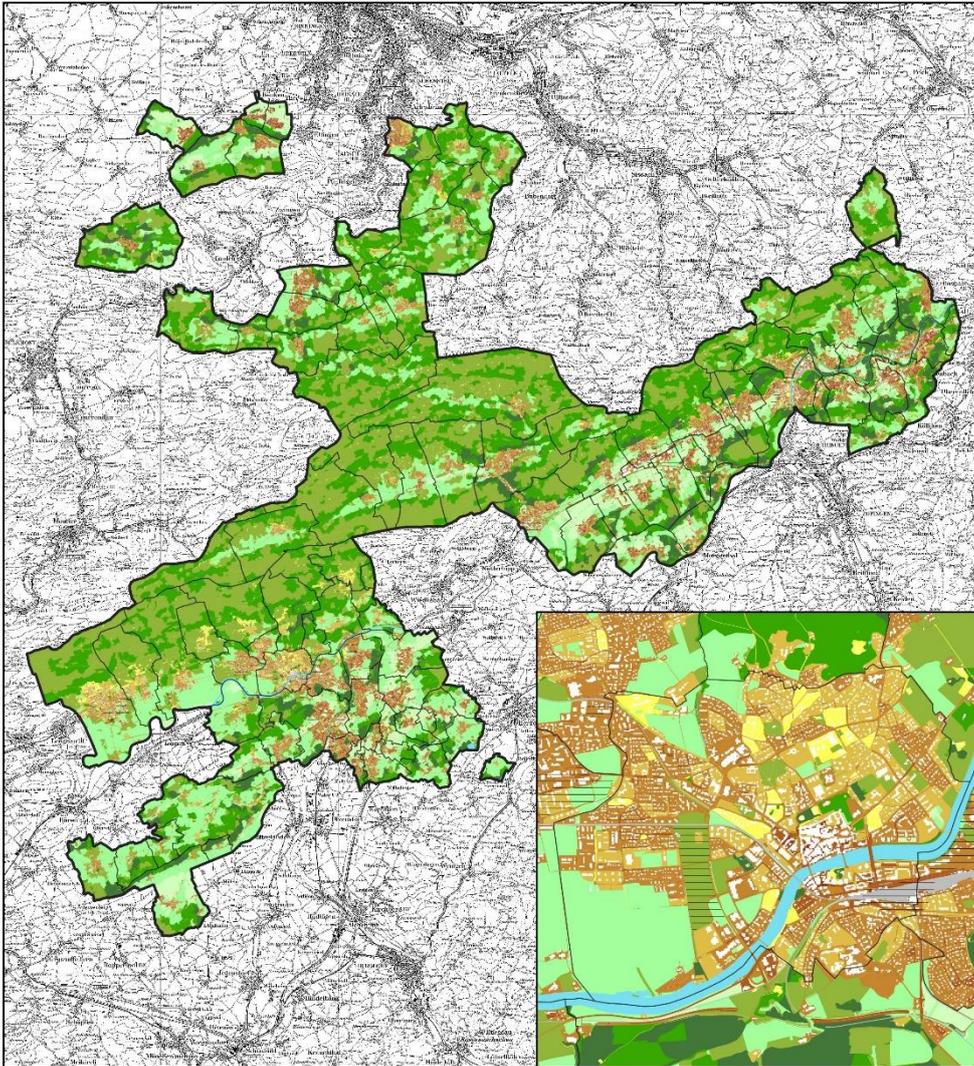


# Erstellung einer Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte für den Kanton Solothurn



Erstellt von:

**GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover**



Im Auftrag von:

**Kanton Solothurn, Amt für Umwelt (AfU)**



September  
2023



# Impressum

## **Projekttitlel**

Erstellung einer Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte für den Kanton Solothurn

## **Auftraggeber**

Amt für Umwelt (AfU)  
Werkhofstrasse 5  
4509 Solothurn  
Abteilung Luft/Lärm

## **Auftragnehmer**

GEO-NET Umweltconsulting GmbH  
Grosse Pfahlstrasse 5a  
30161 Hannover  
Deutschland

## **Autorin**

Josephine Förster, GEO-NET Umweltconsulting GmbH

## **Projektleitung**

Pascal Barrière, Amt für Umwelt

## **Projektbegleitung**

Markus Chastonay, Amt für Umwelt  
Doris Vath, Amt für Umwelt  
Gabriel Zenklusen, Amt für Umwelt

Odile Bruggisser, Amt für Raumplanung  
Sacha Peter, Amt für Raumplanung  
Hannes Zeltner, Amt für Raumplanung  
Stefan Zemp, Amt für Raumplanung

Oliver Jeker, Amt für Geoinformation  
Peter Senn, Amt für Geoinformation

## **Stand**

11. September 2023





# Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>III</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>IV</b>
<b>GLOSSAR .....</b>	<b>V</b>
<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>7</b>
<b>2. FACHLICHE UND REGIONALKLIMATISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Der Wärmeinseleffekt .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 Regionale Klimatologie im Grossraum Solothurn.....</b>	<b>11</b>
2.2.1 Das aktuelle Klima in Solothurn.....	11
2.2.2 Klimawandel .....	12
<b>3. METHODE DER MODELLGESTÜTZTEN KLIMAANALYSE .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Eingesetztes Stadtklimamodell .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Vorgegebene Randbedingungen .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 Eingangsdatenaufbereitung .....</b>	<b>19</b>
<b>3.4 Herausforderungen und Unsicherheiten.....</b>	<b>26</b>
<b>4. ERGEBNISSE DER MODELLIERUNG .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1 Nachtsituation .....</b>	<b>29</b>
4.1.1 Nächtliches Temperaturfeld .....	29
4.1.2 Kaltluftströmungsfeld .....	31
4.1.3 Klimaanalysekarte Nacht .....	36
<b>4.2 Tagsituation.....</b>	<b>39</b>
<b>5. PLANUNGSHINWEISKARTEN .....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 Bewertungsmethoden .....</b>	<b>43</b>
5.1.1 Standardisierung der Parameter (z-Transformation) .....	43
5.1.2 Bewertung von Siedlungs- und Verkehrsflächen (Wirkungsraum).....	44
5.1.3 Bewertung von Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) .....	45
5.1.4 Nicht bewertungsrelevante Kriterien .....	49
<b>5.2 Planungshinweiskarten .....</b>	<b>50</b>
5.2.1 Nachtsituation .....	50
5.2.2 Tagsituation .....	52
<b>5.3 Massnahmenkatalog Siedlungsklima .....</b>	<b>55</b>
<b>5.4 Hinweise zur Wirksamkeit von Massnahmen .....</b>	<b>68</b>
<b>6. FAZIT UND AUSBLICK.....</b>	<b>74</b>
<b>QUELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>75</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze Flurwind.....	9
Abbildung 2: Vorherrschende Winde bei austauscharmen Wetterlagen: Die Wirkung des Reliefs und der städtischen Wärmeinsel .....	10
Abbildung 3: Klimadiagramm für die Station in Koppigen, Normperiode 1991-2020 (MeteoSchweiz 2023a) .....	11
Abbildung 4: Entwicklung der Sommertemperaturen (Juni, Juli, August) für die Schweiz ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 – 1990 (MeteoSchweiz 2023c) .....	12
Abbildung 5: Entwicklung der mittleren Sommertemperatur (JJA) im Kanton Solothurn (Station Grenchen, 428 m ü. NHN) im Zeitraum 1992 bis 2020 .....	13
Abbildung 6: Die Klimaszenarien RCP 8.5, RCP 6, RCP 4.5 und RCP 2.6 (Meinshausen et al., 2011, modifiziert von GEO-NET) .....	14
Abbildung 7: Zukünftige Entwicklung der Sommertemperaturen im Kanton Solothurn auf Basis der Schweizer Klimaszenarien CH2018 (MeteoSchweiz 2023d) .....	15
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (eigene Darstellung nach Gross 1992) .....	18
Abbildung 9: Geländehöhen im Kanton Solothurn .....	21
Abbildung 10: Landnutzung im Kanton Solothurn (Stand 2020).....	22
Abbildung 11: Randomisierte Landnutzungsverteilung auf einer Entwicklungsfläche am Beispiel einer Wohnzone 1-3 G .....	24
Abbildung 12: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation .....	25
Abbildung 13: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld im Kanton Solothurn (Ist-Zustand 2020) .....	30
Abbildung 14: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld im Kanton Solothurn (Zukunft Stand 2060) .....	31
Abbildung 15: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom .....	32
Abbildung 16: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Kanton Solothurn (Ist-Zustand 2020) .....	33
Abbildung 17: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Kanton Solothurn (Ist-Zustand 2020) .....	34
Abbildung 18: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Kanton Solothurn (Zukunft Stand 2060) .....	35
Abbildung 19: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Kanton Solothurn (Zukunft Stand 2060) .....	36
Abbildung 20: Klimaanalysekarte Kanton Solothurn (Ist-Zustand 2020; verkürzte Legende) .....	37
Abbildung 21: Klimaanalysekarte Kanton Solothurn (Zukunft Stand 2060; verkürzte Legende) .....	39
Abbildung 22: Schematische Darstellung der verschiedenen Einflüsse auf das Wärmeempfinden des Menschen (DWD 2023) .....	40
Abbildung 23: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) am Tag im Kanton Solothurn (Ist-Zustand 2020) .....	41
Abbildung 24: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) am Tag im Kanton Solothurn (Zukunft Stand 2060) .....	42
Abbildung 25: z-Transformation zur Standardisierung der vergleichenden Bewertung von Parametern.....	44
Abbildung 26: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation .....	46
Abbildung 27: Bewertungsschema für die Aufenthaltsqualität und Erreichbarkeit von Ausgleichsräumen am Tag (Wälder ausgeschlossen).....	48
Abbildung 28: Bewertungsschema für die bioklimatische Bedeutung von Wäldern am Tag .....	49
Abbildung 29: Planungshinweiskarte Nachtsituation für den Kanton Solothurn (verkürzte Legende) .....	51
Abbildung 30: Planungshinweiskarte Tagsituation für den Kanton Solothurn (verkürzte Legende) .....	53
Abbildung 31: Veränderungen durch Anpassungsmassnahmen am Beispiel eines Tagesverlaufs der Aussentemperatur in zwei Metern Höhe .....	70
Abbildung 32: Blau-grüne Strassenraumgestaltung ist wirksamer als Dachbegrünung (Coutts et al. 2014).....	70
Abbildung 33: Mittlerer Tagesgang der Wassertemperatur in den Monaten Juni, Juli und August am Pegel des Inn bei Rosenheim (links) sowie am Pegel des Main in Würzburg (rechts) .....	71
Abbildung 34: Wirksamkeit von Massnahmen zur Abkühlung im Innen- und Aussenraum (Buchin et al., 2016).....	72
Abbildung 35: Strategische Bausteine einer hitzeangepassten Siedlungsentwicklung .....	73



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Landnutzungsverteilung der Zwillingsflächen im Kanton Solothurn .....	23
Tabelle 2: Zuordnung der Grundnutzung zu den Zwillingsflächen.....	24
Tabelle 3: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004) ...	40
Tabelle 4: Einordnung der Dringlichkeit für Gegenmassnahmen zur nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Verkehrsraum mittels z Transformation .....	44
Tabelle 5: Einordnung der Dringlichkeit zur Verbesserung der bioklimatischen Situation am Tag im Siedlungs- und Verkehrsraum mittels z-Transformation .....	45
Tabelle 6: Einordnung des Grünflächenklimas am Tag mittels z-Transformation (Wälder ausgeschlossen) .....	48
Tabelle 7: Wirkungsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Nachtsituation.....	51
Tabelle 8: Ausgleichsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Nachtsituation .....	52
Tabelle 9: Wirkungsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Tagsituation .....	54
Tabelle 10: Ausgleichsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Tagsituation.....	54
Tabelle 11: Empfehlungen allgemeiner klimatisch wirksamer Massnahmen für den Kanton Solothurn .....	58



# Glossar

**Albedo:** Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzweiliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

**Allochthone Wetterlage:** Durch grossräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert. Die allochthone Wetterlage ist das Gegenstück zur → *autochthonen Wetterlage*.

**Ausgleichsraum:** Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

**Austauscharme Wetterlage:** → *Autochthone Wetterlage*

**Autochthone Wetterlage:** Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Masse durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Siedungsklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können. In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagerte Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld, das entsprechend sensibel auf Hindernisse reagiert. Tagsüber sind die Verhältnisse weniger stabil.

**Bioklima:** Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).

**Flurwind:** Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

**Grünfläche:** Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von bis zu 20 % auszeichnen. Darüber hinaus werden alle weiteren Grünflächen aus der Grundnutzung abgeleitet. Hierzu zählen unter anderem Wälder, Zonen für Sport- und Freizeitanlagen, landwirtschaftliche Flächen, Grün-, Freihalte- und Reservezonen sowie (Natur-)Schutzzone.

**Kaltluft:** Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und somit über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgrösse des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

**Kaltlufteinwirkungsbereich:** Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs- und Verkehrsflächen, die bodennahe Windgeschwindigkeiten von mindestens 0,3 m/s aufweisen.

**Kaltluftleitbahnen:** Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches.



**Kaltluftvolumenstrom:** Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der  $\rightarrow$  *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit  $m^3/(s \cdot m)$ ). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an  $\rightarrow$  *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer  $\rightarrow$  *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das  $\rightarrow$  *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

**Klimaanalysekarte:** Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht in den Siedlungen und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

**PET** (Physiological Equivalent Temperature / Physiologisch Äquivalente Temperatur): Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

**Planungshinweiskarte:** Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungs- und Gewerbeflächen im Gemeindegebiet ( $\rightarrow$  *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als  $\rightarrow$  *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

**Städtische Wärmeinsel** (*Urban Heat Island*): Siedlungen weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

**Strahlungswetterlage**  $\rightarrow$  *Autochthone Wetterlage*

**Strömungsfeld:** Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der Winde in 2 m über Grund während einer  $\rightarrow$  *autochthonen Wetterlage*.

**Wirkungsraum:** Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Wohn- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

**z-Transformation:** Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschliessend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.



# 1. Einleitung

Mit voranschreitender Klimaveränderung werden heisse Tage und Nächte in Zukunft immer häufiger und extremer. Besonders betroffen sind dicht besiedelte Gemeinden, wo Temperaturen gegenüber dem Umland aufgrund des **Wärmeineffekts** um mehrere Grad erhöht sein können (Kap. 2.1). Die Hitzebelastung im Siedlungsraum ist eine Herausforderung, welche in der Raumplanung miteinbezogen werden muss. Die Raumentwicklung erfordert jedoch genaue Kenntnisse über die lokalen Klimabedingungen. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen zum Siedlungsklima ein wichtiges Hilfsmittel für Gemeinden und Planende, um auch mit zunehmendem Klimawandel eine klimaangepasste Siedlungsentwicklung sicherzustellen. Aus der Kenntnis des in einer Gemeinde vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Massnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten und priorisieren. Diese zielen auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger **bioklimatischer** Verhältnisse im Siedlungsraum ab.

Bereits seit 2001 liegen für den Kanton Solothurn eine **Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte** vor<sup>1</sup>, welche insbesondere die Aspekte der Lufthygiene und Durchlüftung thematisiert. Hitzeinseln standen in dieser Untersuchung jedoch noch nicht so stark im Fokus. Die Analyse bietet eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten und dient unter anderem als Grundlage für Umweltverträglichkeitsprüfungen und Nutzungsplanungen, zur Sensibilisierung in der Raumplanung oder findet bei der Modellierung von Emissionen und Gerüchen ihre Anwendung. Im Jahr 2016 stellte der Kanton Solothurn seine Strategie im Umgang mit dem Klimawandel vor. In einem Aktionsplan werden Anpassungsmassnahmen zusammengestellt, die zur Reduktion der Hitzebelastung in den Städten und Gemeinden beitragen. Mit seiner Kampagne „Klimageschichten“<sup>2</sup> richtet sich der Kanton auf kreative Art an alle Akteure. Die nun vorliegende Arbeit stellt die Fortschreibung der Analyse aus dem Jahr 2001 dar. Die Notwendigkeit einer Aktualisierung der 2001er Version war dabei aus gleich mehreren Gründen angeraten:

- Solothurn ist ein dynamisch wachsender Kanton. Die heutige Siedlungsstruktur unterscheidet sich nicht unwesentlich von der Grundlage der 2001er Version der Klimaanalyse.
- Die **Planungshinweiskarte** 2001 besitzt für wesentliche Inhalte nur noch begrenzte Aussagekraft. Hierzu zählen vor allem fehlende Informationen zum kleinräumigen Kaltluftprozessgeschehen sowie ein für heutige Ansprüche und Möglichkeiten unzureichender Detaillierungsgrad bei der Identifizierung von Belastungsräumen.
- Mit numerischen Stadtklimamodellen stehen heute Instrumente zur Verfügung, die diese inhaltlichen Defizite wesentlich verringern können. Die Modelle sind dabei in der Lage, die Zusammenhänge zwischen Wärmeineffekt und kühlenden Kaltluftabflüssen und **Flurwinden** aus dem **Ausgleichsraum** abzubilden. Zudem ist es mit solchen Modellen möglich, eine zukünftige Situation (Berücksichtigung von Klimawandel und Entwicklungsvorhaben; hier: Solothurn 2060) zu untersuchen und zu bewerten.
- Die Klimafolgenanpassung (namentlich die Hitzevorsorge und die Bedeutung von **Kaltluft**) ist in den letzten Jahren noch weiter in den Fokus von Politik, Planung und Stadtgesellschaft gerückt. Als Konsequenz ist die Fortschreibung der Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte eine zentrale Schlüsselmassnahme.

<sup>1</sup> siehe <https://www.mcr.unibas.ch/dolueg2/projects/campaigns/DUP/index.dt.htm>

<sup>2</sup> siehe <https://klimageschichten.so.ch/>



Dem Stand der Technik gemäss wurden zwei hochaufgelöste Rechnungen (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 10 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH-3D durchgeführt, um flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Gebiet des Kantons in der heutigen Situation und in der Zukunft zu erhalten. Die Verwendung der hohen Auflösung erlaubt die Berücksichtigung von Gebäuden als Strömungshindernisse. Durch die kleinräumige Erfassung von Gebäuden und Grünstrukturen, insbesondere Bäumen, samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Siedlungskörpers auf das Mikroklima und insbesondere das **Strömungsfeld** getroffen werden. Die Ergebnisse der Modellrechnung spiegeln neben der Nachtsituation auch die **bioklimatische** Belastung am Tag wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung des Siedlungsklimas im Kanton Solothurn.

Der vorliegende Bericht erläutert die Methodik der Klimaanalyse (Kap. 3) und geht auf die Ergebnisse der Modellrechnung ein (Kap. 4). Planerische Fragestellungen lassen sich am besten in einer Zusammenschau der Ergebnisse beantworten, sodass die Ergebnisse des nächtlichen Prozessgeschehens (Überwärmung des Siedlungsgebiets, Kaltluftströmungsfeld) in einer „**Klimaanalysekarte**“ zusammengefasst werden (Kap. 4.1.3). Darüber hinaus werden, getrennt für die Nacht- und Tagsituation, Bewertungen der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen sowie der Bedeutung von **Grünflächen** als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Planungshinweise abgeleitet (**Planungshinweiskarten**; Kap.5). Die aus der Analyse erarbeiteten Strategien und Massnahmen zur Anpassung an die „Hitze in der Stadt“ werden in Kapitel 5.3 für das gesamte Kantonsgebiet dargestellt und erläutert. Mit dem vorliegenden Maßnahmenkatalog werden u.a. auch Querbezüge und Synergien zum Regenwassermanagement, zur Biodiversität und zur Architektur hergestellt, die im Fazit (Kap. 6) noch einmal zusammengefasst sind. Darüber hinaus geht das Fazit auf die möglichen Anwendungsbereiche der Planungshinweiskarte ein.

## 2. Fachliche und regionalklimatische Grundlagen

### 2.1 DER WÄRMEINSELEFFEKT

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt bzw. einer dicht besiedelten Gemeinde modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Gemeindegrösse stärker ausgeprägt sind (Oke 1973). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, ein geringer Anteil an Vegetation, die Oberflächenvergrösserung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen, un bebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und **bioklimatischen** Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als **Städtische Wärmeinsel** bezeichnet.

Für die Bevölkerung entstehen hohe Belastungen vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen, die durch einen ausgeprägten Tagesgang von Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt sind (**autochthone Wetterlagen**). Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen warmer Luft über den überwärmten Siedlungsflächen. Als Folge des entstehenden bodennahen Tiefdruckgebietes treten Ausgleichsströmungen auf, d.h. Luftmassen aus dem Umland können bis in das Siedlungsgebiet hineinströmen (**Flurwinde**; Abbildung 1).

Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts dagegen kann kühlere Umgebungsluft aus siedlungsnahen (und ggf. innerstädtischen) **Grünflächen** in das wärmere Siedlungsgebiet strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „**Kaltluft**“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse, sodass er nur entlang von Flächen ohne blockierende Bebauung bzw. sonstige Hindernisse erfolgen kann (insb. über sogenannte **Kaltluftleitbahnen**).

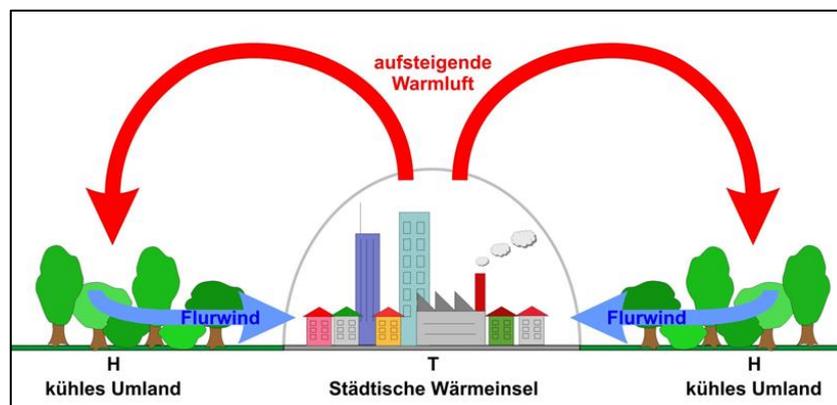


Abbildung 1: Prinzipskizze Flurwind



Die Flurwinde, welche insbesondere nachts infolge des Wärmeinseleffektes entstehen, bilden die Realität jedoch nur zum Teil ab (Abbildung 2). Bei grossen Höhenunterschieden treten zusätzlich Berg- und Talwinde auf, kleinere Höhenunterschiede bewirken bereits Hangauf- bzw. Hangabwinde. Während in der Nacht die Luft hang- bzw. bergabwärts strömt, sind die Luftmassen tagsüber hang- bzw. bergaufwärts gerichtet. Unter **austauscharmen** Bedingungen treten demnach sowohl thermische als auch reliefbedingte Strömungen gleichzeitig auf, die sich in Bezug auf Windgeschwindigkeit und **Kaltluftvolumenstrom** voneinander unterscheiden. Die thermisch hervorgerufenen Winde (Flurwinde) sind in der Regel schwächer als die Hang- und Bergwinde. Für Siedlungen in Tallage bedeutet dies aber vor allem, dass die Flurwinde in der Nacht mit gleichzeitig auftretenden Hangabwinden verstärkt werden.

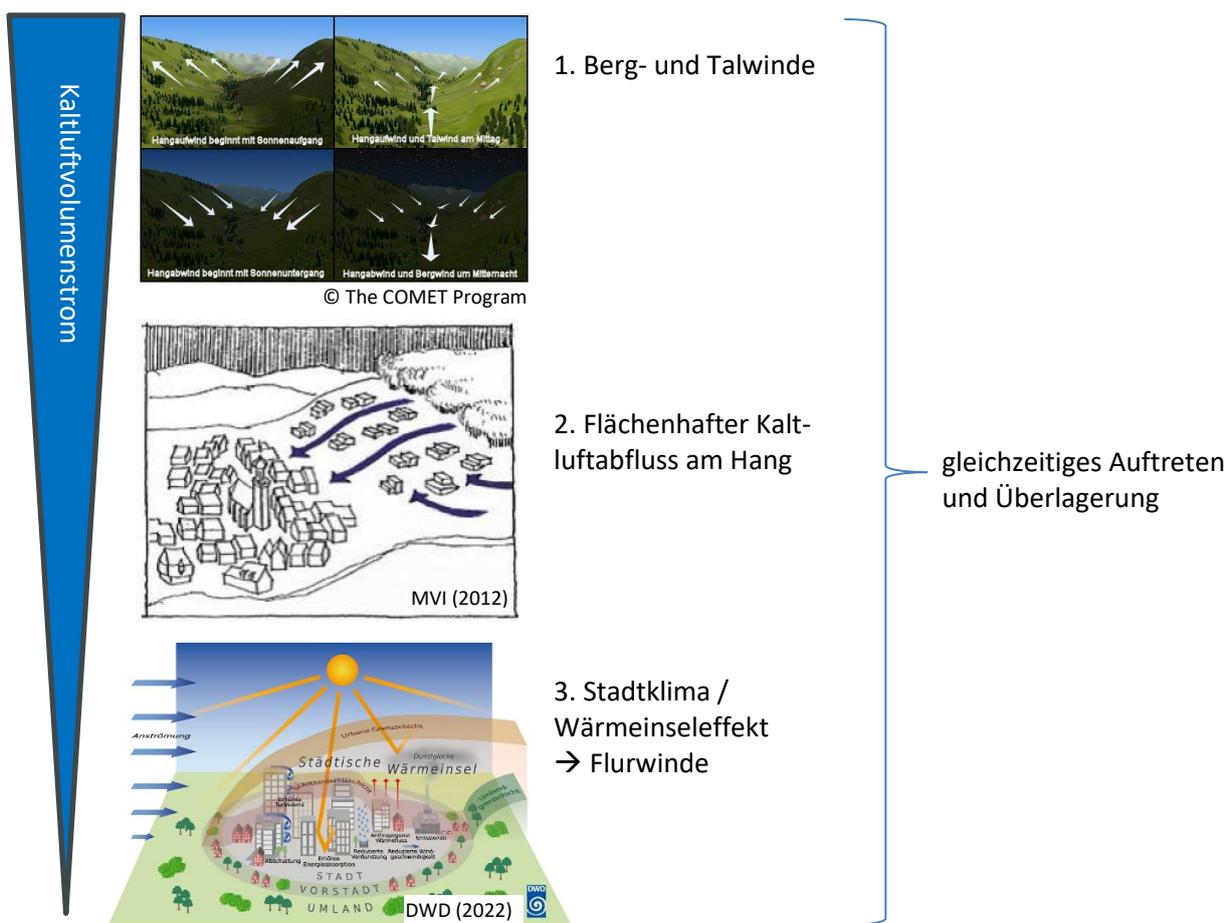


Abbildung 2: Vorherrschende Winde bei austauscharmen Wetterlagen: Die Wirkung des Reliefs und der städtischen Wärmeinsel

Neben der vom Menschen freigesetzten Abwärme (anthropogener Wärmefluss) kommt es durch den hohen Versiegelungsgrad zu einer Erwärmung des Siedlungsgebietes. Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei bebauten, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Beton und Asphalt besitzen eine geringe **Albedo**, sodass viel Strahlung absorbiert wird und sich die Flächen am Tag stark aufwärmen. In der Nacht kann die gespeicherte Wärme als langwellige

Ausstrahlung an die Atmosphäre abgegeben werden (Häckel 2012, Malberg 2002). Aufgrund der stärkeren Versiegelung bzw. des geringeren Grünanteils (und zudem meist geringerer Wasserverfügbarkeit) ist die Verdunstung und damit verbundene Kühlleistung in der Siedlung herabgesetzt<sup>3</sup> (Schönwiese 2008).

Dies erklärt die Notwendigkeit der Betrachtung des Siedlungsklimas, insbesondere da ein Grossteil der Bevölkerung im dicht besiedelten Gebiet wohnt und demzufolge Belastungen so gering wie möglich gehalten werden sollten, um gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse sicherzustellen.

## 2.2 REGIONALE KLIMATOLOGIE IM GROSSRAUM SOLOTHURN

### 2.2.1 DAS AKTUELLE KLIMA IN SOLOTHURN

Das Klima charakterisiert gemäss Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren betrachtet. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) hat die derzeit international gültige Klimareferenzperiode auf den Zeitraum 1961-1990 festgelegt. MeteoSchweiz verwendet jedoch auch die Normperiode 1981-2010 (Begert et al. 2013) bzw. hat kürzlich (im Januar 2022) die Normperiode 1991-2020 eingeführt.

**Höhe ü.M.:** 485 m  
**Geogr. Koord.:** 47.12 N / 7.61 E  
**CH-Koord.:** 2'612'663 / 1'218'665  
**Klimaregion:** Zentrales Mittelland

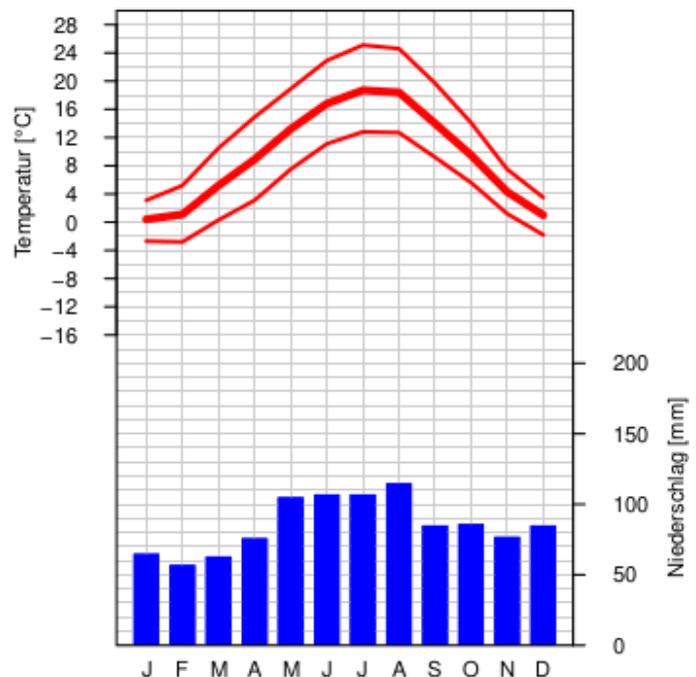
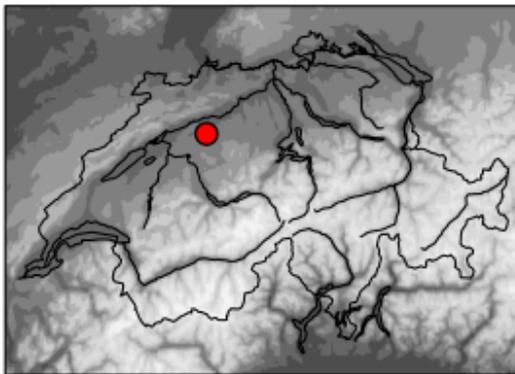


Abbildung 3: Klimadiagramm für die Station in Koppigen, Normperiode 1991-2020 (MeteoSchweiz 2023a)

Der Grossraum Solothurn (im Folgenden anhand der Station Koppigen in Bern abgeleitet; Abbildung 3) ist gekennzeichnet durch eine langjährige Mitteltemperatur (1991-2020) von 9,3 °C und eine mittlere jährliche Niederschlagssumme von 1026 mm/Jahr, wobei die höchsten Temperaturen sowie die höchsten monatlichen Niederschlagssummen in den Sommermonaten auftreten. Damit ist es an der Station Koppigen

<sup>3</sup> In der Stadt steht dem geringeren latenten Wärmestrom ein höherer fühlbarer Wärmetransport gegenüber.



um 3,5 °C wärmer als im Schweizer Temperaturmittel, welches in der aktuellen Normperiode 1991-2020 bei 5,8 °C (MeteoSchweiz 2023b) liegt. Im langjährigen Mittel treten im Grossraum Solothurn 50 Sommertage<sup>4</sup> und 11 Hitzetage<sup>5</sup> pro Jahr auf. Vornehmlich in den Wintermonaten wurden 100 Frosttage<sup>6</sup> und 19 Eistage<sup>7</sup> pro Jahr registriert.

## 2.2.2 KLIMAWANDEL

### BEOBACHTETER KLIMAWANDEL

Das Klima hat sich in der Schweiz und somit auch im Kanton Solothurn in den letzten Dekaden aufgrund der globalen Erwärmung deutlich und beobachtbar verändert. Die Schweizer Mitteltemperatur hat sich seit 1864 bis heute um rund 2 °C erwärmt (NCCS). Das ist etwa doppelt so viel wie die Zunahme der mittleren globalen Temperatur im gleichen Zeitraum von rund 1 °C (IPCC 2021). In der Abbildung 4 ist die rezente Entwicklung der Sommertemperaturen für die Monate Juni, Juli und August seit dem Jahr 1864 im Vergleich zur Klimaperiode 1961 – 1990 aufgetragen.

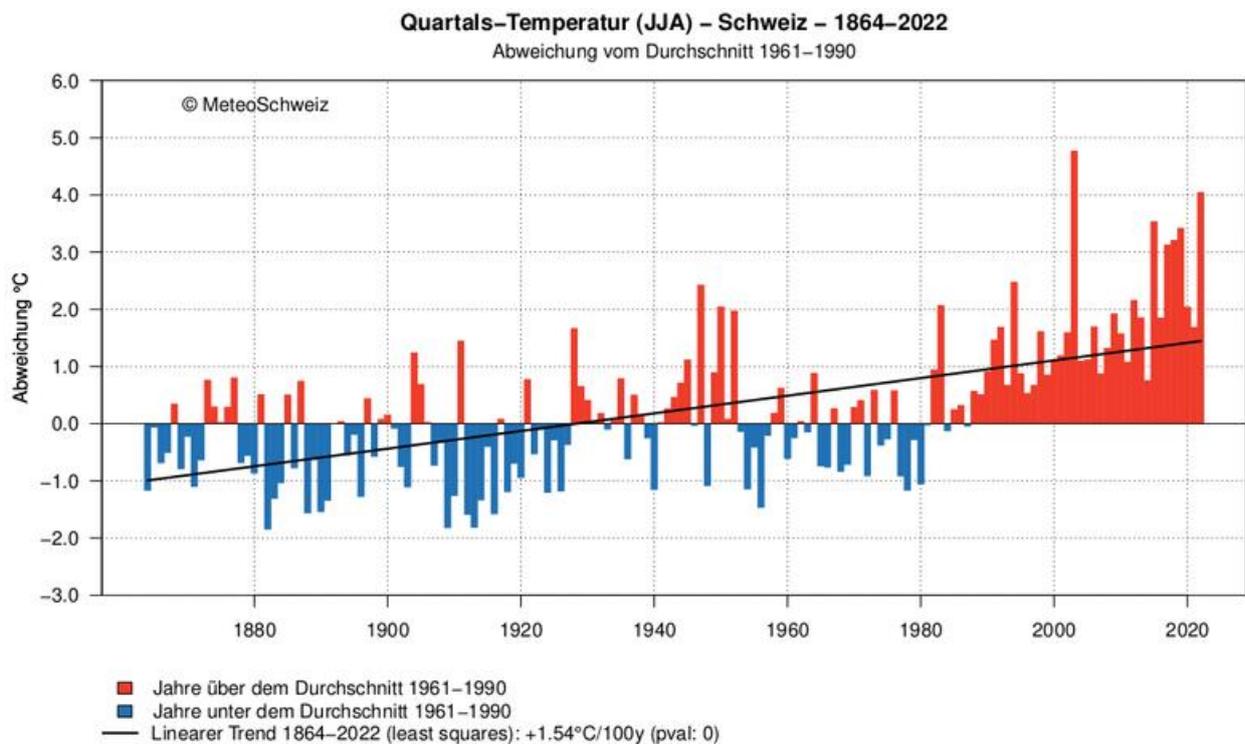


Abbildung 4: Entwicklung der Sommertemperaturen (Juni, Juli, August) für die Schweiz ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 – 1990 (MeteoSchweiz 2023c)

Es ist gut zu erkennen, dass es einen signifikanten positiven Trend der Sommertemperaturen (schwarze Linie) gibt. Die Jahre 2015, 2017, 2018, 2019 und 2022 weichen von der Referenzperiode 1961 – 1990 mit über +3 °C ab. Das Jahr 2003 ist das mit der höchsten positiven Abweichung zur Referenzperiode von ca. + 4,8 °C. Diese Grafik verdeutlicht, dass bereits jetzt der Klimawandel stattfindet und in den Messreihen

<sup>4</sup> Sommertag - Tageshöchsttemperatur  $\geq 25^{\circ}\text{C}$

<sup>5</sup> Hitzetag – Tageshöchsttemperatur  $\geq 30^{\circ}\text{C}$

<sup>6</sup> Frosttag – Tagesminimumtemperatur  $\leq 0^{\circ}\text{C}$

<sup>7</sup> Eistag – Tageshöchsttemperatur  $\leq 0^{\circ}\text{C}$



beobachtet werden kann. Seit den 1980er Jahren steigen die Temperaturen deutlich an und bleiben auch auf hohem Niveau.

Die seit 1992 gemessenen Temperaturen an der Station Grenchen (Abbildung 5) zeigen ebenfalls einen positiven Temperaturtrend und bestätigen damit auch die Beobachtungen in der Gesamtschweiz. Seit 2015 beträgt mittlere Sommertemperatur in Grenchen mehr als 18,44 °C und fällt damit höher als im Mittel von 1992-2020 aus.

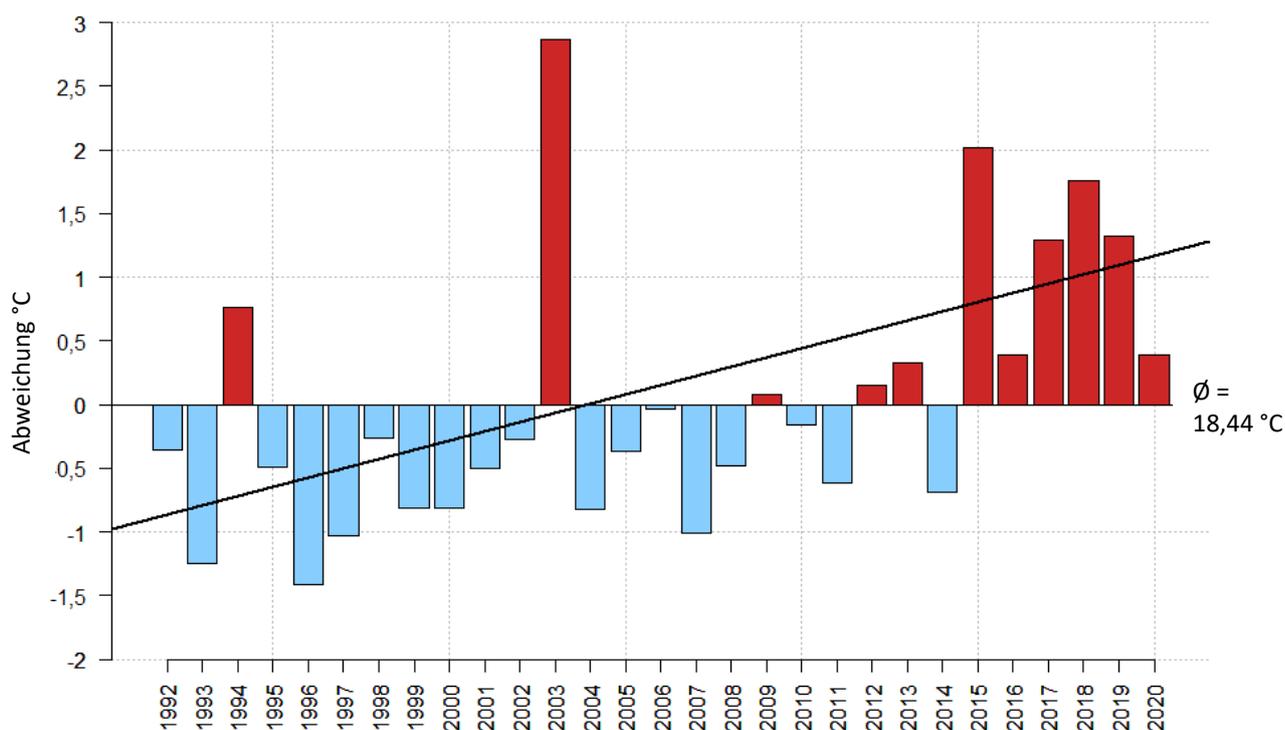


Abbildung 5: Entwicklung der mittleren Sommertemperatur (JJA) im Kanton Solothurn (Station Grenchen, 428 m ü. NHN) im Zeitraum 1992 bis 2020

### ZUKÜNFTIGER KLIMAWANDEL

Der Anstieg der globalen Mitteltemperaturen wird zum Grossteil durch die anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen gesteuert. Da noch unklar ist, wie sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Zukunft entwickeln, wird die zukünftig zu erwartende Temperatur anhand verschiedener Szenarien untersucht. Für die Schweiz sind derzeit drei verschiedene Klimaszenarien verfügbar, nämlich RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5<sup>8</sup>. Die Zahlen in dem Namen der Szenarien stehen für den mittleren Strahlungsantrieb in W/m<sup>2</sup>, der bis ins Jahr 2100 erreicht wird (Abbildung 6).

<sup>8</sup> Representative Concentration Pathways (RCP) = Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre

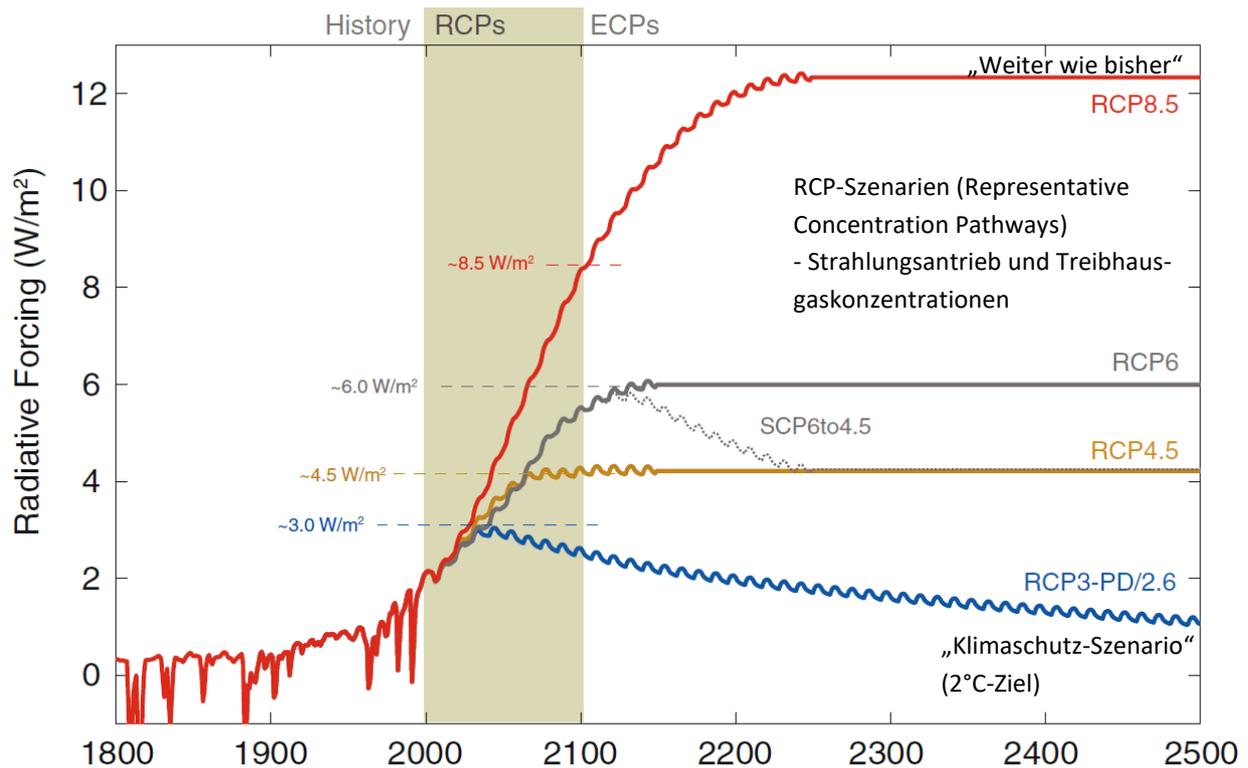


Abbildung 6: Die Klimaszenarien RCP 8.5, RCP 6, RCP 4.5 und RCP 2.6 (Meinshausen et al., 2011, modifiziert von GEO-NET)

- Das Szenario RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 Watt pro Quadratmeter ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf  $2,6 \text{ W}/\text{m}^2$  ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das  $2^\circ\text{C}$ -Ziel nicht überschreiten, sodass das RCP 2.6 oft auch als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das Szenario RCP 8.5 weist hingegen den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und einen Anstieg der globalen Mitteltemperatur um ca.  $4,8^\circ\text{C}$  gegenüber dem Zeitraum 1985-2005 bewirken würde. Das Szenario RCP 8.5 wird auch als „Weiter-wie-bisher-Szenario“ bezeichnet.

Aus dem aktuell sechsten Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 21/22) geht hervor, dass wir uns aktuell ohne eine Verstärkung der bis Ende 2020 eingeführten Massnahmen auf dem Weg zu einer mittleren globalen Erwärmung von  $3,2^\circ\text{C}$  bis zum Ende des Jahrhunderts befinden. Dies entspricht in etwa dem RCP 4.5 Szenario (RCP 4.5 prognostiziert einen Temperaturanstieg um  $2,6^\circ\text{C}$  bis 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Wert). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des  $\text{CO}_2$ -Ausstosses würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen.

Die Klimaszenarien für die Schweiz (auch: „CH2018-Datensätze“) ermöglichen Aussagen zum zukünftigen Klimawandel und sind seit dem 13. November 2018 verfügbar. Eine Zusammenarbeit des National Centre



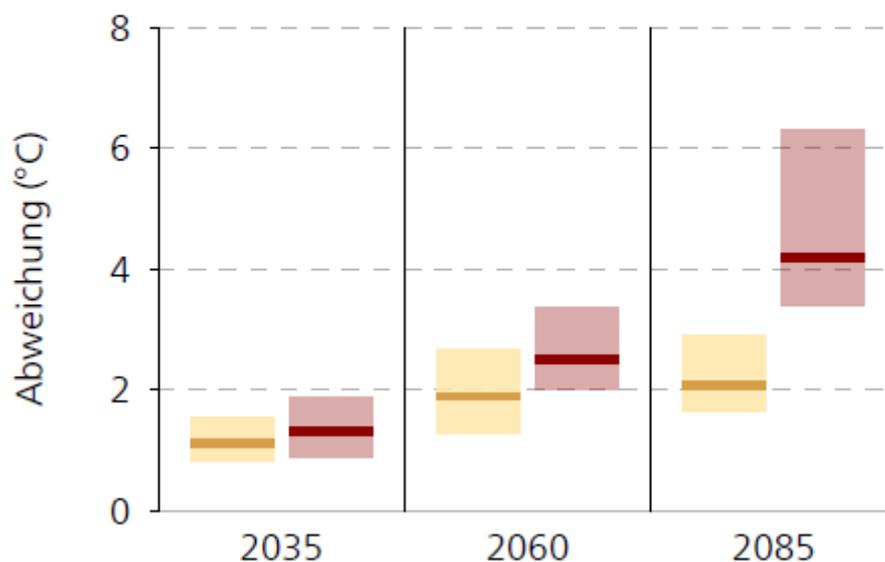
for Climate Services (NCCS) und des ETH-Center for Climate Systems Modeling (C2SM) hat die Klimaszenarien CH2018 erstellt und auf der NCCS-Webplattform veröffentlicht. Als Basis für die Schweizer Klimaszenarien dienen die drei RCPs 2.6, 4.5 und 8.5 der EURO-CORDEX Initiative. Um zuverlässige Aussagen über die simulierten Veränderungen und Unsicherheiten treffen zu können, wurden die Klimadaten zunächst für fünf Modellregionen räumlich aggregiert: Nordostschweiz, Westschweiz, Südschweiz, Westschweizer Alpen und Ostschweizer Alpen. Mittlerweile stehen jedoch auch kantonale Klimaszenarien zur Verfügung, sodass entsprechende Aussagen direkt für den Kanton Solothurn (Abbildung 7) getroffen werden können.

## Temperatur

### Abweichung von der Normperiode 1981-2010

Kt. Solothurn  
Sommer

RCP4.5  
RCP8.5



© Klimaszenarien CH2018

Abbildung 7: Zukünftige Entwicklung der Sommertemperaturen im Kanton Solothurn auf Basis der Schweizer Klimaszenarien CH2018 (MeteoSchweiz 2023d)

Für die Projektion des Klimawandels werden drei zukünftige Perioden verwendet: 2020 - 2049, 2045 - 2074 und 2070 - 2099. Der Einfachheit halber werden diese Perioden durch das entsprechende zentrale Jahr des Zeitfensters bezeichnet, d.h. „2035“, „2060“ und „2085“ (CH2018 (2018)). Die Normalperiode 1981 - 2010 wird als Referenzperiode verwendet, für die die zukünftigen Klimaveränderungen berechnet werden.

Im Vergleich des mittleren Szenarios RCP 4.5 und dem „Weiter-wie-bisher“-Szenario RCP 8.5 wird eine grosse Spannweite des prognostizierten Klimawandels im Kanton Solothurn deutlich. Da sich jedes Szenario aus den Ergebnissen verschiedener Klimamodelle zusammensetzt, ist jeweils ein Möglichkeitsbereich (siehe gelbe und rote Säulen in der Abbildung 7) angegeben, wobei der horizontale Strich innerhalb der Säulen den Mittelwert repräsentiert und im Folgenden als Referenzwert dient. In der Periode 2035 ist



der Unterschied zwischen dem RCP 4.5 (+1,1 °C) und dem RCP 8.5 (+1,3 °C) noch relativ gering. Bis 2060 geht das RCP 8.5 jedoch von einer Zunahme von 2,5 °C gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 aus, während die Temperaturerhöhung im RCP 4.5 lediglich +1,9 °C beträgt. Gegen Ende des Jahrhunderts (Periode 2085) gehen die Aussagen beider RCP's noch weiter auseinander mit +2,1 °C (RCP 4.5) und + 4,2 °C (RCP 8.5). In seiner oberen Schätzung geht das RCP 8.5 bis zum Ende des Jahrhunderts von einer Zunahme von 6,3 °C gegenüber der Referenzperiode aus. Dies macht vor allem deutlich, wie dringend Massnahmen des Klimaschutzes sind, um einer solchen Situation vorzubeugen. Gleichzeitig wird ersichtlich, dass selbst mit konsequentem Klimaschutz mit einer weiteren Zunahme der Durchschnittstemperatur und der Anzahl Hitzetage und Tropennächte gerechnet werden muss. Klimaanpassungsmassnahmen sind somit für alle Emissionsszenarien notwendig.



## 3. Methode der modellgestützten Klimaanalyse

In der Praxis spielen sich umweltmeteorologische Fragestellungen meist in der Grössenordnung einer Gemeinde bzw. Region ab. Die dabei relevanten meteorologischen Phänomene weisen eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden auf. Als mesoskalige Phänomene werden dabei bspw. **Flurwinde**, Land-See-Winde oder die **städtische Wärmeinsel** bezeichnet, während der Einfluss von Hindernissen auf den Wind (z.B. Kanalisierung, Umströmung) oder die Wirkung verschattender Massnahmen mikroskalige Effekte darstellen.

Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen solch lokalklimatischer Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Zwar kann die Verteilung meteorologischer Grössen wie Wind und Temperatur durch Messungen ermittelt werden, aufgrund der grossen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung (insb. in komplexen Umgebungen) in benachbarte Räume nur selten möglich. Entsprechend schwierig ist es, aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende (also flächenhafte) siedlungsklimatologische Bewertung vornehmen zu können.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden in Deutschland eine Reihe meso- und mikroskaliger Modelle konzipiert und realisiert (DFG 1988) und der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist extrem hoch. Zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht somit, neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien, ein weiteres leistungsfähiges Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in der Stadt- und Landschaftsplanung zur Verfügung. Die Modelle basieren, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (*Navier-Stokes Bewegungsgleichung*), der Massenerhaltung (*Kontinuitätsgleichung*) und der Energieerhaltung (*1. Hauptsatz der Thermodynamik*).

### 3.1 EINGESETZTES STADTKLIMAMODELL

Für die Klimaanalyse des Kantons Solothurn kam das Stadtklimamodell FITNAH-3D zum Einsatz. Modelle wie FITNAH-3D können deutlich besser zur Beantwortung stadtklimatologischer Fragestellungen herangezogen werden als rein aus Messkampagnen gewonnene Werte, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schliessen, weitere meteorologische Grössen berechnen und Wind- bzw. Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und Anpassungsmassnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert und auf diese Art und Weise optimierte Lösungen gefunden werden können.

Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst. Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH-3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 10 m. Die vertikale Gitterweite ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Grössen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer grösser und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Relief und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Für tiefergehende Informationen zu FITNAH-3D wird u.a. auf Gross (1992) verwiesen.

### 3.2 VORGEGEBENE RANDBEDINGUNGEN

Die Klimaanalyse legt einen **autochthonen** Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde. Dieser wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Gemeinde bzw. Region besonders gut ausprägen. Charakteristisch für solch eine (Hochdruck-) Wetterlage ist die Entstehung von **Flurwinden**, d.h. durch den Temperaturunterschied zwischen kühleren Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetriebene Ausgleichsströmungen.

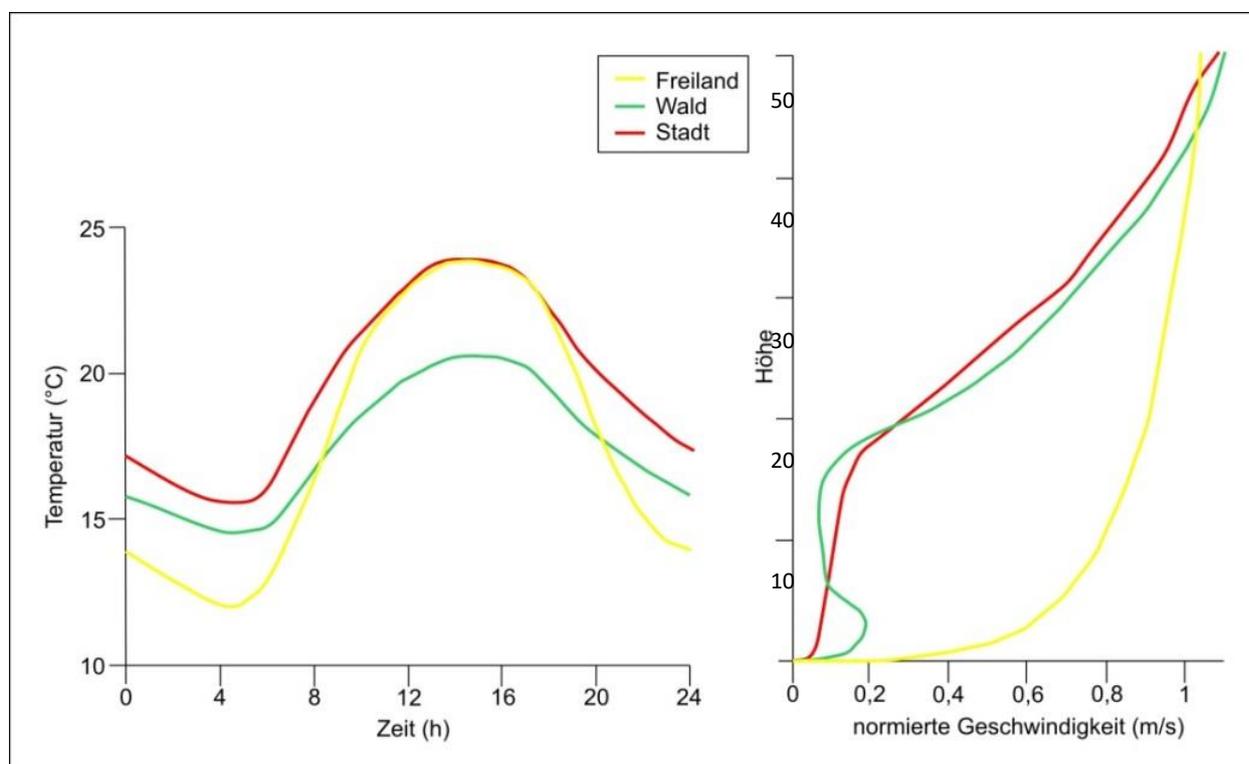


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (eigene Darstellung nach Gross 1992)



In Abbildung 8 sind schematisch die für eine **austauscharme** sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (**Wärmeineleffekt**). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich. Typischerweise führt ein **autochthoner** Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen Luftaustauschs zu den höchsten thermischen Belastungen. Auch wenn es sich dabei um eine besondere Situation handelt, tritt solch eine Wetterlage regelmässig und jeden Sommer mehrfach auf.

Des Weiteren wird die Situation des 21. Juni (Sonnenhöchststand) mit einer 0/8 Bewölkung und einer Bodenfeuchte von 60 % angenommen. Der Modellierungszeitraum erstreckt sich von 21 Uhr bis zum Folgetag um 14 Uhr, wobei in der späteren Auswertung (Kap. 4) lediglich die Zeitpunkte um 4 Uhr nachts und um 14 Uhr am Tag dargestellt werden. Um die regionalen Winde im Grossraum berücksichtigen zu können, wurde ein sog. Nesting-Verfahren eingesetzt. Datengrundlage für das Nesting war das **Strömungsfeld** aus der FITNAH-Modellierung der gesamten Schweiz in 100 m x 100 m Auflösung (internes Projekt von GEO-NET). Beim Nesting werden die Informationen zum grossräumigen Strömungsgeschehen an das kleinere Untersuchungsgebiet des Kantons Solothurn weitergegeben.

Insgesamt liegen für den Kanton zwei modellierte Zustände (Ist-Zustand 2020 und Zukunft 2060) vor. Die bereits genannten Randbedingungen sind für beide Modellläufe identisch. Die beiden Simulationen unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Eingangsdaten (Kap. 3.3) und der Starttemperatur. Im Ist-Zustand 2020 beträgt die Starttemperatur um 21 Uhr 22 °C in 2 m ü. NHN. Bei der zukünftigen Situation erhöht sich die Starttemperatur auf 23,9 °C, was einer Zunahme von 1,9 °C gegenüber dem heutigen Klima entspricht. Diese Temperaturänderung repräsentiert die mittlere Schätzung des RCP-Szenarios 4.5 für den Kanton Solothurn im Sommer in der Zukunftsperiode 2045-2074 bzw. „2060“ (vgl. Abbildung 7 im Kap. 2.2.2).

### 3.3 EINGANGSDATENAUFBEREITUNG

Ein numerisches Modell wie FITNAH-3D benötigt spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Daten vorliegen, die jeweils vom Kanton zur Verfügung gestellt wurden:

- Geländehöhe
  - ↳ LIDAR DTM (2018/19)
- Landnutzung
  - ↳ AV Bodenbedeckung (2021)
  - ↳ Vegetationshöhe (2018/2019)
- Strukturhöhe
  - ↳ LIDAR nDOM Gebäude (2018/19)
  - ↳ Vegetationshöhe (2018/19)
  - ↳ ASTRA MISTRA Lärmschutzwände (2020)
  - ↳ SBB Lärmschutzwände (2020)



- Wassertemperatur
  - ↳ Messdaten des Bundesamtes für Umwelt (2021) für die Aare und Emme

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Kantonsgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Situation Solothurns wird demnach aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens 2018 aufweisen und zum Zeitpunkt der Eingangsdatenaufbereitung (Frühling 2021) sehr aktuell waren. Aufgrund der Notwendigkeit der Kombination von verschiedenen Geodaten ist es jedoch nicht möglich, ein feststehendes Jahr als „Ist-Zustand“ anzunehmen. Zur Vereinfachung wird in den Kartentiteln jedoch der „Ist-Zustand 2020“ genannt, wenngleich die Ist-Situation streng genommen die Jahre 2018-2021 abbildet.

Um die klimatischen Prozesse grenzübergreifend zu erfassen (insb. bezogen auf den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet über die Kantonsgrenze hinaus. Ausserhalb des Solothurner Kantonsgebiets wurde dabei auf frei verfügbare Daten zurückgegriffen. Hauptsächlich wurden die Bodenbedeckungslayer der amtlichen Vermessung aus den angrenzenden Kantonen verwendet, ergänzt mit Bundesdaten, wie z.B. dem bundesweiten Vegetationshöhenmodell der Schweiz (Ginzler und Hobi 2015) und Open-Street-Map-Gebäuden. Im Umland des Kantons Solothurns sind die Eingangsdaten weniger detailgetreu aufbereitet, aber grundsätzlich ausreichend, um das Prozessgeschehen zwischen dem Kanton und seinen Nachbarorten hinreichend genau zu erfassen. Der Kanton Solothurn erstreckt sich bei einer Ausdehnung von ca. bis zu 55 km in Ost-West- bzw. 48 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von 790,45 km<sup>2</sup>. Das für die Modellrechnung verwendete achteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von knapp 3'388 km<sup>2</sup> auf. Da die sich hieraus resultierende Anzahl an Pixel die Kapazität der FITNAH-3D-Modellierung übersteigt, wurde das Untersuchungsgebiet in 8 Kacheln unterteilt, die sich jeweils horizontal als auch vertikal zu ca. 50 % überlappen und einzeln modelliert werden. Jede Kachel misst 30 km x 30 km und resultiert in 9'006'001 Rasterzellen, wobei für jede Rasterzelle jeweils eine Information zur Geländehöhe, Landnutzung und Strukturhöhe hinterlegt ist.

Die Geländehöhe des Modellgebiets wird in einem digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, welches von einer ursprünglichen 0,25 m-Auflösung in die für die Modellierung notwendige 10 m-Rasterauflösung gemittelt wurde (Abbildung 9). Im Solothurner Kantonsgebiet treten Höhenunterschiede von 1'168 Metern auf. Der niedrigste Punkt mit etwa 277 m ü. NHN liegt bei Dornach an der Birs an der Grenze zum Kanton Basel-Landschaft. Die Hasenmatt auf dem Jurakamm bei Selzach stellt mit 1'445 m ü. NHN den höchsten Punkt dar.

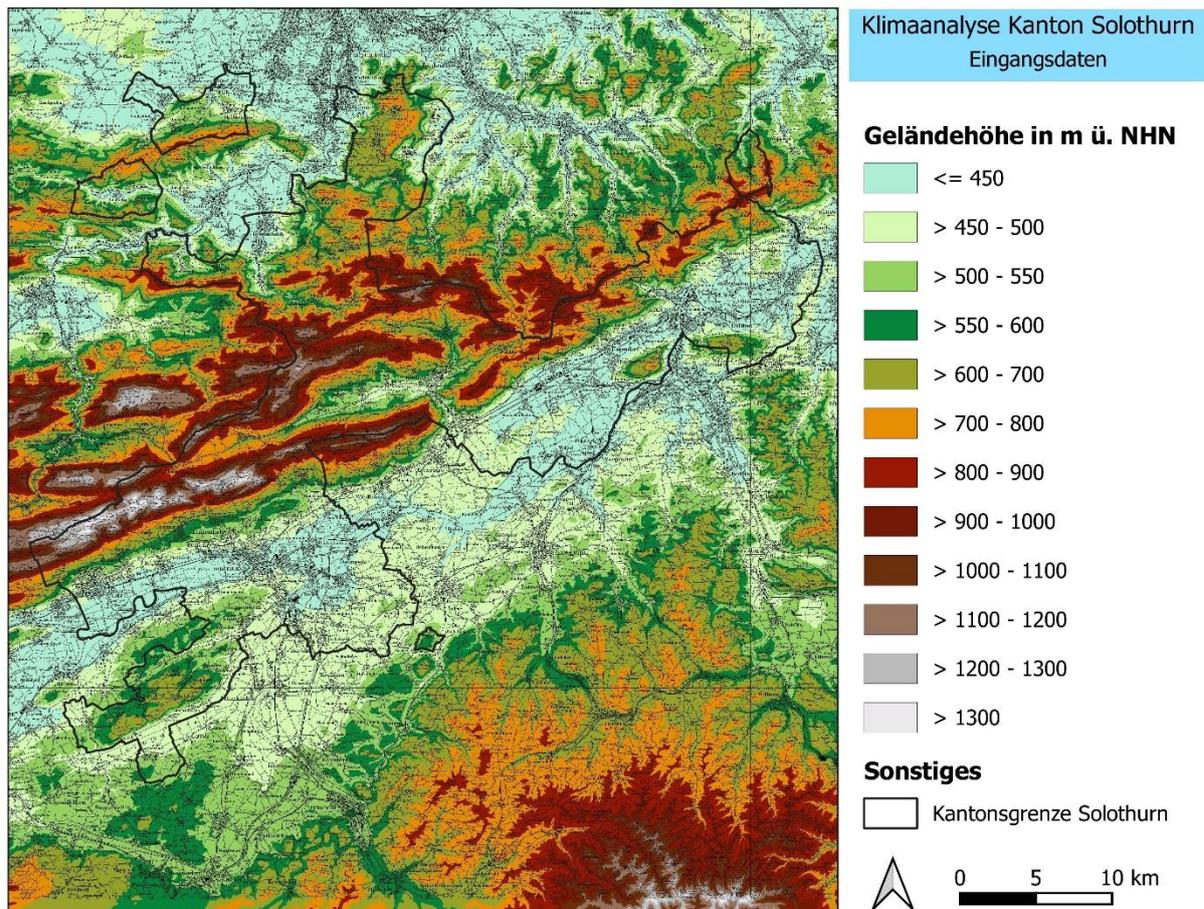


Abbildung 9: Geländehöhen im Kanton Solothurn

Die Landnutzung im Kanton Solothurn wird über 11 verschiedene Nutzungsklassen definiert, welche jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen (Abbildung 10). Diese wurden überwiegend über die Bodenbedeckungsdaten der amtlichen Vermessung abgeleitet. Baumstandorte im Kanton Solothurn wurden über das Vegetationshöhenraster ermittelt. Bei den Bäumen bzw. hoher Vegetation über 2,5 m werden drei verschiedene Untergründe unterschieden. So werden Bäume über Versiegelung (z.B. Strassenbäume), Bäume über Rasen (z.B. in Parks und Wäldern) und Bäume über naturfernem Boden (z.B. an Sportplätzen und Gleisanlagen) ausdifferenziert.

Neben Gebäuden und Bäumen stellen auch Lärmschutzwände ein Strömungshindernis dar. Daten zu Lage und Höhe der Lärmschutzwände an Gleisen und Strassen wurden über die übermittelten Datensätze der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und dem Bundesamt für Strassen (ASTRA) ermittelt. Zusammen mit den Gebäude- und Vegetationshöhen konnten so Strukturhöhen (relative Höhe über dem Gelände) für jede Rasterzelle ermittelt werden.

Daneben ist FITNAH-3D auch in der Lage, räumlich flexible Oberflächentemperaturen von offenen Wasserflächen zu berücksichtigen. Die Wassertemperaturen der Fließgewässer Aare und Emme wurden aus den Messstellen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) ermittelt. Da keine Messstellen im Kanton Solothurn vorlagen, wurden die Messwerte der nächstgelegenen Stationen, d.h. von „Aare-Brugg“ (19,3 °C),

„Aare-Brügg, Aegerten“ (19 °C) und „Emme - Emmenmatt“ (14,6 °C) herangezogen<sup>9</sup>. Gewässer ohne Messdaten wie bspw. der Bellacher Weiher wurden auf 20 °C gesetzt.

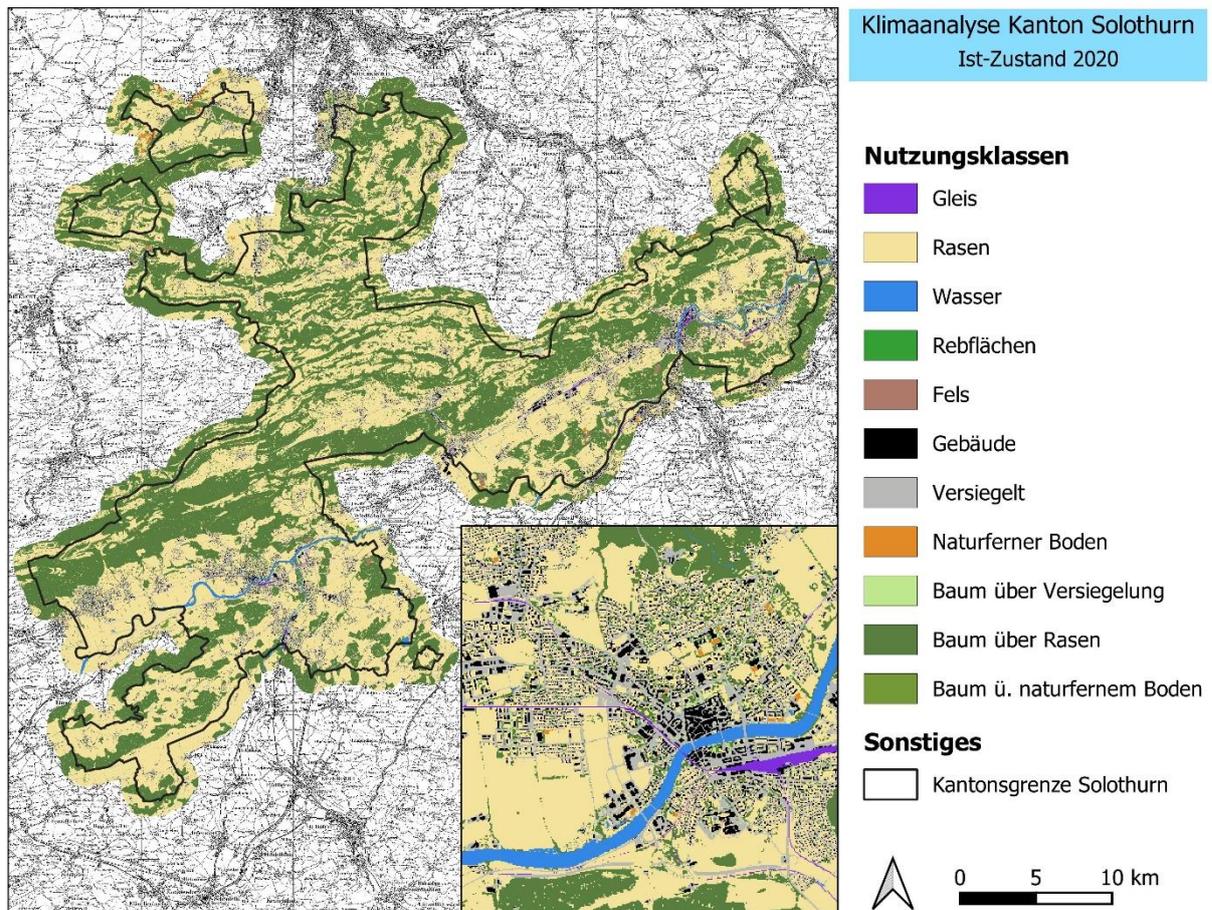


Abbildung 10: Landnutzung im Kanton Solothurn (Stand 2020)

### EINGANGSDATEN FÜR DIE ZUKÜNFTIGE SITUATION

Neben dem Ist-Zustand wurde auch die zukünftige Situation einschliesslich der Landnutzungsänderung und des Klimawandels im Kanton Solothurn untersucht. Für den Aufbau der Flächenkulisse „Zukunft“ wurden zunächst die Areale definiert, in denen eine Nutzungsänderung zu erwarten ist. Dazu zählen Flächen des Agglomerationsprogramms (Frick et al. 2021), bebaubare Grundstücke und Reservezonen.

Bei den Flächen des Agglomerationsprogramms werden alle noch nicht umgesetzten Siedlungsmassnahmen im Kanton Solothurn berücksichtigt. Zu den bebaubaren Grundstücken zählen alle Grundstücke im Siedlungsraum ab einer Grösse von mindestens 400 m<sup>2</sup>, die nur zu 0-20 % der Fläche befestigt sind und noch kein Gebäude<sup>10</sup> enthalten. Ausgenommen sind Friedhöfe und Sportplätze, da diese Flächen nicht bebaut werden. Die betrachteten Reservezonen stellen eine Teilmenge der Reservezonen aus der Grundnutzung gemäss Nutzungsplanung dar. Für die 13 Gemeinden<sup>11</sup> mit abgeschlossener Ortplanungsrevision

<sup>9</sup> Die Wassertemperaturen beziehen sich jeweils auf den Zeitraum 1997-2020 und stellen das langjährige Mittel aus den Sommermonaten Juni, Juli und August dar.

<sup>10</sup> Toleranzbereich: Bis 20 m<sup>2</sup> Gebäudefläche wird ein Grundstück noch als „unbebaut“ definiert.

<sup>11</sup> Niederbuchsiten, Oensingen, Schnottwil, Lüsslingen-Nennigkofen, Buchegg, Metzlerlen-Mariastein, Deitingen, Etziken, Bellach, Langendorf, Riedholz, Rickenbach (SO) und Starrkirch-Wil



(Ortsplanung nach neuem Richtplan 2018) wurden alle Reservezonen aus der Grundnutzung übernommen. In den übrigen Gemeinden und Städten Solothurns werden nur die Reservezonen berücksichtigt, welche weitestgehend vom Siedlungsraum umschlossen sind und nicht vorrangig an ein landwirtschaftliches Gebiet angrenzen.

Neben der Definition der Areale mit Nutzungsänderung spielt auch die Art der Bebauung eine Rolle. Letztere wird anhand von vier verschiedenen Typen abgebildet (nachfolgend „Zwillingsflächen“ genannt):

- Wohnzone 1-3 G
- Wohnzone 4 G+
- Mischzonen
- Arbeitszonen

Anhand der Bestandssituation wurde im Anschluss eine Flächenstatistik (Tabelle 1) für die vier verschiedenen Zwillingsflächen berechnet, um eine typische Landnutzungsverteilung<sup>12</sup> für jede Zwillingsfläche abzubilden. Demnach setzt sich eine durchschnittliche Solothurner Wohnzone 1-3 G zusammen aus 62 % Rasenfläche, einem Gebäudeanteil von 16 %, aus 15 % unbebaut versiegelten Flächen sowie zu 6 % aus Bäumen über Rasen und 1 % aus Bäumen über versiegelten Flächen. Neben der Landnutzung wurde auch die durchschnittliche Gebäude- und Baumhöhe<sup>13</sup> der Zwillingsflächen berechnet. Die mittlere Gebäudehöhe beträgt 6 m in der Wohnzone 1-3 G, 12 m in der Wohnzone 4 G+, 8 m in den Mischzonen und 10 m in den Arbeitszonen. Die Bestandsbäume sind in allen vier Zwillingsflächen durchschnittlich etwa 7 m hoch.

Tabelle 1: Landnutzungsverteilung der Zwillingsflächen im Kanton Solothurn

Landnutzung	Flächenanteil (%) in Wohnzone 1-3 G	Flächenanteil (%) in Wohnzone 4 G+	Flächenanteil (%) in Mischzonen	Flächenanteil (%) in Arbeitszonen
Rasen	62	51	36	21
Gebäude	16	21	25	32
unbebaut versiegelt	15	20	33	42
Baum über Rasen	6	7	5	2
Baum über Versiegelung	1	1	1	1
Gleis	0	0	0	2

Jeder Massnahme des Agglomerationsprogramms sowie jeder übrigen potentiell künftig überbauten Fläche (Reservezonen und bebaubare Grundstücke) wird im Anschluss eine Zwillingsfläche zugeordnet. Bei den Massnahmen des Agglomerationsprogramms erfolgte die Zuordnung der Zwillingsflächen anhand des Massnahmenbeschreibs und in enger Abstimmung des Amts für Umwelt mit dem Amt für Raumplanung. Für die bebaubaren Grundstücke und Reservezonen bildete die Grundnutzung gemäss Nutzungsplanung

<sup>12</sup> basierend auf den Nutzungsklassen von FITNAH-3D in 10 m x 10 m Rasterauflösung

<sup>13</sup> basierend auf den Daten zur Strukturhöhe in 10 m x 10 m Rasterauflösung



die Grundlage für die Zuweisung der Zwillingsflächen (Tabelle 2). Reservezonen ohne konkrete Angaben wurden den Mischzonen zugeordnet.

Tabelle 2: Zuordnung der Grundnutzung zu den Zwillingsflächen

Zwillingsfläche	Grundnutzung gemäss Nutzungsplanung
Wohnzone 1-3 G	Wohnzone 1 G; Wohnzone 2 G; Wohnzone 3 G
Wohnzone 4 G+	Wohnzone 4 G; Wohnzone 5 G; Zone für Terrassenhäuser / Terrassensiedlung; Wohnzone 7 G und grösser
Mischzonen	Gewerbezone mit Wohnen / Mischzone; Kernzonen; Erhaltungszonen; Zone für öffentliche Bauten; Zentrumszonen; Spezialzonen; Reservezone Wohnzone, Mischzone, Kernzone und Zentrumszone; Reservezone OeBa; Reservezonen (ohne konkrete Angabe)
Arbeitszonen	Gewerbezone ohne Wohnen; Industriezone; Arbeitszone; Reservezone Arbeiten

In einem letzten Schritt erfolgte eine zufällige Verteilung der Landnutzungsklassen in den Entwicklungsgebieten entsprechend der Flächenstatistik. Dabei werden die Flächen mit Nutzungsänderung mithilfe eines „Randomisators“ rasterpixelweise und zufällig gemäss dem Anteil an den jeweiligen Nutzungsklassen<sup>14</sup> aufgefüllt. Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturen und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen. Die Abbildung 11 zeigt exemplarisch die randomisierte Landnutzungsverteilung für eine Wohnzone 1-3 G im Westen der Stadt Solothurn.

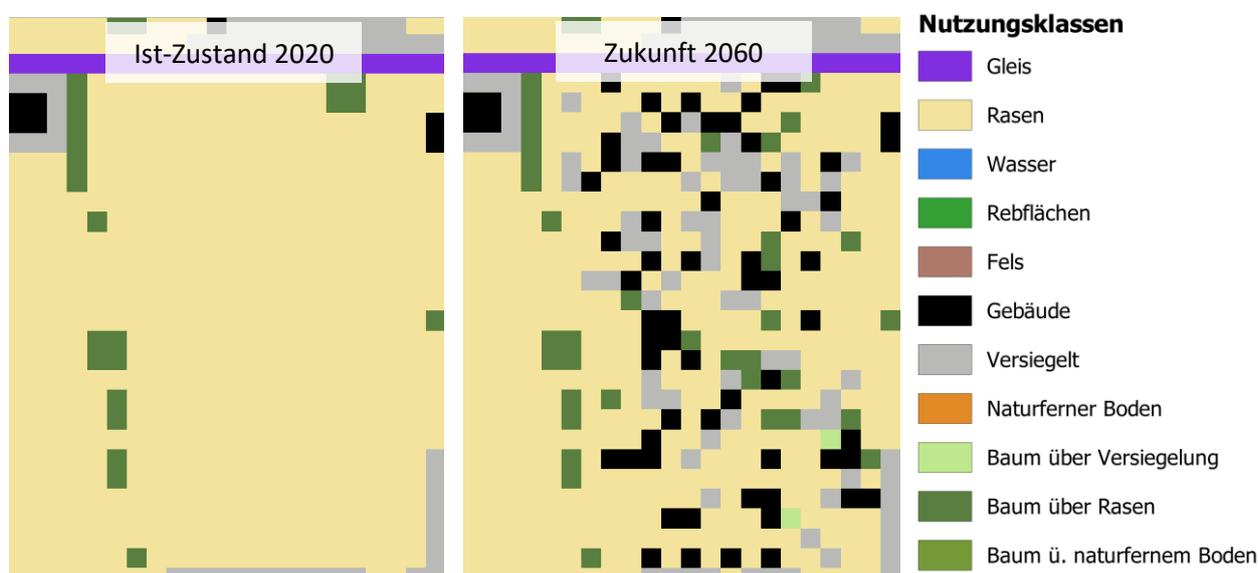


Abbildung 11: Randomisierte Landnutzungsverteilung auf einer Entwicklungsfläche am Beispiel einer Wohnzone 1-3 G

Insgesamt wurden für den Kanton Solothurn 4398 Flächen mit Nutzungsänderung identifiziert, welche in Summe ca. 1228,75 ha ausmachen. Bei 176 der 4398 Flächen handelt es sich um Massnahmen des Agglomerationsprogramms (257,83 ha Fläche mit Nutzungsänderung). Die übrigen 970,92 ha entfallen auf die bebaubaren Grundstücke und den Reservezonen.

<sup>14</sup> einschliesslich der entsprechenden Höhen von Gebäuden und Bäumen

## FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATIONEN

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen der Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 10 m zu erzeugen (Schritt 1 und Schritt 2 in Abbildung 12). Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten rasterbasierten Modellergebnisse der einzelnen Klimaparameter (Schritt 3). Die Modellergebnisse erlauben eine erste Analyse der klimaökologischen Gegebenheiten in einem Gebiet. Planerische Aussagen zur **bioklimatischen** Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnlichen Flächeneinheiten erfolgen. Diese Basisgeometrien sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Die wichtigste Datengrundlage hierfür bildet die Grundnutzung gemäss Nutzungsplanung verschnitten mit dem AV-Bodenbedeckungs-Datensatz. Die rasterbasierten Modellergebnisse werden nun auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem **Kaltluftvolumenstrom** enthält (Schritt 4 in Abbildung 12).

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (Kap. 4), zum anderen als planungsrelevante und massstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung z.B. in der **Planungshinweiskarte** in Kap. 5.2).

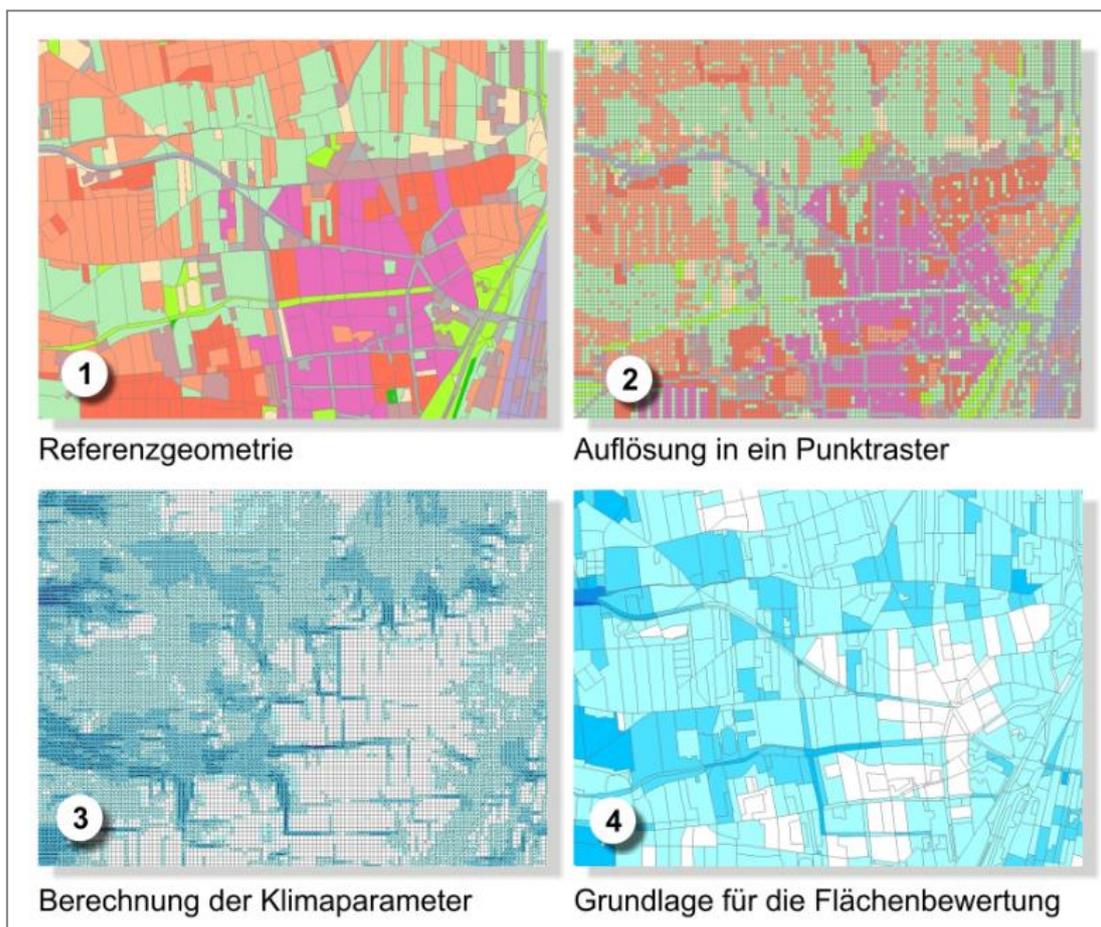


Abbildung 12: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation



### 3.4 HERAUSFORDERUNGEN UND UNSICHERHEITEN

Die numerische Siedlungsklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätze der Fachdisziplin (Messungen, klimatopbasierte GIS-Analysen) aufgrund ihres flächendeckenden, das Prozessgeschehen abbildenden Outputs überlegen. Dennoch sind Modellanwendungen mit Unsicherheiten verbunden, auf die im Sinne eines umfassenden, auf Transparenz und Akzeptanz ausgerichteten Analyseansatzes hingewiesen werden muss. Die Unsicherheiten lassen sich unter den folgenden Überschriften einordnen:

- Unsicherheiten im Modell („interne Unsicherheiten“)
- Unsicherheiten in den Eingangsdaten („externe Unsicherheiten“)

Zunächst einmal sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dieses lediglich hinreichend gut repräsentieren. Den Massstab zur Gütebeurteilung bildet dabei das anvisierte Einsatzgebiet des Modells. Dieser Ansatz gilt für (Stadt-)Klimamodelle aufgrund der Komplexität der in physikalischen Gleichungen abzubildenden (Stadt-)Atmosphäre in besonderem Masse. Folglich ist auch das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern lediglich die, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. Es erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787 definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren auch Prozesse, deren Abbildung gemäss VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten sind, aus denen sich aber dennoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sog. RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der aber im Zusammenhang mit Siedlungsklimaanwendungen noch Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ist. Ein Nachweis für eine tatsächliche Verbesserung der Modellergebnisse steht somit noch aus und kann nach heutigem Erkenntnisstand am ehesten vom Modell PALM-4U erwartet werden, an dessen Erprobung GEO-NET im Rahmen der Fördermassnahme „Stadtklima im Wandel“ intensiv beteiligt ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sog. „Modellrauschen“. Es beschreibt, in welchem Ausmass die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarienrechnungen enthält – also z.B. die Auswirkungen des zukünftig zu erwartenden Klimawandels, von Raumentwicklungsszenarien und/oder Massnahmenszenarien abzubilden hat. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 - 0,2 °C pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich in der Planungshinweiskarte aufgrund der geostatistischen Aggregation auf grössere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das auch für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt der Wert bei +/- 1 – 2 % bezogen auf eine Fläche der Basisgeometrie, bei der Kaltluftproduktionsrate besteht aufgrund ihres primär empirisch hergeleiteten Wertes keine Unsicherheit. Insgesamt zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der Planungshinweiskarte zu vernachlässigen sind.



Insbesondere kleinräumig stellen die zur Verfügung stehenden bzw. mit vertretbarem Aufwand erzeugbaren Modelleingangsdaten die relevantere Unsicherheitsquelle dar. Die Unsicherheiten können sich dabei ergeben aus

- der Aktualität der Daten (bzw. ihrer Obsoleszenz),
- ihrer Genauigkeit (bzw. Ungenauigkeit) bzw. ihres Informationsgehaltes sowie
- der Art ihrer Weiterverarbeitung zur Verwendbarkeit im Rahmen der Analyse

Bzgl. der Aktualität der Daten wird auf Kapitel 3.3 verwiesen. Dabei gilt grundsätzlich: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Insbesondere in sich dynamisch entwickelnden Gebieten sollte der Erhebungszeitpunkt nur für einzelne, das Ergebnis nicht nachhaltig beeinflussende Datensätze mehr als 3 Jahre in der Vergangenheit liegen. Diese Prämisse ist für die vorliegende Analyse weitestgehend erfüllt. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden. Es empfiehlt sich daher, den Fortschreibungsrhythmus der Klimaanalyse nicht an ein starres zeitliches Korsett, sondern an die Aktualisierung zentraler Eingangsdaten durch Dritte (insbesondere den Befliegungsturnus und die daraus abgeleiteten Produkte wie DOM, DTM und RGBI-Luftbilder) zu koppeln. In den letzten 10 Jahren hat die fernerkundliche Erhebungsqualität noch einmal deutlich zugenommen. Die Aufnahmen aus Befliegungen haben heute eine räumliche Genauigkeit von wenigen Zentimetern, so dass sich in der vorliegenden Analyse allenfalls noch kleinere Unsicherheiten aus sichttoten Räumen (z.B. in Gebäudeschatten) ergeben. Schon mit der nächsten Generation von Luftbildern (sog. TrueDOP) wird sich aber auch diese Unsicherheitsquelle auflösen.

Sämtliche Eingangsdaten wurden in der Analyse in ein regelmässiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 100 m<sup>2</sup> repräsentiert. Hierbei handelt es sich um die höchste Auflösung, die gegenwärtig für Kantone in der Grössenordnung Solothurns modelliert werden kann. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude- und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von mesoskaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte und Gemeinden haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Strukturtypen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den grössten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 10 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die **PET** am Tag auswirkt (vgl. Kap. 4.2). Es kann demnach sein, dass eine Strasse mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, so dass in der kantonsumfassenden Perspektive bzw. auf der Ebene der Planungshinweiskarte keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer auch ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.



Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich insbesondere auf die Gebäude. Auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten sind Gebäude in der vorliegenden Analyse als Klötzchenmodell (LOD 1) abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier gewisse Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamstädtischen) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschliesslich über das Bauvolumen abgebildet werden. Allerdings stellt das Bauvolumen den dominierenden Einflussfaktor dar, so dass die fehlenden Daten unter dem Stichwort der Feinjustierung diskutiert werden müssen. Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten (z.B. zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte) in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall einen Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 °C und in den Nachtstunden von 1,1 °C betragen kann, was wiederum auch zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Gross 2014). Es sei noch einmal betont, dass diese Unsicherheiten nicht im Modell begründet liegen – in dem diese Informationen grundsätzlich verarbeitet werden könnten – sondern in nicht oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden (Geo-)Basisinformationen. Angesichts der rasanten Entwicklung in der Fernerkundung und der Datenstandards (z.B. im Bereich des BIM - Building Information Modeling) ist damit zu rechnen, dass entsprechende Informationen mittelfristig (+/- 10 Jahre) bereitstehen werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass numerische Modellrechnungen – ebenso wie alle anderen Analysemethoden in der Umweltanalytik im Allgemeinen und der Angewandten Klimatologie im Speziellen – mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind. Es wird auch deutlich, dass diese Unsicherheiten allenfalls kleinräumig relevant sind und folglich auf die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Analyse – insbesondere auf die Planungshinweiskarte – einen zu vernachlässigenden Einfluss haben dürften. Nichtsdestotrotz wird es die Aufgabe des gesamten Fachgebiets der kommenden Jahre sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern. Das grösste Potential besteht in diesem Zusammenhang in der Optimierung der Berücksichtigung von Gebäude- und Bodeneigenschaften (Gross 2019).



## 4. Ergebnisse der Modellierung

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und **Kaltluftvolumenstrom** (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (**PET**; Tagsituation) für die heutige und zukünftige Situation beschrieben. Zusätzlich fassen die **Klimaanalysekarten** „Ist“ und „Zukunft“ die wesentlichen Aussagen der Klimaparameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen. Alle Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer **autochthonen** Sommerwetterlage (Kap. 3.2). Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. (Lufttemperatur, Windfeld) bzw. 1,1 m (PET) und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Wärmebelastung).

### 4.1 NACHTSITUATION

#### 4.1.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potentiellen **bioklimatischen** Belastungen abzugrenzen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine **autochthone** Sommernacht als besondere Wetterlage zu verstehen.

Je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage bzw. Höhe des Standorts und den Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften kann die nächtliche Abkühlung merkliche Unterschiede aufweisen, was bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets auch für den Kanton Solothurn mit seinen verschiedenen Flächennutzungen und Höhenstufen deutlich wird. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei Minimalwerten von etwa 7 °C in den Gipfelbereichen (Hasenmatt, Grenchenberg) und Maximalwerten bis knapp 20,7 °C über Gewässern (z.B. Teile der Aare) eine Spannweite von 13,7 °C. Die mittlere Temperatur des gesamten Kantons liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei etwa 14,5 °C.

Das Ausmass der Temperaturabweichung zwischen dem besiedelten Bereich und seiner Umgebung ist vor allem von der Ausdehnung und Dichte der Überbauung abhängig. In den Ortskernen sind die höchsten Bebauungsdichten und, gerade in den gewerblich geprägten Bereichen, hohe Versiegelungsgrade vorzufinden, was sich in der stärksten nächtlichen Überwärmung widerspiegelt – selbst nachts werden beispielsweise in den dicht bebauten Bereichen der Stadt Solothurn noch Temperaturen über 19 °C erreicht (Abbildung 13). Mit steigender Entfernung zum Stadtzentrum bzw. den Ortskernen nimmt die Überwärmung ab. In den aufgelockerten, besiedelten Randbereichen der Stadt Solothurn liegt die Temperatur im Bereich von 15 - 17 °C (z.B. in den Stadtteilen im Norden und Westen). Die niedrigsten Siedlungstemperaturen werden in den höher gelegenen Gemeinden (z.B. Gänsbrunnen und Welschenrohr) mit Werten von unter 13 °C erreicht.

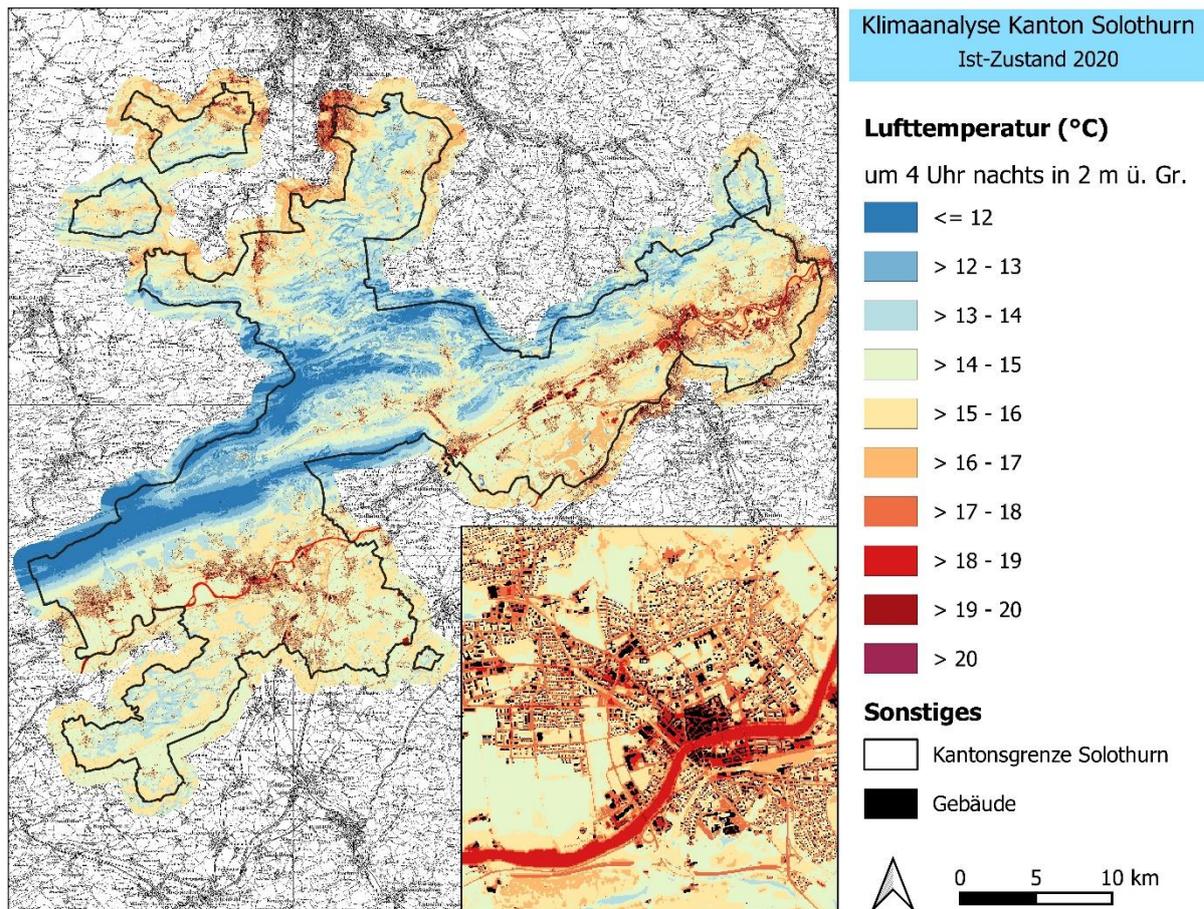


Abbildung 13: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld im Kanton Solothurn (Ist-Zustand 2020)

Unter den Grün- und Freiflächen zählen die Bergregionen zu den kältesten Bereichen des Kantons. So verfügen die Stadt Grenchen mit dem Grenchenberg und die Gemeinde Selzach mit der Hasenmatt über die kühlestn Ausgleichsräume. Neben der Höhenlage spielt jedoch auch die Art der Grün- und Freifläche eine Rolle. Dies kann am Beispiel der Stadt Solothurn verdeutlicht werden: In Bodennähe kühlen sich am stärksten die Acker- und Rasenflächen ab, welche ein Temperaturniveau von 13 - 15 °C aufzeigen. Verglichen mit den grünen Aussenbereichen weisen innerstädtische Grünflächen ein etwas höheres Wertespektrum auf, wobei eine Abhängigkeit von ihrer Grösse und Grünstruktur besteht. So sinkt die Temperatur über kleineren Grünflächen nur selten unter 14 °C, wenn sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind (z.B. Sportplätze). In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. Werte um 15 - 17 °C erreicht werden (z.B. Wildmannwald). Nachts fällt daher die Kaltluftproduktion am Boden geringer aus als über unversiegelten Freiflächen, jedoch nehmen grössere Waldgebiete eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht.

Unter anderem die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über grösseren Gewässern, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen sogar höher als in der Umgebung sein und deren Abkühlung verringern können. Dies ist u.a. bei der Aare und dem Bellacher Weiher zu erkennen. Kältere Gewässer wie z.B. die Emme können in Sommernächten dagegen auch kühlend wirken.

Aufgrund des Klimawandels muss in Solothurn in der Zukunft 2060 (Klimaperiode 2045 - 2074) mit einer sommerlichen Temperaturzunahme von durchschnittlich 1,9 °C gegenüber der Normperiode (1981-2010) gerechnet werden (mittlere Schätzung des RCP-Szenarios 4.5). Diese Temperaturerhöhung ist gleichmässig über den gesamten Kanton verteilt zu beobachten (Abbildung 14). Gleichzeitig haben die neu entstehenden Wohn-, Misch- und Arbeitszonen einen Einfluss auf das Solothurner Klima. Die Temperaturen nehmen am stärksten im Bereich dieser Entwicklungsflächen zu, da neben dem Klimawandel die Landnutzungsänderung und insbesondere die Versiegelung von ehemaligen Grün- und Freiflächen zu Buche schlägt. So treten u.a. lokale Temperaturzunahmen von mehr als 4-5 °C im Bereich neu entstehender Gewerbeflächen bzw. 3-4 °C im Bereich neuer Wohnquartiere auf.

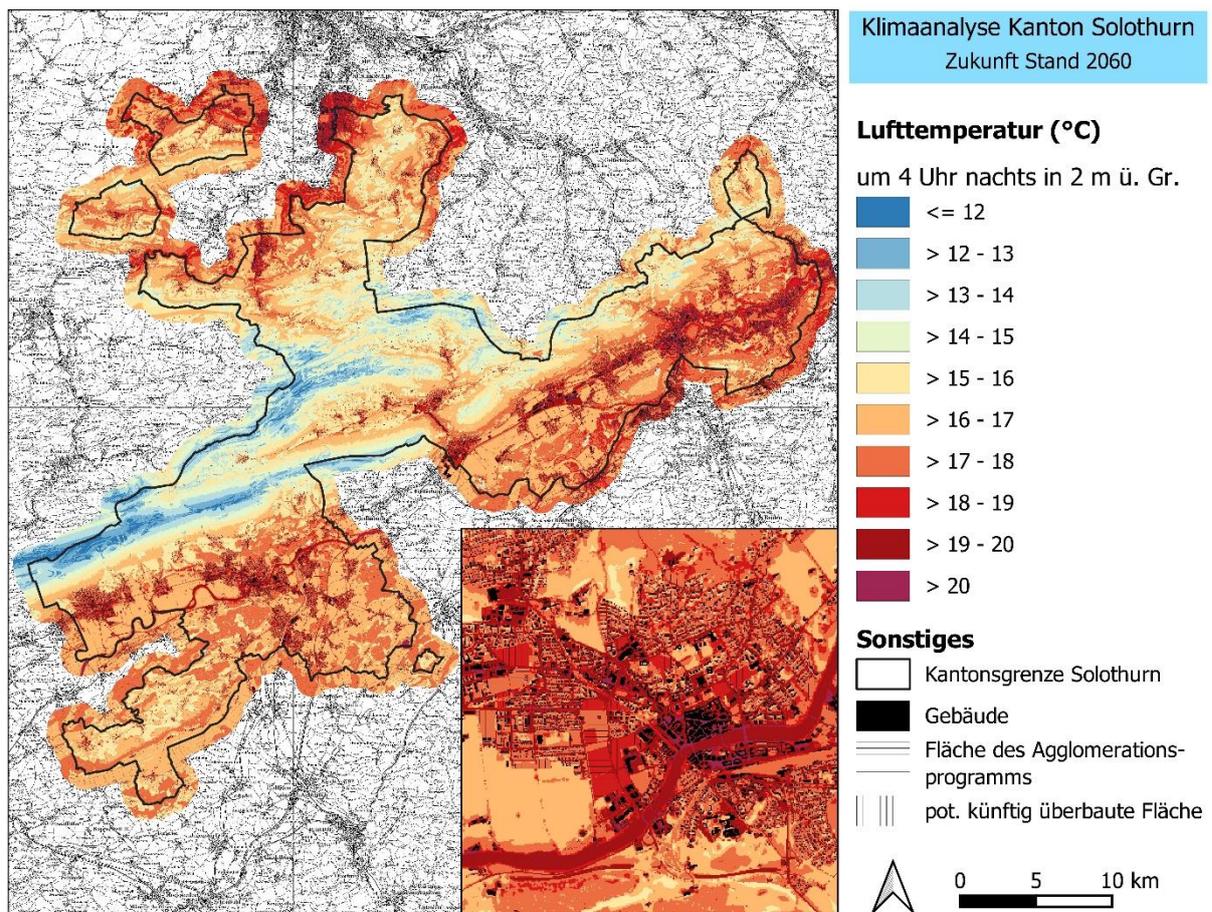


Abbildung 14: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld im Kanton Solothurn (Zukunft Stand 2060)

#### 4.1.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Lokalen Strömungssystemen wie **Flurwinden** oder Hangabwinden kommt eine besondere raumplanerische Bedeutung zu: Grössere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis, sodass die Durchlüftung des Siedlungskörpers herabgesetzt ist. Die Abfuhr überwärmter und schadstoffbelasteter Luftmassen in den Strassenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren **bioklimatisch** zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr kühlerer und frischer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Weil die Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der **Grünflächen** ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: Der **Kaltluftvolumenstrom**. Vereinfacht ausgedrückt stellt er das Produkt aus der Fliessgeschwindigkeit der **Kaltluft**, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit  $\text{m}^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fliesst (Abbildung 15).

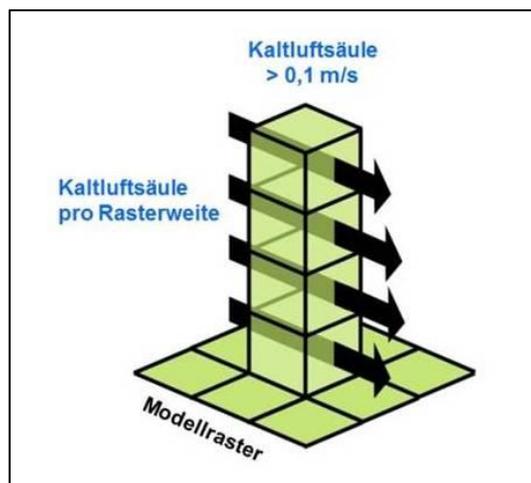


Abbildung 15: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Grösse, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab. Die Mächtigkeit der Kaltluftschicht nimmt im Verlaufe einer Nacht in der Regel zu und ist, genau wie die Luftaustauschprozesse allgemein, meist erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickelt.

Strömungshindernisse wie Strassendämme oder Gebäude können luvseitig<sup>15</sup> markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von grösseren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee<sup>16</sup> zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebauten Gebiet hängt folglich von der Siedlungsgrösse und -struktur sowie Bebauungsdichte und zudem von der anthropogenen Wärmefreisetzung und Menge einströmender Kaltluft ab.

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt im Kanton eine grosse Variabilität und reicht von „nicht vorhanden“ bis zu maximalen Werten von knapp  $145 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  (Abbildung 16). Die höchsten Kaltluftvolumenströme werden in der Regel auf Acker-, Rasen- und Freiflächen in Hanglage erreicht. Dagegen sind die geringsten

<sup>15</sup> dem Wind zugewandte Seite

<sup>16</sup> dem Wind abgewandte Seite

Kaltluftvolumenströme in dicht bebauten Ortschaften, Wäldern und Ebenen zu finden. Der Mittelwert im Kanton Solothurn liegt bei  $29,8 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ .

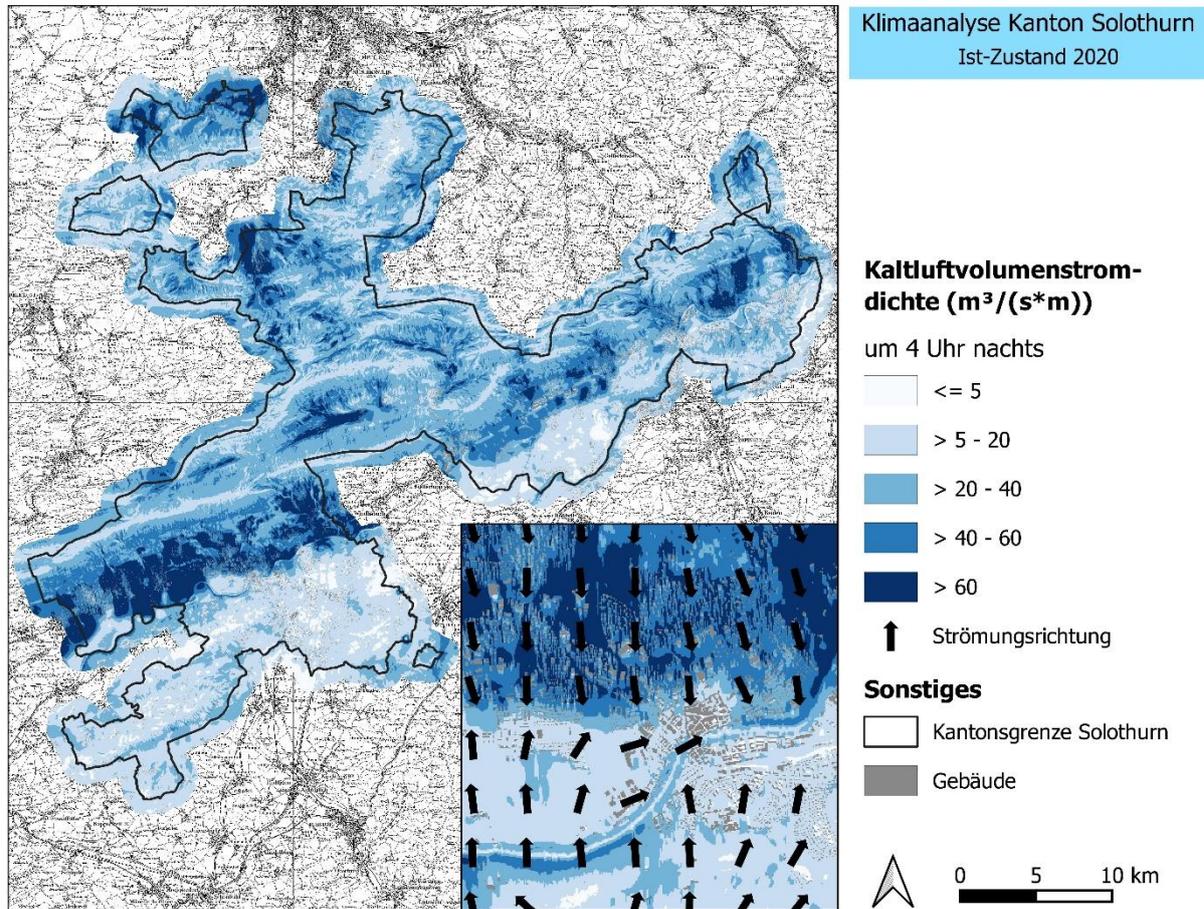


Abbildung 16: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Kanton Solothurn (Ist-Zustand 2020)

Hervorzuheben ist, dass sich die meisten Siedlungen in Tallage (insbesondere Aaretal) befinden und die Kaltluft aus den umliegenden Höhenzügen nachts in Richtung der Ortschaften fliesst. Aufgrund des steileren Reliefs und der Höhenzüge nördlich der Aare ist der Kaltluftvolumenstrom in diesen Bereichen stärker ausgeprägt als südlich der Aare, was unter anderem in der Stadt Solothurn zu beobachten ist. Daneben werden die Hangabwinde durch den Temperaturunterschied zwischen der warmen Siedlung und seiner kühlen Umgebung verstärkt (thermische Winde). Aufgrund der Topografie und der überwiegend lockeren Bebauung im Kanton ist die Belüftungssituation unter **austauscharmen** Bedingungen vergleichsweise günstig. Allerdings nimmt in Richtung der Ortskerne der Kaltluftvolumenstrom aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung ab. Jedoch bilden auch grosse, zum Teil innerstädtische Grünflächen aufgrund der Temperaturunterschiede zur Umgebung ihr eigenes Windsystem aus (z.B. Friedhof Gerlafingen, Friedhof Olten und die derzeit noch bestehende Grünfläche des Entwicklungsgebietes Attisholz-Süd in Luterbach). Diese Winde stellen wichtige lokale Ausgleichsströme für die angrenzende Bebauung dar.

Rauigkeitsarme Strukturen wie die Bahntrassen und breite Strassen sind teilweise durch hohe Volumenströme gekennzeichnet, transportieren in der Regel aber wärmere Luft als grüneprägte Strukturen (die Kaltluft erwärmt sich während des Transports über diesen Flächen). Vor diesem Hintergrund sind rauigkeitsarme Grünflächen in Bezug auf die Kaltluftversorgung tendenziell als wirkungsvoller anzusehen.

Die Abbildung 17 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie für den Ausschnitt der Stadt Solothurn auch die Windrichtung (Pfeilsignatur in 500 m Auflösung<sup>17</sup>) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Eine potentielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s angenommen.

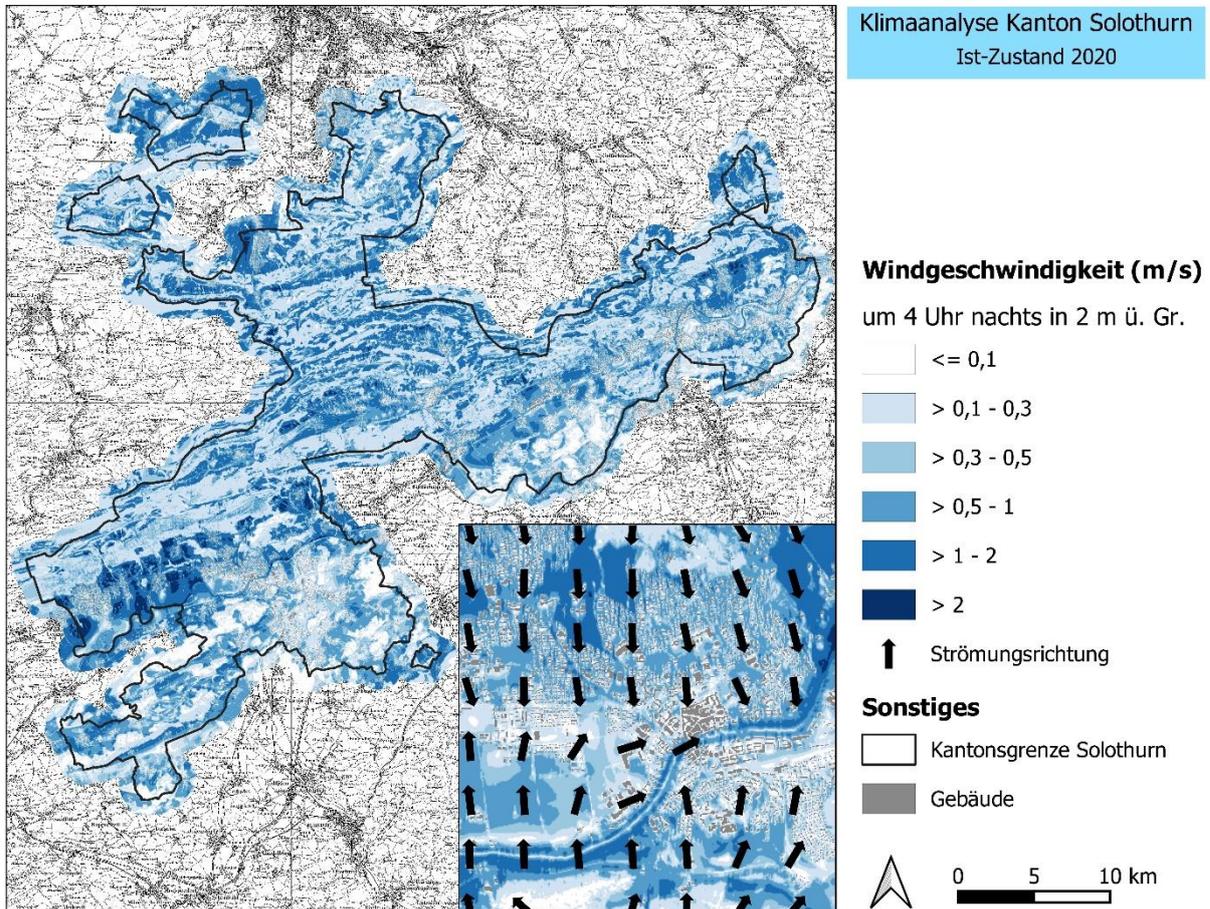


Abbildung 17: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Kanton Solothurn (Ist-Zustand 2020)

Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfeldes folgt grösstenteils dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. Im Kanton Solothurn werden mit 3,6 m/s die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten erreicht. Hohe Windgeschwindigkeiten treten unter **austauscharmen** Bedingungen insbesondere bei steilem Relief auf (nächtliche Bergwinde). Das Kaltluftströmungsfeld verdeutlicht, dass neben Grünzügen auch der Strassenraum (aufgrund der geringen Hinderniswirkung) zur Durchlüftung des Siedlungsgebiets beitragen kann – unter Umständen handelt es sich dabei nur noch um Kaltluft-, nicht mehr um Frischlufttransport im Sinne von schadstoffarmer Luft (insb. in den frühen Morgenstunden je nach Verkehrslage möglich). In 2 m ü. Gr. tritt die Hinderniswirkung von Gebäuden stärker hervor, sodass einige Ortskerne, u.a. das Solothurner Stadtzentrum, bodennah keine wirksame Durchlüftung erfahren. Neben Gebäuden stellen Bäume und insbesondere Wälder mit ihrem dichten Baumbestand zwangsläufig ein Hindernis für eine bodennahe Strömung dar, doch zeigen die Ergebnisse, dass von den Waldrändern her auch bodennahe Ausgleichsströmungen Richtung Siedlungsgebiet einsetzen.

<sup>17</sup> Die Pfeile wurden in einer geringeren räumlichen Auflösung abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.

Die Kaltluftdynamik in der Zukunft verändert sich im Zuge des Klimawandels nur geringfügig gegenüber der heutigen Situation (Abbildung 18, Abbildung 19). Lokale Änderungen im Kaltluftströmungsfeld ergeben sich vorrangig im Umfeld der Entwicklungsflächen, da neu errichtete Gebäude als Strömungshindernisse fungieren und damit die Winde abbremsen bzw. umlenken. So nehmen unter anderem Kaltluftvolumenstrom und Windgeschwindigkeit mit der Realisierung der Entwicklungsfläche Solothurn Weitblick ab. Nahezu alle weiteren Entwicklungsflächen verhalten sich ähnlich, wobei sich die Veränderungen im Kaltluftströmungsfeld in der Regel sowohl auf der Planfläche selbst als auch in seinem näheren Umfeld ergeben.

Wenngleich die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten und des Kaltluftvolumenstroms infolge der Bebauung überwiegt, können durch Kanalisierungseffekte einige Bereiche mit positiven Abweichungen (Zunahmen) auftreten. Eine weitere Ausnahme mit positiven Abweichungen stellt die Veränderung des **Flurwindsystems** dar: Im Zuge der Landnutzungsänderung (also der Umwandlung einer Freifläche in eine bebaute, versiegelte Fläche) nimmt die Temperatur auf den Entwicklungsflächen zu (vgl. Ende von Kap 4.1.1), was zu veränderten, thermisch-induzierten Flurwinden führt. So nehmen beispielsweise Kaltluftvolumenstrom und Windgeschwindigkeit im Osten der Papierfabrik Biberist signifikant zu, da diese aufgrund ihres zunehmenden Versiegelungsgrades deutlich wärmer sind als die umliegenden Frei- und Ackerflächen und sich damit stärkere thermische Flurwinde ausprägen.

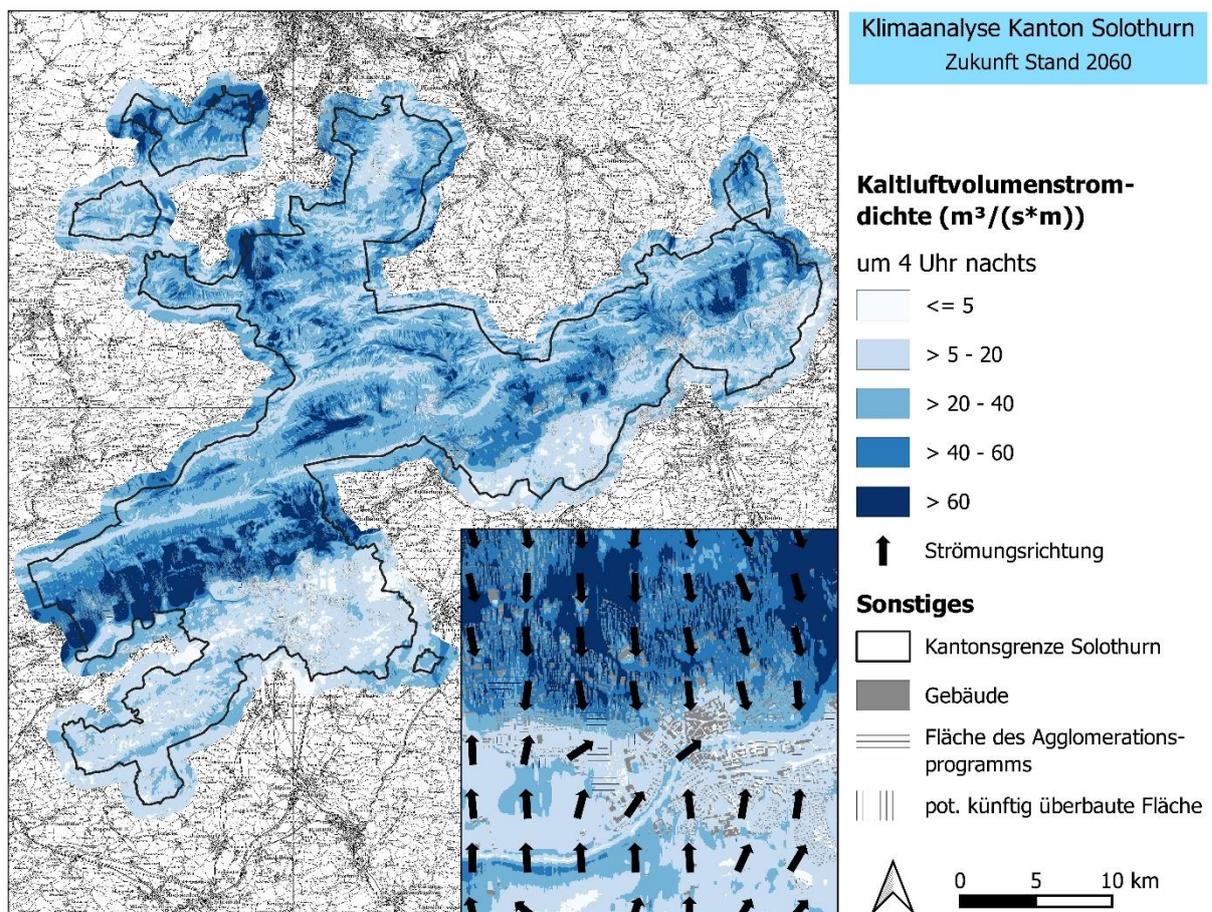


Abbildung 18: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Kanton Solothurn (Zukunft Stand 2060)

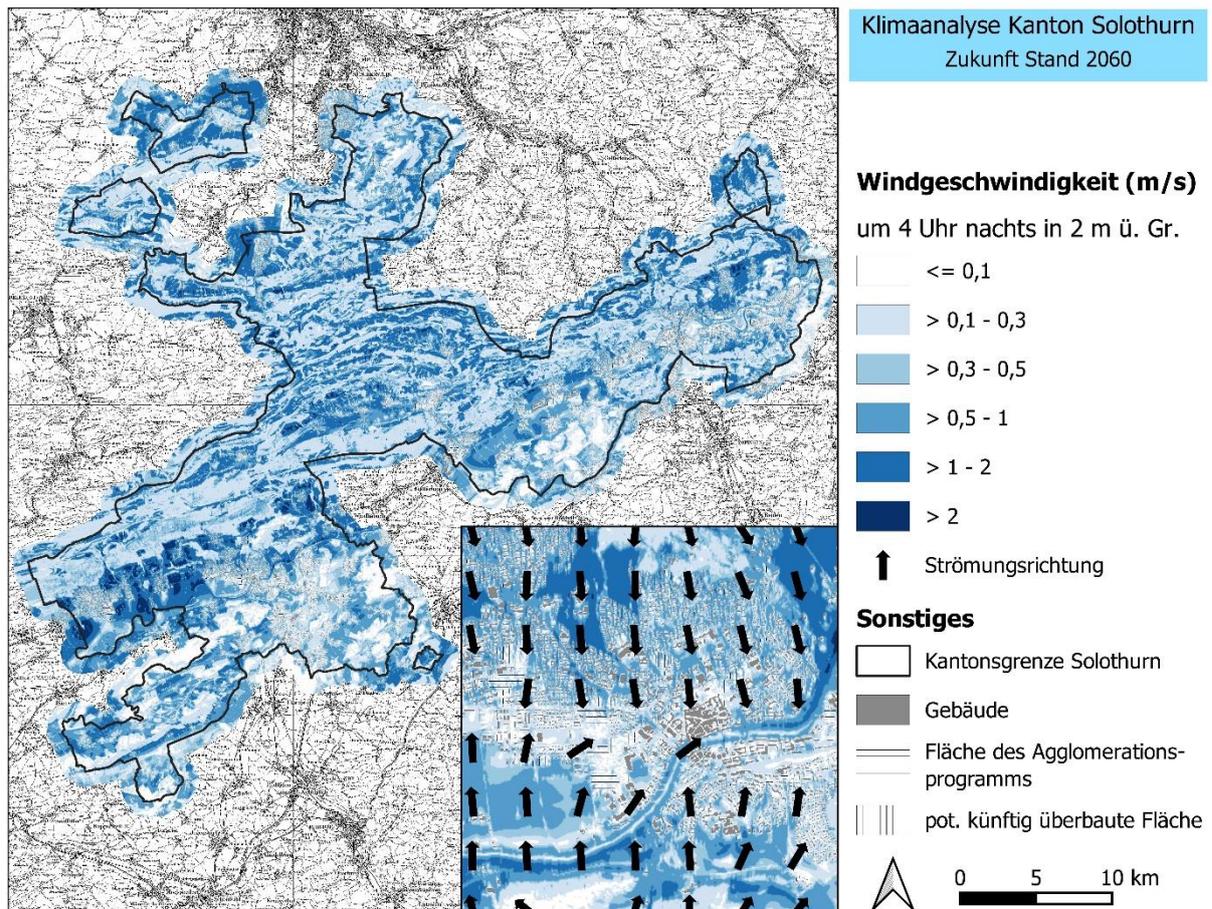


Abbildung 19: Bodennahe nächtliches Strömungsfeld im Kanton Solothurn (Zukunft Stand 2060)

#### 4.1.3 KLIMAAANALYSEKARTE NACHT

Die **Klimaanalysekarte** Nacht bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches im gesamten Untersuchungsraum ab (**Strömungsfeld, Kaltluftleitbahnen**). Für Siedlungs- und Verkehrsflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar, basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer **autochthonen** Sommernacht um 04:00 Uhr morgens. Die Klimaanalysekarte fasst die wesentlichen Aussagen der Klimaparameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeneinhalten.

In der Klimaanalysekarte (Abbildung 20) sind für die Grün- und Freiflächen die Modellergebnisse des Kaltluftvolumenstroms in abgestufter Flächenfarbe dargestellt. Bei den Siedlungs- und Verkehrsflächen steht dagegen die nächtliche Überwärmung im Vordergrund, welche anhand der Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. beschrieben wird. Weiterhin ist das bodennahe Strömungsfeld ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur abgebildet. Das Strömungsfeld wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 500 m aggregiert. Kleinräumige Windsysteme (z.B. Kanalisierung von Winden in schmalen Strassenabschnitten) werden aus der Karte nicht ersichtlich; derartig detaillierte Informationen müssen aus den Rasterergebnissen auf 10 m-Basis entnommen werden. Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in der Karte besondere Kaltluftprozesse hervorgehoben, welche im Kanton Solothurn eine wichtige Rolle spielen. Dazu zählen Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüsse und Parkwinde (Kaltlufttransportbereiche) sowie Kaltluftentstehungsgebiete (Bereiche mit hoher Kaltluftbildung).

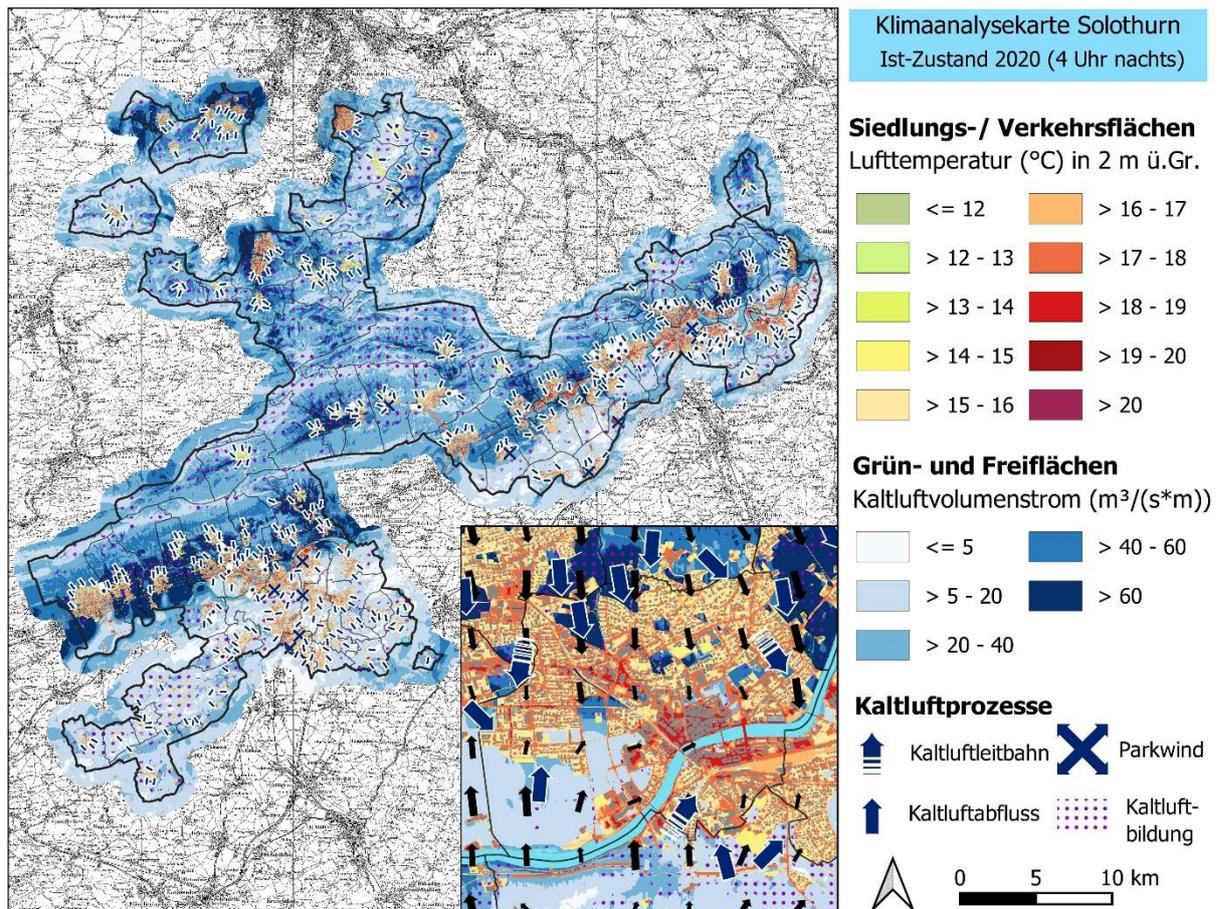


Abbildung 20: Klimaanalysekarte Kanton Solothurn (Ist-Zustand 2020; verkürzte Legende)

**Kaltluftleitbahnen** sind lineare Strukturen, die Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander verbinden und einen elementaren Bestandteil des Luftaustausches darstellen. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, mindestens jedoch 50 m breit (Mayer et al., 1994) und zum belasteten Siedlungsraum ausgerichtet. Insbesondere entlang von Grünachsen dringt Kaltluft in die Bebauung ein und kann dort die thermische Belastung senken. Im Laufe einer (**autochthonen**) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammenhängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als Trittsteine für Kaltluft dienen. Im Kanton Solothurn gibt es etwa 30 verschiedene Kaltluftleitbahnen, welche effektiv vom Umland Kaltluft in die Siedlung transportieren. Dazu zählen unter anderem die Grünzüge entlang des Cholersbaches (Hägendorf) und Rickenbaches (Hägendorf / Rickenbach), der Grünstreifen zwischen Weissensteinstrasse und Sagackerstrasse (Langendorf / Oberdorf), die Ackerflächen südlich der Siedlung Nennigkofen, das Gleisareal im Südwesten der Stadt Solothurn und der Grünzug am Dorfbach (im Nordwesten von Matzendorf). Alle Kaltluftleitbahnen sind durch eine überdurchschnittliche Kaltluftvolumenstromdichte gekennzeichnet und verfügen über einen relativ hohen Grünanteil, sodass sich die Luft während des Transportes nicht wesentlich erwärmt und ausreichend kalte Luft in die Siedlung hineingetragen werden kann.

Neben den Kaltluftleitbahnen als linienhafte Strukturen gibt es auch **Kaltluftabflüsse**, welche flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auftreten und ebenfalls durch überdurchschnittlich hohe Kaltluftvolumenströme gekennzeichnet sind. Für den Kanton Solothurn spielen diese aufgrund des hügelig-bergigen



Reliefs eine wichtige Rolle. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichten von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als **Flurwinde**, die sich aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Für den Kanton wurden über 380 relevante Kaltluftabflussbereiche identifiziert.

Im Kanton Solothurn gibt es zudem eine Reihe von Grünflächen, welche in der Nacht ihre kühle Luft in viele Richtungen in die bebaute Umgebung transportieren. Diese sogenannten **Parkwinde**, d.h. thermisch hervorgerufene Ausgleichsströmungen aus einer umbauten Grünfläche, treten auf grösseren Grünflächen auf, die in eine deutlich wärmere Umgebung eingebettet sind. Da die Parkwinde im Vergleich zu Kaltluftabflüssen eher schwach sind, hängt die Reichweite dieser Ausgleichsströmungen auch stark von den Strömungshindernissen in der Umgebung ab. Breite Strassenzüge bzw. rauigkeitsarme Strukturen und eine strömungsparallele Ausrichtung der Gebäudekörper begünstigen ein weites Eindringen von kühlerer „Park-“Luft in den Siedlungsbereich. Anhand der modellierten Ergebnisse konnten 12 verschiedene Bereiche mit Parkwindssystemen identifiziert werden, unter anderem der Friedhof Olten, der Hardwald in Olten und der Friedhof Gerlafingen. Die von diesen Grünflächen ausgehenden Winde strömen in nahezu fast alle Richtungen und belüften die umgebende Bebauung weitreichend.

**Kaltluftentstehungsgebiete** kennzeichnen Grünflächen mit einer besonders hohen Kaltluftproduktionsrate und speisen die verschiedenen Kaltluftströmungen bzw. reichen teilweise sogar über diese hinaus. Grünflächen wurden als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichnet, wenn sie mindestens  $16,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  Kaltluft produzieren. Die Grenze entspricht dem Mittelwert der Kaltluftproduktionsrate der Grün- und Freiflächen des Kantons (bezogen auf die Situation um 4 Uhr nachts in 2 m ü. Gr.).

Mit Blick auf die Klimaanalysekarte der zukünftigen **Situation 2060** (Abbildung 21) werden die Unterschiede gegenüber der aktuellen Situation sichtbar. Zunächst wird anhand der anderen Farbigkeit der Siedlungs- und Verkehrsflächen (Verschiebung von gelb-orange zu rot) die durch den Klimawandel bedingte Temperaturzunahme von  $1,9 \text{ }^\circ\text{C}$  deutlich. Das Kaltluftprozessgeschehen bleibt auch mit dem Klimawandel und der Realisierung der Entwicklungsflächen weitestgehend erhalten. Bei genauerer Betrachtung führt die Umsetzung von vereinzelt Vorhaben jedoch auch zum Verlust von wichtigen Kaltlufttransportbereichen. In der Klimaanalysekarte „Zukunft“ gibt es 2 Kaltluftabflüsse weniger, 5 Leitbahnen weniger und ein Parkwindssystem weniger als in der aktuellen Situation. Mit der Umsetzung der Massnahmen (des Agglomerationsprogramms) „ChlyHolz“ in Olten und dem „Wohnschwerpunkt Fällimoos, Grünen“ in Biberist entfallen unter anderem zwei Bereiche mit Kaltluftabflüssen. Gleiches gilt für die westlichen Siedlungsränder der Gemeinden Kappel, Oderbuchsiten und der Stadt Solothurn. In anderen Bereichen dagegen verschieben sich die Kaltluftabflussbereiche weiter nach aussen, z.B. mit der Umsetzung der Massnahme Schwerzimoos in Biberist. In solchen Fällen wird das neue Quartier zwar gut durchlüftet, gleichzeitig verschlechtert sich aber die Durchlüftung im angrenzenden Siedlungsbestand. Ähnliches gilt für die Fälle, bei denen eine Kaltluftleitbahn entfällt und ein neuer Kaltluftabfluss am Rande der Entwicklungsfläche entsteht (z.B. Balsthal im Westen nördlich der Dünnern, Gempfen im Norden, Reservezone im Norden Grenchens). In anderen Fällen entfallen Kaltluftleitbahnen ersatzlos, etwa im Bereich des Wohnschwerpunktes Bellach, Grederhof Ost und in der Gemeinde Gretzenbach. Die Umsetzung des Entwicklungsgebietes Attisholz-Süd in Luterbach führt zum Verlust eines Parkwindsystems.

Darüber hinaus entfallen mit der Umwandlung von Grün- und Freiflächen zu Siedlungsflächen auch einige Kaltluftentstehungsgebiete (z.B. Schwerzimoos in Biberist und Wohnschwerpunkt Bellach, Grederhof Ost). Zusammenfassend ergeben sich lokale Änderungen der Temperatur- und Strömungsverhältnisse in den Entwicklungsgebieten und dessen Nahumfeld, während der Klimawandel keine Veränderung im Strömungsgeschehen und eine gleichmässige Temperaturerhöhung im gesamten Kanton um ca. 1,9 °C bewirkt.

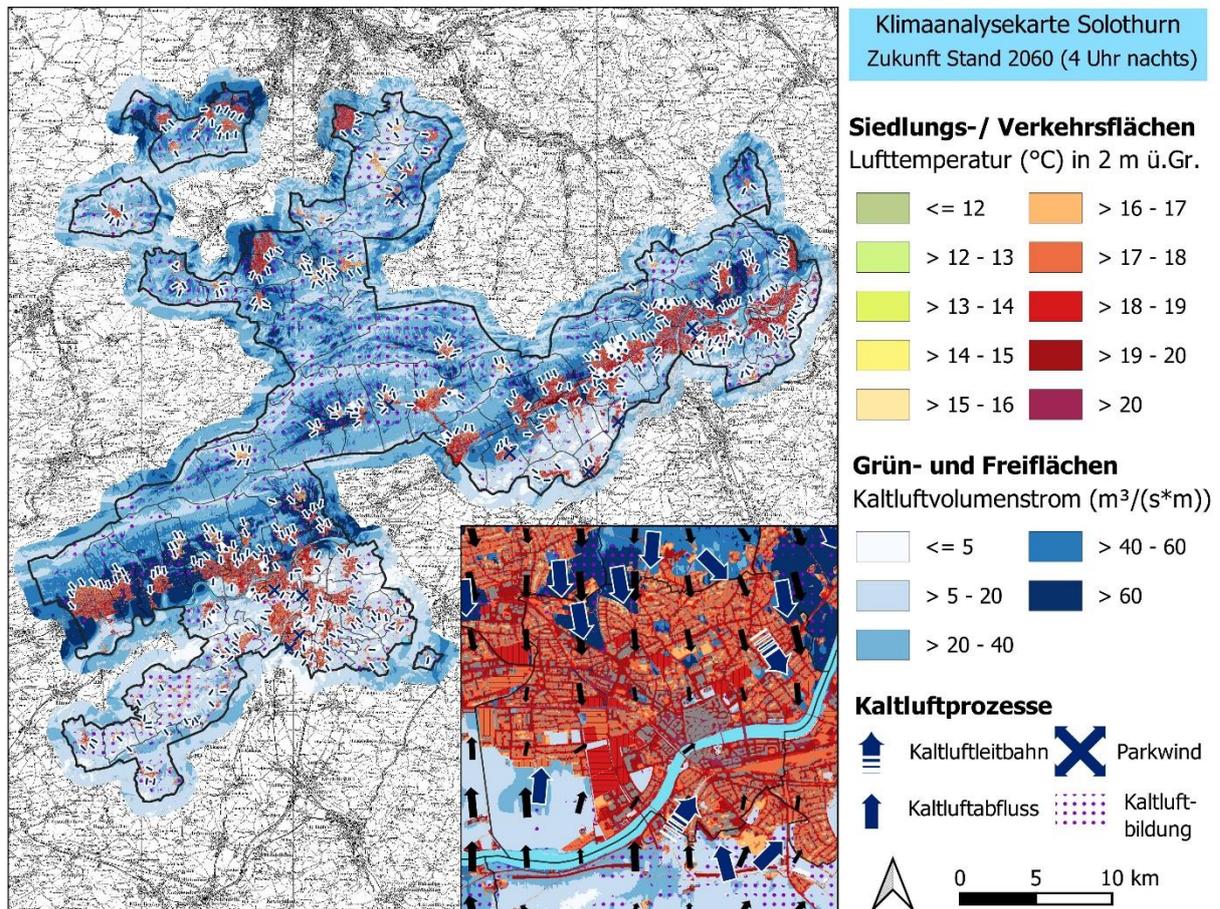


Abbildung 21: Klimaanalysekarte Kanton Solothurn (Zukunft Stand 2060; verkürzte Legende)

## 4.2 TAGSITUATION

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung des klimatischen Wohlbefindens des Menschen am Tag werden Indizes verwendet (Kenngrössen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung (Abbildung 22) und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen<sup>18</sup>.

In dem vorliegenden Bericht wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index **PET** um 14:00 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; Matzarakis & Mayer 1996). Gegenüber

<sup>18</sup> Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m<sup>2</sup> Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).



vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit besser nachvollzogen werden zu können<sup>19</sup>. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, so dass sich die Ergebnisse mit denen anderer Gebiete vergleichen lassen. Wie die übrigen human-biometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf aussenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tageinsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifiziert (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tabelle 3). Die PET wird in einer Höhe von 1,1 m über dem Grund untersucht, da dies die humanbioklimatisch relevante Höhe ist (mittlere Höhe des Körperschwerpunktes eines Menschen).

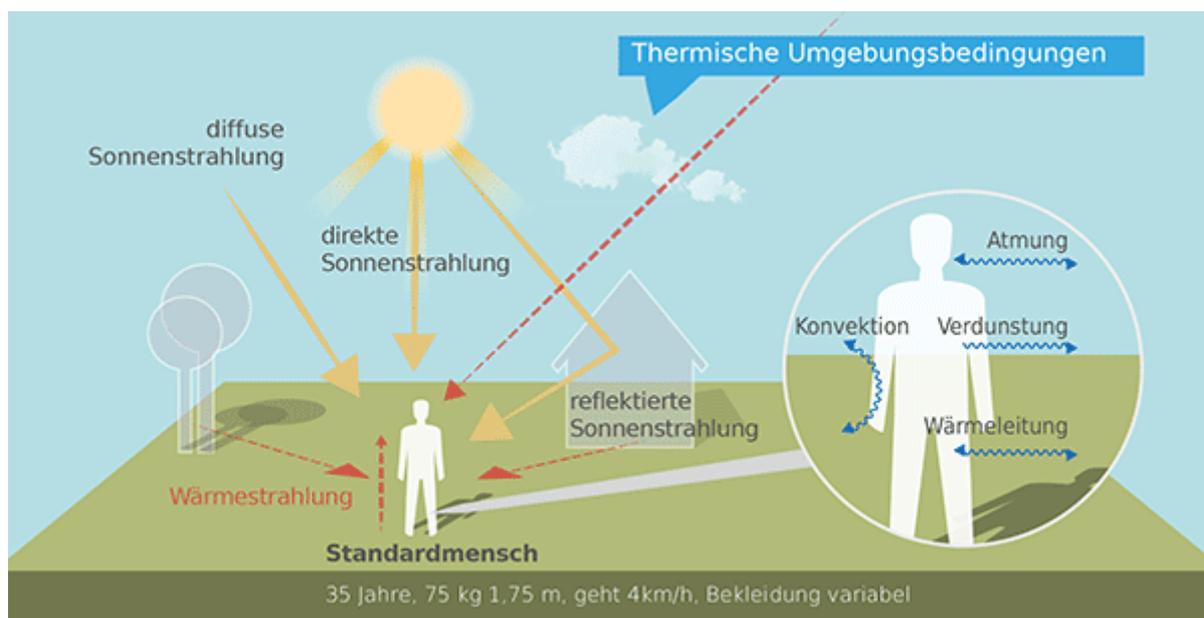


Abbildung 22: Schematische Darstellung der verschiedenen Einflüsse auf das Wärmeempfinden des Menschen (DWD 2023)

Tabelle 3: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004)

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mässige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwäche Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mässige Wärmebelastung
35 °C	Heiss	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiss	Extreme Wärmebelastung

<sup>19</sup> Beispiele für weitere Kenngrössen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).

Die PET wird tagsüber vor allem durch die Verschattung beeinflusst, wobei im Kanton Solothurn auch das Relief (Höhenlage, Hangneigung) einen zusätzlichen Einfluss nimmt. Da in den Höhenlagen die Lufttemperatur verhältnismässig gering ausfällt, ist auch die PET vergleichsweise gering (z.B. Gänsbrunnen und Welschenrohr). Zudem können tagsüber an steilen Hängen stärkere Talwinde auftreten, die eine Reduktion der PET bewirken (z.B. Lommiswil).

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET mit einer Spannweite von 29,3 °C grössere Unterschiede im Kanton auf und reicht von 15,5 - 44,8°C (Abbildung 23). Die geringsten Werte sind in Waldgebieten zu finden, die tagsüber mit PET-Werten von meist unter 29 °C (*keine bis schwache Wärmebelastung*) eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung haben (z.B. Oberwald in Biberist, Hardwald in Olten). Auch unter grösseren Baumgruppen (z.B. Friedhof Olten) können zum Teil PET-Werte von unter 29 °C vorherrschen. Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder und Baumbestände allgemein als Rückzugsorte dienen können. Zudem vermögen siedlungsnaher Wälder und Baumgruppen auch am Tag **Kaltluft** zugunsten des angrenzenden Siedlungsraumes erzeugen (hier nicht dargestellt). Neben Baumbeständen entfalten Gewässerflächen tagsüber eine kühlende Wirkung. So beträgt unter anderem die PET in 1,1 m über der Oberfläche der Aare etwa 27 - 32 °C (bei einer angenommenen Wassertemperatur von 19 °C).

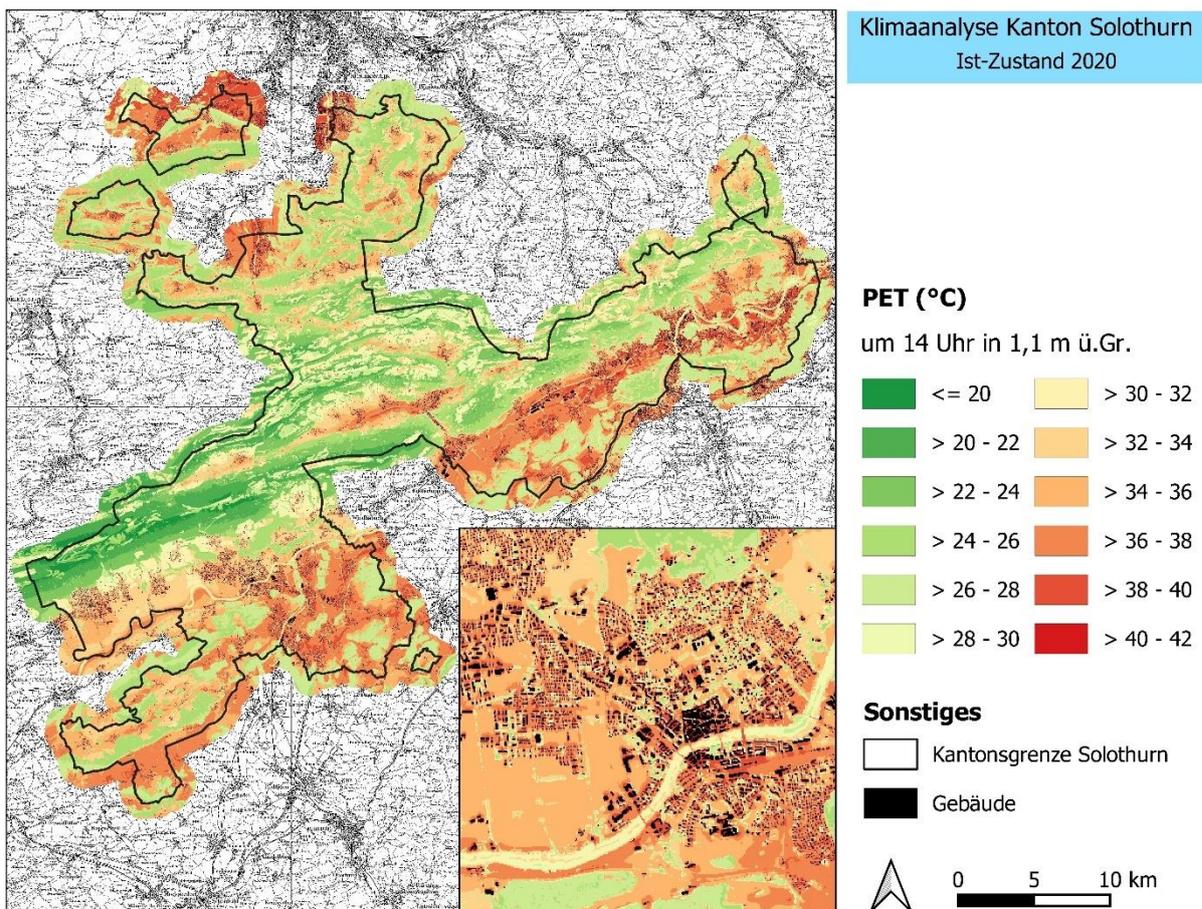


Abbildung 23: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) am Tag im Kanton Solothurn (Ist-Zustand 2020)

Alle weiteren Flächen weisen – mit Ausnahme von Bergregionen – unter den gegebenen Annahmen eines **autochthonen** Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine *mässige*

**Wärmebelastung** auf, wobei der Siedlungsraum grösstenteils von einer *starken Wärmebelastung* betroffen ist. Die höchsten Werte sind über versiegelten Gewerbegebieten und dem Strassenraum, insbesondere in den Ortszentren und den tieferen Lagen, zu finden. Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen fast ähnlich hohe Werte. Neben umliegenden Wäldern stellen in den Siedlungen vor allem Parkareale (z.B. Stadtpark Olten, Richard Flury Park in Biberist, Stadtpark Grenchen), Friedhöfe (z.B. Friedhof St. Katharinen in Solothurn) sowie grüne Uferbereiche (z.B. an der Aare) und Freibäder (z.B. Schwimmbad Moos in Balsthal, Strandbad Olten) mit ihrer vergleichsweise geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar.

Analog zur Lufttemperatur (vgl. Ende von Kap. 4.1.1) nimmt die PET in der Zukunft infolge des Klimawandels gleichmässig über den Kanton verteilt zu (Abbildung 24). Auch bei der PET ergeben sich durch die Landnutzungsänderung sehr lokale Veränderungen. Die Änderungsraten sind sowohl negativ (PET-Abnahme gegenüber der heutigen Situation) als auch positiv (PET-Zunahme gegenüber der heutigen Situation). Aufgrund der steigenden Lufttemperaturen und der Zunahme des Versiegelungsgrades auf den Entwicklungsflächen erhöht sich die PET in den meisten Gebieten gegenüber der heutigen Situation. Jedoch bewirken zusätzliche Verschattungen durch Bäume oder durch Gebäude auch eine Reduktion der PET und damit eine verbesserte bioklimatische Situation am Tag. Demnach können Verschattungsmassnahmen die Effekte des Klimawandels überkompensieren.<sup>20</sup>

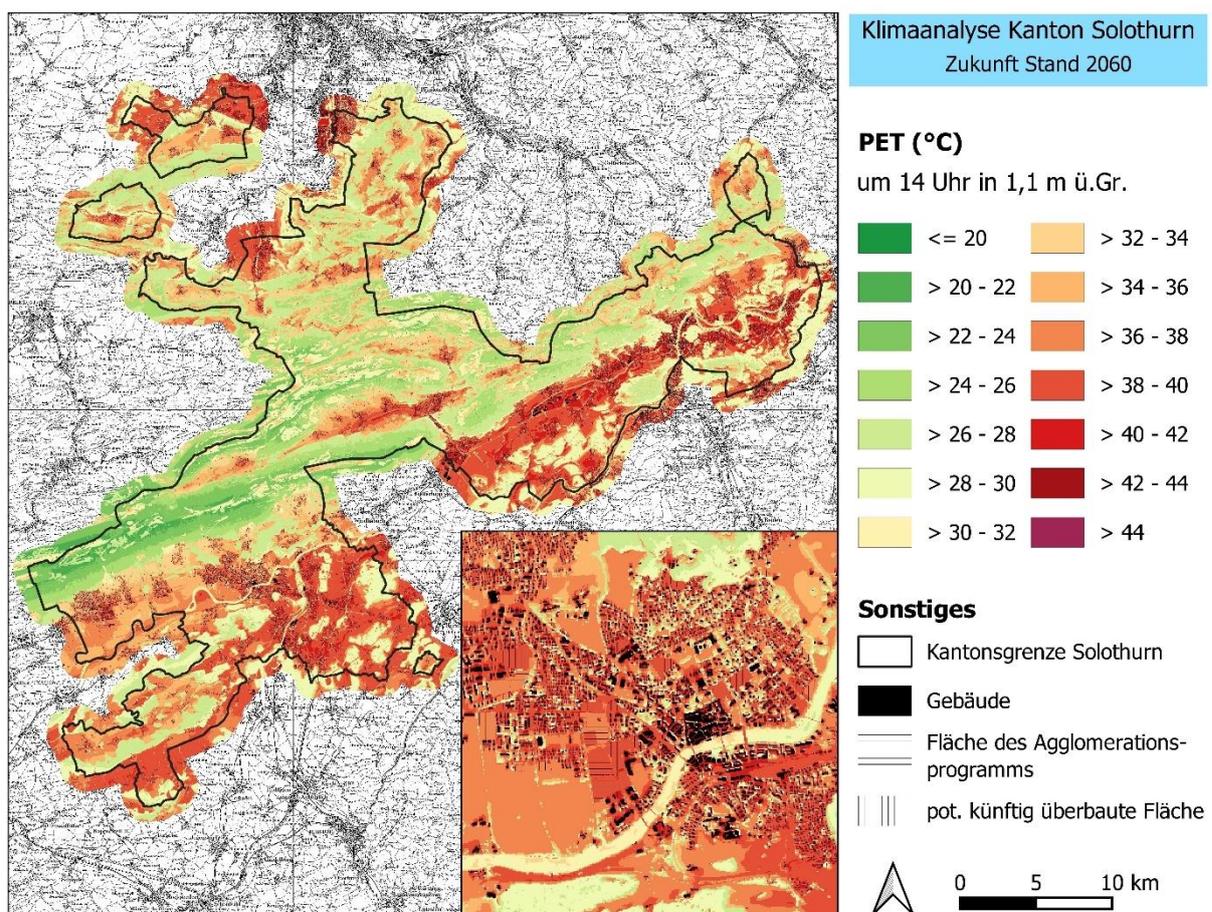


Abbildung 24: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) am Tag im Kanton Solothurn (Zukunft Stand 2060)

<sup>20</sup> Die Aussage bezieht sich auf die Tagsituation. In der Nacht können Baumpflanzungen höhere Lufttemperaturen bewirken.



## 5. Planungshinweiskarten

### 5.1 BEWERTUNGSMETHODEN

Für den Kanton Solothurn wurden zwei separate **Planungshinweiskarten** (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils auf den Ist-Zustand beziehen. Die Bewertung der Dringlichkeit zur Verbesserung der **bioklimatischen** Situation am Tag bzw. für Gegenmassnahmen zur nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Strassenraum (**Wirkungsraum**) sowie der Bedeutung von **Grünflächen** als **Ausgleichsraum** erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 (VDI 2008a, VDI 2014). Ausgehend von ihren Bewertungen wurden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben. Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarten stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

#### 5.1.1 STANDARDISIERUNG DER PARAMETER (Z-TRANSFORMATION)

Die Modellergebnisse und Klimaanalysekarte bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab. Die Bewertung in den Planungshinweiskarten fusst dagegen auf den relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um die Belastungen beschreiben und Planungshinweise ableiten zu können.

Für die Bewertung meteorologischer Grössen bedarf es eines begründeten, nachvollziehbaren Massstabs. Nicht immer ist ersichtlich, aufgrund welcher Kriterien eine Klassifizierung in Kategorien wie beispielsweise *hoch* und *niedrig* oder *günstig* und *ungünstig* erfolgt. In der VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 wird daher vorgeschlagen, einer Beurteilung das lokale bzw. regionale Wertenniveau der Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen (VDI 2008a).

Erstrebenswert wäre es zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Parameter über eine **z-Transformation** standardisiert. Rechnerisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Hieraus ergeben sich Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert (= 0) und positive sowie negative Standardabweichungen ( $S_i$ ) von diesem Mittelwert festgelegt sind (standardmässig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere  $S_1$ -Schranke; Abbildung 25).

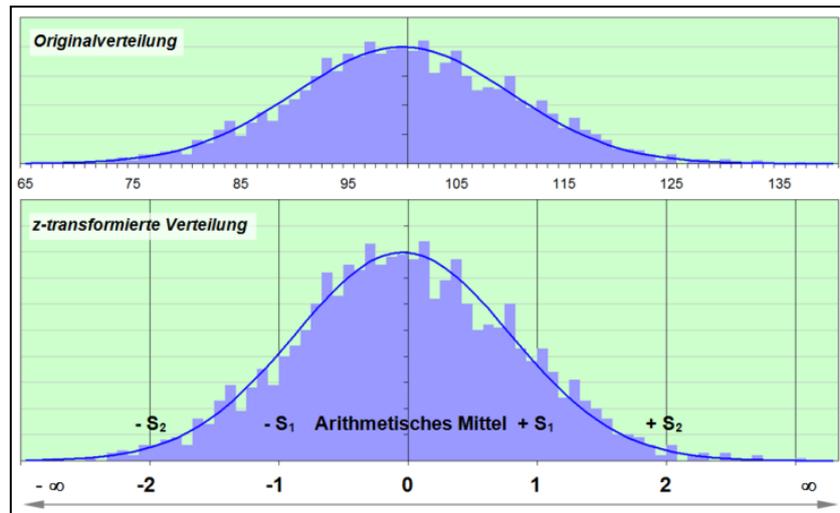


Abbildung 25: z-Transformation zur Standardisierung der vergleichenden Bewertung von Parametern

### 5.1.2 BEWERTUNG VON SIEDLUNGS- UND VERKEHRSFLÄCHEN (WIRKUNGSRAUM)

Der Siedlungsraum und die Verkehrswege stellen den primären Wirkungsraum des siedlungsklimatischen Prozessgeschehens dar. Im Folgenden wird die Herleitung der Klasseneinteilung geschildert.

#### BEWERTUNG DER NACHTSITUATION

In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 weist darauf hin, dass die „Lufttemperatur der Aussenluft die entscheidende Grösse“ für die Bewertung der Nachtsituation darstellt und näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Aussen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, 25). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16-18 °C angegeben (UBA 2016), entsprechend definiert das Climate Service Center Germany seinen „Schlecht-Schlaf-Index“ als Nächte, in denen die Temperatur 18 °C nicht unterschreitet (GERICS 2019). Als besonders belastend gelten Tropennächte mit einer Minimumtemperatur  $\geq 20$  °C - eine mit der PET vergleichbare Bewertungsskala existiert für die nächtliche Situation im Innenraum jedoch (noch) nicht.

Tabelle 4: Einordnung der Dringlichkeit für Gegenmassnahmen zur nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Verkehrsraum mittels z-Transformation

Mittlerer z-Wert	Qualitative Einordnung: Dringlichkeit für Gegenmassnahmen	Lufttemperatur [°C] – Siedlungsflächen *	Lufttemperatur [°C] – Verkehrswege und Plätze **
bis -1	1 = Keine	bis 14,8	bis 15,2
> -1 bis -0,3	2 = Schwach	> 14,8 bis 15,7	> 15,2 bis 16,2
> -0,3 bis 0,5	3 = Mässig	> 15,7 bis 16,7	> 16,2 bis 17,4
> 0,5 bis 1	4 = Hoch	> 16,7 bis 17,3	> 17,4 bis 18,1
> 1	5 = Sehr hoch	> 17,3	> 18,1

\* Mittelwert = 16,03 °C; Standardabweichung = 1,26 °C | \*\* Mittelwert = 16,66 °C; Standardabweichung = 1,47 °C (Die Klassengrenzen für die Spalten 3 und 4 wurden auf eine Nachkommastelle gerundet.)



Für die PHK Nacht erfolgte die räumliche Bewertung anhand der **bioklimatischen** Situation (Lufttemperatur). Um die relativen Unterschiede im Kanton zu erfassen, liegt der Bewertung eine **z-Transformation** zugrunde. Dabei wurde die Dringlichkeit für Gegenmassnahmen in den Siedlungs- und Verkehrsflächen zur besseren Differenzierung in fünf Klassen von keine bis sehr hoch eingeteilt (Tabelle 4). Gewerbegebiete und der Verkehrsraum stehen in der nächtlichen Betrachtung weniger im Vordergrund, doch geben aufgeheizte asphaltierte Flächen nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit ebenfalls die Situation in den angrenzenden Wohngebieten.

**BEWERTUNG DER TAGSITUATION**

Zur Bewertung der Tagsituation wurde der humanbioklimatische Index **PET** um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Kap. 4.2). Die Bewertung der thermischen Belastung in den Siedlungs- und Verkehrsflächen im Kanton Solothurn wurde analog zur Nachtsituation auf der Basis der **z-transformierten** Werte vorgenommen (Tabelle 5). Die bioklimatische Bewertung am Tag ist ein Mass für die Aufenthaltsqualität ausserhalb von Gebäuden. Dieses übt einen gewissen Einfluss auf die Situation innerhalb der Gebäude aus, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren Faktoren ab und kann hier nicht bestimmt werden.

Tabelle 5: Einordnung der Dringlichkeit zur Verbesserung der bioklimatischen Situation am Tag im Siedlungs- und Verkehrsraum mittels z-Transformation

Mittlerer z-Wert	Qualitative Einordnung: Dringlichkeit zur Verbesserung	PET [°C] – Siedlungsflächen *	PET [°C] – Verkehrswege und Plätze **
bis -1	1 = Keine	bis 32,9	bis 30,4
> -1 bis -0,3	2 = Schwach	> 32,9 bis 35,0	> 30,4 bis 33,3
> -0,3 bis 0,5	3 = Mässig	> 35,0 bis 37,4	> 33,3 bis 36,7
> 0,5 bis 1	4 = Hoch	> 37,4 bis 38,9	> 36,7 bis 38,9
> 1	5 = Sehr hoch	> 38,9	> 38,9

\* Mittelwert = 35,91 °C; Standardabweichung = 2,98 °C | \*\* Mittelwert = 34,62 °C; Standardabweichung = 4,24 °C  
(Die Klassengrenzen für die Spalten 3 und 4 wurden auf eine Nachkommastelle gerundet.)

**5.1.3 BEWERTUNG VON GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSRAUM)**

In den Planungshinweiskarten steht die siedlungsklimatische Bedeutung von **Grünflächen** sowie deren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika bedarf es im Hinblick auf planerische Belange einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Kanton. Der während einer **autochthonen** Sommernacht über Grünflächen entstehenden **Kaltluft** wird nur dann eine planerische Relevanz zugesprochen, wenn sie in Zusammenhang mit Siedlungsräumen steht, die von ihrer Ausgleichsleistung profitieren. Erfüllt eine Grünfläche dagegen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellt keinen Ausgleichsraum dar, ist ihre klimaökologische Bedeutung geringer einzustufen. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden. Die Grünflächen wurden für die Tag- und Nacht-Situation in einem teilautomatisierten Verfahren getrennt bewertet und in fünf Qualitätsstufen eingeteilt.



**BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHT**

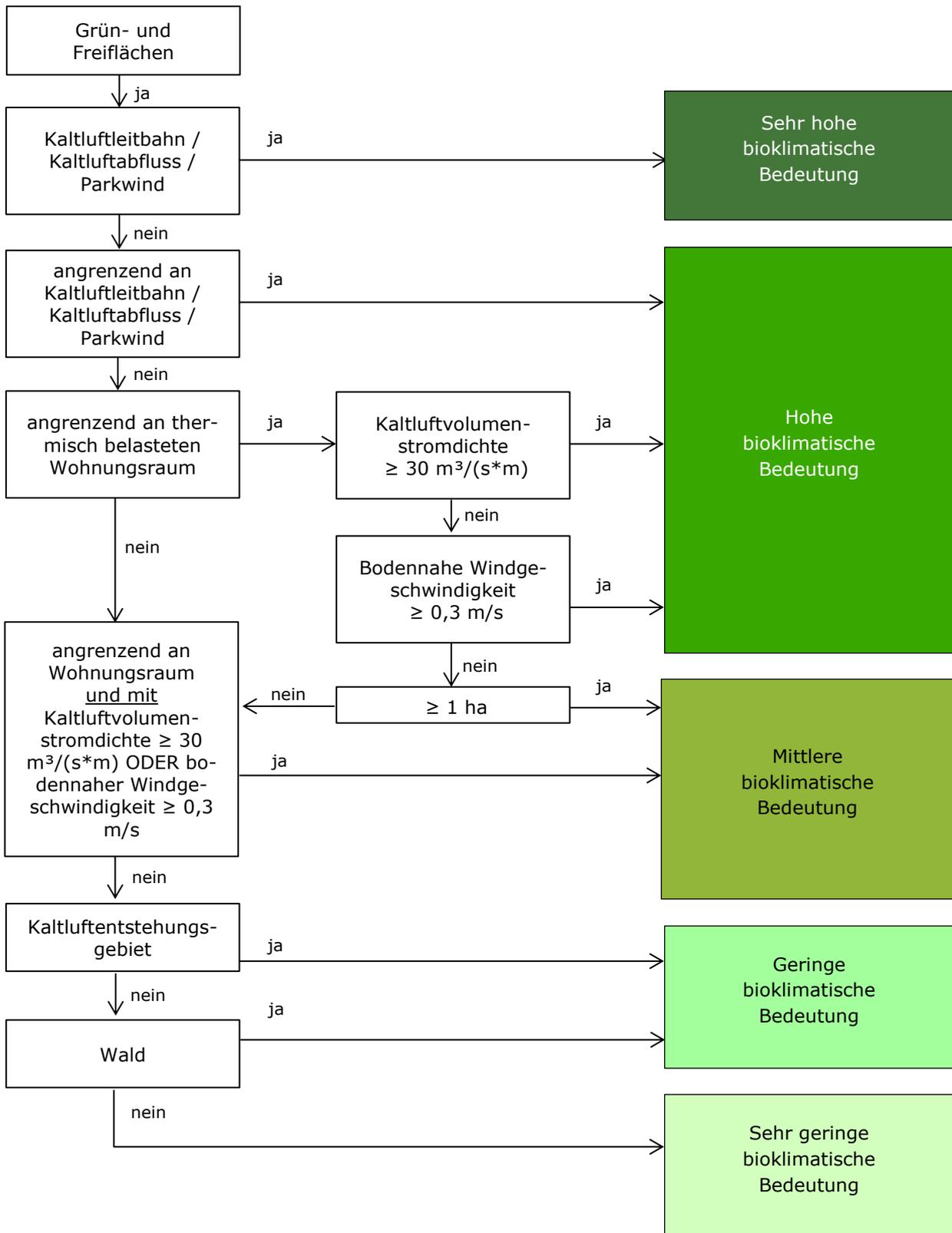


Abbildung 26: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation

Für die Bewertung von Grün- und Freiflächen in der Nacht rückt der Kaltfluthaushalt in den Fokus. So erhielten Kaltluftleitbahnen und Bereiche mit flächenhaften Kaltluftabflüssen oder Parkwinden automatisch eine



sehr hohe Bedeutung. Zudem spielen die Kaltluftproduktivität, Lage, Kaltluftvolumenstromdichte, bodennahe Windgeschwindigkeit, Art und Grösse der Grün- und Freiflächen eine Rolle. Im Einzelnen wurde der in Abbildung 26 dargestellte hierarchische Bewertungsschlüssel verwendet.

Da die Übergänge in Kaltluftleitbahnen<sup>21</sup> fliessend sind, erhielten an Leitbahnen angrenzende Grün- und Freiflächen immer noch eine hohe Bedeutung. Zu den angrenzenden Flächen zählen nicht nur unmittelbar benachbarte Flächen, sondern auch Flächen in einer Entfernung von bis zu 20 Metern. Mit diesem Toleranzbereich können u.a. auch Grün- und Freiflächen berücksichtigt werden, die durch andere Nutzungen (z.B. Strassen, Wege) voneinander getrennt werden. Des Weiteren sind auch die Grün- und Freiflächen besonders bedeutsam, welche an den bewohnten Siedlungsraum angrenzen und potenziell kalte Luftmassen heranzuführen. Auch in diesem Fall gilt der Toleranzbereich von 20 Metern, sodass die Grün- und Freiflächen nicht unmittelbar an den Wohnungsraum angrenzen müssen. Bei dem Kriterium der Grünflächengrösse ( $\geq 1$  ha) wird nicht die einzelne Teilfläche, sondern die Grösse des gesamten Grünflächenverbundes<sup>22</sup> betrachtet. Ab einer Grösse von ca. 1 ha kann einer Grün- und Freifläche eine klimatische Gunstwirkung unterstellt werden. Kaltluftentstehungsgebiete und Wälder weisen mindestens eine geringe Bedeutung auf. Mit einer Punktsignatur wurden Kaltluftentstehungsgebiete in der Klimaanalysekarte und Planungshinweiskarte rasterbasiert (zellenweise für jede 10 m x 10 m Rasterzelle) dargestellt, wogegen in der Bewertung der Grünflächen die Kaltluftentstehungsgebiete polygonbasiert (d.h. auf einzelne Flächen bezogen) betrachtet werden mussten. Ein Grünflächenpolygon wird als Kaltluftentstehungsgebiet definiert, sobald mindestens 30 % der Fläche eine Kaltluftproduktionsrate von  $\geq 16,5$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h erreicht. Da sich die Kaltluftproduktionsrate auf eine Höhe von 2 m ü. Gr. bezieht, haben Wälder in der Regel nachts eine geringe Kaltluftproduktionsrate als beispielweise Acker- und Freiflächen. Ihre eigentliche Kaltluftproduktion findet über dem Kronendach statt. Um die Bedeutung von Wäldern hervorzuheben, erhalten auch diese mindestens eine geringe Bedeutung, sofern sie nicht schon einer bedeutenderen Klasse angehören.

#### BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN AM TAG

Für den Tag basiert die Bewertung der Ausgleichsräume hauptsächlich auf der Entfernung<sup>23</sup> zu belasteten Siedlungsflächen sowie der modellierten Wärmebelastung um 14 Uhr (**PET**). Im Unterschied zur Nachtsituation ist eine möglichst hohe Aufenthaltsqualität auch im Umfeld von Gewerbeflächen relevant, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten.

Insbesondere Bäume können durch ihren Schattenwurf für ein angenehmeres Aufenthaltsklima sorgen, da dieser den Strahlungseinfluss deutlich vermindert. So tritt in den Wäldern Solothurns in der Regel keine bzw. maximal nur eine sehr schwache Wärmebelastung auf. Da sich die Aufenthaltsqualität von Wäldern gegenüber den übrigen Grün- und Freiflächen deutlich unterscheidet, wird die Bewertung von Wäldern separat von den anderen Ausgleichsräumen durchgeführt.

Analog zur Bewertung des Siedlungsraums (vgl. Kapitel 5.1.2) erfolgt im ersten Schritt eine 5-stufige Einteilung des (Grünflächen-)Bioklimas anhand der **z-transformierten** PET-Werte (Tabelle 6). Dieses auf der PET

<sup>21</sup> Gleiches gilt für Kaltluftabflüsse und Parkwinde

<sup>22</sup> Ein Grünflächenverbund wird durch eine andere Nutzung begrenzt, etwa dem Wirkungsraum (Siedlung, Verkehrswege) oder Gewässern. Der Hardwald setzt sich beispielsweise aus mehreren Teilflächen zusammen und bildet einen gesamten Grünflächenverbund.

<sup>23</sup> Die Entfernung basiert auf Luftlinie, ohne die tatsächliche Wegführung zu berücksichtigen (Ampeln, kein Durchgang, etc.).



basierende Grünflächenklima wird in Kombination mit der Entfernung zu belasteten Siedlungsflächen als Bewertung der Grün- und Freiflächen für die Tagsituation genutzt (Abbildung 27).

Tabelle 6: Einordnung des Grünflächenklimas am Tag mittels z-Transformation (Wälder ausgeschlossen)

Mittlerer z-Wert	Qualitative Einordnung: Grünflächenklima am Tag	PET [°C] Grün- und Freiflächen ausschliesslich der Wälder *
bis -1	Sehr günstig	bis 29,7
> -1 bis -0,3	Günstig	> 29,7 bis 32,2
> -0,3 bis 0,5	Mittel	> 32,2 bis 35,1
> 0,5 bis 1	Ungünstig	> 35,1 bis 36,9
> 1	Sehr ungünstig	> 36,9

\* Mittelwert = 33,3 °C; Standardabweichung = 3,6 °C

(Die Klassengrenzen in der 3. Spalte wurden auf eine Nachkommastelle gerundet.)

**Grünflächenklima** (als Indikator für die Aufenthaltsqualität)

**Erreichbarkeit**

- 1. Grünfläche **sehr gut** (300 m) erreichbar aus Siedlungsflächen (SF) mit **sehr hoher Dringlichkeit** zur Verbesserung
- 2. Grünfläche **gut** (700 m) erreichbar aus SF mit **sehr hoher Dringlichkeit** bzw. **sehr gut** (300 m) erreichbar aus SF mit **hoher Dringlichkeit** zur Verbesserung
- 3. Grünfläche **gut** (700 m) erreichbar aus SF mit **hoher Dringlichkeit** bzw. **sehr gut** (300 m) erreichbar aus SF mit **mittlerer Dringlichkeit** zur Verbesserung
- 4. übrige Grün- und Freiflächen

	Sehr günstig	Günstig	Mittel	Ungünstig	Sehr ungünstig
1. Grünfläche <b>sehr gut</b> (300 m) erreichbar aus Siedlungsflächen (SF) mit <b>sehr hoher Dringlichkeit</b> zur Verbesserung	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Ausbaufähig	Begrenzt
2. Grünfläche <b>gut</b> (700 m) erreichbar aus SF mit <b>sehr hoher Dringlichkeit</b> bzw. <b>sehr gut</b> (300 m) erreichbar aus SF mit <b>hoher Dringlichkeit</b> zur Verbesserung	Sehr gut	Gut	Mässig	Ausbaufähig	Begrenzt
3. Grünfläche <b>gut</b> (700 m) erreichbar aus SF mit <b>hoher Dringlichkeit</b> bzw. <b>sehr gut</b> (300 m) erreichbar aus SF mit <b>mittlerer Dringlichkeit</b> zur Verbesserung	Gut	Mässig	Ausbaufähig	Ausbaufähig	Begrenzt
4. übrige Grün- und Freiflächen	Mässig	Mässig	Ausbaufähig	Begrenzt	Begrenzt

Abbildung 27: Bewertungsschema für die Aufenthaltsqualität und Erreichbarkeit von Ausgleichsräumen am Tag (Wälder ausgeschlossen)

In Anlehnung an eine Studie des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR 2018) wird in Bezug auf die Grünerreichbarkeit zwischen einer Entfernung von 300 m und 700 m Luftlinie unterschieden. Es konnte aufgrund der Datenlage keine Unterscheidung zwischen öffentlich zugänglichen und Grünflächen in privater Hand berücksichtigt werden.



Wie eingangs erwähnt, ist die Aufenthaltsqualität in Wäldern tagsüber vergleichsweise hoch. Jedoch sind einige Waldgebiete aus dem Siedlungsraum schwieriger zu erreichen und dienen während einer Hitzeperiode nur begrenzt als Rückzugsort. Aufgrund des günstigen **Bioklimas** haben alle Wälder Solothurns mindestens eine mässige Bedeutung am Tag. Bei einer guten Erreichbarkeit, insbesondere aus Siedlungsflächen mit höherer Wärmebelastung am Tag, ist die Bedeutung der Waldflächen entsprechend höher (vgl. Abbildung 28).

**Erreichbarkeit**

1. **Gut** (700 m) erreichbar aus Siedlungsflächen (SF) mit **sehr hoher Dringlichkeit** bzw. **sehr gut** (300 m) erreichbar aus SF mit **hoher Dringlichkeit** zur Verbesserung

2. **Sehr gut** (300 m) erreichbar aus SF, unabhängig von deren Wärmebelastungsniveau: „siedlungsnaher Wald“

3. Übrige Wälder

**Aufenthaltsqualität & Erreichbarkeit der Waldflächen**



Abbildung 28: Bewertungsschema für die bioklimatische Bedeutung von Wäldern am Tag

**5.1.4 NICHT BEWERTUNGSRELEVANTE KRITERIEN**

In den vorherigen Unterkapiteln wurden die Bewertungsmethoden für die Planungshinweiskarten erläutert. Der Kaltlufteinwirkungsbereich (zu finden in der Karte der Nachtsituation) und die Flächen des Agglomerationsprogramms sind Elemente der Planungshinweiskarte, welche in der Karte abgebildet werden, jedoch keinen Einfluss auf die Bewertung der Flächen nehmen.

Wie bereits die **Klimaanalysekarte** zeigt (vgl. Kapitel 4.1.3), wird Kaltluft zunächst in den Kaltluftentstehungsgebieten gebildet und über Transportflächen (z.B. Kaltluftleitbahnen) in Richtung Siedlung befördert. In Abhängigkeit von mehreren Faktoren, unter anderem der Luftzufuhr vom Siedlungsrand und den Strömungshindernissen in den Siedlungsräumen, kann die Durchlüftung der Ortschaften unterschiedlich stark oder schwach ausfallen. Siedlungsflächen lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstigere Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der **Kaltlufteinwirkungsbereich** kennzeichnet die bodennahe Strömung der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer **autochthonen** Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Wirkungsbereich befindliche Bebauung in der Nacht vergleichsweise günstigere Verhältnisse aufweist.

Als Kaltlufteinwirkungsbereich sind Siedlungs- und Verkehrsflächen innerhalb des Kantons gekennzeichnet, die mit einer bodennahen Windgeschwindigkeit von mindestens 0,3 m/s durchflossen werden. Aufgrund der günstigen topographischen Lage für effektive Kühlung durch Kaltluftabflüsse aus dem Gebirge werden die Ortschaften des Kantons Solothurn gut mit Kaltluft durchströmt. Weite Teile der Gemeinden und Städte bis teilweise hin zu den Ortszentren gelten als Kaltlufteinwirkungsbereich. Dass in den Zentren gleichzeitig die



höchste Überwärmung auftritt, ist kein Widerspruch, sondern verdeutlicht vielmehr die wichtige Ausgleichsfunktion der Grünflächen im Umland, vor allem derer in Gebirgs- und Hanglage, und der innerstädtischen Grünflächen – ohne deren Funktion als Kaltluftlieferant würde ein noch stärkerer **Wärmeinseleffekt** auftreten.

Darüber hinaus werden in der Planungshinweiskarte die Flächen des Agglomerationsprogramms dargestellt. Zwar basiert die Karte auf der Ist-Situation, jedoch wird mit der Darstellung dieser Flächen auf zukünftig zu erwartende Änderungen und eventuelle Konflikte (z.B. Bebauung von bioklimatisch bedeutenden Grün- und Freiflächen) hingewiesen.

## 5.2 PLANUNGSHINWEISKARTEN

### 5.2.1 NACHTSITUATION

In der Nachtsituation besteht für etwa ein Viertel der Solothurner **Siedlungsflächen** kein bzw. nur ein schwacher, für knapp die Hälfte ein mässiger und für ein verbleibendes Viertel ein hoher bis sehr hoher Handlungsbedarf (Tabelle 7). Die nicht vorhandene bis schwache Dringlichkeit für Gegenmassnahmen ist vorrangig in den Höhen- und Hanglagen (z.B. Welschenrohr, Lommiswil) und an den Siedlungsrändern (z.B. in Langendorf und Balsthal) zu finden. Letztere profitieren von der Kaltluftzufuhr aus den umliegenden Grünflächen und sind in der Regel sehr locker bebaut. Dem stehen dicht bebaute zentrale Bereiche (z.B. Stadtzentren von Solothurn und Olten) oder hoch versiegelte Industrie- und Gewerbeflächen (z.B. in Bellach und Luterbach) mit einem weitestgehend (sehr) hohen Handlungsbedarf gegenüber (Abbildung 29). Im **Verkehrsraum** sind jeweils mehr als ein Drittel der Flächen durch keine bis nur eine schwache bzw. durch eine mässige Dringlichkeit für Gegenmassnahmen gekennzeichnet. Die übrigen 26,8 % der Flächen entfallen auf den (sehr) hohen Handlungsbedarf. Als Beispiele für besonders belastete Verkehrswege und Plätze sind hier u.a. die Stadtzentren von Solothurn, Olten und Grenchen und breite Strassenzüge wie die Bielstrasse im Bereich von Bellach, Selzach und Bettlach zu nennen. Verkehrswege mit geringer nächtlicher Überwärmung sind zum Grossteil ausserorts und in den Randlagen zu finden.

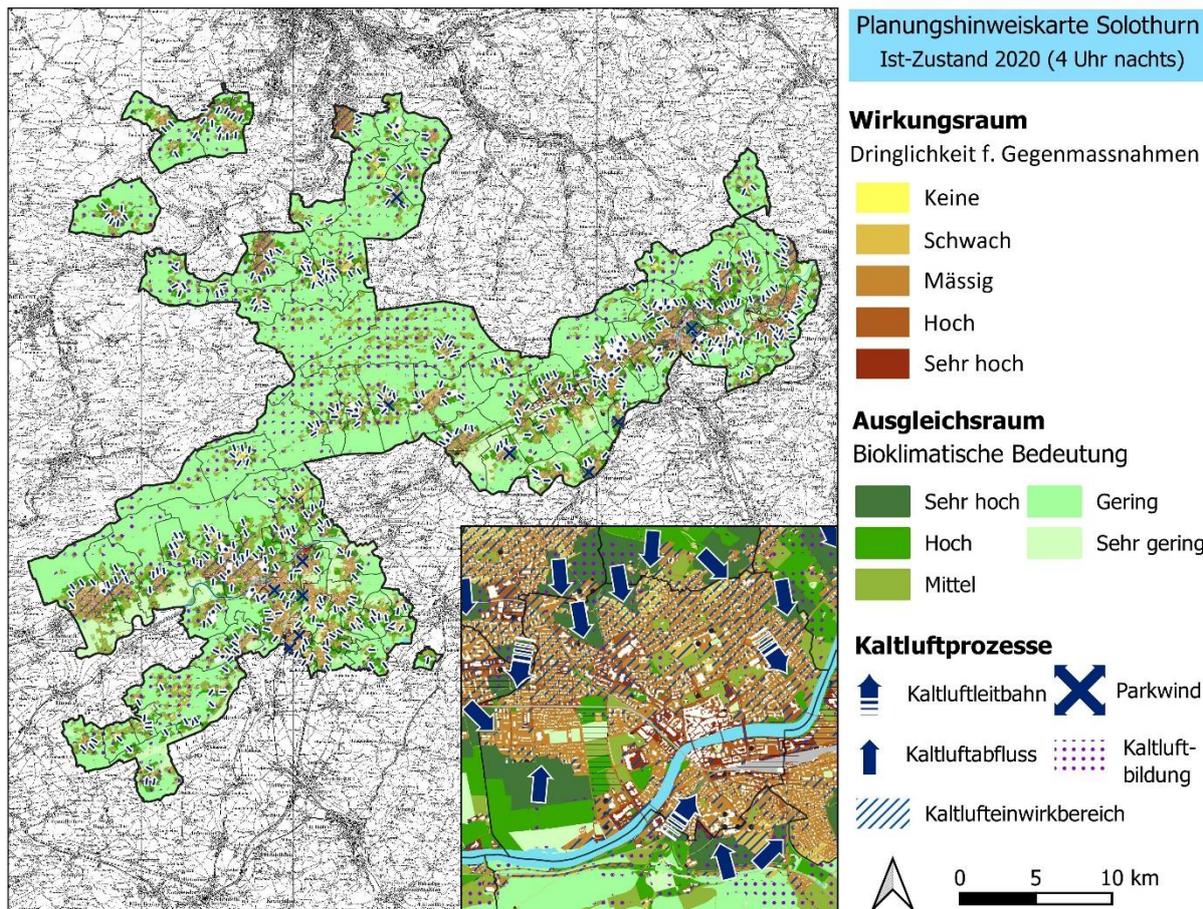


Abbildung 29: Planungshinweiskarte Nachtsituation für den Kanton Solothurn (verkürzte Legende)

Tabelle 7: Wirkungsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Nachtsituation

Gegenwärtige Dringlichkeit für Gegenmassnahmen	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Siedlungsflächen	Verkehrsflächen	
Keine	7,2	17,9	Gebiete, in denen die vorwiegend offene Siedlungsstruktur und der hohe Grünanteil den nächtlichen Kaltluftaustausch gewährleistet und gegenwärtig ein guter Kühleffekt vorliegt. Der hohe Vegetationsanteil begünstigt die gute Kühlwirkung zusätzlich.
Schwach	19,6	18,6	Gebiete, in denen die Siedlungsstruktur und der Grünanteil den nächtlichen Kaltluftaustausch gewährleistet und gegenwärtig noch ein genügender Kühleffekt vorliegt.
Mässig	49,0	36,7	Gebiete, in denen ein mässiger Kaltluftaustausch auf Grund der Baukörperstellung gewährleistet und ein bedingter Kühleffekt vorliegt. Grün- und Freiflächen begünstigen die thermische Regulation.
Hoch	14,1	23,1	Gebiete, in denen der Kaltluftaustausch auf Grund der Baukörperstellung und/oder dem geringen Grünflächenanteil bereits heute teilweise ungenügend ist. Die nächtliche Abkühlung fällt entsprechend gering aus.
Sehr hoch	10,1	3,7	Gebiete, in denen der Kaltluftaustausch auf Grund der Baukörperstellung und/oder dem geringen Grünflächenanteil bereits heute ungenügend ist. Eine ausreichende nächtliche Abkühlung kann nicht gewährleistet werden, sodass in diesen Gebieten Massnahmen mit höchster Priorität umzusetzen sind.



Unter den Solothurner **Ausgleichsräumen** haben knapp ein Fünftel der Flächen eine hohe bis sehr hohe bioklimatische Bedeutung in der Nacht (Tabelle 8). Dies sind die Bereiche der Kaltluftleitbahnen, der flächenhaften Kaltluftabflüsse und der Parkwinde. Grün- und Freiflächen mit sehr geringer Bedeutung machen nur 6,9 % der Solothurner Ausgleichsräume aus. Sie sind vorrangig in entlegenen Gebieten zu finden und stellen dem Menschen keine nennenswerten Klimafunktionen bereit. Mit einem Flächenanteil von 61,8 % machen Grün- Freiflächen mit einer geringen bioklimatischen Bedeutung den Grossteil der Solothurner Ausgleichsräume aus. Hierbei handelt es sich um Flächen, die zwar Kaltluft produzieren (Kaltluftentstehungsgebiete und Wälder, die über dem Kronendach Kaltluft bilden), von denen der Mensch aber aufgrund geringer Strömungsgeschwindigkeiten und der grossen Entfernung zur Siedlung in der Regel nicht profitiert.

Die Bedeutung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen sollte jedoch nicht allein auf die Nachtsituation, sondern auch im Hinblick auf die Tagsituation (vgl. Kapitel 5.2.2) geprüft werden. Teilweise ergeben sich ähnliche Bewertungen (z.B. sind der Birchiwald in Zuchwil und der Friedhof Olten sowohl am Tag als auch in der Nacht gleichermaßen bedeutsam), teilweise jedoch auch gegensätzliche Ausprägungen (z.B. Fussballfelder des FC Gerlafingen mit sehr hoher Bedeutung nachts und geringer Aufenthaltsqualität am Tag). Unterschiedliche Ergebnisse zwischen Tag und Nacht sind nicht unüblich, da nachts insbesondere die Acker-, Rasen- und Freiflächen mit ihrer hohen Kaltluftlieferung von Bedeutung sind und tagsüber Bäume bzw. Wälder als schattenspendende Rückzugsorte vor der Wärmebelastung gelten.

Tabelle 8: Ausgleichsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Nachtsituation

Bioklimatische Bedeutung	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
Sehr hoch	8,7	Grün- und Freiflächen, die eine zentrale Rolle im nächtlichen Kaltfluthaushalt spielen und die wichtigsten klimaökologischen Ausgleichsräume darstellen.
Hoch	10,4	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume.
Mittel	12,2	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume.
Gering	61,8	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereitgestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen.
Sehr gering	6,9	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit.

### 5.2.2 TAGSITUATION

In der Tagsituation weisen 26,7 % der **Siedlungsflächen** und 28,7 % der **Verkehrswege und Plätze** keinen bis nur einen schwachen Handlungsbedarf auf (Tabelle 9). Ähnlich zur Nachtsituation schneiden auch tagsüber die Hanglagen und locker bebauten Ortsteile (z.B. Lommiswil) mit besonders günstigen Bedingungen ab. Zudem profitieren die Siedlungen in Gewässernähe tagsüber von der kühlenden Wirkung des Wassers, insbesondere im Bereich der Aare und Emme. Die Nähe zu Wäldern (z.B. Siedlungsflächen in Trimbach und im Norden von Oberdorf) bzw. ein hoher Baumanteil innerhalb der Siedlung (z.B. südlich der Hermesbühlstrasse, Solothurn) sind weitere Gunstfaktoren für eine geringe Wärmebelastung am Tag. Knapp die Hälfte der Siedlungsflächen und rund zwei Fünftel der Verkehrsflächen sind durch eine mässige Dringlichkeit zur Verbesserung der bioklimatischen Situation gekennzeichnet. In allen übrigen Wirkungsräumen ist der Handlungsbedarf als (sehr) hoch einzustufen, wobei ein Grossteil dieser Flächen in sonnenexponierten, teilweise hoch



versiegelten Bereichen in den tieferen Lagen (u.a. auf den grösseren Industrie- und Gewerbeflächen Egerkingens) zu finden ist (Abbildung 30).

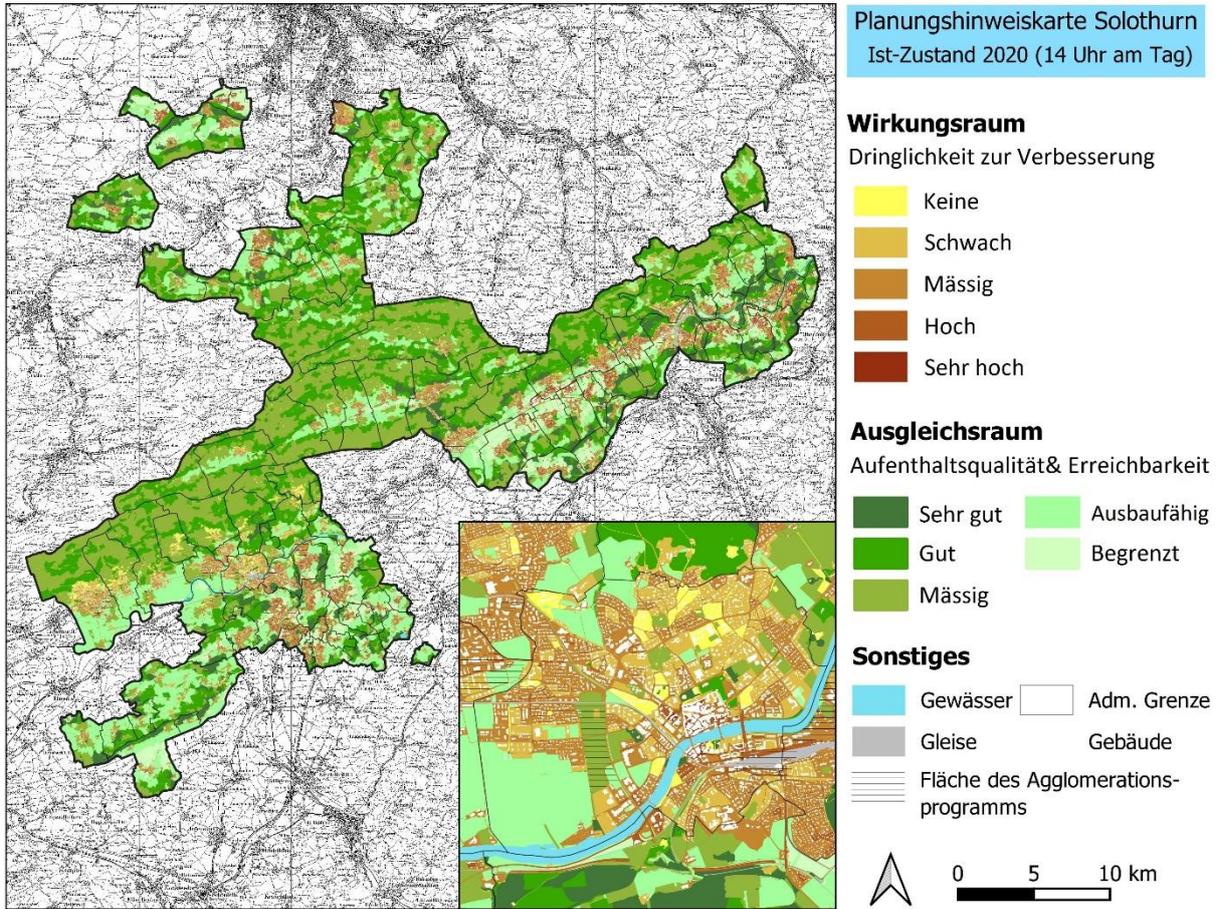


Abbildung 30: Planungshinweiskarte Tagsituation für den Kanton Solothurn (verkürzte Legende)

Etwas mehr als einem Drittel (34,2 %) der **Ausgleichsräume** im Kanton Solothurn wird eine mindestens gute Aufenthaltsqualität zugeschrieben, d.h. sie bieten an Sommertagen ein relativ günstiges Grünflächenklima und eignen sich dank ihrer guten Erreichbarkeit als Rückzugsorte für die Bevölkerung (Tabelle 10). Hierbei handelt es sich zum Grossteil um siedlungsnahen Wälder und innerstädtische Grünflächen (z.B. Birchiwald in Zuchwil, Stadtpark Grenchen). Es ist jedoch zu beachten, dass einzelne Flächen aufgrund der Eigentumsverhältnisse nicht zugänglich sein könnten. Diverse Acker-, Rasen- und Freiflächen, insbesondere in sehr entlegenen Gebieten, erlauben aufgrund der meist ungehinderten Einstrahlung keinen Rückzug und resultieren in einer ausbaufähigen bis begrenzten Aufenthaltsqualität (30 % der Ausgleichsräume Solothurns).



Tabelle 9: Wirkungsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Tagsituation

Gegenwärtige Dringlichkeit zur Verbesserung der bioklimatischen Situation	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Siedlungsflächen	Verkehrsflächen	
Keine	7,5	15,6	Gebiete, in denen die bioklimatischen Bedingungen und der hohe Grünanteil die Wärmebelastung gegenwärtig noch ausgleichen können. Auf den Verkehrsflächen ist das Wohlbefinden für Fussgänger und Radfahrer orts- und zeitweise nicht gewährleistet. Anpassungsmassnahmen sind auch hier zu prüfen.
Schwach	19,2	13,1	Gebiete, in denen die bioklimatischen Bedingungen und der Grünanteil die Wärmebelastung überwiegend noch ausgleichen können. Auf den Verkehrsflächen ist das Wohlbefinden für Fussgänger und Radfahrer orts- und zeitweise nicht gewährleistet. Anpassungsmassnahmen sind sinnvoll.
Mässig	48,5	37,9	Gebiete, in denen die bioklimatischen Bedingungen und der Grünanteil die Wärmebelastung nur mässig ausgleichen können. Verschattungselemente, Grünelemente, unversiegelte Flächen usw. sind rar. Anpassungsmassnahmen sind erforderlich.
Hoch	22,7	30,2	Gebiete, in denen die bioklimatischen Bedingungen und der Grünanteil die Wärmebelastung grösstenteils nicht mehr ausgleichen können. Verschattungselemente, Grünelemente, unversiegelte Flächen usw. fehlen weitgehend. Anpassungsmassnahmen sind erforderlich.
Sehr hoch	2,1	3,2	Gebiete, in denen die bioklimatischen Bedingungen und der Grünanteil die Wärmebelastung schon heute nicht mehr ausgleichen können. Verschattungselemente, Grünelemente, unversiegelte Flächen usw. fehlen. Anpassungsmassnahmen sind zwingend erforderlich.

Tabelle 10: Ausgleichsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Tagsituation

Aufenthaltsqualität und Erreichbarkeit	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
Sehr gut	6,4	Bestmöglich verschattete Grünflächen, die zu Fuss aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können und tagsüber die höchste Aufenthaltsqualität bieten.
Gut	27,8	Ausgleichsräume, welche eine hohe Aufenthaltsqualität am Tag aufweisen und als Rückzugsorte dienen. Hierzu zählen siedlungsnaher Wälder sowie gut verschattete Grünflächen, die zu Fuss aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können.
Mässig	35,8	Siedlungsnaher Grünflächen mit einer mittleren bis hohen Aufenthaltsqualität, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Entlegene Grünflächen mit einer sehr hohen Aufenthaltsqualität (insbesondere siedlungsferne Wälder).
Ausbaufähig	23,3	Grün- und Freiflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsräumen (nicht als Rückzugsort geeignet).
Begrenzt	6,7	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen).



### 5.3 MASSNAHMENKATALOG SIEDLUNGSKLIMA

Die Anpassung an den Klimawandel ist eine Querschnittsaufgabe und beinhaltet neben dem Thema „Hitze“ viele weitere Aspekte, u.a. Wasserwirtschaft, Umgang mit Naturgefahren, Bodenschutz, Landwirtschaft, Waldwirtschaft und Energie. Mit den 75 Maßnahmen des Aktionsplans 2020-2025 (Schweizerische Eidgenossenschaft 2020) bereitet sich die Schweiz bundesweit auf die Folgen des Klimawandels vor. Eine Reihe von Maßnahmenkatalogen für den Umgang mit Hitze bestehen bereits auf bundesweiter und kantonaler Ebene (BAFU 2018, BVU 2021, Seecon 2021) und bilden eine wichtige Grundlage zur Anpassung.

Die **Planungshinweiskarten** zeigen Bereiche im Kanton auf, in denen Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Massnahmenkatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren. Für den Kanton Solothurn wurde ein Katalog aus 20 klimaökologisch wirksamen Einzelmassnahmen identifiziert.

Die Zuordnung bestimmter Massnahmensets aus dem Portfolio der 20 Einzelmassnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in den Planungshinweiskarten ab (z.B. **bioklimatische** Situation in der Nacht und/oder am Tag, Bedeutung für den **Kaltluft**haushalt, Aufenthaltsqualität). Die Massnahmen sind stichpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 11 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

- Thermisches Wohlbefinden im Aussenraum
- Verbesserung der Durchlüftung
- Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum

Die jeweilige Wirkung hängt stark von der konkreten Ausgestaltung der Massnahmen, ihrer Lage in der Siedlung sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Massnahme ab. Grundsätzlich sind alle Massnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Bevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Klimas im Kanton Solothurn beizutragen – werden die Massnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Massnahmen.

Der hohe Grünanteil im Siedlungsgebiet sollte erhalten und insbesondere in thermisch belasteten Bereichen möglichst erhöht werden (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen, → M04: Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können (ab einer gewissen Grösse) als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Insbesondere die siedlungsnahen Waldgebiete Solothurns (z.B. Hardwald in Olten) oder innerstädtische Grünflächen (z.B. Stadtpark Grenchen) stellen wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar (→ M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen). Insbesondere auch kleinere Parkanlagen sind schützenswert und neu zu entwickeln, da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage auch als Kaltlufttrittsteine dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ M14: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen).



Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen Bäume (und Sträucher) im Strassenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Massnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Strassenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Strassen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an (→ M05: Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben). Im Bereich von **Kaltluftleitbahnen** sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fliessrichtung angelegt werden (→ M12: Optimierung des grossskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Grosskronige Laubbäume sind Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (vgl. die Studien der Forschungsanstalt WSL<sup>24</sup> und der Berner Fachhochschule<sup>25</sup>).

Massnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Strassen, Fuss- und Radwege oder (Park-)Plätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M06: Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien). Bei grossflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche **Wärmeinseleffekt** und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden (→ M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Massnahmen).

Daneben wirken sich Gewässer (z.B. Aare, Emme, Bellacher Weiher) überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je grösser die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Gewässer einen stärkeren Kühleffekt als stehendes, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrössert, und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei **allochthonen**<sup>26</sup> **Wetterlagen** der Transport von Kalt- und Frischluft stattfindet. Obwohl während längerer Hitzeperioden in der Nacht Gewässer durch deren Trägheit phasenweise wärmer sein können als umgebener Siedlungsraum, überwiegen insgesamt die genannten Vorteile. Daher ist der Schutz bestehender Gewässer, deren Erweiterung und die Neuerschliessung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen). Diese Massnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ M10), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

<sup>24</sup> <https://www.wsl.ch/de/projekte/testpflanzungen.html> (Abruf 27.2.2023)

<sup>25</sup> [https://www.nbs.ch/documents/864304/1447481/Faktenblatt3-Urbane\\_Baumarten\\_und\\_Klimawandel-3.pdf](https://www.nbs.ch/documents/864304/1447481/Faktenblatt3-Urbane_Baumarten_und_Klimawandel-3.pdf) (Abruf 27.2.2023)

<sup>26</sup> "Fremdbürtige", durch grossräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)



Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Massnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Massnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ M20: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Senioren- und Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M13: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die **Albedo** kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflexion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen grösser, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Massnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M18, M19).

Bei Nachverdichtung sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus klimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte doppelte Innenentwicklung in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz. Neben der aus Wohnungsknappheit ggf. notwendigen Nachverdichtung sollte der Aspekt einer möglichen Entdichtung im Siedlungsraum jedoch weiterhin im Blickpunkt verbleiben. Die Verringerung von Bebauungsdichte und Bauvolumen ist insbesondere in heutigen Industrie- und Gewerbebranchen oder Bahnanlagen vorzunehmen und muss klimaangepasstes Nachverdichtungsvorhaben nicht zwangsläufig entgegenstehen. Zusätzlich kann die Verlegung von Parkraum (z.B. in Quartierstiefgaragen) dazu genutzt werden, von Garagen bestandene Innenhofbereiche oder den Strassenraum weiter zu entsiegeln und grün auszugestalten.

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Plätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Massnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an. Schattenspendende Kübelbäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch grösseren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im **Wirkungsraum** und Schutzprioritäten im **Ausgleichsraum** aus der PHK weiter zu priorisieren.



Tabelle 11: Empfehlungen allgemeiner klimatisch wirksamer Massnahmen für den Kanton Solothurn

MASSNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM		
<p><b>01 Innen-/Hinterhofbegrünung</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhung des Vegetationsanteils und der Durchlässigkeit</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts</li> <li>Erhöhung der Aufenthaltsqualität</li> <li>Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Innen- und Hinterhöfe</li> </ul>	
<p><b>02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts</li> <li>Vernetzung von Grünflächen und damit Synergien zum Mobilitäts-/Radwegenetz</li> <li>Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Baulücken, grössere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)</li> </ul>	

Bild: Grüner Innenhof in München (Quelle: © Jan Weber-Ebnet)

Bild: Parc de Vermont in Genf (Quelle: © Josephine Förster, GEO-NET)



<b>MASSNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM</b>		
<b>03</b>	<b>Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert gestalten</b>	<b>Kurzerläuterung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine dunklen Farben (insbesondere bei Dächern) zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern</li> </ul>
		<b>Wirkung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> </ul>
		<b>Räumliche Umsetzung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Dächer, Fassaden (Neubau und Bestand)</li> <li>ggf. Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze</li> </ul>
<b>04</b>	<b>Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren</b>	<b>Kurzerläuterung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.)</li> <li>niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen</li> </ul>
		<b>Wirkung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts</li> <li>Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassersmanagement</li> </ul>
		<b>Räumliche Umsetzung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe</li> </ul>



**MASSNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

<p><b>05</b></p> <p><b>Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Blaue und/oder grüne Massnahmen für den Verkehrsraum</li> <li>▪ Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.)</li> <li>▪ Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen)</li> <li>▪ Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fussgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen minimieren</li> <li>▪ s. auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale Strassenraumgestaltung urbaner Quartiere“</li> </ul>	 <p>Bild: Begrünte Allee in Oslo (Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)</p>
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflanzung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsigelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung</li> <li>▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze</li> </ul>	
<p><b>06</b></p> <p><b>Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bäume oder bautechnische Massnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten)</li> <li>▪ Terrainunterbauungen vermeiden, konzentrieren und genügend überdecken, um Baumpflanzungen zu ermöglichen</li> <li>▪ Möblierungsangebote im Schatten schaffen</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld</li> </ul>	



**MASSNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

<p><b>07</b></p>	<p><b>Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts</li> <li>▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität</li> </ul>		<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> <li>▪ Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze</li> </ul>	<p>Bild: Grenchner Stadtpark, Oliver Menge (Quelle: <a href="https://www.grenchnertagblatt.ch/solothurn/grenchen/umgestaltung-der-grenchner-stadtpark-soll-attraktiver-werden-ld.2299485?reduced=true">https://www.grenchnertagblatt.ch/solothurn/grenchen/umgestaltung-der-grenchner-stadtpark-soll-attraktiver-werden-ld.2299485?reduced=true</a>)</p>
<p><b>08</b></p>	<p><b>Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten)</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bedeutung für den städtischen Kaltfluthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird</li> <li>▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement</li> </ul>		<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)</li> </ul>	<p>Bild: Schlosspark Charlottenburg in Berlin (Quelle: © Mirian Lübbecke)</p>



**MASSNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

<p><b>09 Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stadtklimafunktion grösserer Fliess- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen</li> <li>▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) -&gt; Hohe Aufenthaltsqualität</li> <li>▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gewässer</li> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> </ul>	
<p><b>10 Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-)Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolensystemen</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung</li> <li>▪ Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> <li>▪ Strassen, Wege, Plätze</li> </ul>	<p>Bild: Regenwasserteich am Potsdamer Platz in Berlin (Quelle: © Miriam Lübbecke)</p>



## MASSNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

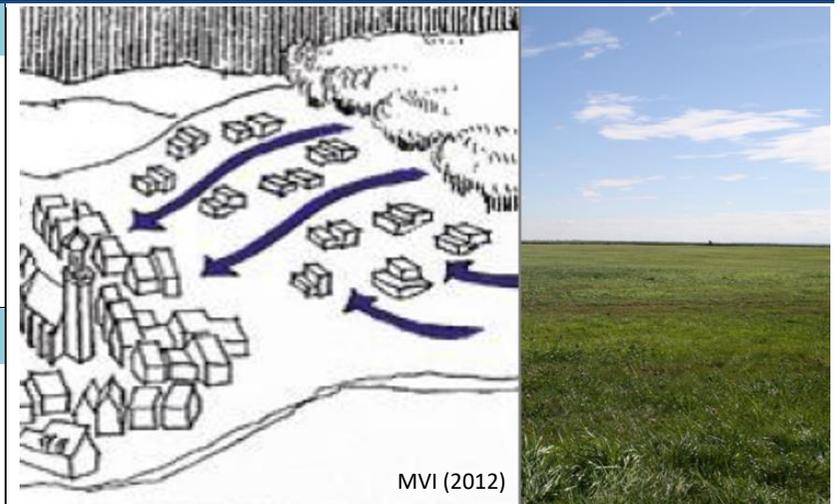
<p><b>11</b> (Temporäre) Saisonale klimaangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume</p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Umwandlung hochgradig versiegelter Innenstadtplätze im Sommer durch Etablierung von Rollrasen, Strauchgewächsen und Kübelbäumen zu städtischen Klimaoasen</li> <li>▪ Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebarmachung nachhaltiger Ideen und Projekte (s. auch Projekt „Pop-Up-Innenstadt“ in Ludwigsburg)</li> </ul>
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung</li> <li>▪ Gesellschaftliche Etablierung des Themas Klima und Dialogmöglichkeit mit den Anwohnern</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plätze, Brachflächen (auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt)</li> </ul>



Bild: Stiftsplatz in Bonn (Quelle: © Bundesstadt Bonn)

## MASSNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

<p><b>12</b> Optimierung des grossskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung</p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)</li> <li>▪ Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen</li> </ul>
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung</li> <li>▪ Reduktion des Wärmestaus</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Neubau, Gebäudekomplexe</li> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> <li>▪ Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze</li> </ul>



MVI (2012)

Bild: Symbolcollage Baukörperstellung und Durchlüftung (Quelle: © GEO-NET)



**MASSNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG**

<p><b>13</b></p> <p><b>Optimierung der Gebäudety- pologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anliegenden Grün- und Parkanlagen, die insb. in Solothurn oftmals Parkwinde induzieren</li> <li>Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsgeschehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht</li> </ul>	 <p>Bild: Mit dem Schindlerpark vernetzter Innenhof. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung. Stadt Zürich (Hrsg.). Zürich, 2020.)</p>
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme</li> <li>Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Strassen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Neubau im Umfeld bestehender Grünflächen oder Parks</li> </ul>	
<p><b>14</b></p> <p><b>Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Freihaltung grossräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, extensives Grünland, Felder, Kleingärten und Parklandschaften, die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben</li> <li>Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft</li> </ul>	 <p>Bild: Rudolph-Wilde-Park in Berlin (Quelle: © Dominika Lessmann, GEO-NET)</p>
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Schutz vor stärkerer Überwärmung</li> <li>Erhalt und Ausbau von Kaltluftentstehungsgebieten und Durchlüftung</li> <li>Synergien zur Biodiversität und damit zur Aufenthaltsqualität am Tage</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Grün- und Freiflächen</li> </ul>	



**MASSNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

<p><b>15 Dachbegrünung</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)</li> </ul>
	<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas und damit Synergien zum Klimaschutz</li> <li>▪ Bei grossflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Aussenraumklimas möglich</li> <li>▪ Erhalt oder Schaffung von Naturraum und damit Synergien zum Niederschlagswasser-management und zur Biodiversität</li> </ul>
	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flachdächer,</li> <li>▪ ggf. flach geneigte Dächer</li> <li>▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)</li> </ul>



Bild: Dachgarten Neubau Bürgerspital Solothurn (Quelle: © Silvia Gmür, Reto Gmür Architekten)

**MASSNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

<p><b>16 Fassadenbegrünung</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)</li> </ul>
	<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Aussenraumklimas -&gt; Steigerung der Aufenthaltsqualität</li> <li>▪ Durch Naturraum an der Fassade entstehen Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz</li> </ul>
	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)</li> </ul>

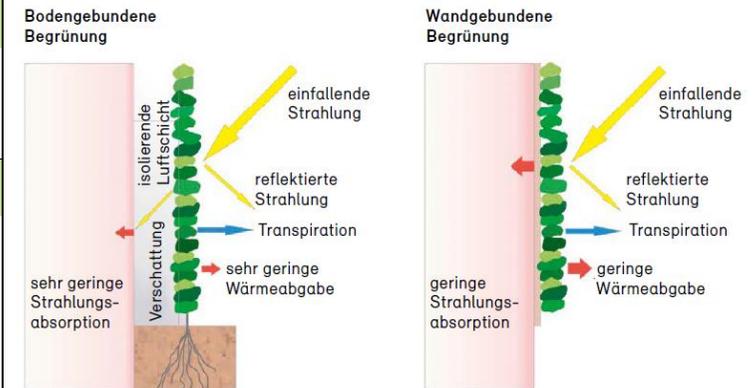


Bild: GEO-NET nach Bundesministerium für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2013. [www.irbnet.de/daten/rswb/13109006683.pdf](http://www.irbnet.de/daten/rswb/13109006683.pdf)



17	<b>Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Massnahmen</b>	<b>Kurzerläuterung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Massnahmen wie aussen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie</li> </ul>	
		<b>Wirkung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -&gt; Erhöhung der Aufenthaltsqualität</li> <li>Verbesserung des Innenraumklimas</li> <li>Synergien zum Klimaschutz</li> </ul>	

Bild: Paul-Gossen-Str. in Erlangen (Quelle: © Janko Löbig, GEO-NET)

**MASSNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

18	<b>Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen</b>	<b>Kurzerläuterung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dämmung von Dächern/Kellern/Fassaden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme</li> <li>Sanierungsmöglichkeiten mit der vorhandenen Gebäudesubstanz und dem Gebäudeausdruck ausschöpfen</li> </ul>	
		<b>Wirkung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>in erster Linie Klimaschutzmassnahme durch Reduktion des Energiebedarfs</li> <li>Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber</li> </ul>	

Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: © ginasanders/123RF.com)



<p><b>19 Technische Gebäudekühlung</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Möglichst ressourcenschonende Lösung</li> <li>▪ Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird</li> <li>▪ Erdkältenutzung</li> <li>▪ Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude, in denen passive Massnahmen nicht ausreichend angewendet werden können</li> </ul>	

Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)

**MASSNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

<p><b>20 Anpassung des Raumnutzungskonzeptes</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer, z.B. im Seniorenzentrum)</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen)</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (z.B. bei Erziehungseinrichtungen, Betreutem Wohnen oder in der Altenpflege)</li> <li>▪ vorwiegend im Neubau umsetzbar</li> </ul>	

Bild: Aufnahme eines nach West ausgerichteten Büroraums. (Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)



## 5.4 HINWEISE ZUR WIRKSAMKEIT VON MASSNAHMEN

Im stadt- und umweltplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpassung stellen Massnahmen die unterste Ebene eines vollständig operationalisierten Zielsystems dar (Fürst und Scholles 2008). Massnahmen müssen in diesem System in einem logisch-hierarchischen Zusammenhang mit primären und abgeleiteten Zielen stehen, also stringent zur Zielerreichung beitragen (Gaede und Härtling 2010). Ohne solche übergeordneten Ziele hängen Massnahmen sprichwörtlich in der Luft. Eine Überprüfung der Wirksamkeit im Sinne ihres Beitrags zur Zielerreichung ist dann kaum sinnvoll möglich. Die in diesem systemischen Ansatz so zentralen Umweltqualitätsziele können dabei entweder in rechtlichen Normen (Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien) definiert sein, sich aus wissenschaftlichen Erkenntnissen bzw. empirischen Gegebenheiten ergeben oder aber das Ergebnis politischer bzw. planerischer Abwägungs-/Entscheidungsprozesse sein.

Auch die Quantifizierung von klimaökologischen Massnahmenwirkungen stellt ein mehrfachkomplexes Thema dar. Folgende Untersuchungsdimensionen müssten bei einer umfassenden Wirkanalyse zur Untersuchung von Massnahmenwirkungen adressiert werden:

- Räumliche Dimension  
Welche Entfernung zur Massnahme in der Horizontalen und Vertikalen wird untersucht?
- Zeitliche Dimension  
Welche Tages-/Jahreszeit wird untersucht?
- Dimension des Aufenthaltsortes  
Werden Gebäudeinnenräume (ggf. in Abhängigkeit von Gebäudetypologie, der Etage und Himmelsrichtung) oder die Aufenthaltsbereiche ausserhalb von Gebäuden untersucht?
- Dimension der Auswerteparameter  
Welche humanbioklimatischen Parameter werden untersucht (z.B. Indizes wie PET oder UTCI, Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftfeuchtigkeit)
- Dimension der Kombination  
Werden die Wirkungen von Einzelmassnahmen oder summarische Wirkungen von (ggf. beliebig) kombinierbaren Massnahmenbündeln untersucht?
- Dimension der Umgebung  
Welche stadtstrukturelle Situation wird analysiert?
- Dimension der Wechselwirkungen  
Welche Effekte für welche anderen siedlungsklimatischen (ggf. auch anderen) Handlungsfelder werden untersucht (z.B. Luftqualität, Sturmgefahren, Windkomfort, Starkregenvorsorge)

Angesichts dieser Komplexität verwundert es nicht, dass eine umfassende Zusammenschau der Wirksamkeit bisher weder von Wissenschaft noch von der zunehmenden Anzahl privatwirtschaftlicher Klimadienstleister geleistet werden konnte. Allerdings existieren eine Vielzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen und praxisbezogenen Projekten, in denen einzelne Massnahmen oder ausgewählte Massnahmensets mit einem gegenüber der oben skizzierten Multidimensionalität (meist deutlich) reduzierten Ansatz untersucht worden sind. In der Konsequenz führt dieser fallstudienorientierte, per se die (eigentlich) notwendigen Analysedimensionen sehr stark vereinfachende Ansatz zu bei weitem noch nicht für alle Detailfragen zufrieden stellende Analyseergebnissen. Dazu gehören auch Analyseergebnisse, die sich auf den ersten Blick zu widersprechen scheinen, auf den zweiten Blick aber „nur“ auf die Berücksichtigung



unterschiedlicher Dimensionen im Analysesetup zurückzuführen sind. Ein Beispiel hierfür ist die Wirkung von vertikaler Gebäudebegrünung. Während Hoelscher et al. (2016) auf der Basis von Messungen an einem real begrünten Gebäude in Berlin keine Kühlungseffekte für den Strassenraum in der Nacht feststellen konnten (jedoch für die Oberflächentemperaturen der Innenwände), definiert der Fachplan Hitzeminderung der Stadt Zürich (Stadt Zürich 2020) die Fassadenbegrünung auf der Basis diverser mikroskaliger Modellrechnungen als die wirksamste Massnahme zur Reduktion der bodennahen Lufttemperatur im nächtlichen Aussenraum (-1,3K im Median in 2-4 m Entfernung). Beide Analysen genügen höchsten wissenschaftlichen Ansprüchen und kommen doch zu unterschiedlichen Ergebnissen. Hintergrund sind die unterschiedlichen Analyse- und Auswertansätze. So betrachten Hoelscher et al. die Südsüdwest-/ und Westfassaden eines realen Einzelgebäudes in Berlin und messen die Wirkungen an einem bestimmten Punkt im Strassenraum während einer Hitzeperiode im August 2014, während sich die Auswertungen im Züricher-Projekt auf Modellergebnisse stützen, bei denen die Aussenwände einer standardisierten Blockbebauung in alle Himmelsrichtungen begrünt wurden und die Ergebnisse flächendeckend um das Gebäude herum ausgewertet werden konnten.

Das gewählte Beispiel ist eines von vielen und verdeutlicht, dass sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt allgemeingültige Aussagen zur Wirkung einzelner Massnahmen oder etwa eine wie auch immer geartete Wirkungsrangfolge fachlich verbieten. Um also nicht in die Falle einer Scheingenauigkeit zu tappen, bleiben die folgenden Ausführungen daher bewusst auf der Ebene von qualitativen Hinweisen. Es ist zu erwarten, dass sich in den kommenden Jahren – angetrieben durch das weiter steigende gesellschaftliche Interesse – ein stetiger Erkenntnisgewinn entwickeln wird, der mittelfristig valide und umfassende quantitative Aussagen möglich machen wird.

Zu den weitestgehend gesicherten Erkenntnissen gehört zuallererst die Feststellung, dass sich mit vielen der bekannten Massnahmen (vertikale Gebäudebegrünungen, Albedoerhöhungen, Entsiegelungen, Stadtbäume) positive Effekte für den thermischen Komfort erzielen lassen. Abbildung 31 verdeutlicht an einem Fallbeispiel aus dem Stadtentwicklungsplan Klima Berlin (SenSBW 2010), dass sich die stärksten Wirkungen durch die kleinräumige Kombination von Massnahmen ergeben. Der Grundsatz „das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ scheint auch hier zu gelten. Die Abbildung verdeutlicht aber auch eine weitere Erkenntnis, die mit hinreichender Sicherheit übertragbar sein dürfte. Die genannten Massnahmen weisen insbesondere tagsüber eine signifikante Wirksamkeit auf, während sie in den Nachstunden kaum zur Abkühlung beitragen (vgl. auch Stadt Zürich 2020).

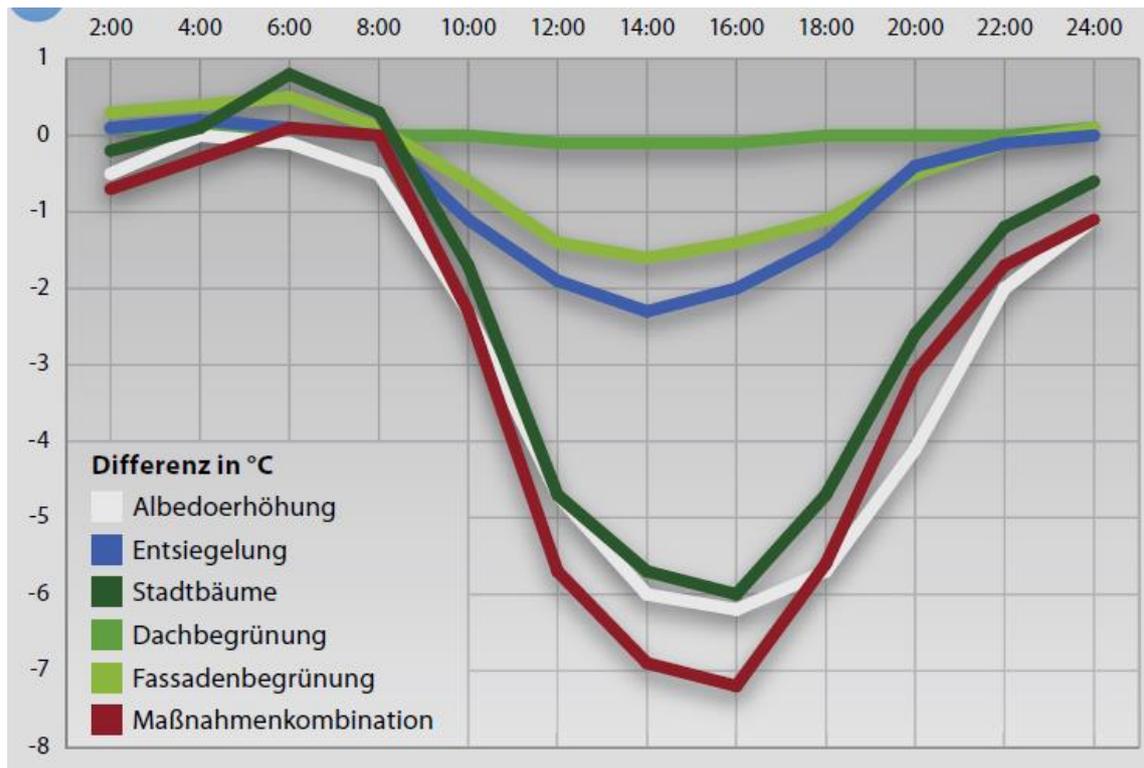


Abbildung 31: Veränderungen durch Anpassungsmassnahmen am Beispiel eines Tagesverlaufs der Aussentemperatur in zwei Metern Höhe.

Einen besonderen Hinweis bedarf die – insbesondere extensive, meist aber auch intensive – Dachbegrünung. Obwohl sie sich in den Festsetzungskatalogen von Sondernutzungsplänen zunehmender Beliebtheit erfreuen, existiert keine Untersuchung, die eine entsprechende Wirkung für den thermischen Komfort im Aussenraum nachweisen könnte. Die Massnahme ist schlichtweg zu weit entfernt vom zu betrachtenden Bodenniveau. Eine australische Studie (Coutts et al. 2014) empfiehlt daher, die blau-grünen Massnahmen auf das Strassenniveau zu konzentrieren und die Dächer mit einer hohen **Albedo** zu versehen. Es sei hinzugefügt, dass auch hier mit flachen Gebäude < 5 m (z.B. Garagenhöfe) Ausnahmen existieren, von deren intensiven Gründächern in bestimmten Konstellationen eine positive Wirkung ausgehen kann (vgl. KURAS 2017).

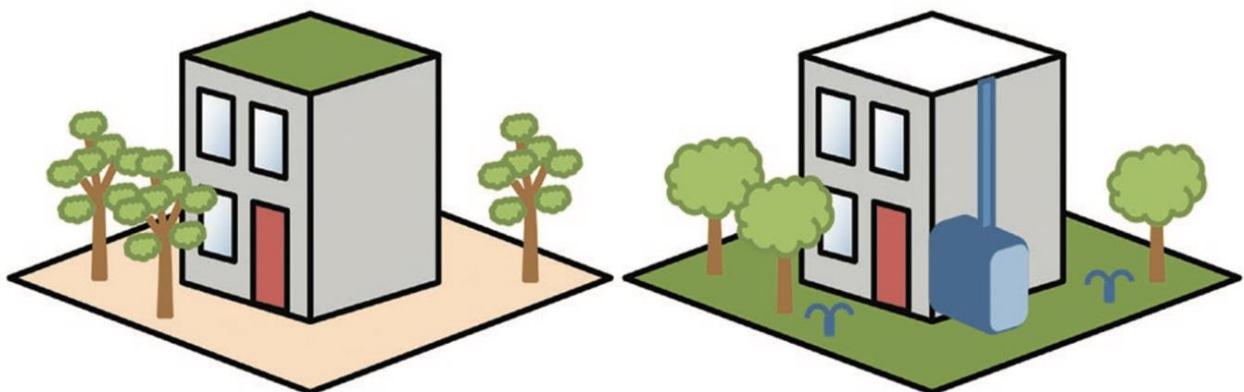


Figure 14: Human thermal comfort can be maximised by providing water at street level, rather than retaining on the rooftop

Abbildung 32: Blau-grüne Strassenraumgestaltung ist wirksamer als Dachbegrünung (Coutts et al. 2014)

Photovoltaikanlagen auf Dachflächen können die Erwärmung der Dachflächen durch Aufnahme eines Teils der solaren Strahlung, die dann nicht mehr zur Erwärmung des Dachs zur Verfügung steht, und durch den Schattenwurf der Module geringfügig reduzieren. Dies gilt aber nur, falls das Dach bereits eine niedrigere oder ähnliche **Albedo** wie die Photovoltaikanlage besitzt. Ist das Dach heller als die Photovoltaikanlage, berichten Studien von einer leichten Erwärmung der Temperatur über dem Dach (Brito 2020). Beide Effekte sind aber vernachlässigbar gross, wie Genchi et al. (2022) in ihren Messungen herausfanden. Somit ist im Mittel von keinem direkten Temperatureinfluss durch Photovoltaikanlagen auf das Stadtklima zu rechnen. Eine positive Beeinflussung ist aber zwischen Gründächern und Photovoltaikanlagen zu erwarten. Das Gründach verliert nicht seine positiven Auswirkungen auf das Klima über dem Dach und gleichzeitig arbeiten Photovoltaikanlagen in Kombination mit den Gründächern deutlich effektiver. Ein Grund ist, dass durch das Dachgrün die Temperaturen oberhalb des Dachs im Vergleich zu einem blossen Dach geringer sind und somit durch das Dachgrün der wärmebedingte Leistungsverlust der Photovoltaikmodule reduziert wird (BUE Hamburg 2022).

Ein weiterer Punkt, der aus Abbildung 31 und weiteren Studien deutlich wird, ist, dass vor allem blau-grüne Massnahmen im Einzelfall und insbesondere in der Nacht sogar zu einer weiteren Erwärmung der Umgebung beitragen können. Dies betrifft beispielsweise offene Wasserflächen, die aufgrund ihrer hohen spezifischen Wärmespeicherkapazität in den (späten) Sommermonaten häufig wärmer sind als die Luft im näheren Umkreis, oder Stadtbäume, die gegenüber einer offenen Grasfläche die nächtliche Auskühlung der bodennahen Luftschichten reduzieren und auch den Kaltluftzufluss aus der Umgebung bremsen können (MVI Baden Württemberg 2012). Beide Massnahmen können in anderen räumlich-zeitlichen Kontexten aber auch nachts sinnvoll sein. Zum Beispiel sind grössere Fließgewässer in einer frühen Hitzeperiode (z.B. im Juni) oder in ihren Oberläufen auch den ganzen Sommer tendenziell kälter als die Umgebungsluft (vgl. Abbildung 33) und (neue) Stadtbäume auf einem zuvor vollversiegelten Stadtplatz führen im Stadtbereich auch nachts tendenziell zu einer Abkühlung und haben insbesondere am Tag eine sehr positive Wirkung auf das Siedlungsklima und die Aufenthaltsqualität draussen. Auch aus diesem Grund sollten Massnahmen immer im konkreten zielbezogenen Kontext entwickelt werden, um Fehladaptation zu vermeiden (vgl. SenSBW 2022).

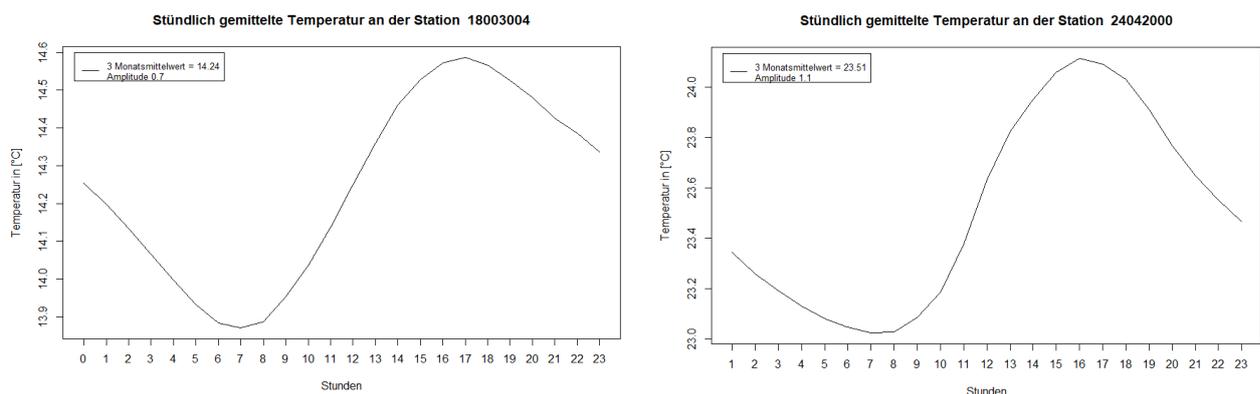


Abbildung 33: Mittlerer Tagesgang der Wassertemperatur in den Monaten Juni, Juli und August am Pegel des Inn bei Rosenheim (links) sowie am Pegel des Main in Würzburg (rechts)

Da die nächtliche Abkühlung durch Massnahmen im Aussenraum nur bedingt möglich zu sein scheint, aufgrund des Klimawandels sowie vielerorts weiter intensiver Siedlungsentwicklung im Innen- und Aussenbereich, kommen zwei Massnahmenpaketen eine besondere Bedeutung zu. Zum einen unterstreichen die oben skizzierten robusten Erkenntnisse zu den Wirkrichtungen der Massnahmen die hohe Relevanz von Erhalt und Verbesserung der nächtlichen Durchlüftung des Siedlungskörpers. Nur auf diese Weise



kann sichergestellt werden, dass die während Hitzeperioden zwar meist ebenfalls warme – aber im Vergleich zur Gebäudeinnentemperatur immer noch deutliche kühlere – Aussenluft auch gut in die Gebäude hineinfließen kann. Den Schlüssel zur Regulierung bzw. Reduzierung von thermischen Belastungen insbesondere zur Nachtzeit und in den Schlafräumen stellen angesichts der oben beschriebenen Erkenntnisse aber zum anderen die Gebäude selbst bzw. Massnahmen zu ihrer unmittelbaren Kühlung dar. Buchin et al. (2016) attestieren in diesem Zusammenhang Massnahmen zur passiven und vor allem aktiven Gebäudekühlung das weitaus grössere Potential als insbesondere grünen Massnahmen im Aussenraum (Abbildung 34). Der baulich-technischen Gebäudekühlung haftet dabei stets der Ruf der Umweltschädlichkeit an. Allerdings existieren bereits heute nachhaltige Lösungen oder befinden sich in der fortgeschrittenen Entwicklungsphase (z.B. Kompressionskältemaschinen oder Ab- und Adsorptionskältemaschinen, adiabatische (Abluft-)Kühlung) (UBA 2020). Auch die in der DIN 4108-2 zum sommerlichen Wärmeschutz subsummierten Massnahmen (innovative Glastechniken, Aussenjalousien, smarte Nachtlüftungssysteme) gehören in diesen hochwirksamen Massnahmenkomplex.

Auch wenn den Gebäuden (inkl. ihrer Hülle und der installierten Haustechnik) bei der Hitzevorsorge also eine ganz zentrale Bedeutung zukommt, stellt ihre Anpassung letztlich einen von mehreren strategischen Bausteinen dar. Die grosse Herausforderung liegt nun in der passgenauen Kombination mit anderen Massnahmenpaketen, Strategien und Paradigmen wie dem Schwammstadtansatz, blau-grüner Infrastruktur, der dezentralen Regewasserbewirtschaftung oder der doppelten/dreifachen Innenentwicklung (vgl. UBA 2019 und Abbildung 35). Dabei müssen individuelle Lösungen für die ganz spezifischen Ausgangs- und Rahmenbedingungen in den Gemeinden entwickelt und umgesetzt werden. Wie die vorherigen Ausführungen gezeigt haben, ist es von entscheidender Relevanz, diesen Prozess auf der Basis von mindestens politisch unterstützten (besser: beschlossenen) „Klimaqualitätszielen“ anzugehen bzw. fortzuführen.

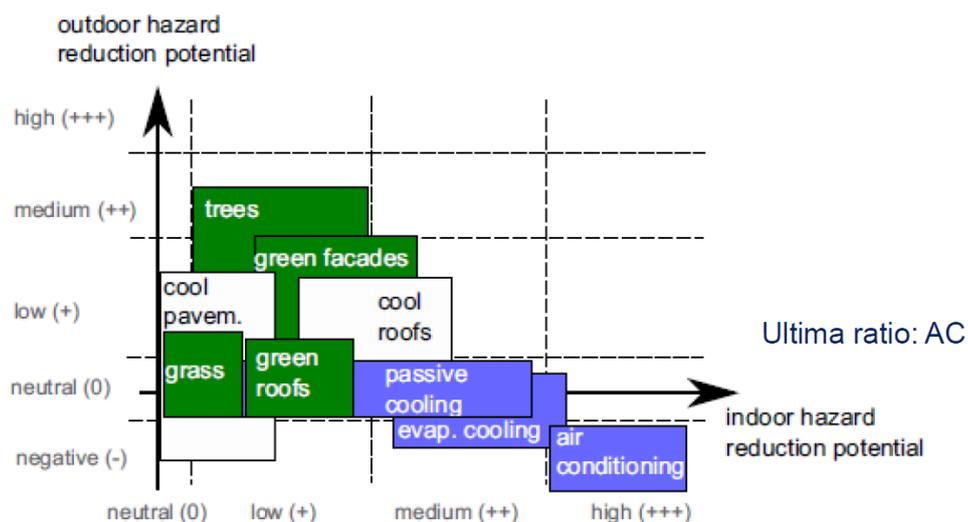


Abbildung 34: Wirksamkeit von Massnahmen zur Abkühlung im Innen- und Aussenraum (Buchin et al., 2016)



Abbildung 35: Strategische Bausteine einer hitzeangepassten Siedlungsentwicklung



## 6. Fazit und Ausblick

Mit der aktuellen Klimaanalyse liegt eine modellgestützte, detaillierte Analyse der klimaökologischen Funktionen im Kanton Solothurn für den Ist-Zustand 2020 und einen möglichen Zustand in der Zukunft 2060 vor. Im Fokus standen dabei insbesondere der nächtliche **Kaltluft**haushalt sowie die kleinräumige sommerliche thermische Belastungssituation der Bevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht (Schutzgut der menschlichen Gesundheit). Um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für den gesamten Kanton zu erhalten, wurde eine Klimamodellierung mit dem Modell FITNAH-3D durchgeführt.

Das Hauptprodukt des Arbeitsprozesses sind zwei **Planungshinweiskarten** mit angebundenem flächenkonkreten Massnahmenkatalog. Die Kartenwerke machen zum einen die abgestufte Handlungsnotwendigkeit zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („**Wirkungsraum**“) der Solothurner Bevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht sichtbar. Zum anderen weisen die beiden Planungshinweiskarten aber auch sämtlichen Frei- und Grünflächen im Kanton („**Ausgleichsraum**“) eine Wertigkeit hinsichtlich der von ihnen bereitgestellten klimaökologischen Funktionen auf.

Primäres Anwendungsfeld der Klimaanalyse im Allgemeinen sowie der Planungshinweiskarten im Speziellen ist somit die Bereitstellung von hochwertigem Abwägungsmaterial für Planungs- und Entscheidungsprozesse der Raumplanung. Die Klimaanalyse könnte unter anderem im Rahmen der kantonalen Richtplanung Anwendung finden. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann hier erstmalig auch die Ortsplanung hinreichend gut bedient werden. Damit können nun auf Basis der Klimakarten gebietsweise Vorgaben zur Sicherung eines angenehmen Siedlungsklimas erlassen werden. Ausserdem sind auch valide Ersteinschätzungen z.B. hinsichtlich der Sensibilität einzelner Entwicklungsvorhaben seitens der Verwaltung sowie bei Bedarf eines externen Gutachters möglich. Um die Hitzethematik möglichst früh bei einem Bauvorhaben mitzudenken, können Planer und Architekten mithilfe der Klimakarten nun ab Beginn eine Einschätzung des Lokalklimas erhalten.

Über dieses klassische Anwendungsfeld hinaus können die Ergebnisse der Klimaanalyse aber auch in weiteren Planungen des Kantons zur Anwendung kommen. Hierzu zählen u.a. die Sanierung des öffentlichen Raums, die Verkehrswegeplanung, die Grünflächenentwicklung sowie Leitbildprozesse oder auch Fragen der Sozialplanung bzw. der Umweltgerechtigkeit. Nicht zuletzt wird mit der Klimaanalyse auch die breite Bevölkerung adressiert: Die Karten sensibilisieren für die Hitzethematik.

Die Anpassung an Hitze ist als Querschnittsaufgabe zu verstehen und bietet viele Synergien, wie etwa zum Regenwassermanagement (BAFU 2022). Der Ansatz der „Schwammstadt“ sieht vor, das Wasser bei Starkregen zurückzuhalten und in Trockenperioden wieder abzugeben. Um dies zu gewährleisten, werden zum Teil die gleichen Handlungsansätze wie bei der Anpassung an Hitze verfolgt, u.a. die Entsiegelung und Begrünung von Flächen. Gleichzeitig werden damit auch mehr Lebensräume für Pflanzen und Tiere geschaffen und damit die Biodiversität gefördert. Daneben spielt auch die Architektur bei der Hitzevorsorge eine wichtige Rolle. So gibt es eine Reihe von gebäudebezogenen Massnahmen zur Klimaanpassung (u.a. Dach- und Fassadenbegrünung, Wärmedämmung und energetische Gebäudesanierung, bautechnische Verschattungsmaßnahmen, helle Oberflächen, technische Gebäudekühlung), die vor allem dazu beitragen, das Klima in den aufgeheizten Innenräumen zu optimieren (siehe Massnahmencluster „Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum“ in Kap. 5.3). Die große Herausforderung des Kantons Solothurn besteht nun darin, eine Vielzahl von Massnahmen an geeigneter Stelle unter Berücksichtigung der Handlungsrestriktionen umzusetzen.



## Quellenverzeichnis

- BAFU (=Bundesamt für Umwelt) (2018): Hitze in Städten. Grundlage für eine klimaangepasste Siedlungsentwicklung. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/hitze-in-staedten.html>
- BAFU (=Bundesamt für Umwelt) (2022): Regenwasser im Siedlungsraum. Starkniederschlag und Regenwasserbewirtschaftung in der klimaangepassten Siedlungsentwicklung. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/regenwasser-im-siedlungsraum.html>
- BBSR (=Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2018): Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz: Indikatoren, Kenn- und Orientierungswerte.
- Begert, M., C. Frei, M. Abbt (2013): Einführung der Normperiode 1981-2010, Fachbericht MeteoSchweiz, 245, 50 pp.
- BfN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- Brito, M. (2020). Assessing the Impact of Photovoltaics on Rooftops and Facades in the Urban Micro-Climate. *Energies*. 13. 2717. 10.3390/en13112717.
- Buchin, O., M.-T. Hoelscher, F. Meier, T. Nehls, F. Ziegler (2016): Evaluation of the health-risk reduction potential of counter measures to urban heat islands. *Energy and Buildings* 114: 27-37.
- BUE: Mehr Gründächer für Hamburg. Broschüre. Hg. v. Behörde für Umwelt und Energie Hamburg. <https://www.hamburg.de/contentblob/4599638/baf6f2302bfa9162490113babe005269/data/d-broschuere.pdf>, zuletzt geprüft am 08.09.2022.
- BVU (=Departement Bau, Verkehr und Umwelt), Kanton Aargau (2021): Hitzeangepasste Siedlungsentwicklung. Leitfaden für Gemeinden.
- CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate, Services, Zurich, 271 pp.
- Coutts, A., M. Loughnan, N. Tapper, E. White, J. Thom, A. Broadbent and R. Harris (2014): Impacts of water sensitive urban design solutions on human thermal comfort. *Green Cities and Microclimate* - B3.1 -2-2014.
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (2022) – Deutscher Wetterdienst: Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. [https://www.dwd.de/DE/forschung/klima\\_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt\\_warmeinseln/projekt\\_waermeinseln\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_warmeinseln/projekt_waermeinseln_node.html)
- DWD (2023) – Deutscher Wetterdienst: Erläuterungen zur Gefühlten Temperatur. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrendindizesthermisch/gefuehltetemp.html>



- Frick, R., F. Foletti, S. Liebisch, M. Oswald, D. Murbach und L. di Lena (2021): Agglomerationsprogramm AareLand 4. Generation. Teil 2: Massnahmenblätter Aarau/Solothurn, 25. Mai 2021.
- Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.) (2008): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage.
- Gaede, M. und Härtling, J. W. (2010): Umweltbewertung und Umweltprüfung. Westermann: Braunschweig.
- Genchi, Yutaka und Ishisaki, Masako und Ohashi, Yukitaka und Kikegawa, Yukihiro und Takahashi, Hiroshi und Inaba, Atsushi. (2022): Impacts of large-scale photovoltaic panel installation in the heat island in Tokyo.
- GERICS Climate Service Center Germany (2019): Schlecht-Schlaf-Index (Homepage). Online: [https://gerics.de/products\\_and\\_publications/publications/IPCC/detail/078103/index.php](https://gerics.de/products_and_publications/publications/IPCC/detail/078103/index.php)
- Ginzler, C. und Hobi, M. (2015): Erstellung eines landesweiten digitalen Oberflächenmodells aus operationellen Stereo-Luftbildern. Geomatik Schweiz (9): 332-335.
- Gross, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research (10): 483-498.
- Gross, G. (2014): On the Parametrization of Urban Land Use in Mesoscale Models. Boundary-Layer Meteorology Vol. 150 No. 2, 319–326.
- Gross, G. (2019): On the range of boundary layer model results depending on inaccurate input data, Meteorologische Zeitschrift Vol. 28 Nr. 3, 225-234.
- Häckel, H. (2012): Meteorologie. 7. Auflage. Stuttgart.
- Hoelscher, M.-T., T. Nehls, B. Jänicke, G. Wessolek (2016): Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. Energy and Buildings 114: 283-290.
- IPCC (2021-2022): Sechster IPCC-Sachstandbericht.
- Jendritzky, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. 114.
- KURAS – Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme (2017): KURAS-Leitfaden. Zielorientierte Planung von Massnahmen der Regenwasserbewirtschaftung. <http://kuras-projekt.de/downloads/erzeugnisse-regenwasserbewirtschaftung/>
- Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.
- Malberg, H. (2002): Meteorologie und Klimatologie- Eine Einführung. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Matzarakis, A. und H. Mayer (1996): Another kind of environmental stress: Thermal stress. WHO Newsletter No. 18: 7-10.
- Mayer, H., W. Beckröge und A. Matzarakis (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.



- Meinshausen M., S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G. J. M. Velders & D.P. P. van Vuuren (2011): The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their extension from 1765 to 2500. *Climatic Change* 109, 213.
- MeteoSchweiz (2023a): Klimanormwerte Koppigen. Normperiode 1991-2020. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/ext/climate-climsheet.html>
- MeteoSchweiz (2023b): Area-mean temperatures of Switzerland 1864-2022. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/product/input/climate-data/swissmean/10.18751-Climate-Timeseries-CHTM-swiss.txt>
- MeteoSchweiz (2023c): Zeitliche Entwicklung von Temperatur und Niederschlag. [https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/temperatur-und-niederschlagsentwicklung.html?filters=ths200m0\\_swiss\\_jja\\_1864-trend](https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/temperatur-und-niederschlagsentwicklung.html?filters=ths200m0_swiss_jja_1864-trend)
- MeteoSchweiz (2023d): Temperatur. Abweichung von der Normperiode 1981-2010. Kt. Solothurn. Sommer. [https://gate.meteoswiss.ch/mchbrowser/data/barplot-scen/tas/SO/RCP4.5-RCP8.5/JJA/barplot-scen\\_tas\\_SO\\_RCP4.5-RCP8.5\\_JJA-De.pdf](https://gate.meteoswiss.ch/mchbrowser/data/barplot-scen/tas/SO/RCP4.5-RCP8.5/JJA/barplot-scen_tas_SO_RCP4.5-RCP8.5_JJA-De.pdf)
- MVI Baden Württemberg 2012: Städtebauliche Klimafibel. <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/pdf/Klimafibel-2012.pdf>
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.
- Schönwiese, C.- D. (2008): *Klimatologie*. 3. Auflage. Stuttgart.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2020): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2020–2025. Bern, 164 S.
- Seecon (2021): Massnahmenkatalog. Massnahmenkatalog zur Handlungshilfe für Gemeinden zur Anpassung an den Klimawandel. Themenkomplex Hitze.
- SenSBW (=Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen) (2010): Stadtentwicklungsplan Klima. Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern.
- SenSBW (=Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen) (2022): Stadtentwicklungsplan Klima 2.0. unveröffentlicht
- Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>
- UBA (2016): Heizen, Raumtemperatur. Online: [www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur](http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur)
- UBA (2019): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. UBA-Texte. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/untersuchung-der-potentiale-fuer-die-nutzung-von>
- UBA (2020): Gebäudeklimatisierung <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/gebäudeklimatisierung>



VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5. Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.

VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.

VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.

VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.