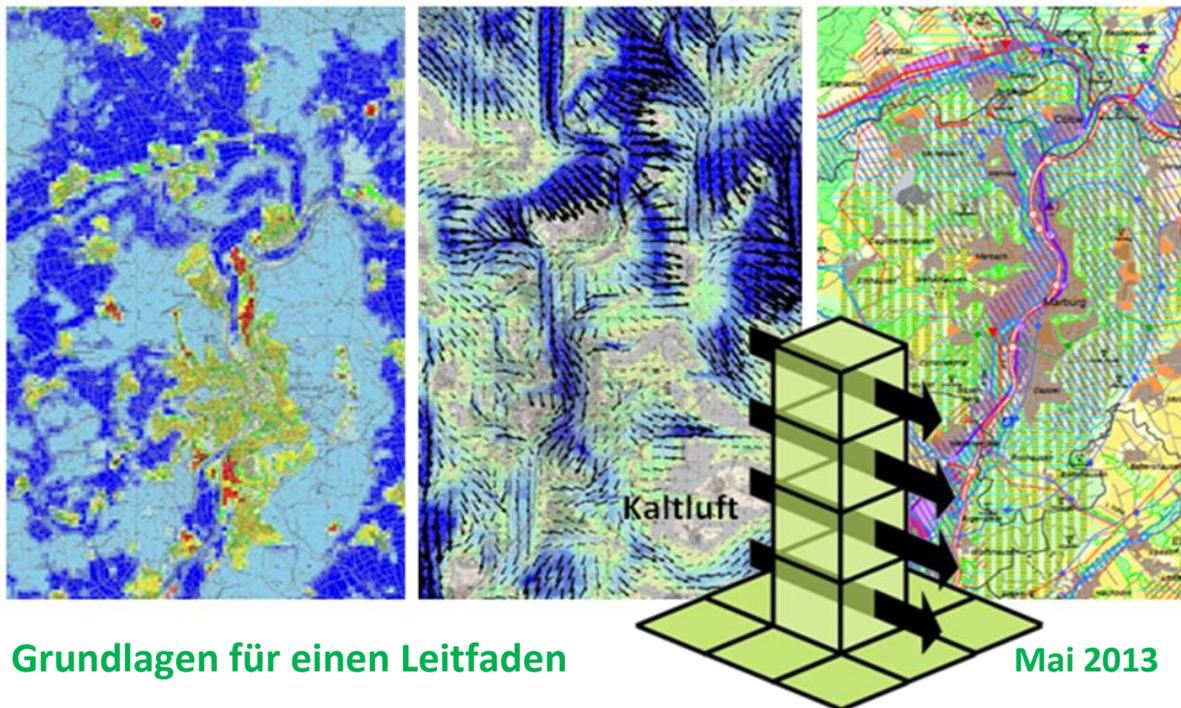


## Modellgestützte Klimaanalysen und –bewertungen für die Regionalplanung



Das „klamis“-Projekt-Team:

- Dr. Ivo Gerhards (Regierungspräsidium Gießen)
- Simone Philippi (Regierungspräsidium Gießen)
- Dr. Natalie Scheck (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung)
- Sonja Singer-Posern (HLUG, Fachzentrum Klimawandel Hessen)
- Michael Voll (Regionalverband FrankfurtRheinMain),

bedankt sich für die **fachliche Unterstützung** bei:

- Hans-Georg Dannert (Umweltamt der Stadt Frankfurt am Main).
- Christoph Kolloge
- Dr. Meinolf Koßmann (Deutscher Wetterdienst)
- Dr. Jost Nielinger (iMA Richter & Röckle GmbH & Co KG)
- Wolf-Dieter Petzoldt

Die Dokumentation „Modellgestützte Klimaanalysen und –bewertungen für die Regionalplanung, Grundlagen für einen Leitfaden“ ist ein eigenständiges Ergebnis, das im Rahmen der Projektarbeit von KLAMIS – Klimaanpassung in Mittel- und Südhessen, unterstützt mit Mitteln des Modellvorhabens der Raumordnung „Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“ (Klima-MORO), erarbeitet wurde. Das Modellvorhaben der Raumordnung (MORO) ist ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), betreut durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).



Bundesministerium  
für Verkehr, Bau  
und Stadtentwicklung



Bundesinstitut  
für Bau-, Stadt- und  
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung





## Vorwort

Vor dem Hintergrund der im Dezember 2008 verabschiedeten „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ unterstützt das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) im Rahmen seines Aktionsprogramms »Modellvorhaben der Raumordnung« (MORO), betreut durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), die Entwicklung regionaler Klimaanpassungsstrategien. Als eine von bundesweit acht Modellregionen hat die Modellregion „Mittel- und Südhessen“ an dem im Juni 2009 initiierten Projekt „Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“ (KlimaMORO) teilgenommen und unter dem Projektnamen „Klamis – Klimaanpassung in Mittel- und Südhessen“ erste Schritte hin zu einer regionalen Klimaanpassungsstrategie unternommen.

Eines von vier Themenfeldern im Rahmen der vom Juni 2009 und März 2011 laufenden ersten Projektphase war das Siedlungsklima. Aufgrund der landesplanerischen Vorgabe, in den Regionalplänen „Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen“ auszuweisen, ist Hessen für die Bearbeitung von Fragestellungen zu diesem Themenbereich besonders geeignet. Die in Hessen der regionalplanerischen Ausweisung bislang zugrunde liegende Datenbasis entspricht nicht dem aktuellen Stand der technischen Möglichkeiten und berücksichtigt unter anderem auch nicht den Aspekt des Klimawandels. Im bundesweiten Vergleich kann zudem festgestellt werden, dass es in der bisherigen Planungspraxis in Bezug auf die Definition und die räumliche Abgrenzung beispielweise von wärmebelasteten Räumen und Ausgleichsräumen noch an Informationen und Kriterien fehlt.

Die vertiefende Bearbeitung dieses Themenkomplexes war daher Gegenstand der, ebenfalls vom BMVBS geförderten, zweiten Phase des KlimaMORO. Ziel dieser Verstetigungsphase war u. a., mittels Formulierung allgemeingültiger Standards die bisher sehr unterschiedliche Vorgehensweise bei der Sicherung regional bedeutsamer, klimarelevanter Flächen vergleichbarer zu gestalten.

Die vorliegende Dokumentation fasst die im Rahmen der zweiten Phase des KlimaMORO gewonnenen Erkenntnisse zusammen und soll regionalen Planungsinstitutionen und Interessierten einen hilfreichen Überblick über den aktuellen Wissensstand sowie Ansätze zur Identifikation überörtlich klimarelevanter Flächen liefern.

Dabei wird deutlich, dass es trotz hochwertiger Datengrundlagen und Werkzeuge der Umweltmeteorologie und bewährter Instrumente zur Steuerung der Regionalplanung bislang an geeigneten und erprobten Analyseinstrumenten und Methoden fehlt, um die Simulationsergebnisse von modellgestützten Klimaanalysen in eine für den Regionalplaner sichere und eindeutige Entscheidungsgrundlage zu überführen. In diesem Zusammenhang konnten im Rahmen von „klamis“ erste Ansätze entwickelt und ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgezeigt werden.



# Inhaltsverzeichnis

## Zusammenfassung

<b>1. Hitzebelastung – Herausforderungen für die Regionen.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Es wird wärmer - Abkühlung ist gefragt .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Wann ist es uns zu warm? .....	3
1.1.2 Wo ist es besonders warm? .....	5
<b>1.2 Was kann die Regionalplanung leisten?.....</b>	<b>8</b>
<b>2. Planungsrelevante Faktoren .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Wirkungsraum, bioklimatisch und/oder lufthygienisch belasteter Raum .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Herkunftsraum, Kaltluftentstehungsgebiete und -strömungen.....</b>	<b>15</b>
2.2.1 Flurwinde (thermisch bedingtes lokales Windfeld).....	17
2.2.2 Kaltluftströmungen .....	18
2.2.3 Kaltluftströmungen und lufthygienische Belastung .....	22
<b>3. Klimaanalysemodelle für die Regionalplanung .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Untersuchte Klimaanalysemodelle .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 Kriterienkatalog zur vergleichenden Gegenüberstellung .....</b>	<b>24</b>
3.2.1 Geeignete Skala und Rastergröße .....	24
3.2.2 Modellierung von Kaltluftabfluss .....	25
3.2.3 Modellierung der bioklimatischen Belastung.....	26
3.2.4 Modellierung der Schadstoffbelastung .....	26
3.2.5 Modellierung klimatischer Veränderungen durch den Klimawandel .....	27
3.2.6 Hohe Wirklichkeitsnähe .....	29
3.2.7 Modellierung mehrerer Kaltluftschichten.....	29
3.2.8 Flurwindeffekte .....	30
3.2.9 Landnutzungsklassen.....	31
3.2.10 Wandartige Hindernisse .....	32
3.2.11 Nesting.....	33
<b>3.3 Zusammenfassung.....</b>	<b>34</b>

<b>4. Modellgestützte Klimaanalysen in den Regionen .....</b>	<b>35</b>
<b>5. Hinweise für die Regionalplanung.....</b>	<b>38</b>
<b>5.1 Anforderungen an Datengrundlagen .....</b>	<b>38</b>
5.1.1 „Vereinfachte“ Verfahren.....	39
5.1.2 Einsatz modellgestützter Klimaanalysen in der Regionalplanung.....	41
<b>5.2 Wesentliche Ergebnisse von modellgestützten Klimaanalysen und Ansätze zu ihrer Umsetzung in die Praxis der Regionalplanung.....</b>	<b>41</b>
5.2.1 Wirkungsraum .....	42
5.2.2 Herkunftsraum .....	43
<b>5.3 Weiterer Handlungs-/Entwicklungsbedarf.....</b>	<b>47</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>49</b>
<b>6. Anhang.....</b>	<b>55</b>
<b>A) Glossar .....</b>	<b>55</b>
<b>B) Humanbioklimatische Belastung – Beurteilungsgrößen (Indices) .....</b>	<b>59</b>
<b>C) Modellgestützte Klimaanalyse und –bewertung für die Regionalplanung in Hessen, Grundlagen am Beispiel Marburg.....</b>	<b>61</b>

## Zusammenfassung

Wetter und Klima können das Wohlbefinden des Menschen und damit auch seine Leistungsfähigkeit und Gesundheit stark beeinflussen. Besonders belastend wirken Wetterlagen mit hohen Lufttemperaturen und einer hohen Luftfeuchtigkeit. Bei geringem Luftaustausch tritt zudem die Gefahr der Anreicherung von Luftschadstoffen auf. Besonders gefährdet sind Städte in dicht besiedelten Räumen sowie in Tallagen (siehe Kapitel 1).

Angesichts des globalen Klimawandels ist in Zukunft mit einer deutlichen Zunahme der Anzahl der heißen Tage (maximale Lufttemperatur  $\geq 30$  °C) sowie Tropennächte (minimale Lufttemperatur  $\geq 20$  °C) und in der Folge mit einer steigenden Wärmebelastung der Bevölkerung zu rechnen. Neben den wichtigen Maßnahmen zum Klimaschutz (z. B. Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Hessische Anpassungsstrategie) rücken die Strategien zur Anpassung an die sich ändernden Klimabedingungen zunehmend in den Fokus. Für die Regionalplanung und die Stadtplanung stellen dabei der durchschnittliche Temperaturanstieg und die Anreicherung der Luft mit Schadstoffen in dicht besiedelten Räumen eine große Herausforderung dar. Einen Beitrag zur Verbesserung des Wohn- und Arbeitsumfeldes kann die Sicherstellung einer ausreichenden Durchlüftung der Ortslagen durch die Sicherung und Aufwertung von Freiflächen, die von besonderer Bedeutung für die Kalt- und Frischluftproduktion sowie den Kaltluftabfluss in Siedlungsgebiete sind, leisten.

Während der Stadtplaner vorwiegend die lokal-/mikroklimatischen Auswirkungen von Planungen in einzelnen Stadteilen einschätzen muss, konzentriert sich die Regionalplanung auf überörtliche Zusammenhänge. Um die Durchlüftungssituation einer Region beurteilen zu können, ist eine Zuordnung von bioklimatisch und/oder lufthygienisch belasteten Räumen (Wirkungsräume) und den ihnen räumlich zugeordneten Räumen, in denen die siedlungsrelevante Kaltluft entsteht (Herkunftsräume), notwendig.

Hierfür benötigt die Regionalplanung Informationen zu:

- den bioklimatisch und lufthygienisch belasteten Räumen, für die ein Bedarf an überörtlicher Entlastung besteht.
- den überörtlich bedeutsamen Kaltluftentstehungsgebieten.
- den überörtlich bedeutsamen Kaltluftleitbahnen und Strömungssystemen (siehe Kapitel 2).

Zahlreiche Regionen haben inzwischen modellgestützte Klimaanalysen in Auftrag gegeben. Bei Betrachtung einzelner regionaler Klimaanalysen fällt jedoch auf, dass diese sich hinsichtlich der zugrunde liegenden Methoden und Vorgehensweisen zum Teil deutlich voneinander unterscheiden (siehe Kapitel 3 und 4). Dies kann damit begründet werden, dass die mit den modellgestützten Klimaanalysen erarbeiteten Analyse- und Ergebnisdaten zwar eine gute Datengrundlage bieten, nach wie vor jedoch geeignete und erprobte Analyseinstrumente und –methoden fehlen, um die Simulationsergebnisse in eine für die Regionalplanung sichere und geeignete Entscheidungsgrundlage zu überführen (siehe hierzu auch die im Rahmen des Projektes in Auftrag gegebene Klimaanalyse am Beispiel der Stadt Marburg).

Vor diesem Hintergrund formuliert Kapitel 5 die Anforderungen an die Datengrundlagen, fasst erste Ansätze zur Umsetzung in die Praxis der Regionalplanung zusammen und zeigt den weiteren Handlungs- und Entwicklungsbedarf auf.



# 1. Hitzebelastung – Herausforderungen für die Regionen

Wetter und Klima können das Wohlbefinden des Menschen und damit seine Leistungsfähigkeit und Gesundheit stark beeinflussen. Bereits heute stehen zahlreiche Regionen - aufgrund von sommerlichen Hitzebelastungen - vor planerischen Herausforderungen. Wie in Kapitel 1.1 dargestellt, werden diese Herausforderungen aufgrund des zu erwartenden klimabedingten Temperaturanstiegs voraussichtlich noch zunehmen. Mit der Frage, wann es uns zu warm ist und welche Regionen in Hessen besonders von Hitzebelastungen betroffen sind, befassen sich die Kapitel 1.1.1 und 1.1.2. Die Möglichkeiten und Grenzen zur räumlichen Steuerung durch die Regionalplanung und die ihr zur Verfügung stehenden Instrumente, fasst Kapitel 1.2 zusammen.

## 1.1 Es wird wärmer - Abkühlung ist gefragt

Viele von uns kennen die Situation: Es ist Sommer und die Lufttemperatur steigt – jetzt sind kühle und schattige Orte gefragt. Kühlt es insbesondere in den Nachtstunden nicht hinreichend ab, stellt dies für den Organismus eine Stresssituation dar, Schlafprobleme bis hin zu gesundheitlichen Beschwerden, vor allem bei bereits vorbelasteten Personengruppen, können die Folge sein. Besonders betroffen ist die Bevölkerung in städtischen Gebieten mit einer hohen Bebauungsdichte und einem hohen Versiegelungsgrad.



Abbildung 1 | Schattenplätze sind gefragt (Foto: Ott, C.)

Nach Aussage von Experten können in den verdichteten Siedlungsräumen die Temperaturen nachts 4 bis 10 Grad Celsius (°C) höher liegen als in den umliegenden ländlichen Räumen (Schönwiese 1994: 349 in Fleischhauer, Bornefeld 2006: 166). In Einzelfällen kann der Temperaturunterschied bis zu 15 °C betragen (BMVBS 2011: 10)

Derzeit leben ca. 75% der deutschen Bevölkerung (über 60 Millionen Menschen) in Städten (Statista 2013). Vor dem Hintergrund, dass insbesondere die Städte in Ballungszentren mit einem weiteren Bevölkerungswachstum rechnen können/müssen, wird die Schaffung von – auch unter dem Gesichtspunkt der bioklimatischen Situation - attraktiven Siedlungsgebiete die Regional- und Stadtplanung vor besondere Herausforderungen stellen. Hinzu kommt, dass in den Städten der Anteil der besonders hitzeempfindlichen älteren Bevölkerung zunimmt.

Auch sind es die dicht bebauten Städte, in denen die Folgen des klimabedingten Temperaturanstiegs voraussichtlich besonders deutlich zu spüren sein werden. Nach Abschätzungen des Fachzentrums Klimawandel Hessen ist für Hessen bis Ende des Jahrhunderts mit einer weiteren Erhöhung der Jahresmitteltemperatur – je nach zugrunde gelegtem Emissionsszenario (A1B, A2, B1) und Modell (Wettreg, REMO, CCLM) - zwischen 1,8 °C und 3,1 °C zu rechnen (Hessischer Umweltatlas: Klima-Zukunft). Hieraus resultiert eine deutliche Zunahme der warmen Temperaturextreme (Sommertage: Maximum der Lufttemperatur  $\geq 25$  °C, heißer Tag, z.T. auch als Hitzetag bezeichnet: Maximum der

Lufttemperatur  $\geq 30$  °C und Tropennächte: Minimum der Lufttemperatur  $\geq 20$  °C). Besonders die heißen Tage und Tropennächte nehmen zum Ende des Jahrhunderts voraussichtlich deutlich zu. Auf Basis der vom Fachzentrum Klimawandel Hessen herangezogenen regionalen Klimamodelle und Emissionsszenarien rechnet das Fachzentrum bis dahin mit mindestens einer Verdoppelung der heißen Tage. Die Temperaturverteilung wird sich also nicht gleichmäßig zu höheren Temperaturen verschieben, sondern es werden insbesondere die sehr warmen Tage stark zunehmen. Auch für die Anzahl von Tropennächten pro Jahr stellt das Fachzentrum fest, dass der simulierte Anstieg für den späteren Zeitraum (2071 – 2100) mindestens doppelt so stark ausfällt wie im Zeitraum 2031 – 2060 (Hessischer Umweltatlas: Klima - Zukunft).

Mit Blick auf die bereits heute z. T. hohen sommerlichen Durchschnittstemperaturen und vor dem Hintergrund, dass es infolge des klimabedingten Temperaturanstiegs nach derzeitigem Kenntnisstand zu einer Zunahme von Hitzetagen und Tropennächten kommen wird, wird die Sicherung von Freiflächen, die bei großräumigen Schwachwindwetterlagen wichtige Belüftungs- und Abkühlungsfunktionen für Siedlungsgebiete wahrnehmen können, künftig noch wichtiger.

### 1.1.1 Wann ist es uns zu warm?

Das thermische Behaglichkeitsempfinden des Menschen und damit die Frage „Wann ist es uns zu warm?“ hängt von dem Gleichgewicht zwischen Wärmebildung und Wärmeabgabe ab. Bei erhöhter Wärmeeinstrahlung muss der Körper diese Wärme wieder abgeben. Unter körperlicher Belastung bedeutet eine Wärme-/Hitzebelastung eine erhebliche Beanspruchung des Organismus (SCHMIDT-KESSEN, W. 1990: 5).

Wärmebelastung und Kältestress hängen von mehreren meteorologischen Parametern ab (z.B. Temperatur, Wind, Strahlung, Feuchte), die immer in ihrer Gesamtheit auf den Menschen wirken, so dass eine kombinierte Bewertung notwendig ist. Auch wenn meteorologische Elemente wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit individuell unterschiedlich wahrgenommen werden, können sie näherungsweise mit Hilfe von Wärmebilanzgleichungen des menschlichen Körpers beschrieben werden. Ein bekanntes Energiebilanzmodell zur Berechnung der gefühlten Temperatur (STAIGER ET AL., 2012) ist das „Klima-Michel-Modell“. Das Modell, das im Jahr 1990 von JENDRITZKY vorgestellt wurde und vom DWD verwendet wird, geht auf eine Behaglichkeitsgleichung von FANGER (1972) zurück; es beinhaltet eine luftfeuchteabhängige Korrektur für feuchtwarme Bedingungen. Aufgrund der Möglichkeit zur flächenhaften Darstellung hat das Modell eine weite Verbreitung als planarisches Werkzeug gefunden. Eine Übersicht des Klima-Michel-Modells sowie weiterer Modelle/Indices ist im Anhang zusammengefasst.

Zur Bewertung der Wärmebelastung kann die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10 herangezogen werden. Sie definiert eine „relevante Wärmebelastung“ als einen Tag, an dem der Schwellenwert „starke Wärmebelastung“ (Tabelle 1) erreicht oder überschritten wird.

**Tabelle 1 | Thermophysiologische Bewertung (10-min-Mittel) (nach VDI-Richtlinie 3787 (Bl. 10) 2010: 15)**

Gefühlte Temperatur (GT) in °C	Thermisches Empfinden	Thermophysiologische Beanspruchung
$GT \geq 38$	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung
$32 \geq GT < 38$	Heiß	Starke Wärmebelastung
$26 \geq GT < 32$	Warm	Mäßige Wärmebelastung
$20 \geq GT < 26$	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
$0 \geq GT < 20$	Behaglich	Komfort möglich
$-13 < GT \leq 0$	Leicht kühl	Schwacher Kältestress
$-26 < GT \leq -13$	Kühl	Mäßiger Kältestress
$-39 < GT \leq -26$	Kalt	Starker Kältestress
$GT \leq -39$	Sehr kalt	Extremer Kältestress

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass es auch unterhalb der o. g. Schwelle extremer Ereignisse zu einer Beeinflussung der Lebensqualität durch die gegebenen klimatischen Bedingungen kommen kann.

Durch Akklimatisation, d. h. die individuelle physiologische Anpassung des Organismus an die Temperaturen, wird die über die Klimaänderung zu erwartende Zunahme von Intensität und Häufigkeit wärmebelastender Bedingungen abgeschwächt (VDI 3787 (Bl. 10) 2010: 16). So geht unter anderem

KOPPE davon aus, dass etwa 4-6 Tage nach Einsetzen einer starken Wärmebelastung i. d. R. durchschnittlich etwa 75% der maximalen Akklimatisation erreicht sind. Danach kommt es nur noch zu einer langsamen weiteren Anpassung, bis etwa nach zwei Wochen die maximale Anpassung erreicht wird (PANDOLF 1998, SHAPIRO ET AL. 1998, FANGER 1972 zit. nach KOPPE, C. 2005: 67). Zu berücksichtigen ist jedoch, dass sich bei älteren und gesundheitlich geschwächten Menschen der Körper häufig schlechter und/oder langsamer an die hohen Temperaturen anpassen kann.

Werden hohe Tag- und Nachttemperaturwerte über einen längeren Zeitraum erreicht, die die täglichen Gewohnheiten beeinflussen und eine massive Belastung der Gesundheit von Personen bzw. Risikogruppen mit sich bringen, wird von einer Hitzewelle/Hitzeperiode gesprochen. Hitzewellen wie im Sommer 2003 in Europa und zuletzt 2010 in Russland haben deutlich gezeigt, welche Auswirkungen lang anhaltende Perioden mit hohen Temperaturen haben können. Durch den Klimawandel ist zu erwarten, dass Tage mit starker Wärmebelastung bzw. Hitzewellen sowie Nächte, in denen die niedrigste Lufttemperatur nicht unter 20 °C fällt (Tropennacht), in Zukunft deutlich häufiger auftreten.

Eine **allgemeingültige internationale Definition einer Hitzewelle existiert nicht** – vielmehr wird eine Hitzewelle in den einzelnen Ländern unterschiedlich definiert, da jede Region andere Umwelt- bzw. Klimabedingungen aufweist. Grundsätzlich müssen Schwellenwerte jedoch unter Berücksichtigung von Tageshöchstwerten und Minimumtemperaturen während der Nacht festgelegt werden. Zudem ist eine Zeitspanne für ein Hitzewellenereignis zu definieren (ROBINSON, P.J. 2001: 763). Eine Übersicht unterschiedlicher Definitionen von Hitzewellen zeigt die folgende Tabelle.

**Tabelle 2 | Unterschiedliche Definitionen von Hitzewelle**

Länder/Städte bzw. Autoren	Temperatur in °C (Tagesmaximum)	Dauer in Tagen
USA	32,2	3
Niederlande	25	5 (3 Tage davon über 30 °C)
Tschechische Republik	30	3
Polen	30	Mehrere Tage oder Wochen, in denen die max. Lufttemperatur über 30 °C liegt und nur durch wenige kühlere Perioden unterbrochen wird.
Deutschland	30	mindestens 5 Tage
Stadt Essen	32	3

USA, NL, Tschech. Republik, Polen, Stadt Essen: EIS, D. ET AL. 2010: 98; Deutschland: TINZ, B., FREYDANK, E., HUPFER, P. 2008

Nach FEENSTRA werden in Europa allgemein  $\geq 30$  °C als maximale Tagestemperatur und 20 °C als Minimum der Lufttemperatur in der Nacht als Richtwerte herangezogen. Bei zahlreichen Definitionen müssen diese Werte an drei aufeinanderfolgenden Tagen erreicht bzw. überschritten - oder bei Nachttemperaturen nicht unterschritten - werden (vgl. FEENSTRA, O. 2011: 7). Nach anderen Definitionen ist eine Hitzeperiode definiert durch mindestens sechs aufeinander folgende Tage mit einer Höchsttemperatur von 5 °C über der mittleren Temperatur eines 30-jährigen Mittels (wiki.bildungsserver).

### 1.1.2 Wo ist es besonders warm?

Zur flächendeckenden Erfassung der bioklimatischen Situation in Hessen wurden die Mess- und Beobachtungsdaten der Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes aus dem Zeitraum von 1971 bis 2000 mit dem Klima-Michel-Modell analysiert (siehe Kapitel 1.1.1). Die auf Basis dieser Daten erstellte Bioklimakarte verdeutlicht die räumliche Verteilung der Tage mit Wärmebelastung, die im vieljährigen Durchschnitt zu erwarten ist. Dabei versteht man unter einem Tag mit Wärmebelastung einen Tag, an dem tagsüber ein fester Wert der gefühlten Temperatur überschritten wird. Wärmebelastung tritt hauptsächlich bei sommerlichen, strahlungsreichen Hochdruckwetterlagen mit geringer Luftbewegung auf. Abbildung 2 zeigt, dass die Bevölkerung im Rhein-Main-Gebiet am häufigsten einer Wärmebelastung ausgesetzt ist. Je dunkler die Rotfärbung, umso höher ist die jährliche Anzahl der Tage mit einer Wärmebelastung (bis zu > 30 Tage mit Wärmebelastung pro Jahr).

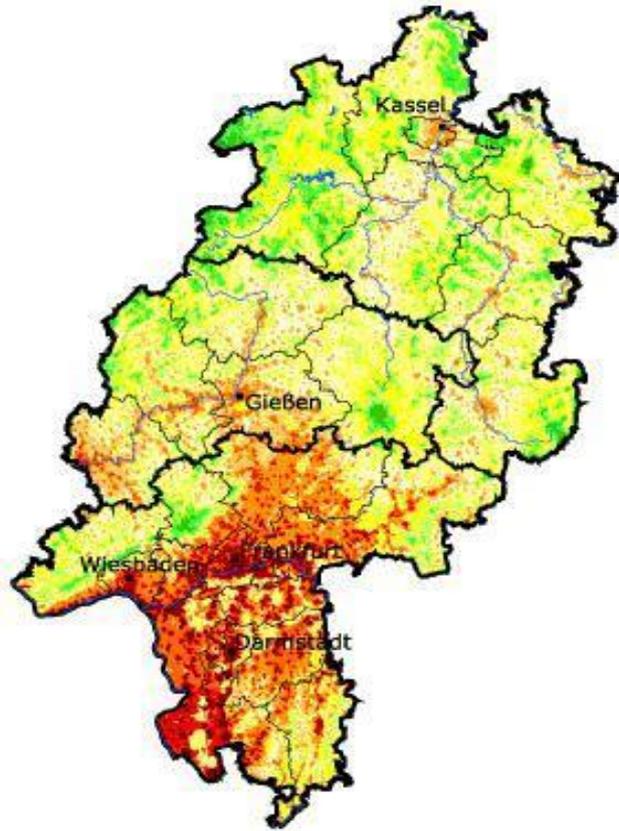


Abbildung 2 | Bioklimakarte Hessen, DWD für den Zeitraum 1971-2000 (Umweltatlas-Hessen)

Hingegen weisen die mittleren Höhenlagen deutlich seltener (gelbe Flächen) und die Hochlagen der Mittelgebirge (z. B. Taunus, Rhön, Westerwald, Rothaargebirge (grüne Flächen)) kaum Wärmebelastungen auf. Hier spiegelt sich u. a. die Höhenabhängigkeit der Wärmebelastung wider. Gut erkennbar ist auch der Einfluss des Klimafaktors „geographische Lage“, der sich mit einem Süd-Nord-Gefälle bemerkbar macht.

Kleinräumiger als die genannten Faktoren sind die Modifikationen, die insbesondere durch folgende Faktoren beeinflusst werden:

- Relief
- Flächennutzung
- Oberflächenstruktur
- Bodenart
- Vegetationsart / -zustand (VDI 3787 (Bl. 1) 1997: 44).

Räumliche Einheiten, in denen die mikroklimatisch wichtigsten Faktoren relativ homogen sind, werden als Klimatope bezeichnet. Da die mikroklimatischen Ausprägungen im Wesentlichen durch die reale Flächennutzung und insbesondere durch die Art der Bebauung bestimmt werden, sind die in der folgenden Tabelle aufgeführten Klimatope nach den dominanten Flächennutzungsarten benannt.

**Tabelle 3 I Klimatope (Auszug, detailliert siehe VDI 3787 (Bl. 1) 1997: 46f)**

<b>Klimatope</b>	<b>Klimatische Besonderheit</b>
<b>Gewässer, Seen</b>	Gedämpfter Tagesgang der Lufttemperatur auf Grund thermischer Trägheit des Wasserkörpers, geringe Rauigkeit bedingt relativ höhere Windgeschwindigkeit.
<b>Freiland</b>	Freiland-Klimatope sind aufgrund ihrer nächtlichen Kalt- und Frischluftproduktion für das Stadtgebiet bedeutsam. Freiland-Klimatope weisen überwiegend landwirtschaftliche Nutzung, Weiden und Wiesen auf. Der Versiegelungsgrad liegt unter 10%. Die Oberflächenstruktur ist überwiegend durch niedrige Strukturen und niedrige Vegetation geprägt.
<b>Wald</b>	Wald-Klimatope sind durch dichte, überwiegend hohe und geschlossene Baumvegetation (Laub- und Nadelwald von mindestens 90% Flächenanteil) geprägt. Sie führen zu gedämpften Tagesgängen von Temperatur und Feuchte sowie zu niedrigeren Windgeschwindigkeiten. Die Kaltluftentstehung findet im oberen Bereich des Kronenraumes statt. Über geneigtem Gelände kann die gebildete Kaltluft hangabwärts abfließen und sinkt nur teilweise in den Stammraum ein.
<b>innerstädtische Grünflächen</b>	Innerstädtische Grünflächen umfassen u. a. Wiesenflächen, Parks, Sportanlagen. Als Mindestgröße der Grünflächen wird in der Literatur z. T. ein Wert von 1 ha angegeben. Der Versiegelungsgrad liegt unter 20%. Die mikroklimatische Veränderung über den innerstädtischen Grünflächen entspricht denen der Freiland-Klimatope. Die Auswirkung in den Randbereich der Umgebung ist normalerweise gering.
<b>Gartenstadt, Dorf</b>	Das Klimatop ist dem Übergangsbereich zwischen Freilandklima und dem Klima bebauter Flächen zuzuordnen. Es überwiegt der Einfluss des unbebauten Geländes. Einzelhäuser mit geringer Bauhöhe (1 bis 3-geschossig) und Garten- und Freilandnutzung herrschen vor. Der Versiegelungsgrad beträgt ca. 20 bis 30%.
<b>Stadttrand</b>	Im Übergang vom locker bebauten Umland erfolgt am Stadttrand eine stärkere Verdichtung der Bebauung. Die Geschosshöhen von Gebäuden und der Versiegelungsgrad steigen an, der Grünflächenanteil, insbesondere die Baumvegetation, geht zurück. Der Versiegelungsgrad beträgt zwischen 30 und 50%.
<b>verdichtete Stadtbauung</b>	Durch Wechselwirkungen mit der hoch verdichteten Bebauung entsteht das als „Stadtklima“ bekannte Mikroklima. Das Stadtklima ist durch die Wechselwirkungen mit der Bebauung und deren Auswirkungen (u a. Abwärme und Emissionen) geprägt. Es herrschen 2- bis 5-stöckige Wohnblocks und Blockrandbebauungen vor. Der Versiegelungsgrad beträgt zwischen 50 und 70%.
<b>Stadtkern (Innenstadt)</b>	Stärkste Ausprägung eines Stadtklimas infolge hochverdichteter Bebauung und eines nur geringen Grünflächenanteils. 3- und mehrgeschossige Gebäudeblöcke, Verwaltungs- und Geschäftsgebäude herrschen vor. Die Vegetation besteht vorwiegend aus Straßebäumen und Straßbegleitgrün. Der Versiegelungsgrad beträgt ca. > 70%.
<b>Gewerbe</b>	Gewerbegebiete mit den dazugehörigen Produktions-, Lager- und Umschlagstätten prägen das Mikroklima. Gewerbe, Halden, Gewerbebrachen und Gleisanlagen sind die prägenden Nutzungen. Die Vegetation besteht vorwiegend aus Wiesen- und Rasenflächen, Einzelbäumen, z. T. Baum- und Strauchanpflanzungen. Der Versiegelungsgrad liegt unter 70%.
<b>Industrie</b>	Industrie-Klimatopen umfassen insbesondere Industrie, Halden, Gleisanlagen und Industriebrachen. Die Bauwerkshöhen differenzieren stark (u. a. 1- bis 5-geschossige Hallen, Verwaltungsgebäude, Produktionsanlagen). Vegetation ist insbesondere in den Randbereichen vorhanden. Über > 70% der Fläche ist versiegelt.

Die Gliederung eines Raums in Klimatope lässt diejenigen Bereiche erkennen, in denen sich ein Stadtklima ausbilden kann. Eine noch feinere Differenzierung bebauter Flächen ist über sogenannte Siedlungsstrukturtypen möglich (vgl. Tabelle 4).

**Tabelle 4 | Potenzielle Überwärmungsintensität von Siedlungsstrukturtypen als Abweichung vom Gebietsmittel der nächtlichen Temperaturen (MOSIMANN, T., FREY, T., TRUTE, P. 1999: 241)**

Siedlungsstrukturtypen	Potenzielle Überwärmungsintensität	Ungefähre potenzielle Überwärmung [°C]	
		Großstädte	Klein-/Mittelstädte
Zentrum / Stadtteilzentrum	hoch – sehr hoch	> 4	> 2
Block-/Blockrandbebauung	hoch – sehr hoch	> 3	1 - 2
Industrie- und Gewerbefläche	mittel – hoch	2 - 3	1 - 2
Gemeinbedarfsfläche	mittel – hoch	> 2	> 1
Hochhausbebauung	gering - hoch	1 - 2	> 1
Zeilenbebauung	gering – mittel	> 1	0 – 1
Alte Ortskerne	gering - mittel	0 - 1	0 – 1
Einzel-/Reihenhausbebauung	gering	0 - 1	0 - 1

Sowohl Klimatope als auch Siedlungsstrukturtypen dienen somit zur Dokumentation und Abgrenzung bioklimatisch belasteter Räume. Eine typische Erscheinung des Stadtklimas ist der sogenannte „Wärmeinseleffekt“, dessen Entstehung in der Regel mit einer hohen Bevölkerungs- und Bebauungsdichte sowie mit einem hohen Oberflächenversiegelungsgrad einhergeht. Dies ist verbunden mit einem niedrigen Anteil verdunstungsaktiver Flächen. Der Hitzeinseleffekt der Städte wirkt auch deshalb so stark, weil sich die verwendeten Baumaterialien (z. B. Beton) aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften besonders stark aufheizen. Nachts geben sie die tagsüber gespeicherte Wärme wieder ab, deshalb sind Städte im Vergleich zu ihrer Umgebung i. d. R. wärmer. Zusätzlich kann in Siedlungen die Energiezufuhr durch den Verkehr, das Heizen von Gebäuden und die Wärmefreisetzung bei industrieller Produktion zu einer Erwärmung beitragen (iMA 2013: 14). Starke Winde und ein hoher Anteil an Grünflächen innerhalb der Siedlung können zur Reduzierung des Wärmeinseleffektes beitragen (KUTTLER, W. 2011: 6).

Um klimarelevante, d. h. Kalt- und Frischluft produzierende Flächen und dazugehörige Luftleitbahnen mit den Instrumenten der Regional-/Stadtplanung (siehe Kapitel 1.2) sichern und geeignete Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung der klimatischen- und lufthygienischen Situation entwickeln zu können, ist es notwendig, Aussagen über die Funktionszusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Flächeneinheiten/Klimatopen treffen zu können. Auch wenn die physikalischen Ursachen der klimatischen Phänomene im Allgemeinen bekannt sind, können diese - aufgrund der Komplexität der lokalklimatischen Prozesse und unterschiedlichen Geländestrukturen - nicht pauschal auf unterschiedliche Räume übertragen werden. Entsprechend ist eine alleinige Betrachtung der Klimatope nicht ausreichend, da diese die dynamischen Prozesse und Wechselwirkungen (z. B. 3-dimensionale Strömungssysteme) nicht hinreichend abbilden.

Vielmehr bieten sich modellgestützte Klimaanalysen an (siehe Kapitel 3), die neben der Komplexität der Geländestruktur und Flächennutzung auch die Dynamik der lokalklimatischen Phänomene abbilden. Messungen hingegen können i. d. R. nur eine begrenzte Anzahl von lokalen Punkten umfassen und decken damit nur einen begrenzten räumlichen Bereich ab, sie sind jedoch hilfreich, um Modellierungsergebnisse hinsichtlich ihrer Qualität zu prüfen.

## 1.2 Was kann die Regionalplanung leisten?

Klima und Luftqualität sind wesentliche, schützenswerte Umweltfaktoren, die als solche auf allen Planungsebenen in die räumliche Gesamtplanung (Landes-, Regional- und Bauleitplanung) und die raumbedeutsamen Fachplanungen (z. B. Verkehrsplanung) einbezogen werden müssen (u. a. § 2 Abs. 2 Nr. 6 Raumordnungsgesetz (ROG), § 1 Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)). Die Regionalplanung, die aufgrund ihrer fachübergreifenden Funktion sowohl zur horizontalen (raumbedeutsame Fachplanung) als auch zur vertikalen (Bauleitplanung) Koordination dient, hat die Möglichkeit, mit den Regionalplänen (§ 8 ROG) Regelungen für die Bodennutzung festzulegen. Gleichzeitig kann sie mittels entsprechender Regelungen Flächen vor entgegenstehenden Nutzungen freihalten.

Über die Kategorien „Ziele“ und „Grundsätze“ der Raumordnung (bzw. in der Plankarte als Vorrang- und Vorbehaltsgebiete) kann die Regionalplanung den unterschiedlichen Anforderungen - und in Bezug auf die Auswirkungen des Klimawandels den Risikobandbreiten - Rechnung tragen. Eine textliche Zielfestlegung/Festlegung in Form eines Vorranggebietes kann jedoch nur erfolgen, wenn gesicherte Erkenntnisse zugrunde gelegt werden können, die eine abschließende regionalplanerische Abwägung ermöglichen. Sind hingegen Aussagen nicht hinreichend genau oder bestehen große Prognoseunsicherheiten, erfolgt eine Festlegung als Grundsatz der Raumordnung (bzw. als Vorbehaltsgebiet in der Plankarte). Neben sogenannten monofunktionalen Planelementen (z. B. Vorrang-/Vorbehaltsgebiete Siedlung (Planung, Bestand)) kommen auch multifunktionale Planelemente zum Einsatz (z. B. Regionaler Grünzug).

**Tabelle 5 | Charakterisierung der Instrumente der Raumordnung**

Charakterisierung der Instrumente der Raumordnung	
Vorranggebiet (Ziel der Raumordnung)	Verbindliche Vorgaben in Form von räumlich und sachlich bestimmten oder bestimmbar, vom Träger der Raumordnung abschließend abgewogenen Festlegungen. ⇒ Bedarf gesicherter Erkenntnisse
Vorbehaltsgebiet (Grundsatz der Raumordnung)	Aussagen zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raums als Vorgaben für nachfolgende Abwägungs- oder Ermessensentscheidungen. ⇒ Z. B. bei Prognoseunsicherheiten
Multifunktional	Grünzüge / Grünzäsuren stellen ein multifunktionales Planelement dar, da sie mehrere Freiraumfunktionen zusammenfassen. ⇒ In den meisten Regionen als Ziel der Raumordnung festgelegt
Monofunktional	Monofunktionale Planelemente betonen eine einzelne Raumnutzung/ Funktion ⇒ Festlegung als Ziel oder Grundsatz möglich

Als Teilaspekt der regionalen Freiraumstruktur werden in zahlreichen Regionalplänen die überregional und regional bedeutsamen Luftleitbahnen sowie die aus überörtlicher Sicht für das Siedlungsklima bedeutsamen Flächen des Freiraums, die im räumlichen Zusammenhang mit lufthygienisch und/oder bioklimatisch belasteten Siedlungsbereichen stehen und wichtige Aufgaben für den Klima- und Immissionsschutz erfüllen, gesichert. Da diese Festlegungen u.U. mit erheblichen

Eingriffen in die kommunale Planungshoheit verbunden sind, müssen diese fundiert begründet sein. Die konkrete Sicherung erfolgt in den Regionalplänen unterschiedlich. Während in vielen Regionalplänen freiraumbezogene Festlegungen wie die multifunktionalen „Regionalen Grünzüge“ oder „Grünzäsuren“ eine klimatische Begründung haben, weisen nur wenige Regionalpläne explizit Flächen für besondere Klimafunktionen aus (z. B. Hessen).

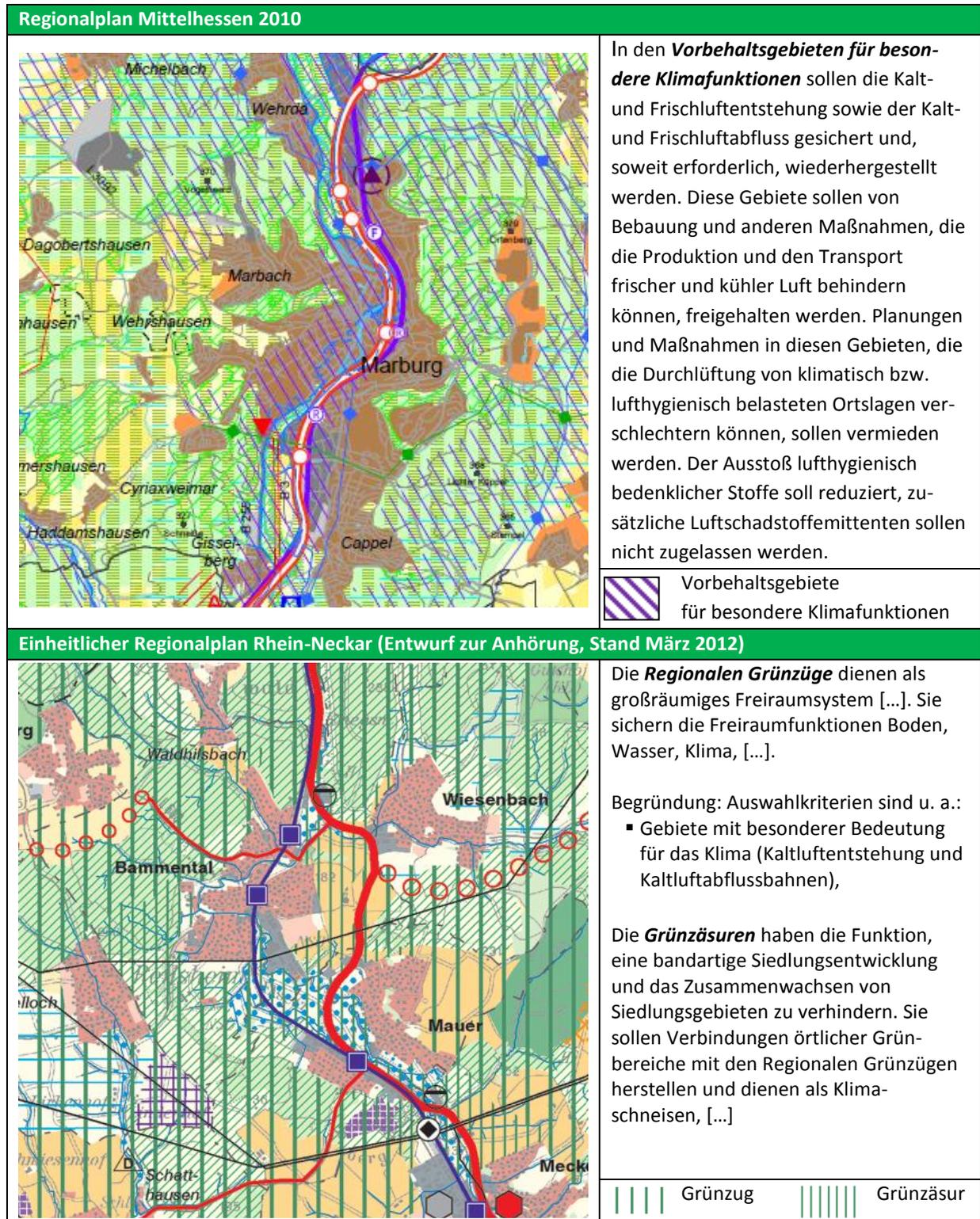


Abbildung 3 | Festlegungen zur Sicherung klimarelevanter Flächen / Luftleitbahnen in Regionalplänen

Sofern in Zielabweichungs- und Raumordnungsverfahren (⇒ Glossar) entsprechende Flächen beeinträchtigt werden können, haben die Gemeinde oder die Träger einer Planung in der Regel durch ein Fachgutachten den Nachweis zu führen, dass die Maßnahme mit den betroffenen klimatischen Belangen verträglich ist.

Für die Abgrenzung der klimarelevanten Flächen – hier auf der regionalen Ebene – sind belastbare Datengrundlagen zu den bioklimatisch und lufthygienisch belasteten Räumen mit einem Bedarf an überörtlicher Entlastung sowie zu überörtlich bedeutsamen Kaltluftproduktionsgebieten und Kaltluftleitbahnen notwendig. Um diese dynamischen Prozesse, insbesondere die Dynamik der Austauschprozesse bzw. die Kaltluftströmungen (in der 3-dimensionalen Verteilung) simulieren zu können, ist der Einsatz eines für die Fragestellung geeigneten Klimaanalysemodells notwendig (siehe Kapitel 3).

#### **Hinweise / Weiterer Handlungs- und Forschungsbedarf**

Eine gesetzliche Erweiterung des raumordnerischen Instrumentariums (z. B. neue Raumkategorien) ist nach MITSCHANG nicht erforderlich. Die Effektivität regionalplanerischer Festlegungen – zur Anpassung an den Klimawandel – kann erheblich verbessert werden, wenn die bestehenden Möglichkeiten formaler Planungsinstrumente, insb. durch die Festlegung von bindenden Zielen stärker als bisher zur Anwendung gebracht werden (MITSCHANG, S. 2011: 19f.).

Trotz hochwertiger Grundlagen und Werkzeuge der Umweltmeteorologie (z. B. modellgestützte Klimaanalysen, digitale Höhenmodelle) und bewährter Instrumente zur Steuerung der Regionalplanung (s.o.) fehlt es bislang an geeigneten und erprobten Analyseinstrumenten und Methoden, um die Simulationsergebnisse von modellgestützten Klimaanalysen in eine für den Regionalplaner sichere und eindeutige Entscheidungsgrundlage zu überführen (siehe detailliert Kapitel 5.3).

## 2. Planungsrelevante Faktoren

Planungsrelevante und im Abwägungsprozess der Regionalplanung zu berücksichtigende Faktoren sind insbesondere die Wirkzusammenhänge von klimaaktiven Freiflächen (Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete) und überörtlichen Luftleitbahnen, die im räumlichen Zusammenhang mit lufthygienisch und/oder bioklimatisch belasteten Siedlungsgebieten stehen (vgl. Kapitel 1.2).

Aus klimatologischer Sicht können in diesem Zusammenhang **Wirkungs- und Herkunftsraum** (VDI 3787 (Bl. 5) 2003: 49) voneinander unterschieden werden.

- Der **Wirkungsraum** ist der Bereich, in den - aus dem zugehörigen Herkunftsraum - Kaltluft transportiert wird. Ist dieser Wirkungsraum bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet, wird er in dieser Publikation auch als Belastungsraum definiert (Kapitel 2.1).
- Der **Herkunftsraum** ist das Gebiet, in dem die Kaltluft entsteht, einschließlich der zugehörigen Transport- bzw. Leitbahnen. Andere Autoren sprechen in diesem Zusammenhang auch von Ausgleichsraum (ZIMMERMANN, R. 1988; MOSIMANN, T. ET AL. 1999; siehe aber VDI 3787 (Bl. 9) 2004: 25).

Verbunden mit der Kaltluftproduktion (Kapitel 2.2) ist bei austauscharmen Wetterlagen die Ausbildung lokaler Windsysteme. In welchem räumlichen Umfang die abfließende Kaltluft einen Wirkungsraum beeinflusst, bestimmen u. a. die Strömungseigenschaft und die Struktur der Kaltluftbahn(en). Grundsätzlich sind die durch den Einfluss im gegliederten Gelände auftretenden lokalen Windströmungssysteme (Hangab- und Talabwinde, Kapitel 2.2.2.) wesentlich stärker ausgeprägt als die in ebenem Gelände durch horizontale Temperaturunterschiede auftretenden Flurwindssysteme (Kapitel 2.2.1).

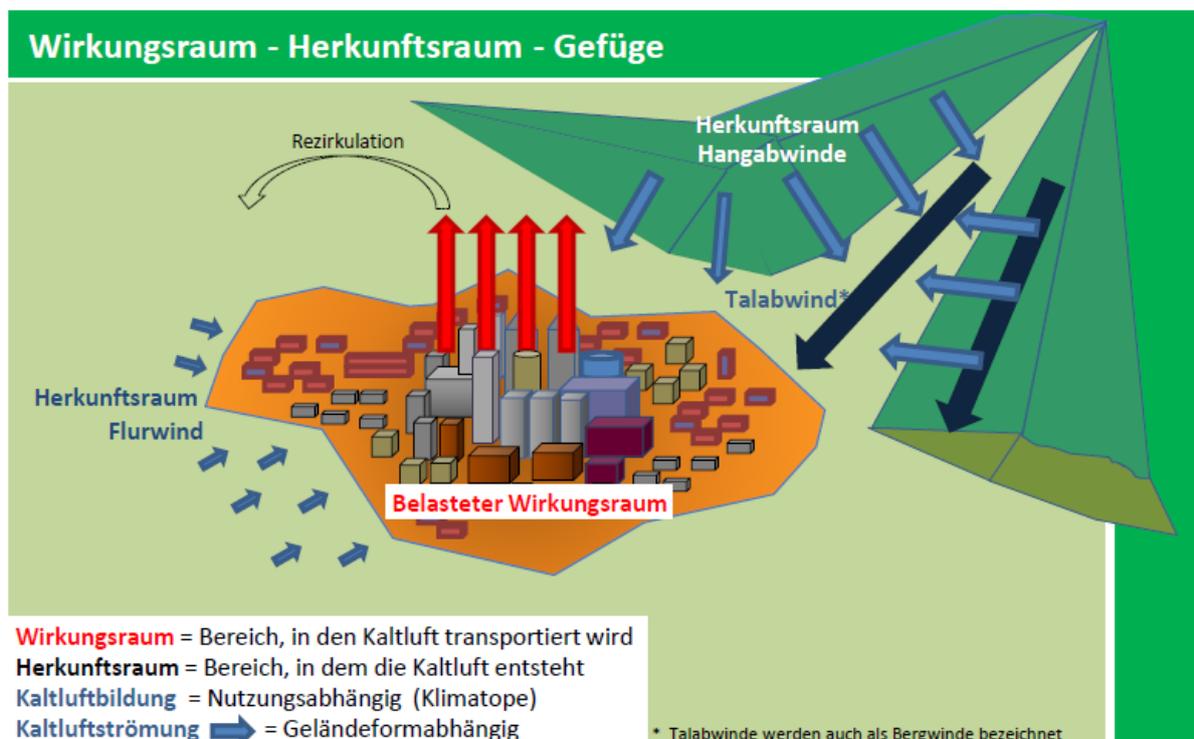


Abbildung 4 | Wirkungsraum - Herkunftsraum - Gefüge (eigene Darstellung)

## 2.1 Wirkungsraum, bioklimatisch und/oder lufthygienisch belasteter Raum

Während der Stadtplaner vorwiegend die lokal-/mikroklimatischen Auswirkungen von Planungen in einzelnen Stadtteilen einschätzen muss, konzentriert sich die Regionalplanung auf überörtliche Zusammenhänge. Um die Durchlüftungssituation einer Region beurteilen zu können, muss eine Zuordnung von insbesondere **bioklimatisch und/oder lufthygienisch belasteten Wirkungsräumen** und den ihnen räumlich zugeordneten Herkunftsräumen, welche die Kaltluft zur Verfügung stellen (siehe Kapitel 2.2), erfolgen.

### Zielsetzung der Regionalplanung

Identifikation der überörtlich bedeutsamen bioklimatisch und lufthygienisch belasteten Wirkungsräume (Belastungsräume), für die ein Bedarf zur überörtlichen Entlastung – und damit ein regionalplanerischer Steuerungsbedarf - besteht.

Die VDI-Richtlinie 3785 (Blatt 1) weist darauf hin, dass eine objektive Bewertung der bioklimatischen Situation kaum möglich ist. In den meisten Fällen kann eine Bewertung deshalb nur vergleichend erfolgen. Auch die Güte der Luftqualität von Kaltluft kann nur im Vergleich mit derjenigen im Wirkungsraum beurteilt werden. Entsprechend empfiehlt die Richtlinie je nach Aufgabenstellung und Untersuchungsaufwand unterschiedliche Nutzungsstrukturen innerhalb eines größeren Gebiets (Klimatope, vgl. Kapitel 1.1.2) oder verschiedene Varianten und Alternativen (z. B. von Trassenverläufen und Bauvorhaben) miteinander zu vergleichen.

Die Vergleichbarkeit der Beurteilungskriterien untereinander und mit anderen Untersuchungen setzt jedoch eine Standardisierung der Variablen voraus, die mittels einer Umwandlung in zusammenfassende Bewertungskategorien (siehe Tabelle 6) erreicht wird. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Variablen dimensionslos unter Beibehaltung der Relationen ausgewertet werden können (VDI-Richtlinie 3785 (Bl. 1), 2008: 29f.).

**Tabelle 6 I** Bewertung der bioklimatischen/immissionsklimatischen Verhältnisse – zusammenfassende Bewertungskategorien (in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3785 (Bl. 1) 2003: 30)

Einstufung der Standorte mit Blick auf die bioklimatische und/oder immissionsklimatischen Verhältnisse			
sehr günstig	günstig	weniger günstig	ungünstig
- ∞	- 1	0	1
<p>Durch vorsorgende Maßnahmen sind die günstigen Bedingungen zu erhalten.</p>	<p>Da keine übermäßigen Belastungen auftreten, besteht nach Angaben der VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 kein Handlungs- und Planungsbedarf. Negative Auswirkungen durch eine zunehmende Verdichtung sind durch die Berücksichtigung klimatischer Aspekte im Planungsprozess zu vermeiden.</p>	<p>Aufgrund der hohen Belastungen am Standort besteht insbesondere im Zusammenhang mit sensiblen Nutzungen Handlungs-/Planungsbedarf. Klimarelevante Stadtstrukturen wie z. B. Ausgleichsflächen sind zu erhalten und zu erweitern und ein ausreichender Luftaustausch ist zu gewährleisten. Einer Verschlechterung der Verhältnisse ist entgegenzuwirken.</p>	<p>Für die als ungünstig eingestuften Standorte besteht die höchste Handlungs- und Planungspriorität. Durch Maßnahmen wie die Erhöhung des Freiflächenanteils, die Reduzierung der Rauigkeit sowie durch Planungseinschränkungen (z. B. Vermeidung zusätzlicher bodennaher Schadstoffemittenten) ist eine Verbesserung der aktuellen klimatischen Situation anzustreben.</p>

Die nachfolgende Betrachtung konzentriert sich jedoch auf die Frage, nach welchen Kriterien bioklimatisch-thermische Belastungssituationen abgegrenzt und eingestuft werden. So sind nach GEO-NET für die Einordnung einer spezifischen Siedlungsfläche in einen bioklimatischen Belastungsgrad in einer sommerlichen Strahlungswetternacht (ab 22:00 Uhr) die Durchlüftung und der Temperaturunterschied zum Gebietsmittel entscheidend. Je höher die nächtliche Überwärmung und je geringer die Windgeschwindigkeit ist, desto höher ist danach die bioklimatische Belastung (2009a: 11). Effekte der Luftfeuchtigkeit und der Strahlung werden hierbei als weniger wichtig angesehen und bleiben unberücksichtigt. Eine Einstufung in unterschiedliche Belastungsstufen zeigt die folgende Tabelle – wobei die Abweichungen der Lufttemperatur vom Gebietsmittel von den zitierten Gutachtern für die Städte Braunschweig und Langenhagen unterschiedlich definiert wurden.

**Tabelle 7 I** Bioklimatische Belastung des Siedlungsraums - Belastungsstufen (GEO-NET 2009: 11, 2007: 10)

Belastungsstufe (für sommerliche Strahlungswetternacht, 22:00 Uhr)	Abweichung vom Gebietsmittel Lufttemperatur in 2 m Höhe [K]	Windgeschwindigkeit in m/s
<b>Stadt Langenhagen</b>		
Mäßig, in Einzelfällen hoch belastet	$\geq 4,4$	-
Gering bis mäßig belastet	$\geq 3$ und $< 4,4$	$\leq 0,1$
Gering belastet	$\geq 3$ und $< 4,4$	$> 0,1$
Nicht belastet / bioklimatisch neutral	$< 3$	-
<b>Stadt Braunschweig*</b>		
Belastet	$\geq 3$	-
Mäßig belastet	$\geq 2$ und $< 3$	$\leq 0,1$
Gering belastet	$\geq 2$ und $< 3$	$> 0,1$
Nicht belastet / bioklimatisch neutral	$< 2$	-

\* jedoch andere Werte für das Gebiet des Zweckverbandes Großraum Braunschweig (GEO-NET 2004a)

Während für die Stadt Langenhagen eine positive Temperaturabweichung von  $\geq 4,4$  °C als höchste Belastungsklasse definiert wurde, gilt für die Stadt Braunschweig bereits eine Temperaturabweichung vom Gebietsmittelwert von  $\geq 3$  °C als höchste Belastungsstufe (GEO-NET, 2007: 10). Grundsätzlich ist zu beachten, dass die berechnete Gebietsmitteltemperatur von der gewählten Modellgebietsgröße abhängt (relative Flächenanteile des Umlands und der Stadt im Modellgebiet).

Nicht nur die Einstufung der bioklimatischen Belastung in einzelne Belastungsstufen wird (je nach Stadt/je nach Gutachter) unterschiedlich definiert, auch das methodische Vorgehen zur Ermittlung und Abgrenzung der bioklimatisch belasteten Wirkungsräume variiert in den modellgestützten Klimaanalysen zum Teil deutlich (siehe Kapitel 4).

#### Defizite / Weiterer Handlungs- und Forschungsbedarf

Die Bewertung der bioklimatischen Situation und der meteorologischen Ausbreitungsbedingungen kann derzeit - mit Ausnahme der Beurteilung der bioklimatisch-thermischen Situation - in den meisten Fällen nur vergleichend erfolgen, da eine **objektive Beurteilung bei fast allen Kriterien kaum möglich** ist. Dies führt – abhängig von Fachwissen und Bedeutung, die dem Schutzgut Klima zuerkannt wird – zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Im Rahmen des „klamis“-Projektes wurden **Wirkungsräume als überörtlich bedeutsam eingestuft**, wenn sie sich nicht aus sich heraus bzw. aus dem eigenen Umfeld (innerhalb der kommunalen Gemarkungsgrenzen) heraus entlasten können, sondern auf überörtlich entlastend wirkende Kaltluftströmungen und –strömungssysteme angewiesen sind. Solche Flächen weisen in der Regel eine gewissen Flächengröße bzw. räumliche Ausdehnung auf.

Es sind **Methoden und Kriterien zu entwickeln**, mit deren Hilfe überörtlich bedeutsame Wirkungsräume, die auf überörtliche Belüftungssysteme angewiesen sind, identifiziert und abgegrenzt werden können (vgl. Kapitel 5.3).

## 2.2 Herkunftsraum, Kaltluftentstehungsgebiete und -strömungen

In klaren windschwachen Nächten strahlen Oberflächen (Boden, Vegetation) praktisch ungehindert Wärme ab. Dieser Energieverlust bewirkt, dass die Temperatur der Oberfläche niedriger ist als die Lufttemperatur - es bildet sich eine bodennahe Kaltluftschicht.

Zu berücksichtigen ist, dass es sich bei der „Kaltluft“ nicht um eine absolute Angabe im Sinne eines festgelegten Temperaturwertes handelt, sondern um eine Luftmenge, die gegenüber den durchschnittlichen Verhältnissen der Unterlage oder ihrer Umgebung eine niedrigere Temperatur aufweist (für weitere Details hierzu, siehe IMA 2013)

### Zielsetzung der Regionalplanung

Zur Entlastung der überörtlich bedeutsamen bioklimatisch und/oder lufthygienisch belasteten Räume bedarf es der Identifikation und der regionalplanerischen Sicherung von:

- überörtlich bedeutsamen Kaltluftentstehungsgebieten
- überörtlich bedeutsamen Kaltluftleitbahnen

(siehe auch § 1 Abs. 3 Nr. 4 Bundesnaturschutzgesetz. Das Gesetz sieht vor, dass zur dauerhaften Sicherung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts u. a. Luft und Klima auch durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege zu schützen sind; dies gilt insbesondere für Flächen mit günstiger lufthygienischer oder klimatischer Wirkung wie Kaltluftentstehungsgebiete oder Luftaustauschbahnen).

Nach der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9 (2004: 24) handelt es sich bei einem **Gebiet für Kaltluftentstehung** um einen abgrenzbaren Raum, welcher auf Grund der momentanen Flächennutzung die Klimafunktion „Kaltluftentstehung“ aufweist. Das Phänomen der lokalen Kaltluft ist in der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 (2003: 10) nur qualitativ beschrieben. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen auch quantitativ charakterisieren würden, existiert danach bisher nicht.

Eine **Möglichkeit zur Identifikation von Kaltluftentstehungsgebieten** besteht darin, die Kaltluftproduktionsrate empirisch auf der Basis der von den Klimamodellen verwendeten Landnutzungsverteilung (Landnutzungsklassen, vgl. Kapitel 3.2.9; Klimatope, vgl. Kapitel 1.1.2) zu berechnen. Das Modell KLAM\_21 verwendet hingegen für jede Landnutzungsklasse eine Kälteproduktionsrate in Watt pro Quadratmeter ( $W/m^2$ ). Die höchste Kaltluftproduktionsrate weisen unversiegelte Freiflächen auf. Bebaute Gebiete haben hingegen i. d. R. ein deutlich reduziertes Kaltluftbildungsvermögen, dichte Bebauung und industriell genutzte Flächen können je nach Wärmefreisetzung als vergleichsweise warme Zonen wirken. Auch Wasser kann sehr viel Wärme speichern, daher ist die Abkühlung im Verlauf einer Strahlungsnacht gering. Ausgehend von spezifischen Kaltluftproduktionswerten für unterschiedliche Landnutzungen (Tabelle 8) kann für jede zu berechnende

(Raster)Fläche eine Kaltluftproduktionsrate entsprechend den prozentualen Häufigkeiten der jeweiligen Landnutzung auf dieser Fläche als Mischwert berechnet werden.

**Tabelle 8 | Zuordnung von typischen Kaltluft- bzw. Kälteproduktionsraten ausgewählter Landnutzungen (iMA 2013: 38, Sievers 2005)**

Landnutzung	Kaltluftproduktionsrate $m^3 / (m^2 s)$	Kälteproduktionsrate $W / m^2$
Grünland, Ackerland	15 – 20 (GEO-NET 2011a: Ackerflächen 10-15)	30
Wald	12 – 15 (Laubwald im Winter bis zu 20)	17 (über ebenem Gelände)
Gartenbau, Mischflächen	10 - 15	24
Siedlungsgebiete	1	0 – 8 (dichte – lockere Bebauung)
Wasseroberflächen	0	0 – minus 6 (flache – tiefe Gewässer)

Die in den Abend- und Nachtstunden entstehende bodennahe Kaltluft kann in Bewegung geraten. Dies geschieht zum einen:

- in ebenem Gelände durch horizontale Temperaturunterschiede (**Flurwinde**),
- bei Vorhandensein einer Geländeneigung (**Hangab- und Talabwinde**).

Die so entstehenden Strömungen können sich, gespeist durch verschiedene Quellen vereinen und erhebliche Intensitäten erreichen, auch die vertikale Mächtigkeit kann von wenigen Metern bis zu mehreren 100 m Höhe in tieferen Tälern ansteigen (ZARDI und WHITEMAN 2012: 68). In komplexen, vielfältigen Geländesituationen treten häufig Mischformen auf (iMA 2001: 5).

Während Kapitel 2.2.1 die Eigenschaften von Flurwinden beschreibt, dokumentiert Kapitel 2.2.2 die im gegliederten Gelände auftretenden Kaltluftströmungen. Nicht betrachtet werden hingegen die tagsüber durch die Sonneneinstrahlung auftretenden Winde (insb. Tal(auf)wind).

## 2.2.1 Flurwinde (thermisch bedingtes lokales Windfeld)

In ebenem Gelände entstehen bei großräumig windschwachen Wetterlagen – durch horizontale Temperaturunterschiede - Flurwinde.

Die meist nur wenige Meter mächtigen Flurwinde entstehen, wenn sich Stadtgebiete stärker als das umliegende Land erwärmen und dadurch ein thermisches Tief über dem Stadtgebiet ausgelöst wird, was zur Folge hat, dass kühlere Luft aus der Umgebung nachströmt (Q.met GmbH 2011). Die Intensität des thermischen Tiefs, und somit des Flurwindantriebs, hängt von der Intensität und vertikalen Mächtigkeit der städtischen Überwärmung ab. Wenn keine Informationen über die Schichtdicke der überwärmten Stadtatmosphäre vorliegen, kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass sich bei Temperaturdifferenzen zwischen dem Umland und dem Siedlungskörper von mindestens 2 Grad die thermische Ausgleichsströmung ausbilden kann (MOSIMANN, T., FREY, T., TRUTE, P. 1999: 255).



**Abbildung 5 |** Schematische Darstellung von Wärmeineffekt, Flurwinden und orographischen Kaltluftströmungen (KOLLOGE 2012, verändert)

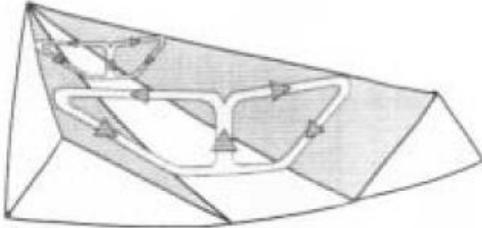
Flurwinde orientieren sich an hindernisarmen Leitbahnen und sind radial auf einen überwärmten Ort gerichtet (BARLAG und KUTTLER 1990/91). Die bodennahe Eindringtiefe in einen bebauten Bereich ist allerdings aufgrund der i. a. relativ schwachen Dynamik der Flurwinde und wegen der gebäudeinduzierten Bremswirkung begrenzt (iMA 2013: 10). Flurwinde erreichen laut MOSIMANN ET AL. je nach landschaftlicher Ausprägung Geschwindigkeiten unter 2 m/s, die Reichweite in die Bebauung beträgt maximal 2 km (Regionalverband Nordschwarzwald und Mittlerer Oberrhein ohne Jahr: 10). Trotz ihrer geringen Strömungsgeschwindigkeit können sie jedoch zu einer Belüftung von Stadtrandgebieten führen (GEO-NET 2004: 8). Flurwinde treten häufig zusammen mit Kaltluftabflüssen auf.

## 2.2.2 Kaltluftströmungen

In **gegliedertem Gelände** treten durch den Einfluss der Oberflächen und der Höhenverhältnisse des Geländes (Orographie) lokale Windsysteme auf.

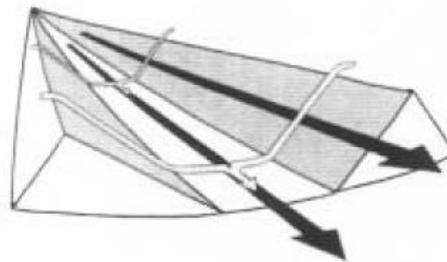
Zur Kühlung überwärmter Siedlungsbereiche sind insbesondere die in den Abendstunden einsetzenden Hangabwinde und Talabwinde (= Bergwind) von Bedeutung. Eine aktuelle Zusammenfassung zu nächtlichen Kaltluftströmungen geben ZARDI und WHITEMAN (2012).

### Hangabwind



Theoretische Luftströmungsverhältnisse zwischen spätem Abend und erster Nachthälfte

### Hangabwind und Talabwind



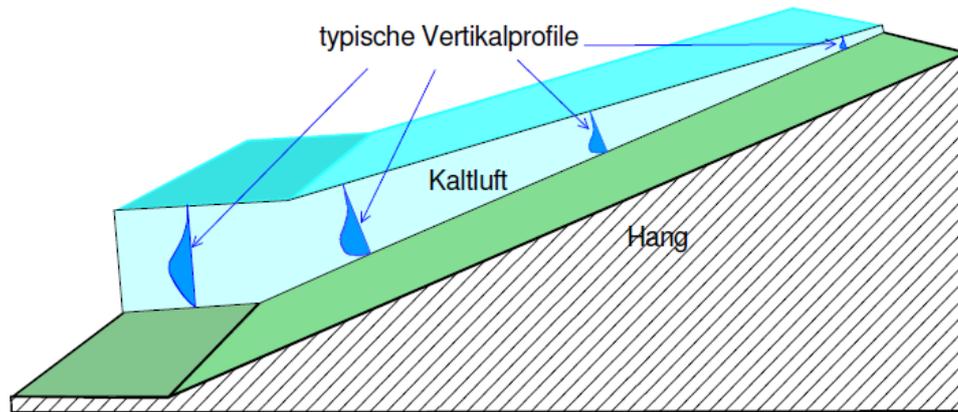
Theoretische Luftströmungsverhältnisse in der zweiten Nachthälfte (Talabwind = dunkle Pfeile)

**Abbildung 6 | Hangab- und Talabwinde (Defant, F., 1949)**

Fließen hanggebundene Kaltluftabflüsse im gegliederten Gelände zusammen, können sich komplexe „Kaltluft-Strömungssysteme“ entwickeln. Infolge der Beiträge vieler kaltluftproduzierender Flächen und Hänge können solche Systeme innerhalb von Kaltluftbahnen eine z. T. bedeutende räumliche Ausdehnung und vertikale Mächtigkeit erlangen. Hierbei stellt sich jedoch immer die Frage der räumlichen Abgrenzung – z. B. ob der Luftstrom als lokal oder oberörtlich bedeutsam einzustufen ist. Tritt eine Kaltluftleitbahn in die Ebene, so verteilt sich die Kaltluft häufig breitflächig und der Impuls nimmt ab.

Da der Antrieb von Kaltluftströmungen durch relative Temperaturunterschiede (zwischen Hang- und Talatmosphäre oder entlang eines Tals) entsteht, können sich Kaltluftabflüsse und Kaltluftströmungssysteme unter den o. g. Bedingungen das gesamte Jahr über in ähnlicher Struktur mit nur leicht variierender Intensität ausbilden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die an einem Hang gebildete Kaltluft nicht grundsätzlich die niedrigsten bodennahen Temperaturen im Untersuchungsgebiet aufweist (detailliert siehe Anhang: Klimaanalyse für die Stadt Marburg (IMA 2013: 9)).

Während eine Berechnung des Kaltluftvolumens im durchgängig ebenen Gelände (ohne Luftbewegung) aus dem Anwachsen der Kaltluftschicht mit der Zeit abgeleitet werden kann, stellen sich die im gegliederten Gelände vorhandenen Kaltluftströmungen deutlich komplexer dar, da sich unterschiedlich bewegende Luftvolumina Einfluss auf die Mächtigkeit einer Kaltluftschicht und deren zeitliche Veränderung nehmen. So ist beispielsweise zu berücksichtigen, dass in den oberen Bereichen von Hängen aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten oft nur Schichtdicken von wenigen Metern auftreten, während sich in den Senken (Kaltluftsammlgebiete) die Kaltluft zu Schichten mit mehreren Dekametern und mehr akkumulieren kann (VDI 3787 (Bl. 5) 2003: 34, siehe auch Abbildung 7).



**Abbildung 7 |** Idealisiertes Schema eines Kaltluftabflusses am Hang, Vertikalprofil der Fließgeschwindigkeit (iMA 2013: 7)

Hangabwinde können nach Angaben von GEO-NET eine maximale Abflussgeschwindigkeit von etwa 3 m/s erreichen, ihre Mächtigkeit liegt oberhalb des Kaltluftsees im Talgrund jedoch meist unter 10 m. Aufgrund ihres größeren Einzugsgebietes sind nächtliche Bergwinde mit Strömungsgeschwindigkeiten von > 5 m/s und Mächtigkeiten von mehreren Dekaden deutlich stärker (Regionalverband Nordschwarzwald und Mittlerer Oberrhein o.J.: 9).

Die VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 (1997: 39) schlägt für die grafische Darstellung in Klimakarten der durch das Relief geführten Kaltluftabflüsse, je nach Ausprägung (schwach, mittel, stark), unterschiedliche Pfeilsymbole vor. Die Stärke des Kaltluftabflusses wird in der Richtlinie, analog zu WERNER et al. (1979), eingestuft. Als stark klimaökologisch wirkungsvoll wird nach der Richtlinie ein Hangabwind mit einem Massenstrom von mindestens 10.000 m<sup>3</sup>/s definiert<sup>1</sup>. Diese Differenzierung setzt simulierte oder gemessene Massenströme voraus. Neben der Stärke des Abflusses ist es zudem entscheidend, ob durch die Kaltluft unbelastete oder belastete Luftmassen transportiert werden (vgl. Kapitel 2.2.3). Da die Fließgeschwindigkeit und Mächtigkeit von Hangabwinden eher gering sind, können die in der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 (im Vergleich zu Tabelle 9) hohen Werte für klimatisch wirksame Hangwinde vermutlich nur erreicht werden, wenn die Hangabwinde in einem großen räumlichen Bereich auftraten. Bezogen auf Täler des Frankfurter Umlandes schlagen MOSIMANN et al. die in Tabelle 9 aufgeführten Bewertungsstufen für den Kaltluftabfluss vor.

**Tabelle 9 |** Orientierung zur Bewertung von Kaltluftabflüssen (Einstufung der Wirksamkeit von Kaltluftabflüssen in Tälern des Frankfurter Umlandes (UVF 1994 zit. nach MOSIMANN, T. FREY, T., TRUTE, P. 1999:255)

Kaltluftabfluss in Tälern [m <sup>3</sup> /s]	Wirksamkeit der Ausgleichsströmung	
	Regional	Lokal
0 – 50	Nicht wirksam	Gering wirksam
> 50 – 100	Sehr gering wirksam	Wirksam
> 100 – 500	Gering wirksam	Hoch wirksam
> 500 – 2.500	Wirksam	Sehr hoch wirksam
> 2.500	Hoch wirksam	Sehr hoch wirksam

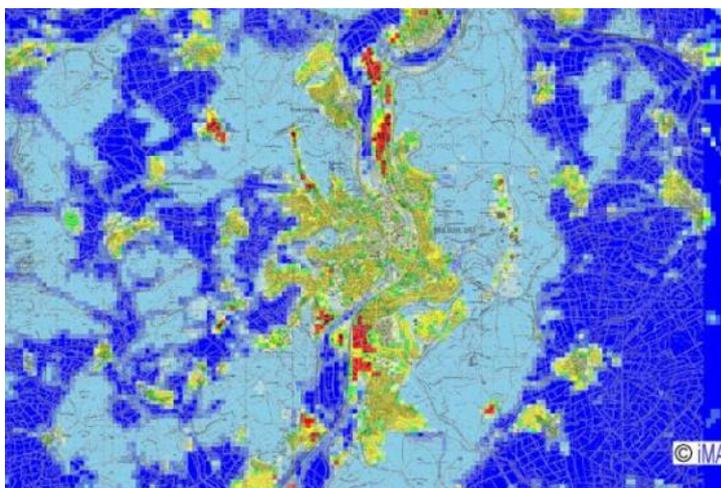
<sup>1</sup> Der Kaltluftmassenstrom (in kg/s) kann aus dem Kaltluftvolumenstrom berechnet werden, wenn die Luftdichte (ca. 1 kg/m<sup>3</sup>) bekannt ist.

In der Dokumentation „Klima- und immissionsökologische Funktion in der Stadt Trier“ spiegeln die Modellergebnisse (Ergebniskarte) hingegen nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts wieder, sondern den Strömungsdurchgang festgelegter Rasterzelle (25 m x 25 m) (⇒ rasterbasierte Volumenstromdichte). Unter einem Volumenstrom ist vereinfacht das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts zu verstehen. Er beschreibt somit die Menge an Kaltluft (in m<sup>3</sup>), die in jeder Sekunde durch den Querschnitt, beispielsweise eines Hanges oder einer Luftleitbahn, fließt. Da die Modellergebnisse in der o. g. Dokumentation nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzelle, ist der daraus resultierende Parameter nach Aussage der Autoren streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstromdichte aufzufassen (GEO-NET 2009b: 52). Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit geringer als 0,1 m·s<sup>-1</sup> wird. Die für die o. g. Dokumentation verantwortlichen Experten haben den Volumenstrom, in Orientierung an das innerhalb des Untersuchungsgebietes auftretenden Wertespektrums, wie in Tabelle 10 dargestellt, klassifiziert.

**Tabelle 10 | Qualitative Einordnung eines rasterbasierten Volumenstroms (GEO-NET 2009b: 52)**

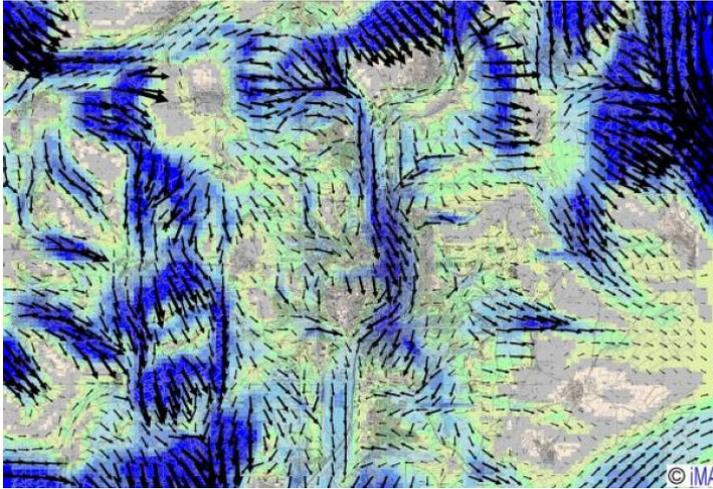
Kaltluftvolumen in m <sup>3</sup> /s pro Rasterzelle (25m x 25m)	Bewertung
< 400	Gering
400 bis 800	Mittel
800 bis 2.000	Hoch
> 2.000	Sehr hoch

Die in den Tabellen 9 und 10 aufgeführten Werte verdeutlichen, dass die Erfassung und Einstufung der Bewertung von Kaltluftabflüssen/Kaltluftvolumina – auch aufgrund unterschiedlicher Größen der Bezugsflächen - nicht einheitlich erfolgt. Desweiteren stehen bisher keine automatischen und objektiven Verfahren zur Verfügung, um mit der nötigen Aussagesicherheit die für die Speisung überörtlicher Kaltluftströmungen verantwortlichen Quellgebiete/Kaltluftentstehungsflächen räumlich abzugrenzen (siehe Abbildungen 8 und 9).



Beispiel für die flächenhafte Darstellung (iMA 2013: 39) der Kaltluftproduktion im Bereich der Stadt Marburg (auf Basis der Kaltluftproduktionsraten Kapitel 2.2. Tabelle 8), rot = geringe/dunkelblau hohe Kaltluftproduktion

**Abbildung 8 | Kaltluftproduktion**



Rasterbasierte Volumenströme in  $\text{m}^3/\text{s}$  bei Betrachtung des Höhenbereichs von 0 bis 50 m über Grund (iMA 2013: 37)

**Abbildung 9 | Volumenströme**

Aufgrund der Komplexität der Wirkungszusammenhänge zwischen Wirkungs- und Herkunftsräumen und dem – selbst in Reliefsituationen mit geringen Höhenunterschieden – häufig gleichzeitigen Auftreten und Überlagern von Flurwindssystemen und Kaltluftabflüssen bzw. dem Auftreten unterschiedlicher Kaltluftströmungen ist die Verwendung modellgestützter Klimaanalysen geboten.

#### Defizite / Weiterer Handlungs- und Forschungsbedarf

Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen auch quantitativ bewerten lassen, gibt es bisher nicht (VDI 3787 (Bl. 5) 2003:10).

Auch wenn modellgestützte Klimaanalysen als Ergebnis flächenhafte Darstellungen der kaltluftproduzierenden Flächen und Kaltluftleitbahnen liefern können, ist es allein anhand entsprechender Karten (vgl. beispielsweise Abbildung 8 und 9) schwierig, die für die Speisung wichtiger überörtlicher Kaltluftströmungen verantwortlichen Quellgebiete/Kaltluftentstehungsgebiete automatisch und objektiv mit der nötigen Aussagesicherheit zuzuordnen bzw. abzugrenzen. Unbefriedigend ist die bisherige Methode, die Kaltluftproduktion rein empirisch auf Basis von Landnutzungen zu bestimmen. Entsprechend ist zu prüfen, ob die Entwicklung von Größen/Methoden wie beispielsweise „Wärmestrom-Bilanzen“ und „Wärmestrahlungsbilanzen“ geeignet ist (siehe auch Kapitel 5.3 „Weiterer Handlungs-/ Entwicklungsbedarf“).

Aus Sicht der Regionalplanung wäre zudem eine Vereinheitlichung der Bezugsgrößen (Fläche / Rastergröße) und Orientierungswerte zur Bewertung z. B. der Volumenströme wünschenswert.

### 2.2.3 Kaltluftströmungen und lufthygienische Belastung

Kaltluftströmungen (siehe Kapitel 2.2.2) werden in der Regel positiv bewertet, da sie eine wichtige Belüftungs- und Abkühlungsfunktion für Siedlungsgebiete bei großräumig windschwachen Wetterlagen wahrnehmen. Überstreicht ein Kaltluftstrom jedoch einen Bereich mit kontinuierlichen bodennahen Emittenten von Luftschadstoffen, so können die dabei aufgenommenen Luftbeimengungen bodennah über vergleichsweise große Distanzen relativ unverdünnt transportiert werden. Bei relativ hohen Luftschadstoffkonzentrationen können sich die Vorteile der Kaltluftströmungen – die Belüftung, Frischluftzufuhr und Abkühlung – dann ins Gegenteil umkehren. Hohe Emissionsquellen (z. B. Schornsteine) stellen in der Regel kein Problem dar, wenn sie oberhalb der Kaltluftschicht oder in den oberen Teil der Kaltluftschicht emittieren. Wegen der geringen vertikalen Durchmischung erreichen diese Schichten den Boden oft gar nicht oder, stark verdünnt, erst in sehr großer Entfernung (IMA 2013: 14f).

Nach der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 spricht man bei den durch das Relief geführten Kaltluftabflüssen

- bei belasteter Luft von Kaltluftschneisen,
- bei unbelasteter Luft von Frischluftschneisen (VDI 3787 (Bl. 1) 1997: 39).

Durch den Einstrom von Frischluft, kann die Luftqualität in einen emissionsbelasteten Raum verbessert werden. Bei der Bewertung der Funktionalität und der Bedeutung eines Kaltluftstromes sollten daher grundsätzlich auch lufthygienische Aspekte einbezogen werden. Die VDI-Richtlinie empfiehlt zur quantitativen Einordnung der Luftqualität im Wirkungsraum immissionsspezifische Kenngrößen – vor allem unter Berücksichtigung von EU-Richtlinien und der entsprechenden Verordnungen zum Bundes-Immissionsschutzgesetz heranzuziehen (VDI 3787 (Bl. 5) 2003: 37).

### 3. Klimaanalysemodelle für die Regionalplanung

Erst wenn klimarelevante Gebiete und zugehörige Luftleitbahnen bekannt sind, können diese mit den Instrumenten der Raumordnung (siehe Kapitel 1.2) langfristig vor entgegenstehenden Nutzungen gesichert werden. Da Messungen in der Natur in der Regel mit einem sehr hohen Aufwand verbunden sind, kommen in der Praxis zunehmend modellgestützte Klimaanalysen zum Einsatz. Mit Hilfe dieser numerischen Simulationsmodelle können die relevanten physikalischen Prozesse – unter Berücksichtigung der Besonderheiten der betrachteten Landschaft insbesondere hinsichtlich der Höhenverhältnisse und der Landnutzung - simuliert werden. Sie liefern damit wichtige Basisinformationen für die Regionalplanung. Simulationsmodelle bieten zudem den Vorteil, dass Planungsvarianten und Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz berechnet und analysiert werden können, um so die regional-/stadtklimatisch besten Lösungen ermitteln zu können.

Im Rahmen des „klamis“-Projektes wurden verschiedene Klimaanalysemodelle anhand eines Kriterienkatalogs dahingehend untersucht, ob sie geeignet sind, klimarelevanten Gebiete (insb. Kalt-/ Frischluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen) in einer für die Regionalplanung geeigneten Detailschärfe zu ermitteln.

**Tabelle 11 | Forschungsthemen der Verstetigungsphase von „klamis“ und mögliche Klimamodellierung**

Forschungsthemen der Verstetigungsphase von „klamis“	Klimamodellierung
Ermittlung und Abgrenzung besonders lufthygienisch/bioklimatisch belasteter Gebiete – unter zusätzlicher Berücksichtigung des Klimawandels	Klimawandel, bioklimatische Belastung, Schadstoffbelastung
Eigenschaften von Kaltluftströmungen	Kaltluftbildung, Kaltluftabflüsse
Schwellenwerte für regional und lokal bedeutsame Kaltluftabflussbahnen	Kaltluftbildung, Kaltluftabflüsse
Lufthygienische Daten (Emissionen, Immissionen) bei der Beurteilung der Qualität von Leitbahnen	Schadstoffbelastung
Räumliche Wirkungszusammenhänge zwischen bioklimatisch/ lufthygienisch belasteten Räumen (Wirkungsräumen) und zugehörigen Kalt-/ Frischluft produzierenden Räumen (Ausgleichsräume)	Kaltluftabfluss-/ Ventilationsbahnen, Bioklimatische Belastung, Schadstoffbelastung

#### 3.1 Untersuchte Klimaanalysemodelle

Sollen Klimaanalysen mit Hilfe numerischer Simulationsmodelle erstellt werden, bedarf es im Vorfeld der Klärung, welche Fragestellungen für welche Planungsebene bearbeitet werden sollen und welche Ergebnisse generiert werden sollen – dies ist maßgeblich für die Auswahl eines geeigneten Modells.

Zu berücksichtigen ist auch, dass die folgende Tabelle nur einen Ausschnitt der verfügbaren Modelle wiedergibt. Diese wurden speziell - mit Blick auf die in Tabelle 11 zusammengefassten Fragestellungen/Forschungsthemen - auf ihre Eignung hin geprüft.

**Tabelle 12 | Übersicht der im Rahmen von „klamis“ untersuchten Klimamodelle (KOLLOGE 2012)**

Klimamodell	mesoskalig	Modellierung von Kaltluft	Aktuelle Software	Alle Musskriterien erfüllt
FITNAH	✓	✓	✓	✓
METRAS	✓	✓	✓	✓
MITRAS	✗	✓	✓	✗
KALM	✓	✓	✓	✓
KLAM_21	✓	✓	✓	✓
GAK/DFM	✓	✓	✓	✓
KLIMM	✓	✓	✗	✗
MISKAM	✗	✓	✓	✗
IBS-AIWAST	✓	✗	✓	✗
MUKLIMO_3	✓*	✓	✓	✓

✓ erfüllt das Kriterium    ✗ erfüllt das Kriterium nicht

\* nur für Gebietsgrößen bis ca. 100 km x 100 km

Im Rahmen des Modellvorhabens wurden nur die GIS-gestützten Klimamodelle hinsichtlich ihrer Eignung für die Regionalplanung untersucht, die alle die in Tabelle 12 aufgeführten „Musskriterien“ erfüllten (FITNAH, METRAS, MUKLIMO\_3, KALM, KLAM\_21, GAK/DFM).

## 3.2 Kriterienkatalog zur vergleichenden Gegenüberstellung

### 3.2.1 Geeignete Skala und Rastergröße

Grundsätzlich kann zwischen globalen, regionalen, mesoskaligen und mikroskaligen Klimamodellen unterschieden werden (Tabelle 13).

Für die Regionalplanung mit einem typischen Maßstab von 1:50.000 (z. B. Baden-Württemberg) bzw. 1:100.000 (z. B. Hessen) eignen sich mesoskalige Klimamodelle am besten, weil die Rastergrößen sowohl grob- als auch feinmaschigere Gitterzellen zulassen.

Grobmaschig und deshalb für regionalplanerische Zwecke ungeeignet sind globale Klimamodelle wie HadCM3, die eine Rastergröße zwischen 150 und 500 km haben und zur Betrachtung ganzer Länder oder Kontinente eingesetzt werden.

Rein mikroskalige Klimamodelle, die atmosphärische Phänomene mit einer horizontalen Ausdehnung zwischen 0 und 2,5 km betrachten, haben eine Rastergröße zwischen 1 und 50 m (UNIVERSITÄT HAMBURG 2003, DWD 2008). Sie werden in der Regel zur Simulation des Klimas in Stadtteilen und kleineren Ortschaften verwendet, nicht jedoch zur Simulation ganzer Städte oder Regionen. Eine Ausnahme stellte hierbei das Modell MUKLIMO\_3 dar, das sowohl Einzelgebäude auflösende Gitterweiten für Stadtareale als auch bei gröberer Auflösung (50 m - 100 m) ganze Städte mit Umland simulieren kann.

**Tabelle 13** | Rastergröße, Untersuchungsgebiete und Beispiele von Klimamodellen (KOLLOGE 2012; Daten: PEUTZ CONSULT 2009, TLUG 2011, EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY 2011, IWAS 2011, REUTER 2012)

Klimamodell	Rastergröße	Untersuchungsgebiet	Beispiele
mikroskalig	0,001 bis 0,05 km	Stadtteile, Städte	MUKLIMO 3**, MITRAS, MISKAM
mesoskalig	0,01 km bis 2.000 km*	Regionen, Städte	FITNAH, KALM, METRAS, KLAM_21
regional	1 km bis 200 km	Regionen, Länder	REMO, CCLM, WETTREG, STAR
global	150 km bis 500 km	Länder, Kontinente	HadCM3, HadGEM1, ECHAM5

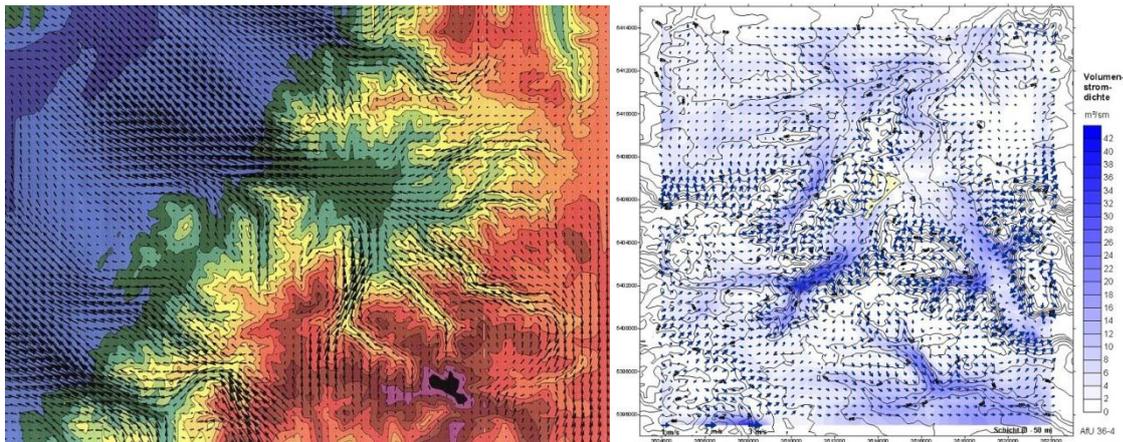
\* das Modell METRAS kann Rastergrößen von maximal 2.000 x 2.000 km darstellen (European Topic Centre on Air and Climate Change 2013).

\*\* das Modell MUKLIMO\_3 kann auch Gitterweiten bis zu 0,5 km simulieren (Früh et al., 2011) und erlaubt somit auch Simulationen auf der kleineren Mesoskala.

### 3.2.2 Modellierung von Kaltluftabfluss

Planerisch bedeutsam sind Kaltluftabflüsse/Kaltluftströmungen, die eine wichtige Rolle z. B. für die nächtliche Versorgung urbaner Gebiete mit „frischer, kühler“ Luft spielen (siehe Kapitel 2). Diese Windsysteme sind durch eine starke örtliche und zeitliche Variabilität gekennzeichnet.

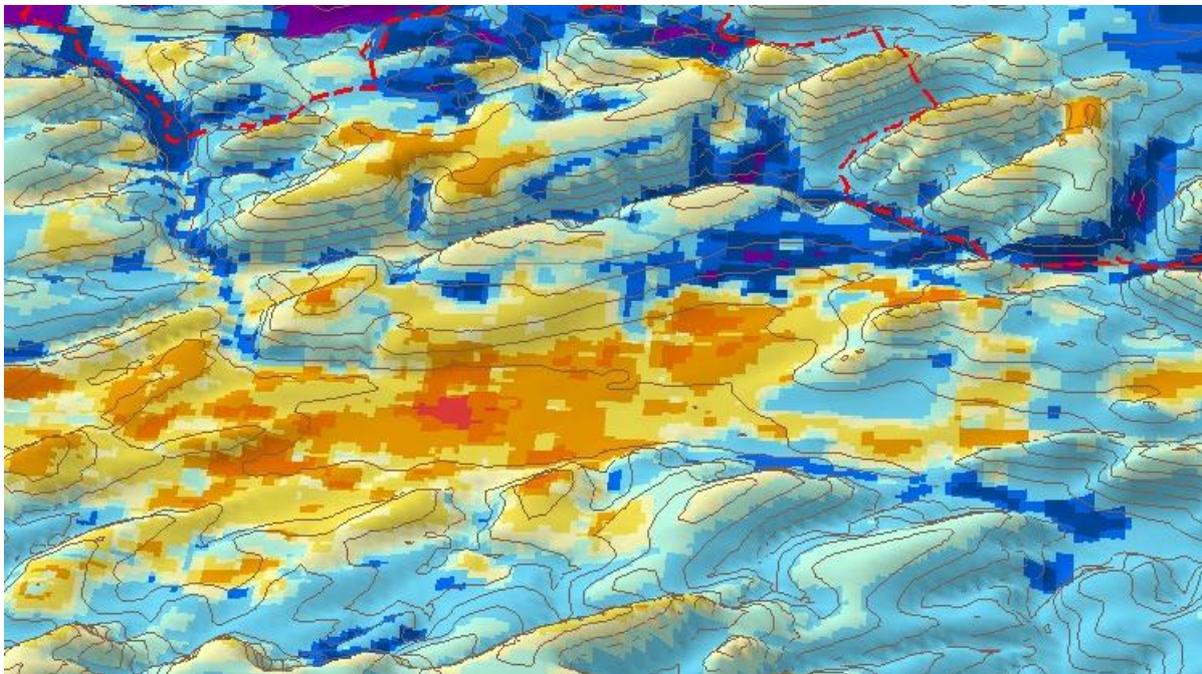
Fast alle untersuchten Klimamodelle (siehe Tabelle 15) können Kaltluftabflüsse modellieren.



**Abbildung 10** | Beispiele für Modellierungen von Kaltluftabflüssen in FITNAH und KALM (iMA o.J., WIRTSCHAFTSMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG 2011)

### 3.2.3 Modellierung der bioklimatischen Belastung

Im Gegensatz zu den Klimamodellen, die nur die thermodynamische Ausbreitung von Kaltluft betrachten (z. B. KALM, KLAM\_21 und GAK/DFM), berechnen die Modelle FITNAH, MUKLIMO\_3 und METRAS PCL auch die Strahlung, Lufttemperatur und -feuchtigkeit. Deshalb können sie neben Kaltluftströmen auch die bioklimatische Belastung berechnen. Bei FITNAH und METRAS PCL ist eine Gliederung von Stadtgebieten in bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume (Wirkungs- bzw. Belastungsräume/Wärmeinseln) einerseits und in Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (Herkunftsräume/Ausgleichsräume/Gunsträume) möglich (Abbildungen 4 und 11). Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinander grenzen und die lokalen Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können überörtliche Kaltluftleitbahnen beide miteinander verbinden. Auf diese Weise kann FITNAH räumliche Wirkungszusammenhänge (im Sinne von Luftaustauschströmungen) zwischen bioklimatisch/lufthygienisch belasteten Räumen und den zugehörigen Ausgleichsräumen ermitteln (KOLLOGE 2012).



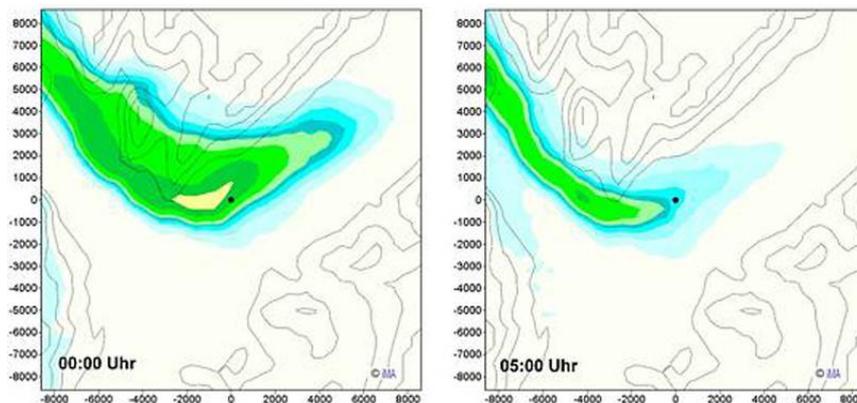
**Abbildung 11 |** Identifizierung von Wärmeinseln – modelliert mit FITNAH (GEO-NET 2004); Die Isolinien markieren die Geländehöhe. Flächen mit Rottönen geben warme, blau markierte Flächen geben kühlere Bereiche an.

### 3.2.4 Modellierung der Schadstoffbelastung

Um die lufthygienische Situation, insbesondere die Schadstoffausbreitung in Kaltluftabflüssen, zu simulieren, können die Modelle FITNAH, METRAS PCL, MUKLIMO\_3, KALM und KLAM\_21 mit Eulerschen oder Lagrangeschen Ausbreitungsmodellen gekoppelt werden. Ein Lagrangesches Ausbreitungsmodell oder Partikelmodell ist nach VIADY (2002) ein numerisches Modell ohne ortsfestes numerisches Gitter. Die Modellgleichungen werden dabei für Raumpunkte oder Volumenelemente gelöst, die sich mit der Strömung mitbewegen. Ein Eulersches Ausbreitungsmodell ist

hingegen ein numerisches Modell, bei dem die physikalischen Gleichungen in ein ortsfestes „numerisches Gitter“ gelöst werden (VIADROY 2002).

Ein Beispiel für ein Lagrangesches Ausbreitungsmodell bzw. Partikelmodell ist LASAT (Lagrange-Simulation von Aerosol-Transport) (JANICKE o.J.). LASAT berechnet die Ausbreitung von Spurenstoffen in der Atmosphäre, indem für eine Gruppe repräsentativer Stoffteilchen der Transport durch die mittlere Strömung und die turbulente Dispersion durch einen Zufallsprozess auf dem Computer simuliert werden. Die Software führt laut MATZARAKIS (2007) zu realistischeren Ergebnissen als Eulersche Ausbreitungsmodelle, da die Genauigkeit im Nahfeld bis einige 100 m genauer ist als bei der Lösung klassischer Diffusionsgleichungen. Auch enthält LASAT ein Strömungsmodell, das Gebäudeeffekte berücksichtigen kann (KOLLOGE 2012).



**Abbildung 12 |** Ausbreitungsrechnung mit FITNAH-LASAT-Kopplung am Beispiel einer Strahlungsnacht in einem Alpental (iMA o.J.)

Nach Recherchen von KOLLOGE ist in der Software GAK/DFM ein eigenes Ausbreitungsmodell integriert, so dass keine Kopplung mit Ausbreitungsmodellen notwendig ist. Diese Software ist auf die Berechnung von Geruchsemissionen ausgerichtet, es können aber auch Schadstoffemissionen modelliert werden. Problematisch sind bei diesen Schadstoffausbreitungsrechnungen allerdings die fehlenden Vergleichswerte, da nur Wahrscheinlichkeiten berechnet werden (KOLLOGE 2012).

### 3.2.5 Modellierung klimatischer Veränderungen durch den Klimawandel

Von den vertieft untersuchten Modellen nutzen FITNAH, MUKLIMO\_3, METRAS PCL– im Gegensatz zu den Modellen KALM, KLAM\_21 und GAK/DFM – als Inputdaten nicht nur Geländedaten und Landnutzungsdaten, sondern auch regionale Klima- bzw. Wetterdaten. Beispiele für solche Daten sind die großräumige Anströmungsrichtung/-geschwindigkeit, Luftmassencharakteristiken sowie Temperatur und Feuchte (GEO-NET 2004: 5). In KLAM\_21 kann eine regionale Anströmung vorgegeben werden (Sievers 2005), die sich der Kaltluftströmung überlagert. Es erfolgt jedoch kein Einströmen von Kaltluft an den Modellgebietsrändern

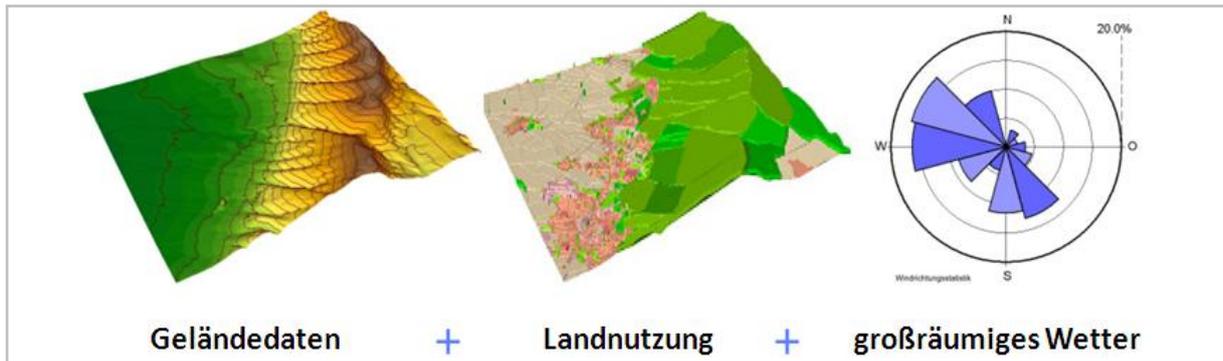


Abbildung 13 | Inputdaten von FITNAH, MUKLIMO\_3 und METRAS PCL (GEO-NET 2004)

Sowohl in FITNAH als auch in METRAS PCL können Wind-, Temperatur- und Feuchtedaten des regionalen Klimamodells REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (mit der Auflösung 10 km x 10 km) eingegeben werden (DIERER 2002: 32, GEO-NET 2004). Bei FITNAH werden zur Festlegung der meteorologischen Situation zusätzlich die analysierten Windverhältnisse (Höhenwinddaten) der NCEP/NCAR (National Center for Environmental Predictions/National Center for Atmospheric Research) verwendet (GEO-NET 2011b: 2). Die zur expliziten Berechnung von Klimatologien (z.B. Anzahl von Tropennächten) für vergangene und zukünftige Zeiträume notwendige Simulation von mehrjährigen Zeiträumen kann für stadtplanerisch benötigte Gitterweiten (10 – 100 m) aufgrund des hohen Rechenaufwands derzeit von keinem Modell geleistet werden. Für die Modelle MUKLIMO\_3 und FITNAH wird daher hierzu die vom Deutschen Wetterdienst entwickelte Quadermethode (Früh et al. 2011), ein dynamisch-statisches Downscaling Verfahren, eingesetzt.

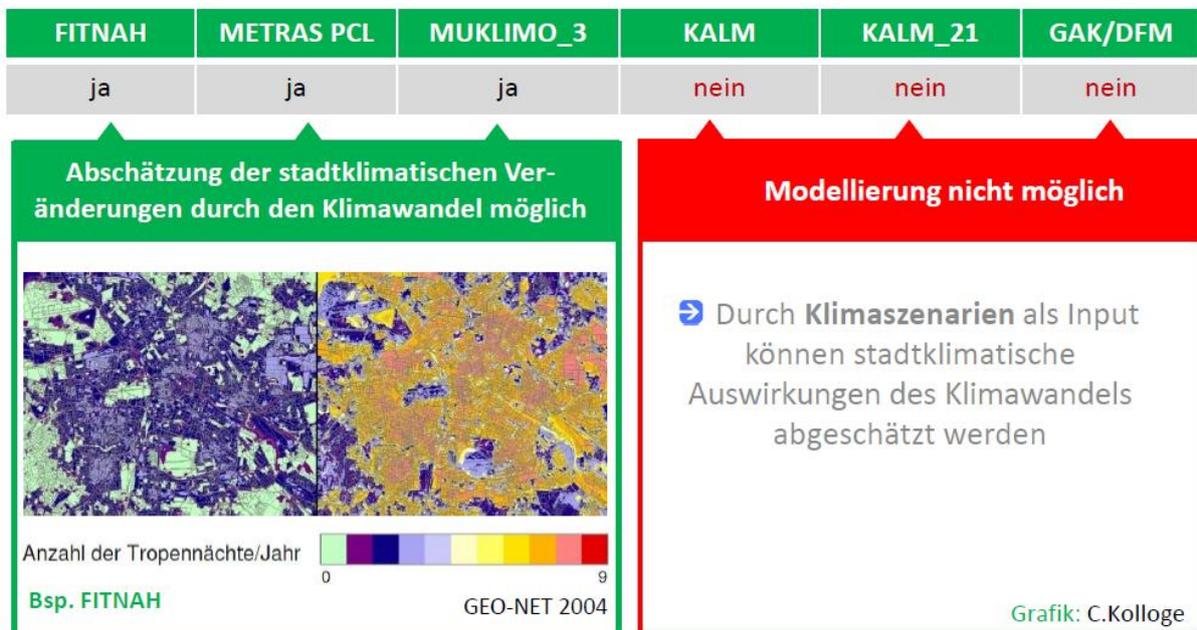


Abbildung 14 | Modellübersicht - stadtklimatische Veränderungen durch den Klimawandel (KOLLOGE 2012)

### 3.2.6 Hohe Wirklichkeitsnähe

Da die Klimamodelle eine fundierte Datengrundlage für die Ausweisung von Vorbehaltsgebieten (ggf. Vorranggebieten) für besondere Klimafunktionen liefern sollen, ist die Wirklichkeitsnähe der einzelnen Kaltluftabflussmodelle von besonderer Bedeutung. Folgende Anforderungen wurden im Rahmen der Untersuchung im „klamis“-Projekt dabei aufgestellt:

- Modellierung mehrerer Kaltluftschichten (Kapitel 3.2.7)
- Berücksichtigung von Flurwindeffekten (Kapitel 3.2.8)
- hinreichende Anzahl an Landnutzungsklassen (Kapitel 3.2.9)
- Option zur Modellierung wandartiger Hindernisse (Kapitel 3.2.10)
- Nesting-Option (Kapitel 3.2.11).

**Tabelle 14 | Gesamtbewertung zur Wirklichkeitsnähe der Klimamodelle (KOLLOGE 2012).**

	FITNAH	METRAS PCL	MUKLIMO_3	KALM	KLAM_21	GAK/DFM
Mehrere Luftschichten	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Flurwindeffekte	✓	✓	✓	Nur qualitativ	Nur qualitativ	Nur qualitativ
Wandartige Hindernisse	Über Modell	Über Rauheit	Über Modell	Über Modell	Über Modell	Über Rauheit
Nesting	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zur Berechnung bioklimatischer Belastung geeignet	✓	✓	✓	✗	✗	✗

### 3.2.7 Modellierung mehrerer Kaltluftschichten

Die Modelle KALM, KLAM\_21 und GAK/DFM sind zweidimensionale Modelle, die nur die vertikal gemittelte Windgeschwindigkeit berechnen (iMA 2008: 9, DIESING + LEHN 2011: 57). Die Temperaturänderung mit der Höhe wird bei diesen Klimamodellen durch ein universelles Temperaturprofil beschrieben, das auf Kenntnissen aus empirischen Studien beruht (REGIONALVERBAND BODENSEE-OBERSCHWABEN 2009: 26). Die dreidimensionalen Modelle FITNAH, MUKLIMO\_3 und METRAS hingegen berechnen die Windgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Höhen. Sie sind in der Lage, die detaillierte Vertikalstruktur der Kaltluftströme zu berechnen.

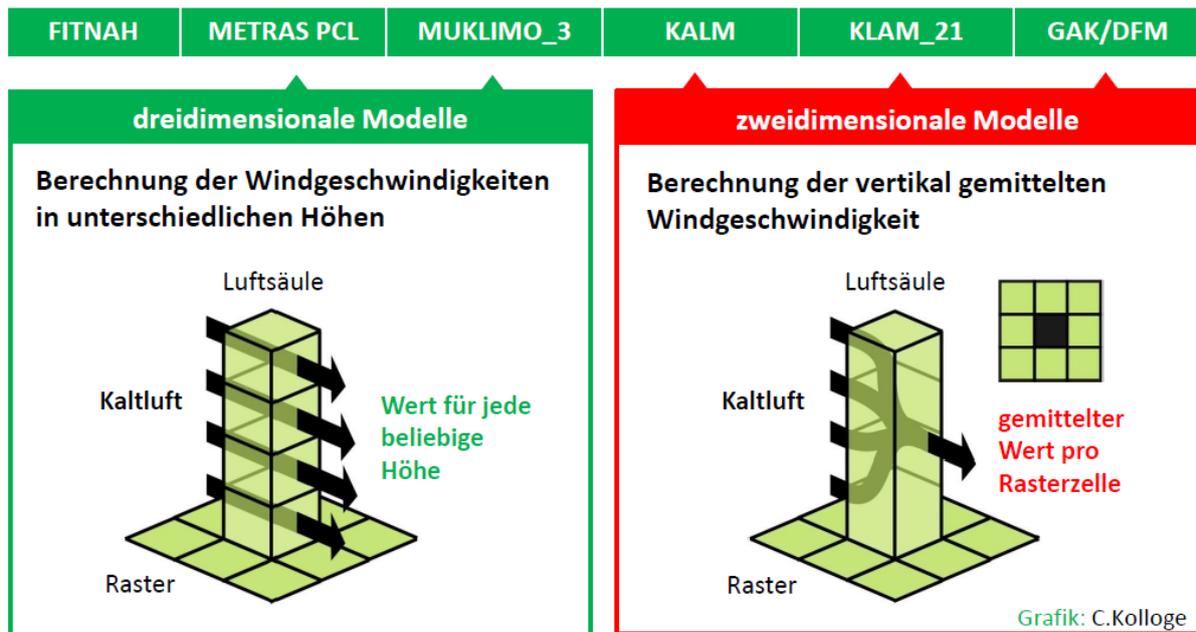


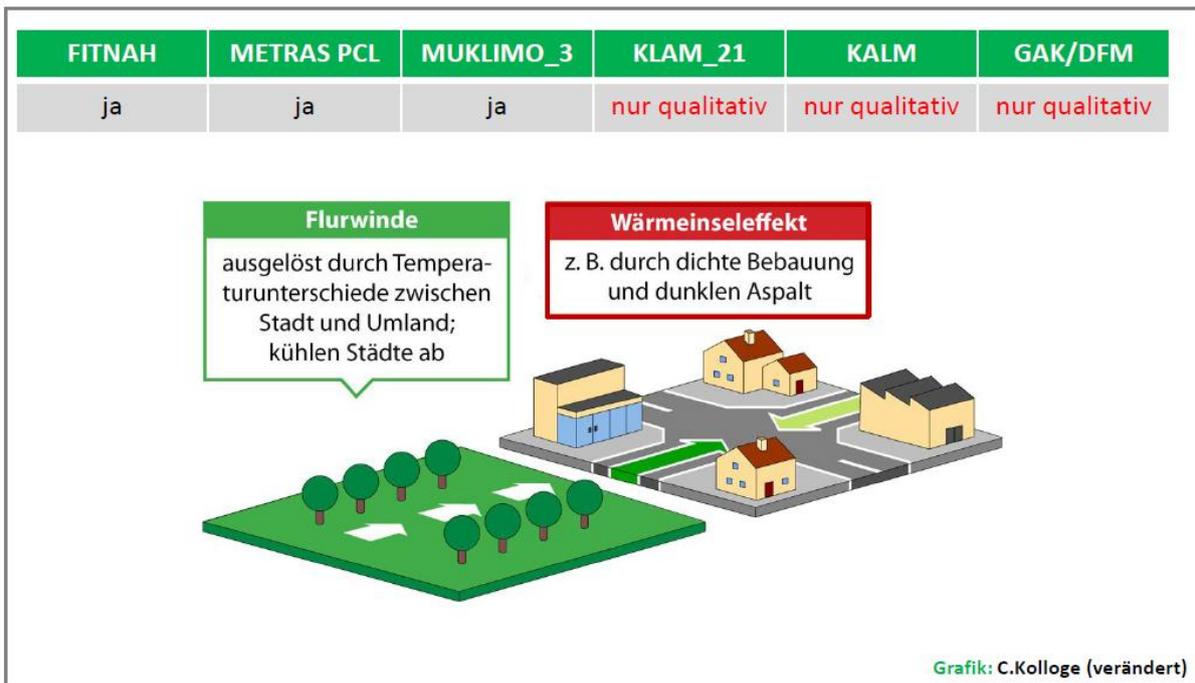
Abbildung 15 | Modellübersicht - Modellierung mehrerer Kaltluftschichten (KOLLOGE 2012)

### 3.2.8 Flurwindeffekte

Kaltluftabflüsse treten in der Regel kombiniert mit Flurwindeffekten auf. Gerade für die Untersuchung flach geneigter Areale (wie dem Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main) kann nur die kombinierte Betrachtung von Kaltluftabflüssen und Flurwindeffekten zu realistischen Ergebnissen führen, da dort keiner der beiden meteorologischen Prozesse als dominierend bezeichnet werden kann (iMA 2011: 3).

Nur FITNAH, MUKLIMO\_3 und METRAS PCL sind in der Lage, Flurwindeffekte realistisch zu simulieren (Geo-Net 2009a: 1, Kost 2012). Die Programme berechnen die Produktion von Kaltluft über den Freiflächen über eine Energiebilanz am Erdboden und die sukzessive Abkühlung der darüber liegenden Luft und benötigen keine Vorgabe einer Kaltluftproduktionsrate (iMA 2011: 2). Bei GAK/DFM, KALM und KLAM\_21 können Flurwinde nur eingeschränkt (qualitativ) simuliert werden. Durch niedrige Kaltluft- oder Kältebildungsrate in Siedlungsgebieten ergibt sich bei diesen Modellen in Städten ein lokales Minimum in der Kaltlufthöhe. Die Differenz in der Kaltlufthöhe zur Umgebung führt zur Ausbildung stadteinwärts gerichteter Flurwinde. Bei KLAM\_21 kann zur Beschreibung der nächtlichen Abgabe von tagsüber in Gebäuden gespeicherter Wärme auch eine abklingende negative Kältebildungsrate vorgegeben werden.

Einige Modelle erlauben zusätzlich die Vorgabe eines Regionalwindes (Stärke und Richtung), der im Modellgebiet die thermisch angeregten Kaltluftabflüsse und Flurwinde überlagert.



**Abbildung 16 I** Modellübersicht – Berücksichtigung von Flurwindeffekten

### 3.2.9 Landnutzungsklassen

Alle Klimamodelle verfügen über Landnutzungsklassen, denen eine „Rauigkeit“ als Maß für den aerodynamischen Widerstand beim Überströmen der Fläche und eine „Porosität“ als Maß für die Durchlässigkeit der bebauten Flächen zugeordnet wird (KOLLOGE 2012). KLAM\_21 nutzt eine effektive Rauigkeitslänge die u.a. von der Kaltlufthöhe abhängt und somit keine feste Rauigkeit darstellt.

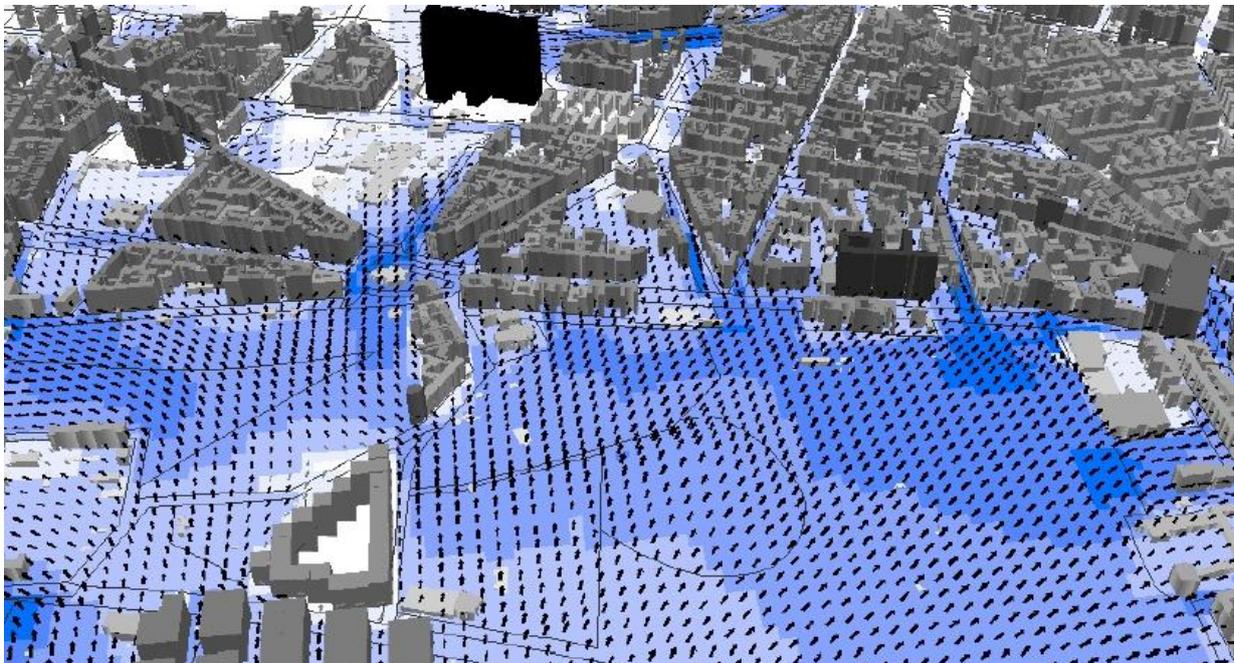
Die untersuchten Klimamodelle zeigen Unterschiede in der Anzahl und Differenzierung der bereits vordefinierten standardmäßigen Landnutzungsklassen: Bei MUKLIMO\_3 sind dies 22, bei FITNAH 12 verschiedene Landnutzungsklassen (Früh et al. 2011, GEO-NET 2009a: 3, iMA 2011: 7). Bei den Modellen METRAS PCL und GAK/DFM werden jeweils zehn Nutzungsklassen unterschieden (RÖCKLE & RICHTER 2001: 11, UNIVERSITÄT HOHENHEIM 2005: 7). KLAM\_21 verfügt über neun Landnutzungsklassen, bei dem Modell KALM sind es nur acht (SIEVERS 2005: 83, DWD 2007: 8, ÖKOPLANA 2007: 49).

Die Landnutzungsdaten, die in der Regionalplanung als Input des jeweiligen Klimamodells verwendet werden können, enthalten ATKIS-Objektarten. Je mehr solcher Objektarten aus den jeweiligen ursprünglichen Inputdaten in Landnutzungsklassen übertragen werden können, desto realistischere Ergebnisse können mit den Klimamodellen erzeugt werden. Alle Modelle verfügen über genügend Klassen, um die Klimatope in Tabelle 3, beziehungsweise die Klimawirkung der wichtigsten AKTKIS-Objektarten, gut abzubilden. Bei Bedarf können für eine detailliertere Klimauntersuchung weitere Landnutzungsklassen definiert und simuliert werden.

### 3.2.10 Wandartige Hindernisse

Wandartige Hindernisse, die aus dem Gelände herausragen – wie Gebäude, Dämme oder Schutzwände – reduzieren die Windgeschwindigkeit und können zum Stau von Kaltluft führen. Die Klimamodelle können diese „windbremsende“ Wirkung mithilfe von Modellen der Bebauung (als Input) berechnen. Die Softwarelösungen berücksichtigen die unterschiedlichen Höhen, die von der Kaltluft überwunden werden müssen, um bestimmte Hindernisse zu überströmen. Die Wirkung von Einzelhindernissen ist im Modell so parametrisiert, dass ihre Überströmung erfolgt, sobald die Höhe der luvseitig gestauten Kaltluft die Hindernishöhe erreicht (KOLLOGE 2012).

Die Um- und Überströmung von Bebauung durch Kaltluft kann bei einer genügend hohen Auflösung (Gitterweiten von nur wenigen Metern) explizit simuliert werden. Bei größeren Gitterweiten können Einzelgebäude nicht mehr aufgelöst werden und die Klimawirkung der Bebauung erfolgt über eine sogenannte Parametrisierung (DLR 2000).



**Abbildung 17 |** Simulation wandartiger Hindernisse mit Modellen der Bebauung in FITNAH (GEO-NET 2004)

### 3.2.11 Nesting

Nesting ist die Möglichkeit, einen hoch aufgelösten Kernbereich mit den lokalen Strömungen, auf den sich der Fokus des Interesses konzentriert, auszuwählen und diesen in einen gröber aufgelösten Einflussbereich mit den regionalen Ausgleichsströmungen einzubetten (siehe Abbildung 18). Alle untersuchten Modelle verfügen über eine Nesting-Funktion. In MUKLIMO\_3 werden im Übergangsbereich zwischen dem hoch aufgelösten Untersuchungsgebiet und der gröber aufgelösten Umgebung die Gitterweiten in kleinen Schritten erhöht (Früh et al. 2011).



Abbildung 18 | Grundschemata eines Nestings (KOLLOGE 2012)

### 3.3 Zusammenfassung

Für ein flächendeckendes, hoch aufgelöstes und vor allem 3-dimensionales Bild des Kaltluftgeschehens bedarf es des Einsatzes eines speziellen Kaltluft-Strömungssimulationsmodells. Die Ergebnisse der Strömungsmodelle liegen in einem Format vor, das mit geeigneten GIS-gestützten „Klimaanalysemodellen“ kartographisch aufbereitet werden kann (z.B. in Form von Klimafunktionskarten).

Als für die Fragestellung der Regionalplanung am besten geeignet, zeichnet sich die Verwendung eines mesoskaligen prognostischen Strömungsmodells ab (geeignete Modelle siehe Tabelle 15), da diese auch die thermische Belastung des Menschen bestimmen können und zur Verfeinerung der Klimaprojektionen regionaler Modelle auf die Stadtskala (Downscaling) eingesetzt werden können. Der Rechenaufwand dieser Modelle ist jedoch vergleichsweise hoch (und somit teuer). Die einfacheren Kaltluftabflussmodelle KALM, KLAM\_21 und GAK/DFM können hingegen für spezielle Fragestellungen der Durchlüftung von Städten kostengünstig und mit deutlich geringerem Rechenaufwand eingesetzt werden und dabei dennoch die komplexe Dynamik nächtlicher Kaltluftabflüsse mit hinreichender Realitätsnähe simulieren.

**Tabelle 15 | Zusammenfassende Übersicht der untersuchten GIS-gestützten Klimamodelle**

	FITNAH	METRAS PCL	MUKLIMO_3	KALM	KLAM_21	GAK/DFM
Einsatz in Regionalplanung	✓	✓	✓*	✓	✓	✓
Einsatz in Stadtplanung	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>RELEVANTE ANWENDUNGEN</b>						
Kaltluftproduktion	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Schadstoffbelastung	mit LASAT	mit LASAT	Eulersche Ausbreitung	mit LASAT	mit LASAT	✓
Bioklimatische Belastung	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Klimawandel	✓	✓	✓	✗	✗	✗
<b>RELEVANTER OUTPUT</b>						
Thermische Strömung	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Temperatur	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Luftfeuchtigkeit	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Strahlung (solare und thermische)	✓	✓	✓	✗	✗	✗

\* nur für Gebietsgrößen bis 100 km x 100 km

Zusammenfassend zeichnet sich ab, dass für die Fragestellungen der Raumordnung (siehe Kapitel 3) geeignete Klimaanalysemodelle vorliegen. Diese liefern hochwertige fachliche Grundlagen (z. B. detaillierte Analysekarten). Nach wie vor fehlen jedoch geeignete und erprobte Analyseinstrumente und –methoden, um die Simulationsergebnisse in eine für die Regionalplaner sichere und eindeutige Entscheidungsgrundlage zu überführen. Ein für die Regionalplanung optimiertes Sortiment an Analysemethoden existiert bislang nicht – ihre Entwicklung wäre Aufgabe von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Erste Hinweise fasst Kapitel 5 zusammen.

## 4. Modellgestützte Klimaanalysen in den Regionen

In bzw. für zahlreiche Regionen sind zwischenzeitlich von den zuständigen Stellen der Länder (z. B. Umweltministerien) oder der Regionen (z. B. Regionalverbände) modellgestützte regionale Klimaanalysen erarbeitet bzw. in Auftrag gegeben worden. Diese, teilweise wissenschaftlich begleiteten, Analysen stellen wichtige Daten- und Bewertungsgrundlagen klimatischer Flächenfunktionen im Rahmen der räumlichen Planung dar. Ziel der Analysen ist es, die bioklimatische Belastungssituation und die klimatischen Ausgleichsfunktionen in den Regionen transparent darzustellen. Aufbauend auf den Modellierungsergebnissen werden für die Regional- und Bauleitplanung zudem Planungshinweise zur Minimierung der thermischen Belastung abgeleitet.

Die aus der landesweiten und/oder regionalen Perspektive erarbeiteten Ergebnisse können die gegebenenfalls auf örtlicher Ebene erforderlichen großmaßstäblichen Detailuntersuchungen nicht ersetzen, jedoch die Entwicklung räumlich lenken und inhaltlich vorbereiten.

Eine kursorische Betrachtung von modellgestützten Klimaanalysen zeigt eine Vielfalt der zum Einsatz kommenden Klimaanalysemodelle (Auszug):

- FITNAH (u.a. in der Modellregion Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald, für einen räumlichen Ausschnitt der Modellregion Mittel- und Südhessen),
- MetPhoMod zur Analyse der Durchlüftungssituation (z. B. in der Region Südlicher Oberrhein),
- METRAS PC zur Berechnung der Windsituation, KALM Simulation der Kaltluftabflüsse (z.B. in der Region Stuttgart),
- KLAM\_21 (in der Region Oberschwaben: Hier wurde auf Basis der mit KLAM\_21 berechneten Daten mittels eigener Verfahren wichtige Leitbahnen für lokale Kaltluftbewegungen (Berg- und Hangabwinde) und gleichzeitig die wichtigen Herkunftsgebiete der Kaltluft flächenhaft herausgearbeitet).

Unterschiede zeichnen sich auch hinsichtlich des methodischen Vorgehens bei der Ermittlung und Abgrenzung der bioklimatisch/lufthygienisch belasteten Räume (Wirkungsräume/Belastungsräume) sowie der Freiflächen, die für die Belastungsräume eine klimatische Ausgleichsfunktion (Herkunftsräume) wahrnehmen, ab (siehe auch Kapitel 2.1). Auch hier zeigen die nachfolgenden Betrachtungen nur einen ersten Einblick.

So wurden beispielsweise im Rahmen der modellgestützten Klimaanalyse für die Region Oberschwaben neben größeren Siedlungen bei der Ermittlung der potentiellen Wirkungsräume auch Flächen in der Nähe größerer Siedlungen berücksichtigt, wenn diese von nächtlichen Kaltluftbewegungen profitieren können (z. B. Luftleitbahnen zwischen zwei benachbarten größeren Siedlungen). Zur Bestimmung der potentiellen Wirkungsräume wurde für jede Pixelfläche im Raster eine definierte (quadratische) Umgebung betrachtet. War der Anteil der Siedlungspixel in dieser Umgebung höher als der Grenzwert für den Siedlungsanteil, der in der Studie mit 25% definiert wurde, so wurde der Pixelfläche das Attribut „Siedlungsnähe“ zugewiesen. Mittels dieses Verfahrens können zur Schaffung zusammenhängender Wirkungsräume die „Lücken“ zwischen den größeren Siedlungen „geschlossen“ und die zahllosen kleinflächigen Siedlungen im Untersuchungsgebiet herausgefiltert werden (Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, Band 2, 2009: 33).

Die Regionale Klimaanalyse für die Region Südlicher Oberrhein hat als Indikator für lokal erhöhte Wärmebelastungsrisiken den nächtlichen fühlbaren Wärmestrom bei autochthonen Wetterlagen herangezogen. Dieser beschreibt eine wichtige Komponente des Energieaustauschs zwischen der Erdoberfläche und der darüber befindlichen Luft. In die Ermittlung der lokalen Wärmebelastungsrisiken gingen das für autochthone Wetterlagen berechnete nächtliche mesoskalige Lufttemperaturfeld sowie die räumliche Verteilung der klimatologisch relevanten Landbedeckung ein. Zur Kalibrierung des Methodenansatzes dienten die klimatologisch intensiv untersuchten Gegebenheiten im Freiburger Stadtgebiet (Regionalverband Südlicher Oberrhein 2006: 52).

Risikostufe	Kürzel	Code	Zugeordnete Flächen
Keine erhöhten Risiken	WB <sub>0</sub>	0	$\Delta T_S < 3K$
Erhöhte Risiken	WB <sub>1</sub>	1	$\Delta T_S \geq 3K \wedge \Delta T_S < 4K$
Stark erhöhte Risiken	WB <sub>2</sub>	2	$\Delta T_S \geq 4K$

<sup>1</sup>räumliche Kontextanalyse: Flächenein- bzw. -ausschluss bis 2 ha

(  $\Delta T_S$  = Temperaturdifferenz der lokalen nächtlichen Überwärmung)

In der Dokumentation wird darauf hingewiesen, dass im Rahmen der Klimaanalyse Region Südlicher Oberrhein Bereiche mit (stark) erhöhten lokalen Wärmebelastungsrisiken abgegrenzt wurden, in denen bei autochthonen Wetterlagen während der Nachtstunden eine erhöhte Intensität von Wärmebelastungen zu erwarten ist. Hingegen wurde im transnationalen Regio-Klima-Projekt (REKLIP, www.reklip.org), welches die regionalen Klimaphänomene im Oberrheingebiet von Basel bis Karlsruhe untersucht hat, die generelle Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Belastungssituationen beleuchtet. Aufgrund unterschiedlicher Bezugsgrößen sind die Ergebnisse daher nicht unmittelbar vergleichbar (Regionalverband Südlicher Oberrhein 2006: 15).

Unterschiede zeichnen sich bei den modellgestützten Klimaanalysen auch bei der Einstufung und Bewertung der klimatologischen Charakteristika der Grün- und Freiflächen ab. Als planungsrelevant für die Regional- und Bauleitplanung werden häufig nur kaltluftproduzierende Flächen und Luftleitbahnen eingestuft, wenn diese einem Siedlungsraum zugeordnet sind, der von den Ausgleichsleistungen profitieren kann.

Da der Versuch, die Grün- und Freiflächen eines heterogenen Raumes wie der Region Nordschwarzwald/Mittlerer Oberrhein einer einheitlichen Bewertung zu unterziehen, mit einigen Schwierigkeiten verbunden ist und eine Einzeluntersuchung der jeweiligen Charakteristika aller Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im vorliegenden Maßstabbereich häufig nicht möglich ist, wurde zur Bewertung der bioklimatischen Bedeutung von Grün- und Freiflächen von den Gutachtern der Klimaanalyse „Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald“ ein vereinfachtes, teilautomatisierbares Verfahren angewendet. In der Analyse sprechen die Gutachter Grün- und Freiflächen im direkten Umfeld (250 m) von bioklimatisch ungünstigen Siedlungsgebieten, auch bei vergleichsweise geringer Kaltluftbildung, generell eine sehr hohe bioklimatische Bedeutung zu. Nach Aussage der Gutachter sind diese Flächen geeignet, unabhängig von ihrer Kaltluftbildung ausgleichend auf das thermische Klima in ihrem meist dicht bebauten Umfeld zu wirken. Freiflächen im 250 m-Umfeld von bioklimatisch weniger günstigen Siedlungsräumen werden aus umweltmeteorologischer Sicht als hoch bedeutsam angesehen. Als Grünflächen werden in der Klimaanalyse – unabhängig von ihrer

Nutzung – die Flächen bezeichnet, die einen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25% aufweisen (Regionalverband Nordschwarzwald und Mittlerer Oberrhein, Erläuterung zur Planhinweiskarte, o. J: 1). Hingegen gehen in die Temperaturmittelwertermittlung der Freiflächen einschließlich Wald in der im Anhang beigefügten Klimaanalyse für den Raum um die Stadt Marburg nur Flächen ein, die einen Versiegelungsgrad von unter 10% aufweisen (siehe auch Abbildung 22).

Zur Berücksichtigung des räumlichen Gefüges von lokalen und überlokalen Belastungsfaktoren sowie der Reichweite von thermischen Ausgleichsprozessen wurden in der Klimaanalyse für die Region Südlicher Oberrhein die entsprechenden Zielsetzungen (Thermische Ausgleichswirkung der Luftströmungen erhalten und verbessern sowie Wärmebelastungsrisiken in potenziell austauscharmen Gebieten vermeiden bzw. reduzieren) in Gebieten ausgewiesen, die maximal 1 km von Gebieten mit lokal erhöhten bzw. stark erhöhten Wärmebelastungsrisiken entfernt liegen. Durch dieses Vorgehen wird laut Dokumentation sichergestellt, dass unter Einbezug überörtlicher Effekte alle Bereiche berücksichtigt werden, die für die auf die thermische Situation bezogenen Zielsetzungen relevant sind. Für die oben genannten Zielsetzungen werden relevante Räume in die Kategorien „hohe Priorität“ und „niedrige Priorität“ eingestuft (Regionalverband Südlicher Oberrhein 2006: 77).

Aufbauend auf kartografisch aufbereiteten Grundlagendaten und Analyseergebnissen weisen die daraus abgeleiteten Planungshinweiskarten für die Regionalplanung i. d. R. Grün- und Freiflächen nach ihrer bioklimatischen Bedeutung sowie Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer bioklimatischen Belastungsstufe aus. Je nach Einstufung der Flächen werden Maßnahmen zum Erhalt bzw. zur Verbesserung der klimatischen Situation formuliert. Diese Planhinweiskarten geben Auskunft darüber, welche Flächen aus umweltmeteorologischer Sicht eine sehr hohe, hohe bzw. mittlere Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung aufweisen. Dabei konzentrieren sich die Hinweise häufig auf die Bereiche, in denen aus überörtlicher Sicht eine bestimmte Zielsetzung (z. B. Freihaltung der Flächen von Versiegelung und Bebauung) und ein entsprechender Handlungsbedarf angezeigt sind.

Insgesamt existieren in zahlreichen Regionen inzwischen sehr gute und fachlich fundierte modellgestützte Klimaanalysen. Eine Vergleichbarkeit der Analysen ist jedoch u. a. aufgrund:

- des unterschiedlichen methodischen Vorgehens
- der unterschiedlichen Kriterien zur Abgrenzung und Bewertung z. B. der Wirkungsräume
- der Vielzahl möglicher Modelle für die Wärmebelastung des Menschen (siehe Kap. B im Anhang)

insbesondere für Nichtfachleute schwierig.

Vor allem die Abgrenzung, ob Luftleitbahnen lokal oder regional bedeutsam sind, erfolgt bislang nicht nach einheitlichen Methoden und Kriterien (siehe auch Kapitel 5.3). Eine wissenschaftliche Evaluierung der bestehenden Klimaanalysen wird angeregt. Diese sollte in enger Abstimmung mit den Akteuren der Raumordnung und mit Klimamodellierern erfolgen.

## 5. Hinweise für die Regionalplanung

### 5.1 Anforderungen an Datengrundlagen

Zur Steuerung der Raumentwicklung stehen der Regionalplanung, wie in Kapitel 1.2 beschrieben, insbesondere die Planelemente „Ziel“ (Vorrang) und „Grundsatz“ der Raumordnung (Vorbehalt) zur Verfügung. Da Ziele der Raumordnung eine strikte Beachtungspflicht gegenüber raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen von allen öffentlichen Stellen bzw. Planungsträgern entfalten und nicht im Wege von Abwägungen/Ermessensentscheidungen überwunden werden können, sind die Anforderungen an die zugrunde liegenden Daten höher als bei der Festlegung von Grundsätzen. Den Anforderungen an Datengrundlagen für eine Zielfestlegung wird genüge getan, wenn die Daten hinreichend aktuell, belastbar, vollständig und mittels geeigneter Methode erstellt werden. Wie in dieser Dokumentation dargelegt, existieren – für das Thema Klima - geeignete Raumnutzungsdaten und meteorologische Daten sowie modellgestützte Klimaanalysen. Es fehlen jedoch Bewertungs- und Transformationsansätze zur Identifikation der überörtlich bedeutsamen Belastungsräume, Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen. Auch für das Thema Lufthygiene können die Modellierer und Planer auf zahlreiche Datengrundlagen zurückgreifen.

Als eine in die Zukunft gerichtete, für einzelne Raumnutzungen und Raumfunktionen Vorsorge treffende Planung ist die Regionalplanung gewohnt, mit Prognosen und Projektionen (z. B. Bevölkerungsprojektionen) und den damit naturgemäß einhergehenden Bandbreiten zu arbeiten. Prognosen und Projektionen sind häufig und zu verschiedenen Themen auch Basis für politische Entscheidungen. Klimaprojektionen, deren Verwendung im Rahmen der regionalplanerischen Vorsorge für die Anpassung an den Klimawandel geboten ist, sind bei Verwaltungsentscheidungen wie andere Projektionen zu behandeln.

Um bereits heute die Auswirkungen des Klimawandels zu veranschaulichen, wird angeregt, das Klimawandelsignal im Sinne einer pragmatischen Vorgehensweise (siehe Abbildung 19) bereits auf die „Ist-Situation“ zu projizieren. Methodisch richtig wäre es jedoch, die zu einem definierten Planungszeitraum voraussichtlich zu erwartende „Planungssituation“ abzuschätzen und hierauf das für den gleichen Zeitraum zu erwartende Klimawandelsignal zu projizieren.

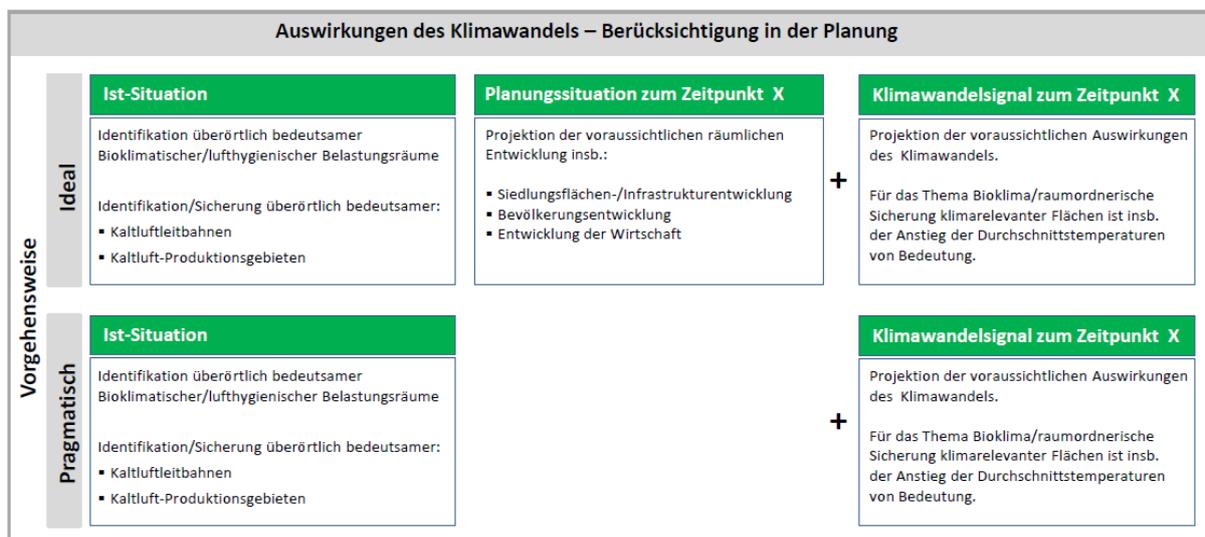


Abbildung 19 | Berücksichtigung der Auswirkungen der Klimawandels in der Planung

### 5.1.1 „Vereinfachte“ Verfahren

Vor dem Hintergrund, dass die Regionalplanung i. d. R. nicht über die technische und fachlich-personelle Ausstattung zur Erstellung modellgestützter Klimaanalysen verfügt und für die Regionalplanung geeignete Daten häufig nicht bei den Fachbehörden abgerufen werden können, stellt sich die Frage, ob bzw. für welche Fragestellungen vereinfachte Verfahren zum Einsatz kommen können.

Beispiele für vereinfachte Verfahren sind die bereits in den 90er Jahren für das Land Hessen erstellte Klimafunktionskarte sowie die im Rahmen des „klamis“-Projektes in der 1. Projektphase erprobte empirische Ermittlung von Kalt- und Frischluftleitbahnen sowie der zugehörigen klimarelevanten Freiflächen.

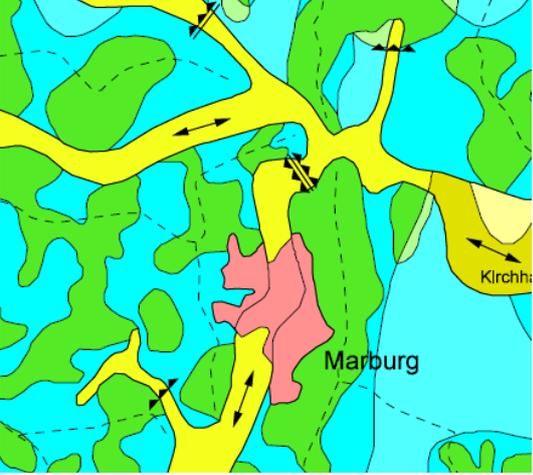
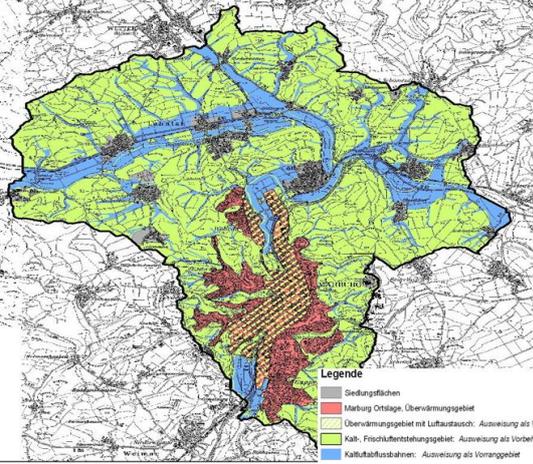
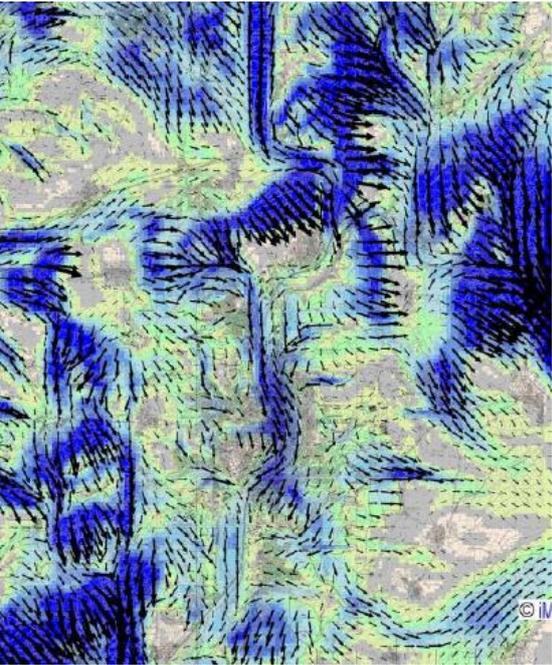
„Vereinfachte Klimaanalysen“	
<p>Klimafunktionskarte Hessen (1997)</p> 	<p>Die im Maßstab 1:200.000 erstellte <u>Klimafunktionskarte Hessen</u> (UNI KASSEL, TARAXACUM AG 1997) stellt neben den Gebieten mit Tendenzen zur Überwärmung (rote Flächen) auch die Freiflächen, differenziert nach ihrer Bedeutung für die Kalt- und Frischluftentstehung (blaue/grüne Flächen), dar. Die für den Lufttransport wichtigen Bahnen werden differenziert in potenzielle Luftleit- bzw. Sammelbahnen, potenziell hoch aktive Ventilationsbahnen/ -flächen sowie potenziell aktive Ventilationsflächen.</p> <p>Die <u>Empirische Ermittlung ohne modellgestützte Klimaanalyse</u> versucht anhand einer vereinfacht dargestellten Flächennutzung und der Geländeform Analogieschlüsse auf die Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete sowie die Kaltluftbahnen zu ziehen. Die in der Karte grün dargestellten Flächen (Kalt- und Frischluftentstehung) werden als die der Siedlungsfläche der Stadt Marburg zuzuordnenden Flächen eingestuft.</p>
<p>Empirische Ermittlung - ohne Strömungs-Klimamodell („klamis“-Projekt, 1. Projektphase)</p> 	<p>Beide Karten geben <u>einen ersten Überblick</u> über die für die Regionalplanung relevanten Freiflächen und Leitbahnen. Die Abgrenzung der Leitbahnen orientiert sich z. T. vereinfachend an den Geländeformen.</p> <p>Den Karten/Dokumentationen kann u. a. jedoch nicht entnommen werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Welches Kalt-/Frischluftentstehungsgebiet (in welchem Umfang) welchem bioklimatisch belasteten Raum (=Wirkungsraum) zugeordnet ist.</li> <li>▪ Auf welche Höhe ü. G. sich die Luftströmungen beziehen und wie sie sich während der Nacht verändern (fehlende 3-Dimensionalität und zeitliche Dynamik der Strömungssysteme).</li> <li>▪ Fehlende Darstellung der Mächtigkeit von Kaltluftströmungen und damit keine Möglichkeit der Dokumentation der Überströmung von Geländerücken bzw. Siedlungen.</li> <li>▪ Leitbahnen werden teilweise in ihrer Bedeutung überhöht bzw. nicht dargestellt.</li> </ul>

Abbildung 20 | Beispiele für vereinfachte Klimaanalysen

Im Vergleich zu der (mit dem mesoskaligen prognostischen Strömungsmodell FITNAH) für den Raum um die Stadt Marburg durchgeführten modellgestützten Klimaanalyse zeigt sich, dass vereinfachte Verfahren zwar einen ersten Überblick über die für die lufthygienischen und bioklimatischen Verhältnisse relevanten Freiflächen und Leitbahnen geben können – jedoch die 3-Dimensionalität und Dynamik der Systeme (Kaltluftentstehung/Luftleitbahnen) nicht bzw. nur unzureichend abbilden können.

<b>Modellgestützte Klimamodellierung (Teilergebnis, Gesamtbericht siehe Anhang)</b>	
	<p>Das Ergebnis der modellgestützten Klimaanalyse umfasst zahlreiche kartographisch aufbereitete Ergebniskarten, die u. a. folgende Inhalte enthalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bodennahe Temperaturen in 2 m über Grund zu Beginn einer Strahlungsnacht (ca. 1 bis 2 Stunden nach Sonnenuntergang) und in der 2. Nachthälfte (&gt; 3 Stunden nach Sonnenuntergang)</li> <li>▪ Die Belüftung als bodennahe mittlere Strömung (10 m Höhe über Grund) und in Überdachniveau (50 m über Grund) in der 2. Nachthälfte</li> <li>▪ Darstellung der Temperaturabweichung gegenüber dem Mittelwert + Zusammenführung der Temperaturabweichungen für zwei Ausgabezeitpunkte</li> <li>▪ Volumenströme in m<sup>3</sup>/s in den Höhenbereichen 0 bis 10 m und 0 bis 50 m über Grund + Vektoren der Strömung</li> <li>▪ Kaltluftbildung (Kaltluftproduktionsrate oder Energiebilanz der Oberfläche)</li> </ul> <p>Modellgestützte Klimaanalysen können detaillierte Analyseergebnisse liefern, eine Bewertung und Transformation in die regionalplanerische Umsetzung ist damit jedoch noch nicht geleistet.</p>

**Abbildung 21 | Beispiele vereinfachter Analysen im Vergleich zu einer modellgestützten Klimaanalyse (aus iMA 2013)**

### 5.1.2 Einsatz modellgestützter Klimaanalysen in der Regionalplanung

Die Regionalplanung verfügt, wie in Kapitel 1.2 dargestellt, über Instrumente und Planelemente, mit denen sie Freiflächen, die im Wirkungszusammenhang mit bioklimatisch belasteten Gebieten eine besondere Ausgleichsfunktion wahrnehmen, langfristig für bestimmte Funktionen bzw. vor entgegenstehende Raumnutzungen sichern kann. Insbesondere als „Ziele der Raumordnung“ festgelegte Vorgaben können mit erheblichen Eingriffen in die planerischen Gestaltungsmöglichkeiten verbunden sein und bedürfen daher einer fachlich fundierten Begründung.

Vor dem Hintergrund der „Schwächen“ empirischer Verfahren (siehe Kapitel 5.1.1) ist eine auf die Anforderung der Regionalplanung zugeschnittene modellgestützte Klimaanalyse geboten, die folgende Schritte umfasst:

- Untersuchungen von zusammenhängenden Siedlungsstrukturen im Hinblick auf die lokalen Belüftungsfunktionen, die eine Einstufung zulassen, ob sich der Siedlungsraum aus sich selbst heraus bzw. dem eigenen unmittelbaren Umfeld heraus entlasten kann oder aber auf überörtliche Zuströme von Kaltluft/Frischlufte angewiesen ist.
- Ausweisung und Abgrenzung der - für einen Belastungsraum (Wirkungsraum) – belüftungsrelevanten überörtlichen Kaltluftleitbahnen.
- Ausweisung und Abgrenzung von Kaltluftentstehungsgebieten, welche die für den Belastungsraum relevanten überörtlichen Kaltluftleitbahnen speisen.
- Eine Darstellung der lufthygienischen Qualitäten der Luftleitbahnen.

Auch wenn mittels geeigneter modellgestützter Klimaanalysen hochwertige Analyse-/Ergebnisdaten zur Ist-Situation und unter Berücksichtigung des Klimawandels bereit gestellt werden können, zeigt sich in der Praxis, dass nach wie vor geeignete und erprobte Analyseinstrumente und –methoden fehlen, um die Simulationsergebnisse in eine für die Regionalplanung sichere und eindeutige Entscheidungsgrundlage zu überführen (Handlungsbedarf, siehe Kapitel 5.3)

## 5.2 Wesentliche Ergebnisse von modellgestützten Klimaanalysen und Ansätze zu ihrer Umsetzung in die Praxis der Regionalplanung

Als Ergebnis-Datensatz liefern geeignete modellgestützte Klimaanalysen u. a. Daten zu Kaltluftströmungssystemen, die hauptsächlich auf einer 3-dimensionalen Verteilung folgender Größen:

- Lufttemperatur,
- Luftfeuchtigkeit und
- Windvektoren (Windrichtung, Windgeschwindigkeit) basiert.

Sowie 2-dimensionalen Verteilungen an der Oberfläche der Größen:

- Oberflächentemperatur,
- Strahlungsflüsse (solare und thermische Strahlung),
- Wärmeströme und Verdunstung

Diese Informationen können in einer hohen räumlichen Dichte aufbereitet werden. So umfasst beispielsweise die im Anhang dokumentierte Klimaanalyse für das Umfeld der Stadt Marburg horizontal 360 x 360 Berechnungspunkte und bis in 100 m über Grund 12 Schichten. In der Summe stehen z. B. insgesamt 1,5 Mio. unterschiedliche Daten zu Temperatur und Wind zur Verfügung.

Neben diesen Größen können weitere Informationen hilfreich sein:

- Geländehöhe
- Landnutzung
- weitere vom Modell berechnete Größen (z. B. Trajektorien, Tracerkonzentration)

Die Darstellung der oben genannten Daten und Größen stellt jedoch noch keine objektive Abgrenzung und Differenzierung im Sinne der Regionalplanung dar. Aus den Kartendarstellungen lassen sich aber teilweise deutliche Strukturen (z. B. Kaltluftleitbahnen) erkennen und abgrenzen, die Abgrenzung, ob diese Leitbahn lokal oder regional bedeutsam ist, erfolgt jedoch in den Regionen bislang nicht nach einheitlichen Methoden und Kriterien und würde von jedem Bearbeiter voraussichtlich etwas anders vorgenommen werden. Zudem kann die Abgrenzung in der Regel nur verbal beschrieben werden und sich kaum auf quantitative/objektive Kategorien berufen. Für eine rechtssichere Entscheidung von Zielfestlegungen ist diese Art der Entscheidung unbefriedigend (iMA 2013: 29).

Nachfolgend werden einige wichtige Ergebnisse und Ansätze zu ihrer Umsetzung in der Praxis der Regionalplanung erörtert.

### 5.2.1 Wirkungsraum

Zur Ermittlung und Abgrenzung bioklimatisch bzw. lufthygienisch belasteter Siedlungsräume existieren verschiedene Datengrundlagen (z. B. Bioklimakarte, Emissionskataster). Als Indiz (Proxydaten, indirekte Klimazeiger) können auch die Flächennutzung, Bebauungsdichte und die Flächengröße (räumliche Ausdehnung) der Gebiete dienen. Wertvolle Ergebnisse liefern modellgestützte Klimaanalysen. Verschnitten mit Daten z. B. zur Bevölkerungsstruktur sind so Aussagen zur Betroffenheit und Verwundbarkeit (Vulnerabilität) besonders gefährdeter Personengruppen möglich und dienen – in geeigneter Form - als Grundlage für politische/planerische Entscheidungen. Vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Vorgehensweisen in den Regionen (siehe Kapitel 4) wären jedoch objektive Kategorien zur Bewertung wünschenswert. Im Rahmen des „klamis-Projektes“ wurden überörtlich bedeutsame bioklimatisch/lufthygienisch belastete Räume als raumbedeutsam definiert, wenn sie sich nicht aus sich heraus (inklusive Wirkung von intensiver Durchgrünung) bzw. aus dem eigenen, unmittelbaren Umfeld heraus entlasten können, sondern auf überörtlich entlastend wirkende Kaltluftströmungen bzw. –strömungssysteme angewiesen sind.

## 5.2.2 Herkunftsraum

### Kaltluftproduktion

Das bodennahe Lufttemperaturfeld lässt zwar relativ schnell die Identifizierung von belasteten (überwärmten) Siedlungsgebieten zu, eine Differenzierung von Wald- und Freiflächen, hinsichtlich ihres Kaltluftpotenzials ist aber aufgrund der auch von der Geländehöhe abhängigen Temperaturverteilung nicht ohne weiteres möglich. Für die Identifizierung der kaltluftproduzierenden Flächen in dem jeweiligen Untersuchungsraum wird daher angeregt, zunächst diejenigen Landnutzungen aus der Betrachtung zu nehmen, die einen Versiegelungsgrad von über 10% aufweisen. Für die verbleibenden Berechnungsflächen (Wald- und Freiflächen ohne die versiegelten Flächen (Versiegelung > 10%)) wird als Referenztemperatur der Temperaturmittelwert gebildet (iMA 2013: 30).

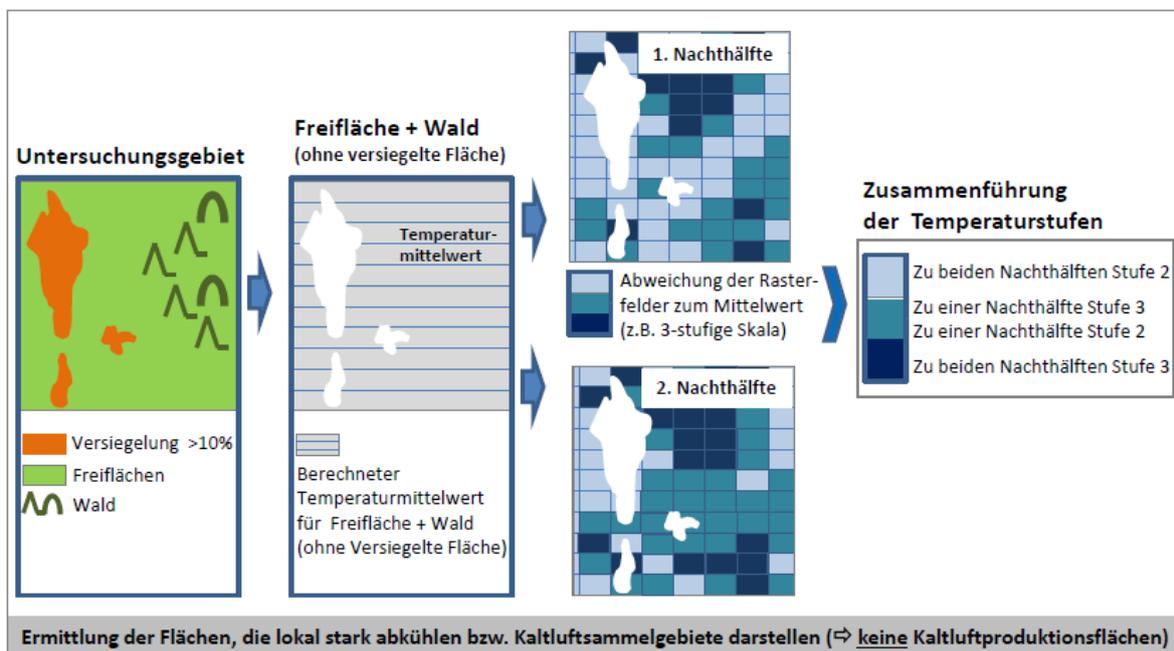
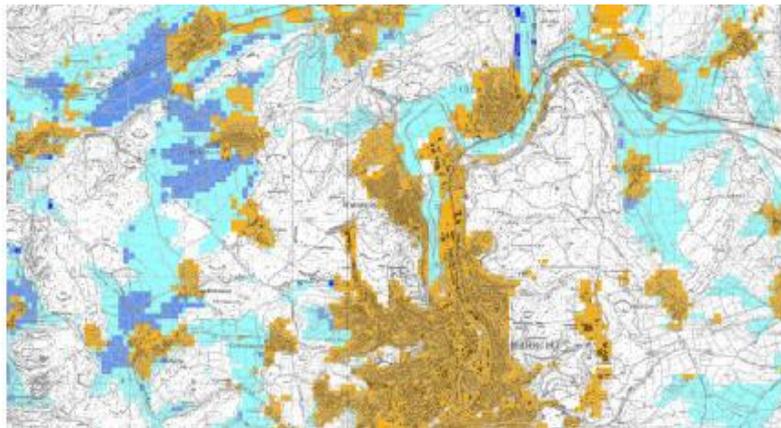


Abbildung 22 | Vorgehen – Mittelwertabweichungen von Wald- und Freiflächen

In einem weiteren Schritt sind für die 1. Nachthälfte (ca. 1 bis 2 Stunden nach Sonnenuntergang) und die 2. Nachthälfte (ca. 3 Stunden nach Sonnenuntergang) für jede Wald- oder Freiflächen-Rechenfläche (Rasterfeld) die Abweichung zu dem berechneten Temperaturmittelwert zu bestimmen. Vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Ausgangsbedingungen der Regionen in Deutschland bietet es sich bei dieser Methodik an, sich von absoluten Zahlen der Temperaturdifferenz zu lösen und auf gestufte Skalen zurückzugreifen. Durch die Zusammenführung der für zwei Zeitpunkte in der Nacht ermittelten Temperaturabweichungen der Wald- und Freiflächen – gegenüber dem Mittelwert - sind die Flächen mit besonderem Kaltluftpotenzial (besonders niedrige Temperaturen während einer gesamten Kaltluftsituation) eindeutig erkennbar und abgrenzbar (vgl. Abbildung 22). Detailliert wird die Vorgehensweise im Anhang in der Dokumentation „Modellgestützte Klimaanalyse und –bewertung für die Regionalplanung in Hessen“ beschrieben (iMA 2013: 30f.).



(Auszug aus iMA 2013: 33)

Zu beiden Terminen Stufe 2

Zu einem Termin Stufe 2 / zu einem Termin Stufe 3

Zu beiden Terminen Stufe 3

**Abbildung 23 | Zusammenführung von räumlichen Temperaturabweichungen**

Zu beachten ist jedoch, dass es sich bei den auf diese Weise ermittelten Flächen nicht um „Kaltluftproduktionsflächen“ handelt, sondern um Flächen, die entweder lokal stark abkühlen oder um Kaltluftsammelgebiete in den Niederungen. Eine entsprechende Auswertung wäre somit beispielsweise auch geeignet, um eine Standortsuche unter dem Gesichtspunkt der Frostgefährdung für Obstbau oder empfindliche Pflanzen durchzuführen oder aber die Wahrscheinlichkeit von stellenweisem Auftreten von Bodenfrost räumlich abzugrenzen. Allerdings erlaubt die Ableitung aus dem bodennahen Temperaturfeld keine Abgrenzung der Kaltluftproduktion, da die Identifikation hangnah gebildeter Kaltluft auf diesem Weg nicht hinreichend zuverlässig möglich ist; so kann Kaltluft an Hängen vergleichsweise warm erscheinen. Nach Aussagen von iMA ist selbst bei einer Abstrahierung der Zielgröße und Vereinfachung die seitens der Regionalplanung gewünschte eindeutige Differenzierung und Abgrenzung nicht möglich, vielmehr bedarf es anderer Zielgrößen und dazu passender Skalen (iMA 2013: 34).

#### **Bodennahes Temperaturfeld:**

Die auf Basis der in Abbildung 22 dargestellten Methode ermittelten Flächen, umfassen die Flächen, die lokal stark abkühlen bzw. **Kaltluftsammelgebiete darstellen**. Sie stellen eine fachliche Grundlage beispielsweise für die Standortsuche unter dem Gesichtspunkt der Frostgefährdung dar.

Wie dargelegt, lässt sich die Kaltluftproduktionsrate alleine durch eine Analyse des bodennahen Temperaturfeldes oft nicht eindeutig identifizieren und abgrenzen. Es ist zu prüfen, ob zur Ermittlung der wirksamen Kaltluftentstehungsgebiete die bodennahen Lufttemperatur- und Windverhältnisse (ggf. für verschiedene Abend-/Nachtzeiträume) zu betrachten sind.

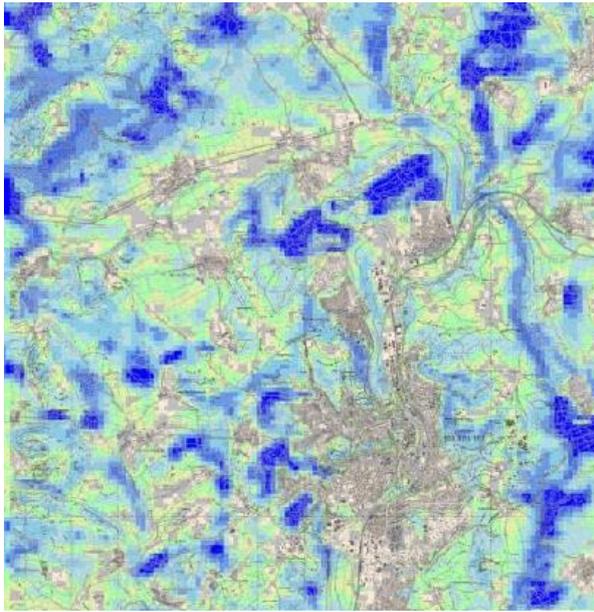
Bislang ist es u. a. üblich, die Kaltluftproduktionsrate empirisch auf der Basis der in den Klimaanalysemodellen verwendeten Landnutzungsverteilung zu berechnen. Ausgehend von spezifischen Kaltluftproduktionswerten für unterschiedliche Landnutzungen kann für jede zu berechnende (Raster)Fläche eine Kaltluftproduktionsrate (vgl. Tabelle 8) entsprechend den prozentualen Häufigkeiten der jeweiligen Landnutzung auf dieser Fläche als Mischwert berechnet werden. Da Hänge oft eine ausgeprägte Kaltluftbildung aufweisen, kann die Berechnung der Kaltluftproduktionsrate nach Aus-

sagen von iMA durch die Berücksichtigung der Geländeneigung modifiziert werden. Allerdings wurde dieser Ansatz bislang nur vereinzelt und dann empirisch verwendet, messtechnische Nachweise oder einheitliche Konventionen sind nicht dokumentiert (iMA 2013: 38).

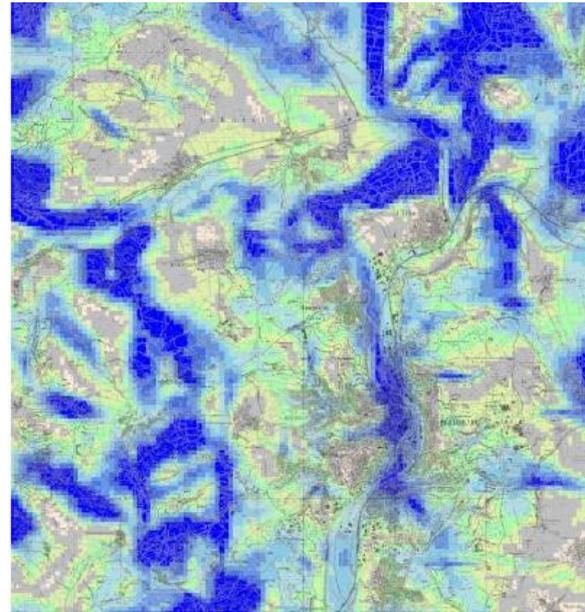
### Kaltluftströmungen

Eine Erkenntnis aus modellgestützten Klimaanalysen ist, dass die Ausbildung überörtlich wirksamer Kaltluftabflüsse in der Regel eine gewisse Zeit benötigt und sich im Lauf der Nacht, ausgehend von zunächst lokalen Kaltluftabflüssen, unterschiedliche größerskalige Strömungssysteme ausbilden können. Damit verbunden ist die Einschätzung, dass überörtlich bedeutsame Kaltluftleitbahnen oft erst in der zweiten Nachthälfte erkennbar werden. Für die Erfassung überörtlich bedeutsamer Phänomene ist die zweite Nachthälfte mindestens ebenso bedeutsam wie die Situation zu Beginn der Strahlungsnacht. Es existieren jedoch auch Strömungssysteme, die sich – bei günstigen Reliefbedingungen und großem Kaltlufteinzugsgebiet – bereits zu Beginn einer Strahlungsnacht wirksam ausbilden. Daran knüpft sich die Frage an, anhand welcher Kriterien überörtlich bedeutsame Kaltluftabflüsse ermittelt und abgegrenzt werden können.

Eine in der räumlichen Planung häufig verwendete Größe zur Bestimmung, Differenzierung und Abgrenzung von Kaltluftströmen ist die Berechnung eines Volumenstromes. Hierzu wird die Windgeschwindigkeit (m/s) in einer Gitterbox (Breite x Länge x Höhe einer durch das Rechengitter gebildeten Zelle) multipliziert mit der Seitenfläche der Box ( $m^2$ ). Es ergibt sich ein Luftvolumen pro Zeit ( $m^3/s$ ), das die Gitterbox durchströmt. Zur Ermittlung der Volumenströme wird i. d. R. die Betrachtung vom Boden bis in eine bestimmte Höhe „z“ aufsummiert (iMA 2013: 34). Im Rahmen der modellgestützten Klimaanalyse am Beispiel der Stadt Marburg wurden die Volumenströme von 0 m bis 10 m über Grund sowie von 0 m bis 50 m über Grund ermittelt. Jede dieser Ermittlungen ermöglicht die Abgrenzung von Bereichen mit einem hohen Volumenstrom. Allerdings zeigt sich hierin auch ein Dilemma: je nach Höhe „z“ bis zu der ein Volumenstrom berechnet wird, ergeben sich z. T. sehr unterschiedliche Strukturen der Strömungsverhältnisse.



**Abbildung 24 | Volumenströme in m<sup>3</sup>/s  
Höhenbereich 0 bis 10 m (ü. G.) (iMA 2013: 35)**



**Abbildung 25 | Volumenstrom in m<sup>3</sup>/s  
Höhenbereich 0 bis 50 m (ü. G.) (iMA 2013: 36)**

Ein Indiz für regionale Luftleitbahnen können Flächen sein, die einen großen Volumenstrom bis in große Höhe und zugleich eine hohe Strömungsgeschwindigkeit aufweisen (vgl. Abbildung 21). Wie die modellgestützte Klimaanalyse für die Stadt Marburg zeigt, sind überörtliche Kaltluftströme oft so mächtig, dass sie Ortslagen im Überdachniveau überströmen. Aufgrund von turbulenten Vermischungen können diese Strömungen zur Durchlüftung von bebauten Ortslagen beitragen. Wenn ein solcher Luftstrom innerhalb des Siedlungskörpers wirksam ist, kann es gerechtfertigt sein, regionalplanerische Festlegungen zur Sicherung der Kaltluftleitbahn auch im Bereich des Siedlungskörpers vorzunehmen. In Hessen kann somit eine Überlagerung eines Vorbehaltsgebietes für besondere Klimafunktionen mit einem Vorranggebiet Siedlung bzw. Industrie und Gewerbe begründet werden.

**Volumenströme:**

Je nach Höhe bis zu der Volumenströme berechnet werden, zeichnen sich unterschiedliche Strukturen der Strömungsverhältnisse ab. Es stellt sich die Frage, welche der Höhen für die Fragestellungen der Regionalplanung relevant sind.

## 5.3 Weiterer Handlungs-/Entwicklungsbedarf

Auch wenn zur sicheren Entscheidungsfindung in der räumlichen Planung geeignete Datengrundlagen und modellgestützte Klimaanalysen (siehe Kapitel 3) zur Verfügung stehen, lassen die so generierten Ergebnisse nicht automatisch eine objektive Abgrenzung und Differenzierung – im Sinne der Regionalplanung – zu.

Ziel muss es daher sein, aus den vorhandenen meteorologischen Daten Zielgrößen und Skalen zu entwickeln, die den Anforderungen der jeweiligen Planungsebene entsprechen. Unerlässlich für die Methodenentwicklung/-forschung ist eine enge Abstimmung und interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Umweltmeteorologen und den für die räumliche Gesamtplanung zuständigen Akteuren.

Die Datengrundlagen, die die Regionalplanung für ihre Entscheidungsfindung benötigt, umfassen u. a. Angaben:

- ob sich ein Siedlungsraum aus sich selbst heraus bzw. dem eigenen, unmittelbaren Umfeld heraus entlasten kann oder ob er auf überörtliche Kaltluftströme angewiesen ist (⇒ Identifizierung der überörtlich bedeutsamen belasteten Wirkungsräume (Belastungsräume)).
- zur Abgrenzung von Kaltluftentstehungsgebieten, welche die relevanten überörtlich bedeutsamen Kaltluftleitbahnen (s. u.) speisen (⇒ Identifizierung, Abgrenzung und Bewertung überörtlich relevanter Kaltluftentstehungsgebiete).
- zur Abgrenzung der - für einen Wirkungsraum - belüftungsrelevanten überörtlichen Kaltluftleitbahnen, einschließlich Aussagen zur Luftqualität (⇒ Identifizierung, Abgrenzung und Bewertung überörtlich relevanter Kaltluftleitbahnen).

### a) Identifizierung der überörtlich bedeutsamen belasteten Wirkungsräume

Im Rahmen des „klamis-Projektes“ wurden bioklimatisch/lufthygienisch belastete Wirkungsräume als raumbedeutsam definiert, wenn sie sich nicht aus sich heraus (inklusive Wirkung von intensiver Durchgrünung) bzw. aus dem eigenen, unmittelbaren Umfeld heraus entlasten können sondern auf überörtlich entlastend wirkende Kaltluftströmungen bzw. –strömungssysteme angewiesen sind.

Methodisch bedarf es eines Instrumentariums zur Identifizierung von belasteten Wirkungsräumen, die auf überörtlich relevante Kaltluftproduktionsflächen und Kaltluftleitbahnen angewiesen sind. Größen, die diskutiert und unter Anwendung von modellgestützten Klimaanalysen untersucht werden sollten, sind die „Luftwechselrate“ und die „Durchdringung“ der Bebauung mit Kaltluft. Darüber hinaus bedarf es klarer Schwellenwerte, um die „lokale Selbstversorgung“ von dem „überörtlichen Zustrom“ zu trennen.

### b) Identifizierung, Abgrenzung und Bewertung überörtlich relevanter Kaltluftentstehungsgebiete

Die bisherige Methode, die Kaltluftproduktion rein empirisch auf Basis von Landnutzungen, evtl. erweitert um Ansätze zur Berücksichtigung von Geländeformen, zu bestimmen, ist unbefriedigend, da sie den tatsächlichen physikalischen Gegebenheiten, die ursächlich für die Produktion von strömender Kaltluft sind, nur begrenzt Rechnung trägt. IMA hat im Rahmen des „klamis-Projektes“ einige Überlegungen formuliert, die Kaltluftproduktion direkt während des Simulationslaufes zu berechnen. Als eine geeignete Größe wären der fühlbare Wärmestrom und die thermische Strahlungsbilanz aus der Energiebilanzberechnung an der Erdoberfläche heranzuziehen. Solange der

Wind stark genug weht (d. h. solange die Luft turbulent durchmischt wird), wird die Abkühlung der bodennahen Luft durch den fühlbaren Wärmestrom dominiert. Bei besonders windschwachen Situationen (z. B. in Kaltluftseen) wird die Abkühlung durch die thermische Strahlungsbilanz dominiert. Noch näher an den physikalischen Antriebmechanismen wäre jedoch eine Auswertung bodennaher Temperaturen im Vergleich zur Umgebungsluft. Möglichkeiten bietet auch eine Wärmestrom-Bilanz im Berechnungsgitter (Wärmestrom u. a. als Produkt von Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit). Geprüft werden sollte auch, ob ggf. erst die Zusammenführung beider Informationen zu einem Kaltluftproduktions-Index die hinreichende Schärfe zur Identifizierung und Abgrenzung von Kaltluftproduktionsgebieten liefert.

#### c) Identifizierung, Abgrenzung und Bewertung überörtlich relevanter Kaltluftleitbahnen

Die Identifizierung von Kaltluftleitbahnen erfolgt u. a. durch die Berechnung von Volumenströmen bis in eine oft subjektiv festgelegte Höhe über Grund. Unter Berücksichtigung der Anforderungen der Regionalplanung bedarf es jedoch der Festlegung einer geeigneten Referenz-Höhe über Grund, bis zu der die Volumenströme zu berechnen sind. Auch wäre ein Mindestwert festzulegen, ab der ein Volumenstrom überhaupt als belüftungsrelevant angesehen werden kann. Als notwendig wird zudem eine Skala angesehen, die eine Differenzierung des Lufttransports und damit eine Abstufung der Bedeutung der Leitbahnen zulässt (als Menge pro Zeiteinheit oder als spezifische Größe bezogen auf eine Querschnittfläche). Die Bewertung der überörtlich relevanten Kaltluftleitbahnen steht im engen Kontext mit den unter Punkt a) aufgeführten Anforderungen zur Ermittlung der „Luftwechselrate“ und der „Durchdringung“.

Im Zusammenhang von Punkt b) und c) ist auch die Frage zu klären, wie die äußere Grenze von Kaltluftströmungssystemen zwischen Belastungs- und Herkunftsraum bestimmt werden kann. Über die mittlere Fließgeschwindigkeit von Kaltluft (z. B. 1 m/s) lässt sich nur sehr grob abschätzen, bis zu welcher Entfernung vom Siedlungsrand „Kaltluftpakete“, die in einem Kaltluftentstehungsgebiet gebildet werden, für die belastete Siedlung wirksam werden können. Sogenannte Rückwärts-trajektorien, mit deren Hilfe die Herkunft von (Kalt)Luft an einem Zielort (hier Modellgebiet Marburg) rechnerisch „rückverfolgt“ werden kann, stellen grundsätzlich ein geeignetes Instrument für die Zuordnung eines belüftungswirksamen Luftpaketes zu einem bestimmten Kaltluftstrom und vor allem zu einem bestimmten bodennahen Herkunftsgebiet dar. Die Untersuchungen für Marburg (iMA 2013: 40) zeigen jedoch, dass aufgrund der komplexen 3-dimensionalen Strömungssysteme die Eindeutigkeit der Zuordnung nicht unbedingt gegeben ist. Hier sind daher weitere Überlegungen anzustellen und weitere methodische Entwicklungen notwendig.

#### d) Identifizierung von Flurwindssystemen

Flurwinde sind besonders bedeutsam wenn orographische Effekte keine signifikante Rolle spielen. In diesen Situationen ist von Bedeutung, bis in welche Entfernung von einem Wirkungsraum der umgebende Raum für die Entwicklung wirksamer Flurwindssysteme relevant ist. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, wie dieser Raum genutzt werden bzw. wie dieser beschaffen sein sollte (Bodenbedeckung, horizontale und vertikale Struktur, Vegetationsanteil etc.).

#### e) Qualitätssicherung / Verifizierung von Modellergebnissen

Wichtig ist auch die Plausibilisierung und Verifizierung von Modellergebnissen anhand von örtlichen Temperatur- und Windmessungen (vgl. Regionalverband Bodensee-Oberschwaben 2009).

## Literaturverzeichnis

**ADV (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland) (2003):** ATKIS-Objektartenkatalog (ATKIS-OK). <http://www.atkis.de/> (Zugriff: 15.12.2011).

**ARGE BAADER-BOSCH (2001):** Ausbauprogramm Flughafen Frankfurt/Main. Unterlagen zum Raumordnungsverfahren. [http://www.dfld.de/PFV\\_Landebahn/ROV/Ordner\\_04/G2\\_TeilC9-13+D+E.pdf](http://www.dfld.de/PFV_Landebahn/ROV/Ordner_04/G2_TeilC9-13+D+E.pdf) (Zugriff: 15.12.2011).

**Barlag, A.-B., Kuttler, W. (1990/91):** The significance of country breezes for urban planning. *Energy and Buildings* 15-16, S. 291-297.

**Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) Hrsg. (2011):** Klimawandelgerechte Stadtentwicklung, Ursachen und Folgen des Klimawandels durch urbane Konzepte begeben Forschungen Heft 149, Berlin.

**Defant, F. (1949):** Zur Theorie der Hangwinde, nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg- und Talwinde. *Arch. Meteor. Geophys. Bioclimatol., Ser. A*, 1, 421–450.

**DIESING + LEHN (Diesing + Lehn Stadtplanung SRL) (2011):** Bebauungsplan „Schwimmbad“. Umweltbericht. <http://www.bad-vilbel.de/pdf/Umweltbericht.pdf> (Zugriff: 15.12.2011).

**Dierer, Silke Cornelia (2002):** Untersuchung von groß- und mesoskaligen Einflüssen auf die Entwicklung polarer Mesozyklonen mit Hilfe des Modells METRAS. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrads der Naturwissenschaften im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. [http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=964432714&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=964432714.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=964432714&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=964432714.pdf) (Zugriff: 16.12.2011).

**DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) (2000):** Numerical models. <http://www.pa.op.dlr.de/homepages/DietrichHeimann/models> (Zugriff: 16.12.2011).

**DWD (Deutscher Wetterdienst) (2007):** Planfeststellungsverfahren 3. Start- und Landebahn. Klimatologische Erheblichkeitsabschätzung (Klimagutachten). [http://www.mucausbau.de/media/downloads/pfv/11\\_KLG\\_1Klimatolog\\_Erheblichkeitsabschätzung.pdf](http://www.mucausbau.de/media/downloads/pfv/11_KLG_1Klimatolog_Erheblichkeitsabschätzung.pdf) (Zugriff: 15.12.2011).

**DWD (Deutscher Wetterdienst) (2008):** Numerische Wettervorhersage beim Deutschen Wetterdienst. [http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/download.php?file=Numerische\\_Wettervorhersage.pdf](http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/download.php?file=Numerische_Wettervorhersage.pdf) (Zugriff: 15.01.2012).

**European Topic Centre on Air and Climate Change (2013):** Long description of model 'METRAS' [http://pandora.meng.auth.gr/mds/showlong.php?id=62&MTG\\_Session=c0490d31d0d0cd7e466b5c0607af743e](http://pandora.meng.auth.gr/mds/showlong.php?id=62&MTG_Session=c0490d31d0d0cd7e466b5c0607af743e) (Zugriff: 26.04.2013).

**Eis, D., Helm, D., Laußmann, D., Stark, K. (2010):** Klimawandel und Gesundheit – Ein Sachstandsbericht. Hrsg.: Robert Koch-Institut, Berlin.

**European Environment Agency (2011):** Long description of model 'METRAS'. [http://pandora.meng.auth.gr/mds/showlong.php?id=62&MTG\\_Session=c0490d31d0d0cd7e466b5c0607af743e#d\\_1](http://pandora.meng.auth.gr/mds/showlong.php?id=62&MTG_Session=c0490d31d0d0cd7e466b5c0607af743e#d_1) (Zugriff: 17.12.2011).

**Feenstra, O. (2011) (Hrsg.):** Hitzeschutzplan Steiermark. Landessanitätsdirektion FA für Gesundheitswesen FA8B, Graz.

**Fiala, D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B., Jendritzky G. (2012):** UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. Int. J. Biometeorol. 56:429–441.

**Fleischhauer, Mark, Bornefeld, Benjamin (2006):** „Klimawandel und Raumplanung - Ansatzpunkte der Raumordnung und Bauleitplanung für den Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel“. In: Raumforschung und Raumordnung. Heft 3/2006, S. 161-171.

**Früh, B., P. Becker, T. Deutschländer, J.-D. Hessel, M. Koßmann, I. Mieskes, J. Namyslo, M. Roos, U. Sievers, T. Steigerwald, H. Turau, U. Wienert (2011):** Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. J. Appl. Meteor. Clim., Vol. 50, No. 1, 167-184.

**GEO-NET (GEO-NET Umweltconsulting GmbH) (2004):** Das mesoskalige Simulationsmodell FITNAH. [http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/download/FITNAH\\_Modellanwendung.pdf](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/download/FITNAH_Modellanwendung.pdf) (Zugriff: 07.12.2011).

**GEO-NET (GEO-NET Umweltconsulting GmbH) (2004a):** Analyse der klimaökologischen Funktionen für das Gebiet des Zweckverbandes Großraum Braunschweig: Teilbereich Kaltlufthaushalt. GEO-NET Umweltconsulting GmbH, in Zusammenarbeit mit: Prof. Dr. G. Gross, Hannover, Auftraggeber Zweckverband Großraum Braunschweig. <http://www.zgb.de/barrierefrei/content/regionalplanung/pdf/Klimagutachten%20Gro%DFraum%20Braunschweig-Endbericht.pdf> (Zugriff: 04.03.2013).

**GEO-NET (GEO-NET Umweltconsulting GmbH) (2007):** Klima- und immissionsökologischen Funktionen im Stadtgebiet Braunschweig. GEO-NET Umweltconsulting GmbH, in Zusammenarbeit mit: Prof. Dr. G. Gross, Hannover, Auftraggeber Stadt Braunschweig. [http://www.braunschweig.de/leben/umwelt\\_naturschutz/klima/Klimafunktionen\\_Gutachten.pdf](http://www.braunschweig.de/leben/umwelt_naturschutz/klima/Klimafunktionen_Gutachten.pdf) (Zugriff: 09. November 2012).

**GEO-NET (GEO-NET Umweltconsulting GmbH) (2009a):** Analyse der Klima- und immissionsökologischen Funktionen in der Stadt Langenhagen. Abschlussbericht. GEO-NET Umweltconsulting GmbH, in Zusammenarbeit mit: Prof. Dr. G. Gross, Hannover, Auftraggeber: Stadt Langenhagen. [http://www.langenhagen.de/media/custom/1620\\_3432\\_1.PDF](http://www.langenhagen.de/media/custom/1620_3432_1.PDF) (Zugriff: 14.12.2011).

**GEO-NET (GEO-NET Umweltconsulting GMBH) (2009b):** Klima- und immissionsökologische Funktion in der Stadt Trier, Entwurf Abschlussbericht. GEO-NET Umweltconsulting GmbH, in Zusammenarbeit mit: Prof. Dr. G. Gross, Hannover, Auftraggeber: Stadt Trier.

**GEO-NET (GEO-NET Umweltconsulting GMBH) (2011a):** MORO Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel Leitfaden „Klimaökologie“, Baden-Baden, 26.01.2011. [http://www.klimamoro.de/fileadmin/Dateien/Veranstaltungen/3\\_Querschnittsworkshop\\_Baden-Baden/Input2\\_OberrheinNordschwarzwald\\_Baden-Baden.pdf](http://www.klimamoro.de/fileadmin/Dateien/Veranstaltungen/3_Querschnittsworkshop_Baden-Baden/Input2_OberrheinNordschwarzwald_Baden-Baden.pdf) (Zugriff 04.04.2013).

**GEO-NET (GEO-NET Umweltconsulting GmbH) (2011b):** Wind – darum dreht es sich. Innovative Lösungen für die Beurteilung der Windenergie. [http://www.geo-net.eu/downloads/rz\\_050905\\_flyer\\_wind\\_de\\_rev01.pdf](http://www.geo-net.eu/downloads/rz_050905_flyer_wind_de_rev01.pdf) (Zugriff: 16.12.2011).

**Hessischer Umweltatlas: Bioklimakarte**

<http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/inhalt-klima.htm> (Zugriff 04.04.2013).

**Hessischer Umweltatlas: Klima – Zukunft**

<http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/inhalt-klima.htm> (Zugriff 04.04.2013).

**iMA (Richter & Röckle GmbH & Co KG) (o. J.):** Ausbreitungsrechnung mit FITNAH

<http://www.ima-umwelt.de/ausbreitungsrechnung/modellpalette/fitnah.html> (Zugriff 26.04.2013).

**iMA (Richter & Röckle GmbH & Co KG) (2001):** Belüftungsanalyse für das Stadtgebiet Sindelfingen (Kaltluft/Flurwind-Situation, Südwestanströmung).

**iMA (iMA Richter & Röckle GmbH & Co KG) (2003):** Ausbreitung von Schadstoffen und Gerüchen in Kaltluftabflüssen – Tracergas-Messungen und Modellrechnungen. [http://www.imaumwelt.de/fileadmin/dokumente/ausbreitungsrechnung\\_downloads/ausbreitung\\_von\\_geruechen\\_in\\_kaltluftabfluessen.pdf](http://www.imaumwelt.de/fileadmin/dokumente/ausbreitungsrechnung_downloads/ausbreitung_von_geruechen_in_kaltluftabfluessen.pdf) (Zugriff: 07.12.2011).

**iMA (iMA Richter & Röckle GmbH & Co KG) (2008):** Vorstellung des Programms GAK. Ein Hilfsmittel zur Abschätzung der Geruchs-Ausbreitung in Kaltluftabflüssen.

[http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/das\\_hlug/fortbildung/Kaltluft\\_GAK\\_Nielinger.pdf](http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/das_hlug/fortbildung/Kaltluft_GAK_Nielinger.pdf) (Zugriff: 14.12.2011).

**iMA (iMA Richter & Röckle GmbH & Co KG) (2011):** Das numerische Simulationsmodell FITNAH.

[http://www.ima-umwelt.de/fileadmin/dokumente/klima\\_downloads/fitnah\\_kurzuebersicht.pdf](http://www.ima-umwelt.de/fileadmin/dokumente/klima_downloads/fitnah_kurzuebersicht.pdf) (Zugriff: 14.12.2011).

**iMA (iMA Richter & Röckle GmbH & Co KG) (2013):** Modellgestützte Klimaanalyse und –bewertung für die Regionalplanung in Hessen, Grundlagen am Beispiel der Stadt Marburg im Rahmen des Modellvorhabens "Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel" der Modellregion „Mittel- und Südhessen“ (klamis).

**IWAS (Internationale Wasserforschungsallianz Sachsen) (2011):** Regionale Klimamodellierung.

<http://www2.ufz.de/index.php?de=21848> (Zugriff: 14.12.2011).

**Janicke (o. J):** Ingenieurbüro Janicke, Ein Programmsystem zur Berechnung von Schadstoffausbreitung in der Atmosphäre. <http://www.janicke.de/de/lasat.html>

**Kolloge, Christoph (2012):** Klimamodelle für die Regionalplanung Kriterienkatalog zur vergleichenden Bewertung. Projektinternes Papier im Rahmen des Modellvorhabens "Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel" der Modellregion „Mittel- und Südhessen“ (klamis), unveröffentlicht.

**Koppe, C. (2005):** Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse. Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau.

**Kuttler, W. (2011):** Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen. Environmental Sciences Europe. Review.

**Thomas Leidinger (2006):** Charakteristische Belastungsstrukturen durch Klima, Luft und Lärm und Möglichkeiten ihrer Bewertung - dargestellt an Beispielen aus Trier und Ludwigshafen vom Fachbereich VI Geographie / Geowissenschaften der Universität Trier zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte Dissertation.

**Mayer, H. und P. Höppe (1987):** "Thermal comfort of man in different urban environments". Theor Appl Climatol 38(1), S. 43–49.

**Matzarakis, Andreas (2007):** Modelle. [http://www.stadtklima.de/DE/D\\_1tools.htm](http://www.stadtklima.de/DE/D_1tools.htm) (Zugriff: 08.12.2011).

**METCON (METCON Umweltmeteorologische Beratung Dr. Klaus Bigalke) (2001):** Abschlussbericht: Entwicklung und Evaluierung eines meteorologischen Modellsystems zur Folgenabschätzung von Umwelteingriffen auf Klima und Luftqualität. Band 1: Hauptteil und Anhänge 1 bis 5. [http://www.metconumb.de/uploads/media/DBU\\_Haupt\\_Anhang1-5.pdf](http://www.metconumb.de/uploads/media/DBU_Haupt_Anhang1-5.pdf) (Zugriff: 16.12.2011).

**Mitschang, Stephan (2011):** Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel Expertise zur Verwertung der Ergebnisse des Modellvorhabens KlimaMORO, unveröffentlicht.

**Mosimann, T., Frey, T., Trute, P. (1999):** Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Bearbeitung der klima- und immissionsökologischen Inhalte im Landschaftsrahmenplan und Landschaftsplan. In: Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie 19 (4): 203 – 275. Hildesheim.

**Muthers, Stefan (2010):** Untersuchung des Zusammenhangs von thermischem Bioklima und Mortalität in Österreich auf der Grundlage von Messdaten und regionalen Klimamodellen, Freiburg im Breisgau.

**ÖKOPLANA (Ökoplana Klimaökologie, Lufthygiene, Umweltplanung) (2007):** Klima- und Luftschadstoffgutachten zum geplanten Gewerbestandort ‚Langes Feld‘ in Kassel-Niederzwehren. <http://www.kassel.de/imperia/md/content/cms04/langesfeld2/klimagutachten-komplett.pdf> (Zugriff: 15.12.2011).

**Ott Carsten:** <http://www.ott-photo.de/>

**PEUTZ CONSULT (2009):** Lufthygienische Untersuchung für den Bebauungsplan Nr. 5477/124. [http://www.duesseldorf.de/planung/bauleit/plaene/altstadt/5477\\_124a/lu\\_5477\\_124.pdf](http://www.duesseldorf.de/planung/bauleit/plaene/altstadt/5477_124a/lu_5477_124.pdf) (Zugriff: 15.12.2011).

**Q.MET GMBH (2011):** Lexikon. Flurwind. <http://www.wetter.net/lexikon/flurwind.html> (Zugriff: 15.12.2011).

**Regionalverband Bodensee-Oberschwaben Hrsg. (2009):** Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO), Wissenschaftlicher Abschlussbericht - Band 2. [http://www.bodenseeoberschwaben.de/upload/REKLIBO\\_Abschlussbericht\\_Band2\\_532.pdf](http://www.bodenseeoberschwaben.de/upload/REKLIBO_Abschlussbericht_Band2_532.pdf) (Zugriff: 15.12.2011).

**Regionalverband Nordschwarzwald, Regionalverband Mittlerer Oberrhein Hrsg. (o.J.):** Leitfaden zur Berücksichtigung klimatischer Ausgleichsfunktionen in der räumlichen Planung am Beispiel der Region Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald. Erstellt durch GEO-NET Umweltconsulting GmbH.

**Regionalverband Südlicher Oberrhein Hrsg. (2006):** Regionale Klimaanalyse Südlicher Oberrhein (REKLISO), Wissenschaftliche Bearbeitung durch Prof. Dr. Eberhard Parlow, Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, Universität Basel Prof. Dr. Dieter Scherer und Dr. Ute Fehrenbach, Fachgebiet Klimatologie, Technische Universität Berlin, [http://www.region-suedlicher-oberrhein.de/de/regionalentwicklung/e\\_klimaanalyse.php](http://www.region-suedlicher-oberrhein.de/de/regionalentwicklung/e_klimaanalyse.php) (Zugriff: 07.02.2013).

**Reuter, Ulrich (2012):** Stadtklima Stuttgart. Themenhefte. Heft 2: Verkehrsbedingte Schadstoffbelastung im Zusammenhang mit der Planung "Stuttgart 21". [http://www.stadtklimastuttgart.de/index.php?klima\\_s21\\_themenhefte\\_h2](http://www.stadtklimastuttgart.de/index.php?klima_s21_themenhefte_h2) (Zugriff: 15.12.2011).

**Robinson, P.J. (2001):** On the Definition of a Heat Wave. Journal of Applied Meteorology 40 (4): 762 – 775.

**Röckle, R. & C.-J. Richter (2001):** Ausbreitung von Gerüchen in Kaltluftabflüssen.

[http://www.imaumwelt.de/fileadmin/dokumente/ausbreitungsrechnung\\_downloads/ausbreitung\\_von\\_geruechen\\_in\\_kaltluftabfluessen.pdf](http://www.imaumwelt.de/fileadmin/dokumente/ausbreitungsrechnung_downloads/ausbreitung_von_geruechen_in_kaltluftabfluessen.pdf) (Zugriff: 15.12.2011).

**Rothfusz, L. P. (1990).** The Heat Index "Equation" (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index). Techn. Ber. NWS Technical Attachment SR 90-23.

**Schmidt-Kessen, W. (1990):** Humanmedizinische Klimatologie. In: Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponenten im Bioklima des Menschen. Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell. Akademie für Raumforschung und Landesplanung. Beiträge 114. Hannover.

**Schönwiese, Christian-Dietrich (1994):** Klimatologie. Stuttgart: Ulmer.

**Sievers, Uwe (2005):** Das Kaltluftabflussmodell KLAM\_21. Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 227. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.

**Stadt Berlin (2009):** Klimamodell Berlin. Analysekarten (Ausgabe 2009)

<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e.../ka410.doc> (Zugriff: 14.12.2011).

**Staiger, H., Laschewski, G., Grätz, A. (2012):** The perceived temperature – a versatile index for assessment of the human thermal environment. Part A: Scientific basis. Int. J. Biometeorol. 56, S. 165-176.

**Statista (2013):** <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/152879/umfrage/in-staedten-lebende-bevoelkerung-in-deutschland-und-weltweit/> (Zugriff: 20.03.2013).

**Tinz, B., Freydank, E., Hupfer, P. (2008):** Hitzeperioden in Deutschland im 20. Und 21. Jahrhundert, in: Loza'n u.a.: Warnsignal Klima. Gesundheitsrisiken, zitiert auf <http://wiki.bildungsserver.de> (Zugriff: 30.03.2013).

**TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt u. Geologie) (2011):** Klimamodelle und Klimaprojektion. [http://www.tlug-jena.de/de/tlug/umwelthemen/klima/klimaforschung\\_anwendung/klimamodelle](http://www.tlug-jena.de/de/tlug/umwelthemen/klima/klimaforschung_anwendung/klimamodelle) (Zugriff: 12.12.2011).

**Universität Hamburg (2003):** Microscale Model MITRAS.

<http://www.mi.uni-hamburg.de/Microscale-M.358.0.html> (Zugriff: 12.12.2011).

**Universität Hohenheim (2005):** Wissenschaftliche Untersuchungen zur GIRL-Anwendung unter den speziellen Bedingungen der Baden- Württembergischen Schweineproduktion ("GIRL-Projekt BW"). Abschlussbericht. [http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/31682/Abschlussbericht\\_GIRLProjektBW.pdf?command=downloadContent&filename=Abschlussbericht\\_GIRL-ProjektBW.pdf](http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/31682/Abschlussbericht_GIRLProjektBW.pdf?command=downloadContent&filename=Abschlussbericht_GIRL-ProjektBW.pdf) (Zugriff: 12.12.2011).

**Viadoy, Jaime E.H. (2002):** Ausbreitungsmodelle. GIS-Seminar WS 2001/2002. [http://www.ikg.uni-bonn.de/vorlesungsarchiv/seminar\\_Geoinfo\\_7\\_Sem\\_ws\\_01\\_02/Vortraege/viadoy\\_02\\_01\\_07.ppt](http://www.ikg.uni-bonn.de/vorlesungsarchiv/seminar_Geoinfo_7_Sem_ws_01_02/Vortraege/viadoy_02_01_07.ppt) (Zugriff: 07.01.2012).

**VDI Richtlinie 3785, Blatt 1 (2008):** Umweltmeteorologie Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.

**VDI Richtlinie 3787, Blatt 1 (1997):** Umweltmeteorologie Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.

**VDI Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003):** Umweltmeteorologie Lokale Kaltluft. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.

**VDI Richtlinie 3787, Blatt 9 (2004):** Umweltmeteorologie Berücksichtigung von Klima und Luft-hygiene in räumlichen Planungen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.

**VDI Richtlinie 3787, Blatt 10 (2010):** Umweltmeteorologie Human-biometeorologische Anforderungen im Bereich Erholung, Prävention, Heilung und Rehabilitation. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.

**Werner, G., Kresz, R., Mai, H., Reuter, W., Roth, D., Schulz, V. (1979) in VDI 3787, Blatt 1:** Regionale Luftaustauschprozesse für die räumliche Planung. Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn.

**wiki.bildungsserver:** (<http://wiki.bildungsserver.de/Klimawandel>) (Zugriff: 20.03.2013).

**Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (2011):** Methoden der Informationsgewinnung für die Planung. Das Kaltluftabflussmodell KALM.

[http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/kap\\_4/kap\\_4-3-3.htm](http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/kap_4/kap_4-3-3.htm) (Zugriff: 16.12.2011).

**Zardi, D., C. D. Whiteman (2012):** Diurnal Mountain Wind Systems. In F. Chow et al. (Ed.): Mountain Weather Research and Forecasting - Recent Progress and Current Challenges. Springer, Berlin, S. 35-119.

**Zimmermann, R. (1988):** Zur Ermittlung und Bewertung des Klimas im Rahmen der Landschafts-(rahmen-)planung.- Untersuchungen zur Landschaftsplanung Bd. 14, Karlsruhe.

## 6. Anhang

### A) Glossar

#### Glossar

Autochthone Wetterlage	Hochdruckwetter, austauscharme Strahlungswetterlage.
Allochthone Wetterlage	Durch großräumige Luftströmung bestimmte Witterung.
Belastungsraum	⇒ Wirkungsraum, der bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet ist.
Bergwind	= Talabwind /VDI 3787 (Blatt 1) 1997:39 Nachts kühlt sich die Luft in Tälern stärker ab als über der Ebene. Die vergleichsweise schwere Kaltluft fließt zunächst die Berghänge hinunter und schließlich talabwärts. Der Bergwind beginnt 2 bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang und dauert bis kurz nach Sonnenaufgang.
Biometeorologie	Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit der Wirkung des Klimas auf den Menschen beschäftigt.
Frischluff	Je nach lufthygienischer Eigenschaft können Luftströmungen in einem Einwirkungsbereich die Luftqualität positiv/negativ beeinflussen. Ist die Luft unbelastet von Luftschadstoffen, spricht man von „Frischluff“.
Grundsatz der Raumordnung	Aussagen zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raums als Vorgaben für nachfolgende Abwägungs- oder Ermessensentscheidungen (siehe auch ⇒Ziel der Raumordnung).
Gunstraum	Ein Gunstraum ist ein Gebiet, das weder thermisch noch lufthygienisch belastet ist.
Hangwind	Hangabwinde und Hangaufwinde sind Teiglieder der Berg- und Talwindzirkulation. Sie setzen schon kurz nach Beginn der abendlichen Abkühlung bzw. nach Einsetzen der Sonneneinstrahlung am Morgen ein. Nach einigen Stunden Verzögerung treten dann Ausgleichsströmung zwischen Tal und Vorland als ⇒Bergwind (nachts) bzw. ⇒Talwind (tags) ein.
Heißer Tag (Hitzetag)	Tag an dem das Maximum der Lufttemperatur $\geq 30$ Grad Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) beträgt. Z.T. wird auch der Begriff „Hitzetag“ genutzt.
Herkunftsraum	In erster Linie ein Gebiet, in dem die ⇒ Kaltluft entsteht. Geländeform, Exposition, Art der Oberfläche und deren physikalische Eigenschaften, die durch Bodenart und Bodenbeschaffenheit festgelegt sind, bestimmen die jeweiligen Abkühlungsraten der Luft. In zweiter Linie gehören dazu auch die Kaltluftleitbahnen.
Inversion	Unter Inversion versteht man in der Meteorologie die Umkehr des normalerweise mit der Höhe abnehmenden Verlaufs der Lufttemperatur. Vom Erdboden aufsteigende Warmluft kann eine solche Inversionsschicht nicht durchdringen. Somit stellt eine Inversion eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tief liegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert.

Kaltluft (lokale)	Luft, die aufgrund des Energieumsatzes an der Erdoberfläche eine niedrigere Temperatur als die Luft in der Umgebung aufweist. Die nachts durch Ausstrahlung abkühlende Erdoberfläche kühlt ihrerseits die darüber liegende bodennahe Luftschicht ab. Es handelt sich dabei um einen relativen und nicht um einen absoluten Bezug.
Kaltluftabfluss	Unter Kaltluftabfluss versteht man den orographisch bedingten nächtlichen Abfluss von örtlich gebildeter Kaltluft, dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt. Dies trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen auf.
Kaltlufteinzugsgebiet	Das Kaltlufteinzugsgebiet umfasst nur diejenigen Kaltluftproduktionsgebiete, in denen Kaltluft gebildet wird, die für einen bestimmten Standort oder eine Siedlung (Wirkungsraum) von Bedeutung sind. (VDI 3787 (Blatt 5) 2003:22)
Kaltluftentstehung/ Kaltluftbildung (Kaltluftproduktion)	Bei windschwachen Strahlungswetterlagen infolge nächtlicher Ausstrahlung örtlich entstehende Kaltluft. Die durch Ausstrahlung abkühlende Erdoberfläche kühlt ihrerseits die darüber liegende bodennahe Luftschicht ab. Es bildet sich bodennahe Kaltluft. Die Kaltluftbildung ist abhängig von den physikalischen (z. B. Wärmeleitung) und topographischen (z. B. Bewuchs, Bebauung, Geländeform) Eigenschaften der Erdoberfläche.
Kaltluft(leit)bahn	Kaltluft(leit)bahnen sind natürliche oder planerisch geschaffene Bahnen mit entsprechendem Gefälle, die Kaltlufteinzugsgebiete mit ihrem Wirkungsraum verbinden. In Kaltluft(leit)bahnen sammeln sich die hanggebundenen ⇒ Kaltluftabflüsse.
Kaltluftproduktionsrate	Bei wolkenarmen und windschwachen Wetterlagen führt die nächtliche Ausstrahlung der Erdoberfläche zur ⇒ Kaltluftbildung. Die Angabe der Stärke der Kaltluftbildung erfolgt über das pro Sekunde abgekühlte Luftvolumen pro Grundfläche. Alternativ verwenden Kaltluftabflussmodelle auch eine Kälteproduktionsrate (Energieflussdichte) an der Oberfläche in Watt pro Quadratmeter.
Kaltluft- Volumenstromdichte	Die Kaltluft-Volumenstromdichte ist ein Maß für die Menge der abfließenden Kaltluft. Sie wird angegeben in Kubikmeter pro Sekunde und Querschnitt der Breite 1 Meter über die gesamte betrachtete Luftschichtmächtigkeit.
Klimaaktive Flächen	Klimaaktive Flächen beziehen sich in allgemeiner Weise auf die thermischen wie auch auf die reliefbedingten Voraussetzungen des lokalen Luftaustauschs (Kaltluftentstehungsgebiet, Kaltluft(leit)bahnen). Für die Regional- und Bauleitplanung werden Flächen als klimaaktiv bezeichnet, wenn sie eine besondere Funktion zur Entlastung bioklimatisch/lufthygienisch belasteter Räume wahrnehmen.
Klimafaktoren (klimatologische Wirkungsfaktoren)	Klimafaktoren sind Faktoren, welche die Klimaelemente (Temperatur, Feuchte usw.) und damit das Klima eines Ortes beeinflussen. Die wesentlichen natürlichen Klimafaktoren sind geographische Breite, topographische Höhe und Exposition, Entfernung vom Meer und anderen größeren Wasserflächen, Bodenart und Bodenbedeckung. Hinzu kommen die durch den Menschen beeinflusste Faktoren wie Bebauung und Abwärme (z. B. durch Heizungen, Straßenverkehr).

Klima-Michel-Modell	Das Klima-Michel-Modell ist ein Energiebilanzmodell für den menschlichen Organismus. Es verknüpft die atmosphärischen Bedingungen mit dem Energieumsatz eines „Standard-Menschen“, dem Klima-Michel. Beschrieben wird das thermische Empfinden des Klima-Michels mit der Gefühlten Temperatur (siehe Anhang Kapitel B).
Klimarelevante Flächen	Alle Flächen im Wirkungsgefüge von Wirkungs- und Herkunftsraum, die aus bioklimatischer bzw. lufthygienischer Sicht als belastet oder entlastend gelten können.
Klimatop	Räumliche Einheiten, in denen die mikroklimatisch wichtigsten Faktoren relativ homogen sind.
Luftaustausch	Belüftungsgrad und die potenzielle Lufterneuerung eines Raums.
Luftleitbahn	Oberbegriff für Geländeformen, die bei $\Rightarrow$ autochthonen und/oder $\Rightarrow$ allochthonen Wetterlagen zur Durchlüftung beitragen. Eine durch Ausrichtung, Oberflächenbeschaffenheit und Breite bevorzugte Fläche für den Luftmassentransport, bei der das Relief von untergeordneter Bedeutung ist. Entscheidend sind die durch Wetterlagen bedingte übergeordnete Windrichtung und/oder die thermisch induzierten Windsysteme, die sich durch Temperatur- und Luftdruckgegensätze zwischen stärker erwärmten Innenstadtbereichen und kühleren Umlandbereichen bilden (Flurwind) sowie Kaltluftströmungen (z. B. Tal- und Bergwinde, vgl. VDI 3785 Blatt 1: 6).
Luftwechselrate	Quantitatives Maß für den Luftaustausch.
Raumordnungsverfahren	Verwaltungsinternes Verfahren zur Prüfung der Übereinstimmung eines Vorhabens mit den Zielen und Grundsätzen der Raumordnung und der Landesplanung (siehe § 15 Raumordnungsgesetz).
Sommertag	Ein Tag an dem das Maximum der Lufttemperatur $\geq 25$ °C beträgt.
Stadtklima (urbanes Klima)	Unter Stadtklima versteht man das gegenüber dem Umland durch die Bebauung und Emissionen (wie z. B. Luftschadstoffe oder Abwärme) modifizierte Klima von Städten und Ballungsräumen. Das Stadtklima ist insbesondere durch die Eigenschaften von Baustoffen bezüglich ihrer Wärmespeicherung und Reflexion von Sonnenstrahlung, durch die starke Versiegelung des Bodens und das Fehlen von Vegetation gekennzeichnet.
Talwind	Talaufwärts gerichteter Wind, der tagsüber aufgrund der Sonneneinstrahlung auftritt.
Tal <u>ab</u> wind	= Bergwind
Tropennacht	Nacht, in der das Minimum der Lufttemperatur $\geq 20$ °C beträgt.
überörtlich	Die überörtliche Planung (Regionalplanung) ist der Planung von Städten und Gemeinden (kommunalen Bauleitplanung) vorgelagert. Von überörtlicher Bedeutung sind Planungen, die die Flächen mehrerer Kommunen berühren bzw. Auswirkungen auf andere Kommunen haben.
Umweltmeteorologie	Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit der Wirkung des Klimas auf die Umwelt beschäftigt.

Wärmebelastung	Bei Wärmebelastung werden die Thermoregulationsmechanismen des Organismus gefordert.
Wärmeinsel	Typische Erscheinung des Stadtklimas, dessen Entstehung u. a. von - einer erhöhten Wärmespeicherung, einer reduzierten effektiven Ausstrahlung sowie einer Veränderungen des Wasserhaushaltes der Oberflächen abhängig ist (VDI 3785 Blatt 1:6).
Wirkungsraum	Raum, <u>in den</u> die Kaltluft oder Frischluft eindringt. Ist er bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet wird er auch als ⇒ Belastungsraum oder belasteter Wirkungsraum bezeichnet.
Zielabweichungsverfahren	Sofern von den im Regionalplan festgelegten Zielen abgewichen werden soll, ist ein förmliches Zielabweichungsverfahren erforderlich (Hessen: siehe § 8 Hessisches Landesplanungsgesetz).
Ziel der Raumordnung	Verbindliche Vorgaben in Form von räumlich und sachlich bestimmten oder bestimmaren und vom Träger der Raumordnung abschließend abgewogenen textlichen oder zeichnerischen Festlegungen in Raumordnungsplänen zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raums.

## B) Humanbioklimatische Belastung – Beurteilungsgrößen (Indices)

Die Forderung, Beurteilungsgrößen für die thermische Belastung insbesondere für die überwärmten städtischen Bereiche bereit zu stellen, erklärt sich aus der gesetzlichen Verpflichtung, das Schutzgut „Klima“ in der Planung zu berücksichtigen. Bisher existieren jedoch keine gesetzlichen Beurteilungs- und Bewertungsvorschriften (LEIDINGER 2006: 50).

Um die Wärmebelastung für einen Menschen abzuschätzen, werden von den Experten daher Wärmebilanzmodelle verwendet. Diese berechnen unter Berücksichtigung aller für das Wärmeempfinden relevanten Größen – wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, kurz- und langwellige Strahlungsflüsse sowie Bekleidung und körperliche Aktivität – die physiologisch relevanten Indices. Die Vielzahl der vorhandenen Wärmebilanzmodelle und die Tatsache, dass bis heute kein allgemeiner, international anerkannter Standard existiert, stehen einer Vergleichbarkeit der zahlreichen Studien zur thermischen Belastung bisweilen im Weg. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Parameter entwickelt, die über eine Kombination verschiedener meteorologischer Parameter die mehr oder weniger physiologisch wirksame thermische Belastung beschreiben. Einige dieser Größen (wie Wind-Chill-Factor, Heat-Index) sind vergleichsweise einfach aufgebaut und verwenden nur wenige Parameter, andere beschränken sich in ihrer Gültigkeit nur auf bestimmte Bereiche des thermischen Empfindens.

Der **Wind-Chill-Factor** beschreibt die kombinierte Wirkung von hohen Windgeschwindigkeiten mit tiefen Temperaturen.

Der **Heat-Index** bzw. die „apparent temperature“ basiert in der vielfach verwendeten vereinfachten Form nach ROTHFUSZ (1990) nur auf der Lufttemperatur und der relativen Feuchte (MUTHERS 2010: 10).

Komplexere Indices hingegen versuchen alle relevanten meteorologischen Parameter zu berücksichtigen und dabei auch physiologische Komponenten zu integrieren (MUTHERS 2010: 10).

Häufig anzutreffen ist der **Predicted Mean Vote (PMV)** nach FANGER. Hierbei handelt es sich um einen Index, der den Grad des Komforts bzw. Diskomforts ausdrücken soll. Die Bewertungsskala (sehr kalt bis sehr warm) wurde ursprünglich für Innenraumbedingungen empirisch entwickelt und setzt voraus, dass sich Körperkern- und Hauttemperatur im Komfortbereich befinden (MUTHERS 2010: 10).

Vor dem Hintergrund, dass es insbesondere bei Nichtfachleuten von abstrakten Größen, wie dem PMV (s. o.), zu Verständnisschwierigkeiten kommen kann, haben MAYER und HÖPPE (1987) die mit der Maßeinheit „Grad Celsius“ versehene und deshalb leichter nachvollziehbare Größe „Physiologisch Äquivalente Temperatur“ (engl. **Physiological Equivalent Temperature, PET**) eingeführt (MÜLLER, ET AL. 1999, VDI 3787 (Bl.2) 2008: 14). Die PET wurde im Zuge des Münchener Energiebilanz-Modells für Individuen (MEMI) von MAYER und HÖPPE auf Basis der Energiebilanzgleichung des Menschen entwickelt. Das Münchener Energiebilanzmodell basiert, wie die Behaglichkeitsgleichung nach FANGER, auf der Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers für stationäre Bedingungen. Abweichend von den Ansätzen von FANGER gehen in das Modell MEMI reale Werte der Hauttemperatur und der Schweißverdunstung ein. Es ermöglicht so für eine Person bestimmten Alters, Geschlechts, Gewichts, Tätigkeit u. a. bei gegebenen meteorologischen Bedingungen die Hauttemperatur, Körperkerntemperatur und auch den Befeuchtungsgrad der Haut (unter Einfluss von Bekleidung) zu bestimmen (LEIDINGER 2006: 58).

Der Deutsche Wetterdienst verwendet zur Bewertung der thermo-physiologischen Belastung die **Gefühlte Temperatur (GT)**, die als **Belastungsindex aus dem Klima-Michel-Modell** (s. u.) hervorgeht. Auch die GT ist über die Lufttemperatur einer Standardumgebung definiert und verwendet als Einheit „Grad Celsius“ (STAIGER ET AL. 2012).

Eine neuere Entwicklung im Bereich der human-biometeorologischen Indices stellt der **Universal Thermal Climate Index (UTCI)** dar (FIALA ET AL. 2012). Seine Entwicklung wurde im Jahr 2000 von der International Society of Biometeorology mit dem Ziel initiiert, einen universellen, für alle Klimate der Erde anwendbaren Index zu entwickeln (MUTHERS 2010: 11). Der Vorteil des UTCI ist, dass er dafür konstruiert ist, in allen Klimazonen und zu allen Jahreszeiten seine Gültigkeit zu behalten; bei negativen Temperaturen wird jedoch der Kältestress überschätzt. Das DWD hat daher entschieden, die auf ähnlichen physikalischen Grundlagen basierende "Gefühlte Temperatur" zu verwenden, da diese Temperatur vor allem in gemäßigten Breiten realistischer ist.

### Klima-Michel-Modell (KMM)

Zur Berechnung der thermischen Wirkungskomponenten des Wetters und ihre Bewertung – auch der - Strahlungsbedingungen im Freien - wurde das Klima-Michel-Modell entwickelt. Es geht auf eine Behaglichkeitsgleichung von FANGER (1972) und dessen PMV-Wert zurück und beinhaltet eine luftfeuchteabhängige Korrektur für feuchtwarme Bedingungen nach GAGGE (1986). Durch die Berücksichtigung der für den menschlichen Wärmehaushalt relevanten Größen (siehe Abbildung rechts) kann mit dem Modell, das Temperaturempfinden eines Durchschnittsmenschen hinsichtlich Behaglichkeit, Wärmebelastung und Kältestress zu beschreiben. Der Name „Michel“ weist auf den Durchschnittsmenschen hin (männlich, 35 Jahre alt, 1.75 m groß, 75 kg schwer), damit sind jedoch die Bevölkerungsgruppen „Kinder“, „Frauen“, „Alte“ und „Kranke“ nur bedingt repräsentiert.

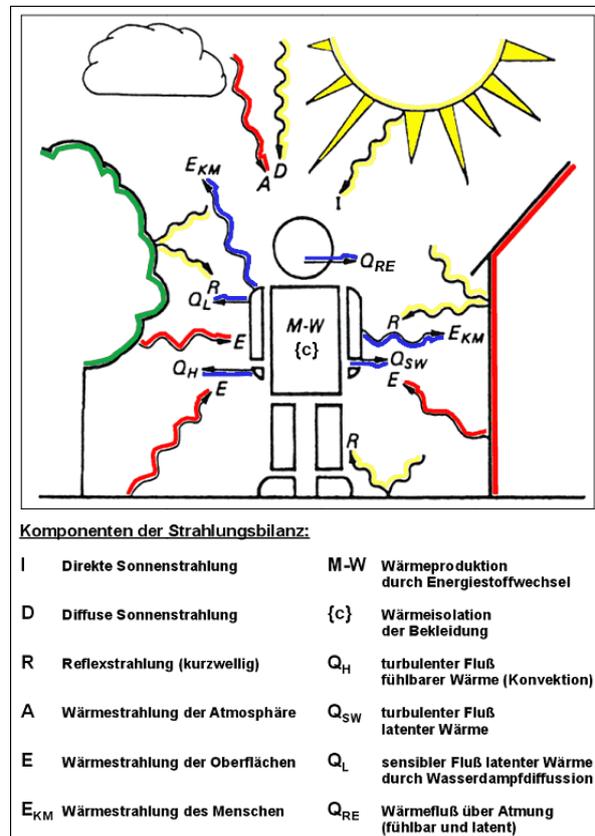


Abbildung 26 | Klima-Michel-Modell (DWD)

## C) Modellgestützte Klimaanalyse und –bewertung für die Regionalplanung in Hessen, Grundlagen am Beispiel Marburg

Erstellt durch iMA Richter & Röckle (steht als separates Dokument zur Verfügung)

		 Richter & Röckle Immissionen Meteorologie Akustik
<b>Auftraggeber:</b>	Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung Kaiser-Friedrich-Ring 75 65185 Wiesbaden	 Deutsche Akreditierungsstelle D-PL-14202-01-00  Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüf- verfahren  Akkreditiert für Ausbreitungsrechnung n. TA Luft und GIBL Messstelle n. § 26 BImSchG
	<b>Modellgestützte Klimaanalyse und –bewertung für die Regionalplanung in Hessen Grundlagen am Bsp. Marburg</b>	
	<b>Forschungsvorhaben „klamis“: Klimaanpassung in Mittel- und Südhessen</b>	
<b>Projekt-Nr.:</b>	12-09-04-S	
<b>Umfang:</b>	44 Seiten	
<b>Datum:</b>	27.04.2013	
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Dipl.-Met. Dr. Jost Nielinger</b> <small>(Anerkannter Berater der Meteorologie DMG e.V.)</small> <b>Dipl.-Met. Werner-Jürgen Kost, FRMetS, CMet</b> <small>(Anerkannter Berater der Meteorologie DMG e.V., Fellow of The Royal Meteorological Society (UK))</small> <b>Dipl.-Met. Dr. Markus Hasel</b>	
	<b>iMA - Immissionen · Meteorologie · Akustik</b> Richter & Röckle GmbH & Co. KG Niederlassung Stuttgart Hauptstraße 54 D-70839 Gerlingen Tel. 07 156 / 4389 15 Fax: 07 156 / 5026 18 E-Mail: <a href="mailto:nielinger@ima-umwelt.de">nielinger@ima-umwelt.de</a> Internet: <a href="http://ima-umwelt.de">ima-umwelt.de</a>	