend dazukommt. Dies betrifft insbesondere die Anzahl der Ereignistage bzw. die Auftretenshäufigkeit von Hitzeperioden. Ibbenbüren allerdings profitiert einerseits insbesondere bei Strahlungswetterlagen, an denen sich heiße Tage zw. Hitzeperioden ausbilden, von der ausgeprägten Kaltluftströmung im südlichen Stadtgebiet, andererseits von der gebietsweise relativ lockeren Bebauung mit Freiflächen. Die „Verschärfungen“ der Kennwerte durch den Wärmeinseleffekt ist im Stadtgebiet von Ibbenbüren in abgemilderter Form zu erwarten. Trotzdem ist im Kernbereich bei einigen der Ereignistagen, bspw. der Anzahl von Sommertagen und Hitzetagen, mit höheren Werten als für das Flächenmittel ausgegeben, zu rechnen.

Tab. 8-1: Zu- und Abnahmen der jährlichen Werte der Kenngrößen für die nahe und ferne Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode für das Szenario RCP8.5.

Projizierte Klimaänderungen	Änderung im Vergleich zur Referenzperiode (1971 - 2000)					
	Zeitraum 2036-2065			Zeitraum 2069-2098		
	Minimum	Median	Maximum	Minimum	Median	Maximum
Sommertage (Tage/Jahr)	3,1	9,3	40,4	12,6	21,4	75,3
Heiße Tage (Tage/Jahr)	0,3	2,8	18,2	2	7,1	39,8
Tropennächte (Tage/Jahr)	0	1,2	14,3	0,2	4,3	35,2
Frosttage (Tage/Jahr)	-49,3	-28,7	-15,9	-92,4	-46,2	-22,8
Eistage (Tage/Jahr)	-22,5	-9,2	-3,8	-31,8	-12,4	-5,7
Tage mit Niederschlag > 20 mm/Tag (Tage/Jahr)	-0,3	0,8	2	0,5	1,6	3,7

9 Literaturverzeichnis

- [1] BIGALKE, K., RAU, M. et al., *Dokumentation - Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken - SynAKS für Deutschland - Berechnung - Qualitätssicherung - Anwendung (Version 1.1)*, Pinneberg / Heilbronn: Download unter www.metsoft.de, 2013.
- [2] Garret, A.J., Smith III, F.G., „Two-Dimensional Simulations of Drainage Winds and Diffusion Compared to Observations.“ *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 597-610., 1984.
- [3] Schlünzen, K.H., Petrik, R., Grawe, D., *METRAS-PCL, Version 5.0.0 Benutzerhandbuch*, Hamburg: Hamburg, Meteorologisches Institut der Universität, CEN, 2017.
- [4] Schlünzen, K.H., Grawe, D., Petrik, R., Schenk, E., Weiner, O., *Referenzimplementierung eines prognostischen mesoskaligen Windfeldmodells für die Ausbreitungsrechnung nach Anhang 3 der TA Luft zur Berücksichtigung von Geländeunebenheiten bei Steigungen 1:5*, UFOPLAN-Abschlussbericht 3712 43 241, Meteorologisches Institut, CEN, Universität Hamburg, 2018.
- [5] VDI - Verein Deutscher Ingenieure, *VDI-Richtlinie 3783 Blatt 7 - Umweltmeteorologie; Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle; Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder*, 2017.
- [6] VDI - Verein Deutscher Ingenieure, *VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 - Umweltmeteorologie - Klima- und Lüfthygienekarten für Städte und Regionen*, Düsseldorf, 2015.
- [7] MAYER, H., BECKRÖGE, W. & MATZARAKIS, A., *Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen*, UVP-Report, 5, 265 - 268, 1994.
- [8] Pfeifer S., Bathiany S., Rechid D., „Klimaausblick Steinfurt,“ Climate Service Center Germany (GERICS), eine Einrichtung der Helmholtz-Zentrum hereon GmbH, 2021.
- [9] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor und T. Waterfield (eds.), „IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C,“ World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp., 2018.
- [10] PIK (2020): Klimafolgen Online. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) e. V., Potsdam. <http://www.klimafolgenonline.com/> Klimawandelprojektionsdaten.

- [11] IPCC (2013/2014) : Klimaänderung 2013/2014: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzungen durch D.
- [12] Brienen S, Walter A, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Höpp S, Jensen C, Jochumsen K, Möller J, Krähenmann S, Nilson E, Rauthe M, Razafimaharo C, Rudolph E, Rybka H, Schade N, Stanley K., „Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwer-punktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks,“ 157 Seiten. DOI: 10.5675/ExpNBS2020.2020.02, 2020.
- [13] Smagorinsky, J.S., Manabe, S., Holloway, L., „Numerical results from a nine-level general circulation model of the atmosphere.,“ Mon. Wea. Rev., 93, 727-768., 1965.

10 Anhang

Modellgleichungen und Numerik:

Grundlage des Modells sind die Flachwassergleichungen nach [2], die aus der vertikalen Integration der atmosphärischen Bewegungsgleichungen unter Annahme einer konstanten Dichte und der Kontinuitätsgleichung resultieren und eine ergänzende Gleichung für die Temperatur, abgeleitet aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{C_D U u}{h} - \frac{EV(u - u_a)}{h} - f(v_g - v) - \frac{g\Delta T}{T_0} \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_s}{\partial x} \right) + K_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{C_D U v}{h} - \frac{EV(v - v_a)}{h} - f(u_g - u) - \frac{g\Delta T}{T_0} \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z_s}{\partial y} \right) + K_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -\frac{\partial u h}{\partial x} - \frac{\partial v h}{\partial y} - \frac{EV\Delta T}{T_0} + Q + K_H \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - A + K_H \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)\end{aligned}$$

mit

$$U = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$V = \sqrt{(u - u_a)^2 + (v - v_a)^2}$$

$$E = \frac{A_1}{S_1 Ri + A_2} \quad A_1 = 2 \cdot 10^{-3}, A_2 = 2 \cdot 10^{-2}, S_1 = 0.5$$

$$Ri = \frac{g \Delta T h}{T_0 U^2}$$

$$K_H = 0.08 \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2}$$

u und v sind die vertikal integrierten Windkomponenten in x- bzw. y-Richtung innerhalb der Kaltluftschicht, u_a und v_a bzw. u_g und v_g die korrespondierenden Windkomponenten oberhalb der Kaltluftschicht bzw. oberhalb der atmosphärischen Grenzschicht (geostrophischer Wind). Mit h ist die Schichtdicke der Kaltluft, mit z_s die Geländehöhe, mit Q die Kaltluftproduktionsrate und mit A die abendliche Abkühlrate der Luft bezeichnet. ΔT ist die Temperaturdifferenz der Kaltluftschicht T zur umgebenden Referenztemperatur T_0 , C_D der Widerstandsbeiwert bzw. Reibungskoeffizient des Untergrunds, f der Coriolisparameter und g die Erdbeschleunigung. Der Diffusionskoeffizient K_H berechnet sich nach einem Ansatz von [13] aus der Scherung der Strömung.

Die beiden ersten Terme jeder Gleichung entsprechen der Advektion, die folgenden Terme repräsentieren die Vertikaldiffusion (Reibung am Boden, Entrainment am Oberrand), Corioliskraft

und Druckgradienten aufgrund von Dichte- bzw. Temperaturdifferenzen sowie die Kaltluftproduktion. Eine Kaltluftdissipation, die über Entrainmenteffekte hinausgeht (z.B. durch Advektion der Kaltluft über warme Wasseroberflächen oder Eindringen in wärmere bebaute Bereiche), kann durch Vorgabe einer negativen Kaltluftproduktionsrate für die entsprechenden Landnutzungstypen realisiert werden. Der letzte Term repräsentiert die Horizontaldiffusion. Entrainment am Oberrand, horizontale Diffusion sowie die Temperaturgleichung werden in METKAT optional berechnet.

Anstelle der prognostisch bestimmten Temperatur kann auch mit einer fest vorgegebenen Temperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung gerechnet werden. Die Temperaturgleichung dient in erster Linie dazu, eine zeitlich und räumlich variable Temperaturdifferenz zwischen Kaltluftschicht und Umgebung bereitzustellen. Sie liefert eine bessere Näherung als eine vorgegebene feste Temperaturdifferenz. Die absoluten Temperaturen sind dagegen weniger verlässlich. Für eine belastbare Temperaturbestimmung mangelt es der Temperaturgleichung jedoch an einer Parametrisierung der Energieflüsse am Boden, deren Richtung vom Vorzeichen der Temperaturdifferenz zwischen Boden / Oberflächen und Luft abhängt. In der vorliegenden Form findet grundsätzlich nur eine Abkühlung der Luft in Abhängigkeit von der lokalen Landnutzung statt.

Dem Modell kann ein Modellgitter vorgegeben werden, in dem innerhalb einer Gitterpunktsfläche die prozentualen Anteile verschiedener Landnutzungen definiert sind. In diesem Fall werden sowohl der Widerstandsbeiwert als auch die Kaltluftproduktionsrate und die Abkühlrate als gewichteter Mittelwert aus den landnutzungsspezifischen Klassenwerten gebildet.

Das Modellgebiet wird durch ein frei wählbares räumliches Gitter definiert, an dessen Gitterpunkten Geländehöhen und Landnutzung digitalisiert vorgegeben werden. Die Grundgleichungen werden gitterbezogen auf einem so genannten Arakawa-C-Gitter diskretisiert und numerisch gelöst. Die Advektionsterme werden mit einem Upstreamverfahren, andere Terme mit zentrierten Differenzen diskretisiert.

Über die Einströmränder erfolgt kein Kaltluftfluss in das Modellgebiet hinein. An Ausströmrändern wird die Normalableitung der Kaltlufthöhe auf 0 gesetzt. Die randnormalen Windkomponenten werden mithilfe einer Orlanski-Strahlungsrandbedingung berechnet. Alternativ kann für die Kaltlufthöhen und die randnormalen Windkomponenten ein konstanter Gradient angenommen werden.