



Impressum

Auftraggeber

Kanton Luzern, Umwelt und Energie

Autoren

Cornelia Burmeister, Josephine Förster, Nadja Krause, Katja Mendzigall

Projektorganisation

Projektgruppe

Kanton Luzern: Ronja Bohnenblust (Projektleitung, BUWDDS Klima), Evi Rothenbühler (rawi Geoinformation), Stefanie Hinn (rawi Geoinformation), André Duss (rawi Raumentwicklung)

GEO-NET: Katja Mendzigall, Cornelia Burmeister, Josephine Förster, Nadja Krause, Peter Trute

Steuerungsgruppe

Jürgen Ragaller (BUWDDS Klima), Thomas Hösli (rawi Geoinformation)

Begleitgruppe

Gemeinden Ebikon (Melanie Lienhard, Marcel Blättler), Emmen (Susanne Schwegler, Barbara Irniger), Hochdorf (Gaby Oberson), Horw (Sivia Hanssen), Kriens (Robin Burch, Sascha Blum), Luzern (Mirjam Luder, Sibylle Sautier), Sursee (Thomas Achermann), LuzernPlus (Yanick Auchli, Mario Baumgartner), klimaresiliente Agglomeration Luzern (Johannes Heeb, Celia Schmidt)



Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	V
GLOSSAR	VI
1. EINLEITUNG	8
2. FACHLICHE UND REGIONALKLIMATISCHE GRUNDLAGEN	9
2.1 Der Wärmeinseleffekt	9
2.2 Regionale Klimatologie im Grossraum Luzern	11
2.2.1 Das aktuelle Klima in Luzern	11
2.2.2 Autochthone Wetterlagen	12
2.2.3 Klimawandel	13
3. METHODE DER MODELLGESTÜTZTEN KLIMAANALYSE	18
3.1 Eingesetztes Stadtklimamodell	18
3.2 Vorgegebene Randbedingungen	19
3.3 Eingangsdatenaufbereitung	22
3.4 Herausforderungen und Unsicherheiten	29
4. ERGEBNISSE	32
4.1 Nachtsituation	32
4.1.1 Nächtliches Temperaturfeld	32
4.1.2 Kaltluftströmungsfeld	34
4.1.3 Klimaanalysekarte Nacht	38
4.2 Tagsituation	41
4.2.1 Lufttemperatur am Tag	41
4.2.2 PET am Tag	42
5. PLANUNGSHINWEISKARTEN	46
5.1 Bewertungsmethoden	46
5.1.1 Standardisierung der Parameter (z-Transformation)	46
5.1.2 Bewertung von Siedlungs- und Verkehrsflächen (Wirkungsraum)	47
5.1.3 Bewertung von Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)	48
5.1.4 Kaltlufteinwirkbereich als nicht bewertungsrelevantes Kriterium	52
5.2 Planungshinweiskarten	53
5.2.1 Nachtsituation	53
5.2.2 Tagsituation	56
5.3 Massnahmenkatalog Siedlungsklima	60
5.4 Hinweise zur Wirksamkeit von Massnahmen	67
6. FAZIT UND AUSBLICK	73
QUELLENVERZEICHNIS	75



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: PRINZIPIKIZZE 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 LUZERN, NORMPERIODE 1991–2020 (METEOSCHWEIZ 2022A)	11
ABBILDUNG 4: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN (93.6 PRO JAHR) IM ZEITRAUM 1990 – 2020, STATION: 44 – ALTDORF (DATENQUELLE: METEOSCHWEIZ).....	13
ABBILDUNG 5: ENTWICKLUNG DER SOMMERTEMPERATUREN (JUNI, JULI, AUGUST) FÜR DIE SCHWEIZ AB 1864 BIS HEUTE IM VERGLEICH ZUR PERIODE 1961 – 1990 (METEOSCHWEIZ 2022c)	14
ABBILDUNG 6: DIE KLIMASZENARIEN RCP 8.5, RCP 6, RCP 4.5 UND RCP 2.6 (MEINSHAUSEN ET AL., 2011, MODIFIZIERT VON GEO-NET)	15
ABBILDUNG 7: ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER SOMMERTEMPERATUREN IM KANTON LUZERN AUF BASIS DER SCHWEIZER KLIMASZENARIEN CH2018 (METEOSCHWEIZ 2022d)	16
ABBILDUNG 8: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT VERSCHIEDENER LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROSS 1992)	19
ABBILDUNG 9: LAGE DER METEOSCHWEIZ-STATIONEN IM KANTON LUZERN UND DER NÄHEREN UMGEBUNG	21
ABBILDUNG 10: GELÄNDEHÖHEN IM KANTON LUZERN.....	24
ABBILDUNG 11: LANDNUTZUNG IM KANTON LUZERN	25
ABBILDUNG 12: ERMITTELTE HÖHENABHÄNGIGE WASSERTEMPERATUR. QUELLE: EIGENE AUSWERTUNG	26
ABBILDUNG 13: SOMMERLICHE WASSERTEMPERATUREN IM KANTON LUZERN	27
ABBILDUNG 14: SCHEMA DER WERTEZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION.....	28
ABBILDUNG 15: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD IM KANTON LUZERN	33
ABBILDUNG 16: PRINZIPIKIZZE KALTLUFTVOLUMENSTROM	34
ABBILDUNG 17: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM KANTON LUZERN	36
ABBILDUNG 18: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM KANTON LUZERN	37
ABBILDUNG 19: KLIMAAANALYSEKARTE KANTON LUZERN (VERKÜRZTE LEGENDE)	39
ABBILDUNG 20: LUFTTEMPERATUR AM TAG (14 UHR) IM KANTON LUZERN.....	42
ABBILDUNG 21: PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR (PET) AM TAG IM KANTON LUZERN	45
ABBILDUNG 22: Z-TRANSFORMATION ZUR STANDARDISIERUNG DER VERGLEICHENDEN BEWERTUNG VON PARAMETERN	47
ABBILDUNG 23: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHTSITUATION.....	49
ABBILDUNG 24: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE AUFENTHALTSQUALITÄT UND ERREICHBARKEIT VON AUSGLEICHSRÄUMEN AM TAG (WÄLDER AUSGESCHLOSSEN)	51
ABBILDUNG 25: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE AUFENTHALTSQUALITÄT UND ERREICHBARKEIT VON WÄLDERN AM TAG	52
ABBILDUNG 26: PLANUNGSHINWEISKARTE NACHTSITUATION FÜR DEN KANTON LUZERN (VERKÜRZTE LEGENDE).....	54
ABBILDUNG 27: PLANUNGSHINWEISKARTE TAGSITUATION FÜR DEN KANTON LUZERN (VERKÜRZTE LEGENDE).....	57
ABBILDUNG 28: BEISPIELHAFTER ABLEITUNG VON MASSNAHMEN FÜR SIEDLUNGSFLÄCHEN; PLANUNGSHINWEISKARTE NACHTSITUATION IM AUSSCHNITT HORW (TÜRKISER RAHMEN ZEIGT DIE BETRACHTETE BASISGEOMETRIE)	62
ABBILDUNG 29: VERÄNDERUNGEN DURCH ANPASSUNGSMASSNAHMEN AM BEISPIEL EINES TAGESVERLAUFS DER AUSSENTEMPERATUR IN ZWEI METERN HÖHE.	69
ABBILDUNG 30: BLAU-GRÜNE STRASSENRAUMGESTALTUNG IST WIRKSAMER ALS DACHBEGRÜNUNG (COUTTS ET AL. 2014)	69
ABBILDUNG 31: 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).....	70
ABBILDUNG 32: WIRKSAMKEIT VON MASSNAHMEN ZUR ABKÜHLUNG IM INNEN- UND AUSSENRAUM (BUCHIN ET AL., 2016)	71
ABBILDUNG 33: STRATEGISCHE BAUSTEINE EINER HITZEANGEPASSTEN SIEDLUNGSENTWICKLUNG	72
ABBILDUNG 34: VERWENDUNGSZWECK DER PLANUNGSHINWEISKARTEN (ERGEBNIS AUS EINER UMFRAGE AUSGEWÄHLTER LUZERNER GEMEINDEN).....	73



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWERTUNG DER 21 UHR TEMPERATUREN FÜR DIE SOMMERMONATE SOWIE VON KENNTAGEN. QUELLE: EIGENE AUSWERTUNGEN BERUHEND AUF METEOSCHWEIZ-STATIONSDATEN.....	20
TABELLE 2: REFERENZWERTE DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN ZUR BERECHNUNG DES HÖHENABHÄNGIGEN WÄRMEINSELEFFEKTS	38
TABELLE 3: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN (NACH VDI 2004).....	43
TABELLE 4: EINORDNUNG DER NÄCHTLICHEN ÜBERWÄRMUNG IM SIEDLUNGS- UND VERKEHRSRAUM MITTELS Z-TRANSFORMATION	47
TABELLE 5: EINORDNUNG DER WÄRMBELASTUNG AM TAG IM SIEDLUNGS- UND VERKEHRSRAUM MITTELS Z-TRANSFORMATION.....	48
TABELLE 6: EINORDNUNG DES GRÜNFLÄCHENKLIMAS AM TAG MITTELS Z-TRANSFORMATION (WÄLDER AUSGESCHLOSSEN).....	51
TABELLE 7: WIRKUNGSRAUM: FLÄCHENANTEILE UND PLANUNGSHINWEISE FÜR DIE NACHTSITUATION.....	55
TABELLE 8: AUSGLEICHSRAUM: FLÄCHENANTEILE UND PLANUNGSHINWEISE FÜR DIE NACHTSITUATION	56
TABELLE 9: WIRKUNGSRAUM: FLÄCHENANTEILE UND PLANUNGSHINWEISE FÜR DIE TAGSITUATION	58
TABELLE 10: AUSGLEICHSRAUM: FLÄCHENANTEILE UND PLANUNGSHINWEISE FÜR DIE TAGSITUATION	59
TABELLE 11: EMPFEHLUNGEN RAUMEINHEITENSPEZIFISCHER SIEDLUNGSKLIMATISCH WIRKSAMER MASSNAHMEN FÜR DEN KANTON LUZERN (MASSNAHMENKATALOG AKTIONSPAN ANPASSUNG).....	63



Glossar

Albedo: Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger 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: Grüngeprägte, 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 den kommunalen Zonenplänen abgeleitet. Hierzu zählen unter anderem Wälder, Zonen für Sport- und Freizeitanlagen, Landwirtschafts-, Grün-, Freihalte- und Reservezonen sowie (Natur-)Schutzzonen.

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 Wärmeinseleffekts 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.

Im Kanton Luzern waren bisher, mit Ausnahme der Stadt Luzern, wenige Informationen bezüglich der lokalen Hitzeverteilung und Kaltluftströme bekannt. Als Klimaanpassungsmassnahme aus dem Planungsbericht Klima und Energie des Kanton Luzern wurde deshalb eine Klimaanalyse durchgeführt (Massnahme KA-R3, Handlungsfeld Raumentwicklung). Die vorliegende Klimaanalyse ist die erste Studie, welche den Gesamttraum des Kantons Luzern in einer hohen Auflösung untersucht und so sowohl die feldhaften Zusammenhänge des Klimas im Kantonsgebiet darstellt als auch durch die hohe Auflösung für die einzelnen Gemeinden des Kantons einen Einblick in die klimatische Situation im eigenen Planungsraum auf kleinerem Betrachtungsstab ermöglicht.

Dem Stand der Technik gemäss wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 10 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Gebiet des Kantons zu erhalten. Die Verwendung der hohen Auflösung des (10m x 10m-Raster) 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 Luzern.

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). 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 des Status Quo erarbeiteten Strategien und Massnahmen zur Anpassung an die „Hitze in der Stadt“ werden in Kapitel 5.3 für das gesamte Kantonsgebiet dargestellt und erläutert.



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).

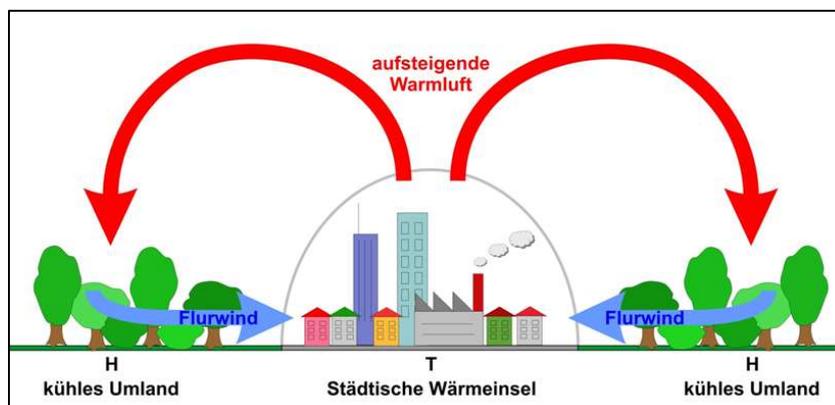


Abbildung 1: Prinzipische Skizze Flurwind



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.

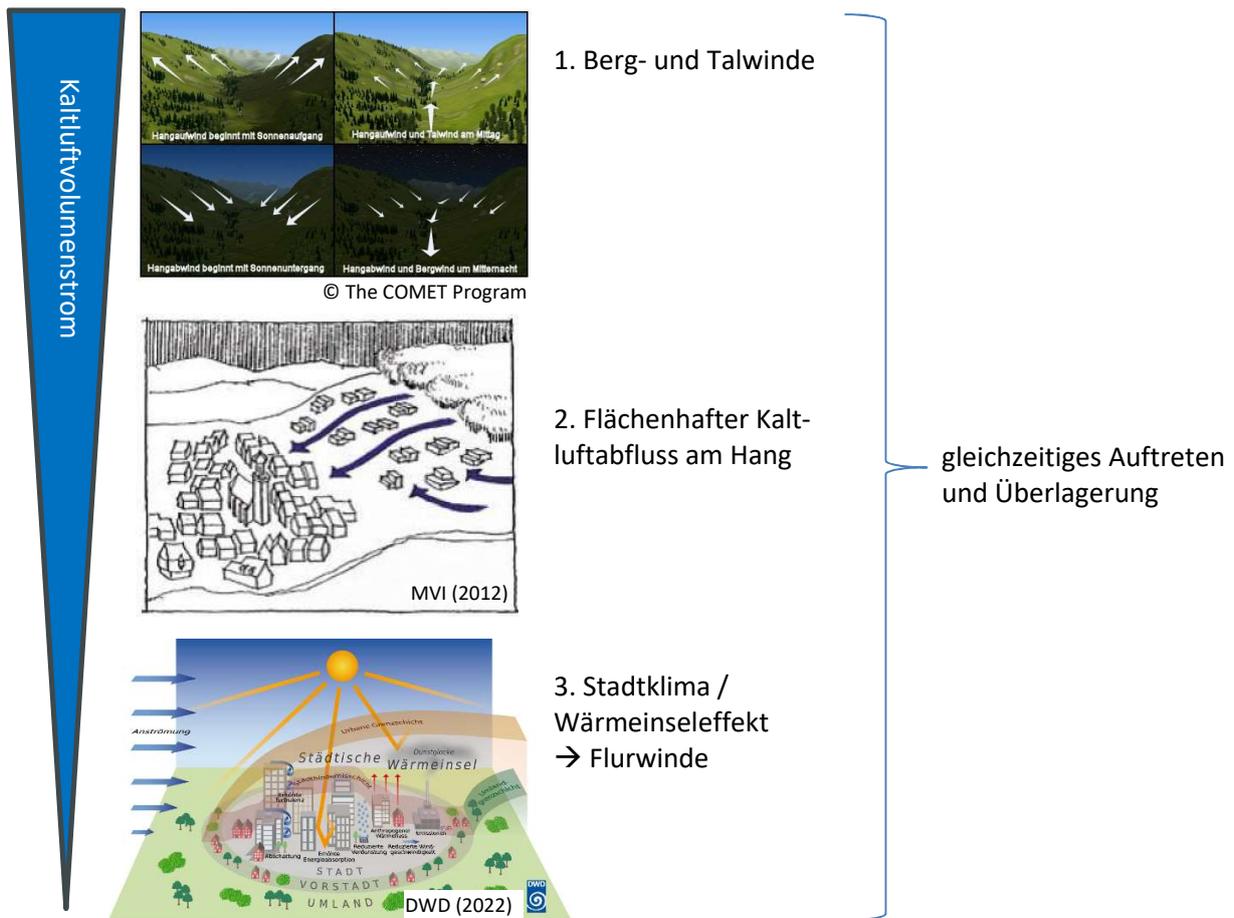


Abbildung 2: Vorherrschende Winde bei austauscharmen Wetterlagen: Die Wirkung des Reliefs und der städtischen Wärmeinsel

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 herabgesetzt¹ (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 LUZERN

2.2.1 DAS AKTUELLE KLIMA IN LUZERN

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 Normperiode 1981-2010 (Begert et al. 2013) bzw. hat kürzlich (im Januar 2022) die Normperiode 1991-2020 eingeführt.

Höhe ü.M.: 454 m
Geogr. Koord.: 47.04 N / 8.3 E
CH-Koord.: 2'665'545 / 1'209'850
Klimaregion: Zentrales Mittelland

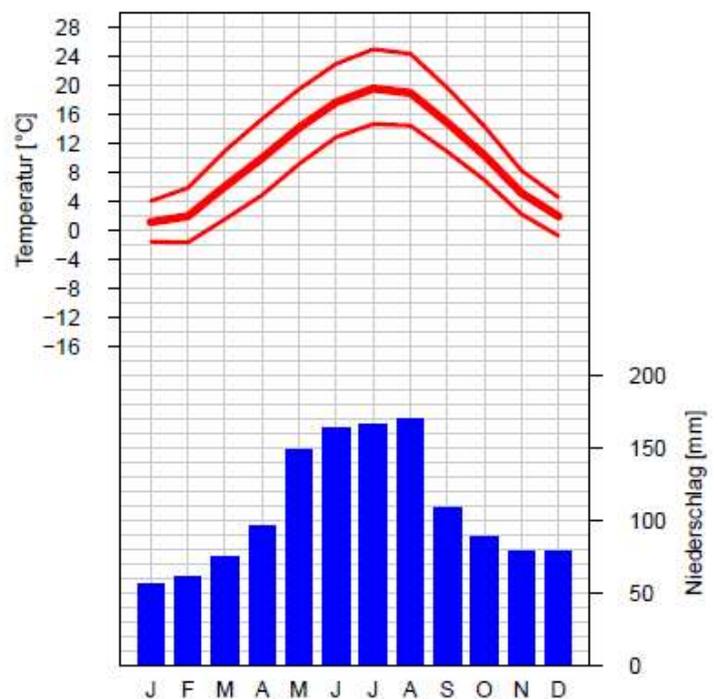
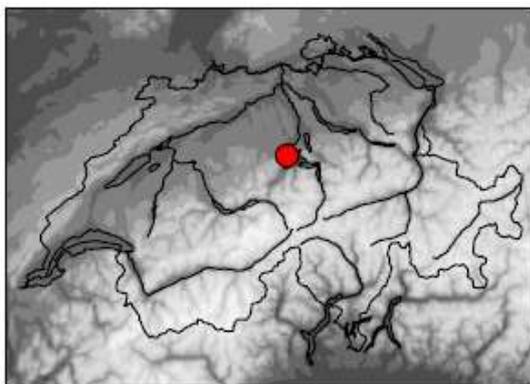


Abbildung 3: Klimadiagramm für die Station in Luzern, Normperiode 1991–2020 (MeteoSchweiz 2022a)

¹ In der Stadt steht dem geringeren latenten Wärmestrom ein höherer fühlbarer Wärmestrom gegenüber.



Luzern ist gekennzeichnet durch eine langjährige Mitteltemperatur (1991-2020) von 10,1 °C und eine mittlere jährliche Niederschlagssumme von 1291 mm/Jahr, wobei die höchsten Temperaturen sowie die höchsten monatlichen Niederschlagssummen in den Sommermonaten auftreten. Damit ist es an der Station Luzern um 4,3 °C wärmer als im Schweizer Temperaturmittel, welches in der aktuellen Normperiode 1991-2020 bei 5,8 °C (MeteoSchweiz 2022b) liegt. Im langjährigen Mittel treten in Luzern 50 Sommertage² und 9 Hitzetage³ pro Jahr auf. Vornehmlich in den Wintermonaten wurden 78 Frosttage⁴ und 15 Eistage⁵ pro Jahr registriert.

2.2.2 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

Die Klimaanalyse für den Kanton Luzern legt einen autochthonen Sommertag (wolkenloser Himmel, nur sehr schwach überlagernder synoptischer Wind) als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde (vgl. Kap. 3.2). Verbunden mit dieser autochthonen Wetterlage ist das Auftreten einer windschwachen Strahlungsnacht, in welcher die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Siedlungsgebiet erzeugt.

Für die Bestimmung der Anzahl autochthoner Nächte werden stündlich aufgelöste Daten zum Bedeckungsgrad benötigt. Da dies an den Klimastationen im Kanton Luzern nicht gegeben war, wurde die Station Altdorf (Uri) herangezogen, welche 3-stündliche Werte in Bezug auf die Bewölkung erfasst⁶. Aufgrund der Nähe zum Kanton Luzern und vergleichbarer topographischer Lage lassen sich die Messwerte aus Altdorf näherungsweise auch auf Luzern übertragen. Die Messstation Altdorf dient somit als Referenz für die Häufigkeitsuntersuchung windschwacher Strahlungsnächte.

² Sommertag - Tageshöchsttemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$

³ Hitzetag – Tageshöchsttemperatur $\geq 30^{\circ}\text{C}$

⁴ Frosttag – Tagesminimumtemperatur $\leq 0^{\circ}\text{C}$

⁵ Eistag – Tageshöchsttemperatur $\leq 0^{\circ}\text{C}$

⁶ Fehlende stündliche Werte der Bewölkung wurden in Anlehnung an die vorhandenen Stundenwerte approximiert.

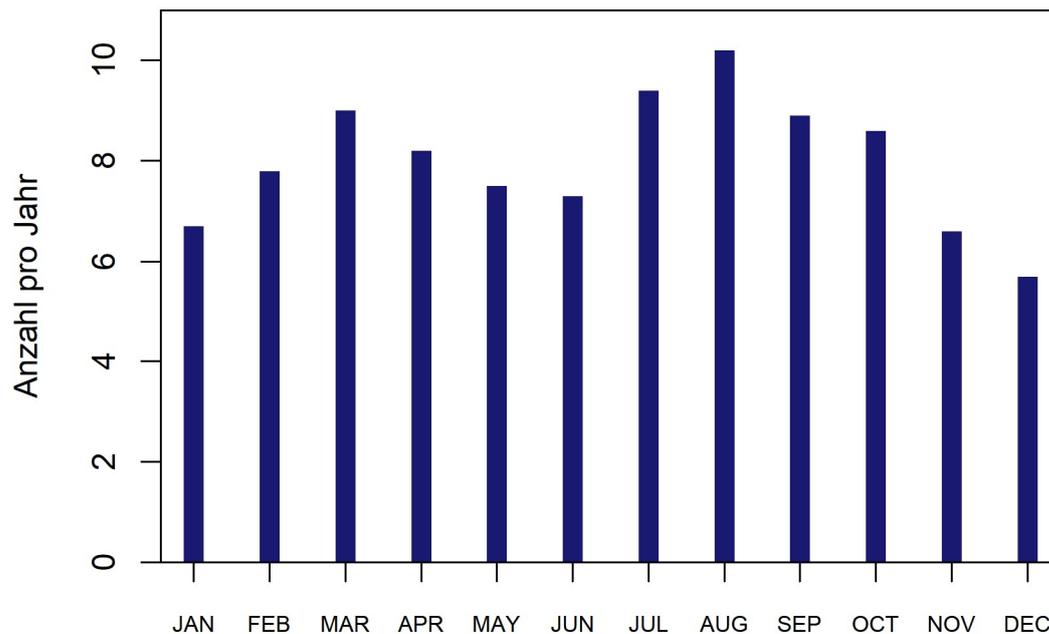


Abbildung 4: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten (93.6 pro Jahr) im Zeitraum 1990 – 2020, Station: 44 – Altdorf (Datenquelle: MeteoSchweiz)

An der Station treten im langjährigen Mittel rund 94 windschwache Strahlungsnächte auf, wobei im Sommerhalbjahr und besonders im Juli, August und September die Häufigkeit am grössten ist (Abbildung 4). Im Juli und August ist in etwa jede dritte Nacht durch autochthone Wetterlagen gekennzeichnet. Zum Verständnis dieser Daten ist wichtig zu beachten, dass die Ermittlung der langjährigen mittleren Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten anhand von Daten der Station Altdorf ermittelt wurde, welche sich weiter ausserhalb der Siedlung (bei der A2) befindet. Es ist davon auszugehen, dass in den verdichteten Siedlungskörpern Luzerns, wo die Windgeschwindigkeiten tendenziell niedriger ausfallen, die Auftrittshäufigkeiten dieser lokalen Wetterlagen im Sommer wesentlich höher ist.

2.2.3 KLIMAWANDEL

BEOBSCHTETER KLIMAWANDEL

Das Klima hat sich in der Schweiz und somit auch im Kanton Luzern 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 etwas doppelt so viel wie die Zunahme der mittleren globalen Temperatur im gleichen Zeitraum von rund 1°C (IPCC 2021). In der Abbildung 5 ist die rezente Entwicklung der Sommertemperaturen für die Monate Juni, Juli und August seit dem Jahr 1864 im Vergleich zur Klimaperiode 1961 – 1990 aufgetragen. Es ist gut zu erkennen, dass es einen signifikanten positiven Trend der Sommertemperaturen (schwarze Linie) gibt. Die Jahre 2015, 2017, 2018 und 2019 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 beobachtet werden kann. Seit den 1980er Jahren steigen die Temperaturen deutlich an und bleiben auch auf hohem Niveau.

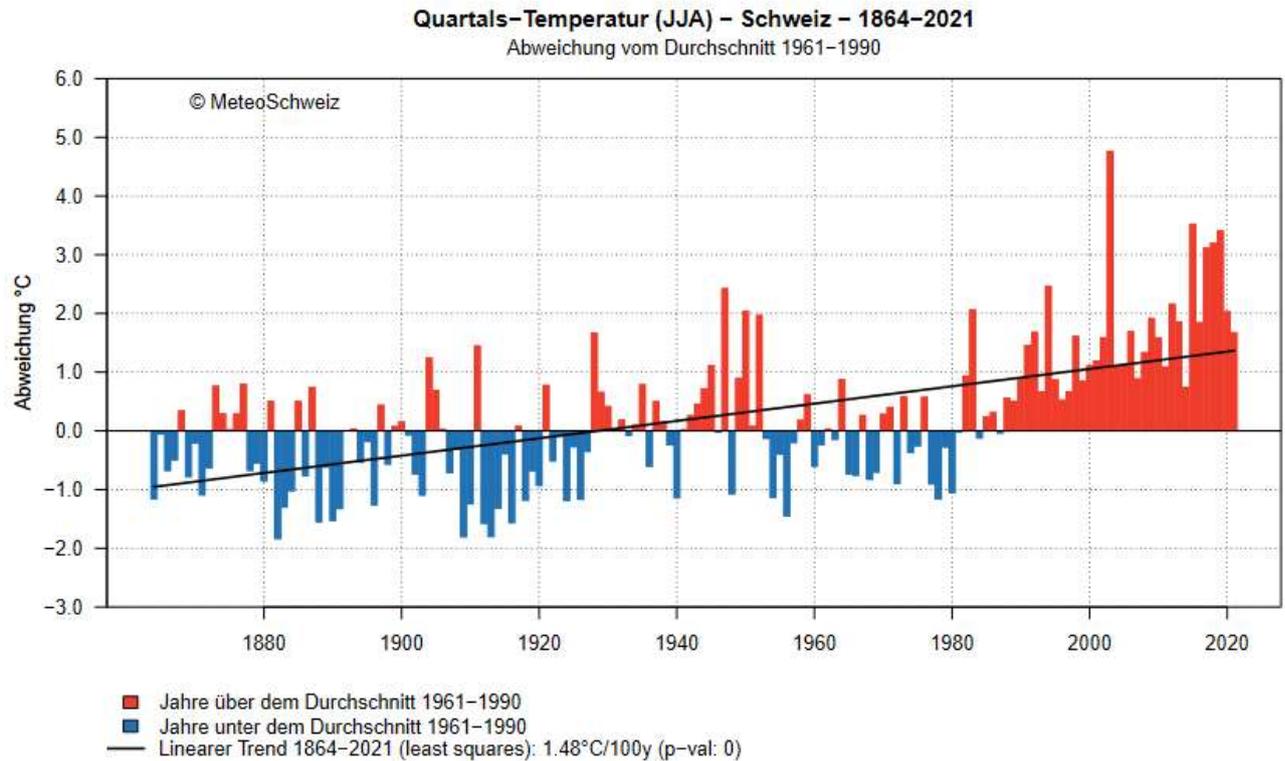


Abbildung 5: Entwicklung der Sommertemperaturen (Juni, Juli, August) für die Schweiz ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 – 1990 (MeteoSchweiz 2022c)

ZUKÜNFTIGER KLIMAWANDEL

Der Anstieg der globalen Mitteltemperaturen wird zum Grossteil durch die anthropogenen CO₂-Emissionen gesteuert. Da noch unklar ist, wie sich die CO₂-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 8.5⁷. Die Zahlen in dem Namen der Szenarien stehen für den mittleren Strahlungsantrieb in W/m², der bis ins Jahr 2100 erreicht wird (Abbildung 6).

⁷ Representative Concentration Pathways (RCP) = Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre

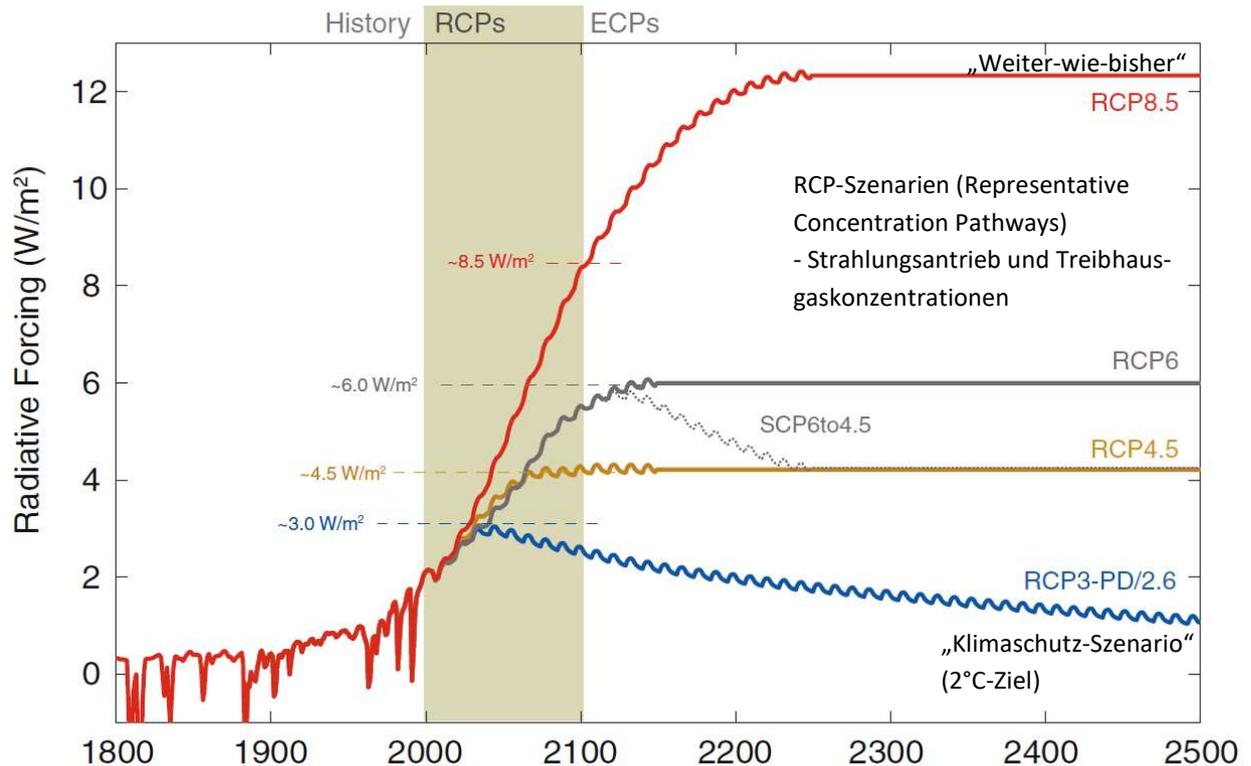


Abbildung 6: Die Klimaszenarien RCP 8.5, RCP 6, RCP 4.5 und RCP 2.6 (Meinshausen et al., 2011, modifiziert von GEO-NET)

- Das Szenario RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 Watt pro Quadratmeter (W/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°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 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 Luzern (Abbildung 7) getroffen werden können.

Temperatur

Abweichung von der Normperiode 1981-2010

Kt. Luzern
Sommer

RCP2.6
RCP8.5

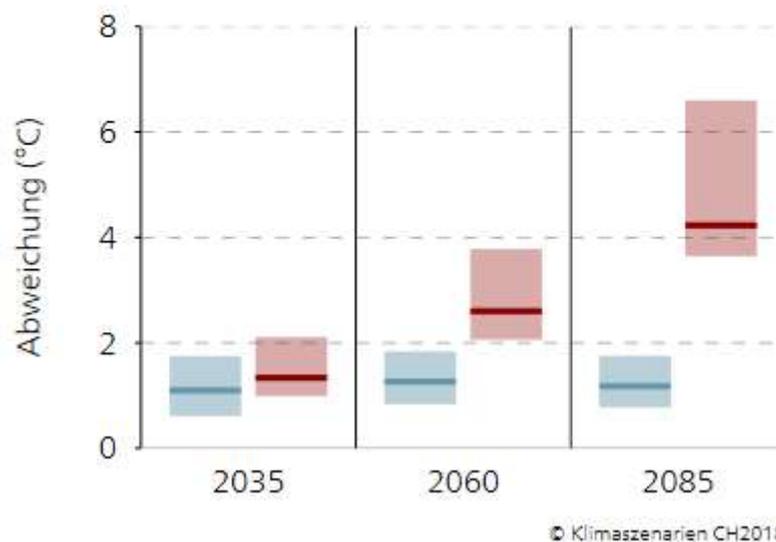


Abbildung 7: Zukünftige Entwicklung der Sommertemperaturen im Kanton Luzern auf Basis der Schweizer Klimaszenarien CH2018 (MeteoSchweiz 2022d)

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. Zwischen vorindustrieller Zeit und Referenzperiode ist die Temperatur im Kanton Luzern bereits um rund 1.5 °C gestiegen.

Im Vergleich des „Klimaschutz-Szenarios“ RCP 2.6 und dem „Weiter-wie-bisher“-Szenario RCP 8.5 wird die gesamte Spannbreite des prognostizierten Klimawandels im Kanton Luzern deutlich. Da sich jedes Szenario aus den Ergebnissen verschiedener Klimamodelle zusammensetzt, ist jeweils ein Möglickeitsbereich (siehe blaue 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 2.6 (+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 2,6 °C gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 aus, während die Temperaturerhöhung im RCP 2.6 lediglich +1,3 °C beträgt. Gegen Ende des Jahrhunderts (Periode 2085) gehen die Aussagen beider RCP's noch weiter auseinander mit +1,2 °C (RCP 2.6) 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 6,6 °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 Luzern kam das Stadtklimamodell FITNAH-3D zum Einsatz. Mesoskalige 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 Ausgleichsmassnahmen 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.

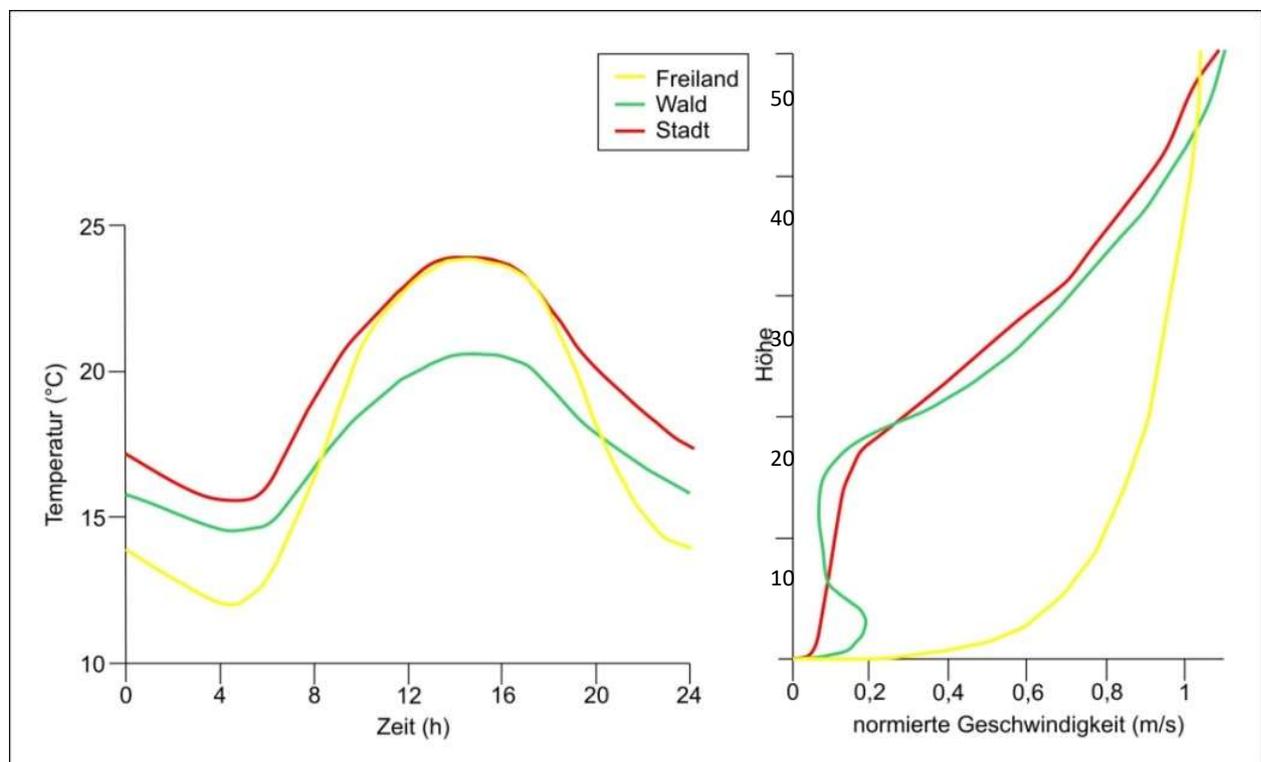


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (eigene Darstellung nach Gross 1992)



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 (Wärmeinseleffekt). 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 (in Luzern etwa jede dritte bis vierte Sommernacht, vgl. Kap. 2.2.2)

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.

Als weitere Randbedingung wurde die Modell-Starttemperatur für den Zeitpunkt 21 Uhr vorgegeben, um ein realistisches Temperaturniveau im Kanton Luzern zu simulieren. Dazu wurden unterschiedliche MeteoSchweiz-Stationsdaten ausgewertet (Abbildung 9). Die Daten lagen grösstenteils für mehrere Dekaden, meist 30 Jahres Messreihen vor. Die Tabelle 1 zeigt das Ergebnis dieser Auswertung.

Tabelle 1: Auswertung der 21 Uhr Temperaturen für die Sommermonate sowie von Kenntagen. Quelle: Eigene Auswertungen beruhend auf MeteoSchweiz-Stationsdaten

Stations ID	Stationskürzel	Name	Mittlere Temperatur der Sommermonate Juni bis August um 21 Uhr	Mittlere 21 Uhr-Temperatur der Sommertage	Mittlere 21 Uhr-Temperatur der Hitzetage	Höhe der Stationen in m ü. M.
162	CHZ	Cham	17,8	20,8	23,3	442
854	EGO	Egolzwil	17,0	20,1	22,5	522
711	FLU	Flühli	13,8	19,2	22,7	940
952	GES	Gersau	17,3	22,1	25,5	521
915	GIH	Giswil	18,8	20,6	21,9	471
68	LUZ	Luzern	18,7	20,1	22,6	454
842	MOA	Mosen	18,6	19,7	20,6	453
43	PIL	Pilatus	8,9	19,9	-	2105
859	SPF	Schüpfheim	16,3	18,3	20,7	744

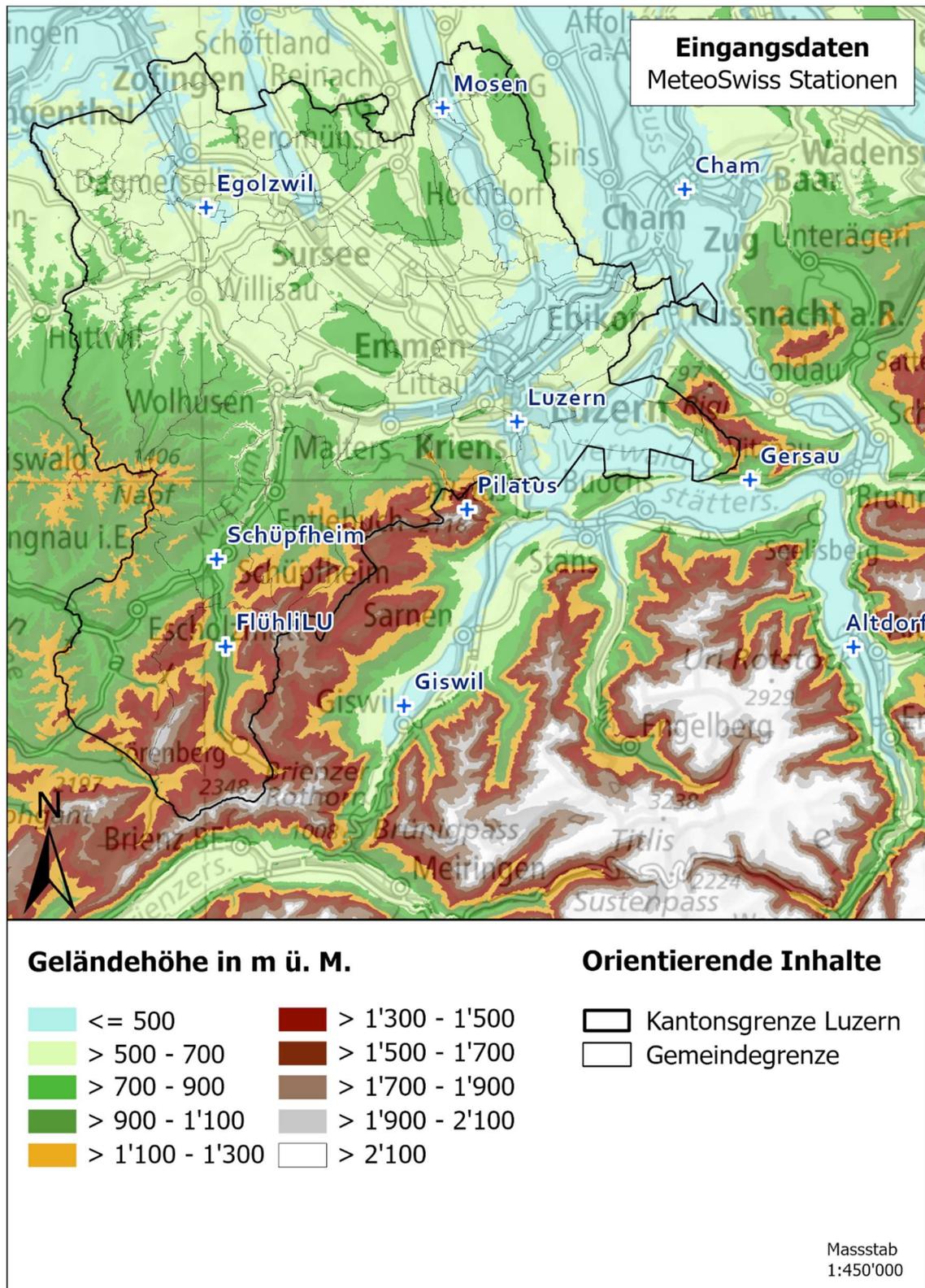


Abbildung 9: Lage der MeteoSchweiz-Stationen im Kanton Luzern und der näheren Umgebung

Je nach Höhengniveau weisen die Messstellen unterschiedliche Niveaus auf, v.a. die Messstelle Pilatus auf 2105 m Höhe ist mit einer mittleren 21 Uhr Temperatur in den Sommermonaten mit 8,9 °C sehr kühl. Auch die Station Flühl, welche auf 940 m liegt, hat deutliche Abweichung zu den anderen Stationen, die



sich in Höhenlagen von 442 m bis 522 m einordnen. Diese Stationen haben ein recht ähnliches Temperaturniveau von 17 bis 18,8 °C. Werden die Messdaten auf die Sommertage eingeschränkt, was bedeutet, dass die Maximaltemperatur am Tag 25 °C überschreitet, wird ersichtlich, dass sich die mittlere Temperatur für den Zeitpunkt 21 Uhr erhöht. Einen sehr deutlichen Sprung weisen die Messstationen Flühli und Pilatus auf, wobei hier die Sommertage eher die Ausnahmen sind und die Messdaten nur auf wenigen Datensätzen beruhen. Das ist auch an dem Fehlwert für die Hitzetage (Maximaltemperatur am Tag über 30 °C) für die Station Pilatus sichtbar. Die mittleren 21 Uhr Temperaturen für die Hitzetage liegen noch einmal deutlich über dem Niveau der Sommertage, so dass in Abstimmung mit dem Auftraggeber, für die Modellrechnung ein Sommertag zugrunde gelegt wurde. Das Modell wurde mit der 21 Uhr Temperatur der Station Luzern mit 20,1 °C für das Höhenniveau 454 m initialisiert.

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 bzw. teilweise online zugänglich waren:

- Geländehöhe
 - ↳ Digitales Terrainmodell in 0,25 m Auflösung (2018)
- Landnutzung
 - ↳ RGBI-Luftbilder⁸ in 1 m Auflösung (2020)
 - ↳ AV Bodenbedeckung (2021)
 - ↳ AV Bodenbedeckung projiziert (2021)
- Strukturhöhe
 - ↳ Digitales Oberflächenmodell in 0,25 m Auflösung (2018)
 - ↳ Gebäudemodelle (2021)
 - ↳ Vegetationshöhe Wald (2018) in 0,25 m Auflösung (2018)
 - ↳ Einzelbäume (2018)
 - ↳ Lärmschutzwände (2021)
- Wassertemperatur
 - ↳ Messdaten der Abteilung Umwelt und Energie (2010-2021)
 - ↳ Messdaten vom Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs (1981-2021)
 - ↳ Messdaten des Bundesamtes für Umwelt (2021)

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Kantonsgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Situation Luzerns wird demnach aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens 2018 aufweisen. Aufgrund der Notwendigkeit der Kombination von verschiedenen Geodaten ist es jedoch nicht möglich, ein feststehendes Jahr als „Ist-Zustand“ anzunehmen. Die meisten Datengrundlagen stammen jedoch mindestens aus dem Jahr 2018 und waren zum Zeitpunkt der Eingangsdatenaufbereitung (Ende 2021) demnach sehr aktuell. Alle Eingangsdaten wurden zudem hinsichtlich ihrer Plausibilität mittels Orthophoto abgeglichen und auch vom Auftraggeber gegengeprüft.

Um die klimatischen Prozesse grenzübergreifend zu erfassen (insb. bezogen auf den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet über die Kantonsgrenze hinaus. Ausserhalb des Luzerner Kantonsgebiets wurde dabei auf frei verfügbare Daten zurückgegriffen. Hauptsächlich wurden die Bodenbedeckungs-Layer der

⁸ 4-Kanal Multispektralbilder mit der Kanalbelegung RGBI (Rot-Grün-Blau-Nahes Infrarot)



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 Luzern sind die Eingangsdaten weniger detailgetreu aufbereitet, aber grundsätzlich ausreichend, um das Prozessgeschehen zwischen dem Kanton und seinen Nachbarorten hinreichend genau zu erfassen. Der Kanton Luzern erstreckt sich bei einer Ausdehnung von ca. bis zu 52 km in Ost-West- bzw. 58 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von etwa 1'494 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von etwa 4'522 km² auf (60,2 km x 75,1 km). Da die sich hieraus resultierende Anzahl an Pixel die Kapazität der FITNAH-3D-Modellierung übersteigt, wurde das Untersuchungsgebiet in 11 Kacheln unterteilt, die sich jeweils horizontal als auch vertikal zu 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 10). Im Luzerner Kantonsgebiet treten Höhenunterschiede von mehr als 1'946 Metern auf. Der niedrigsten Punkt mit etwa 399 m ü. M. liegt bei Gemeinde Honau an der Grenze zu Kanton Zug. Der Briener Rothorn in den Emmentaler Alpen südlich von Kanton Luzern stellt mit 2'345 m ü. M. den höchsten Punkt dar.

Die Landnutzung im Kanton Luzern wird über 11 verschiedene Nutzungsklassen definiert, welche jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen (Abbildung 11) Diese wurden überwiegend über die Polygone des übermittelten Bodenbedeckungs-Datensatzes abgeleitet. Bei der vorliegenden Rasterzellenbreite von 10 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungsklassifizierung aufzulösen. Bei den Bäumen bzw. hoher Vegetation über 3,5 m werden zwei verschiedene Untergründe unterschieden. So werden Bäume über Versiegelung (z.B. Strassenbäume) und Bäume über Rasen (z.B. Bäume in Parks) ausdifferenziert. Baumstandorte im Kanton Luzern wurden über das Vegetationshöhenraster und die Einzelbaum-Datei ermittelt. Während das Vegetationshöhenraster lediglich in die passende 10 m-Auflösung überführt wurde, mussten die Punkt-Shape-Dateien der Einzelbäume, welche nicht im Vegetationshöhenraster abgebildet waren (z.B. Stadtbäume), mit dem berechneten Radius des Kronendurchmessers gepuffert werden, um die entsprechenden Bäume im 10 m-Raster korrekt darzustellen. Die zugehörigen Baumhöhen waren in den Attributen angegeben.

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), Daten der Abteilung Umwelt und Energie (UWE) und dem Bundesamt für Strassen (ASTRA) ermittelt. Lärmschutzwände ab einer Höhe von 2 m wurden als Modelleingangsdaten übernommen. Zusammen mit den Gebäude- und Vegetationshöhen konnten so Strukturhöhen (relative Höhe über dem Gelände) für jeden Pixel ermittelt werden.

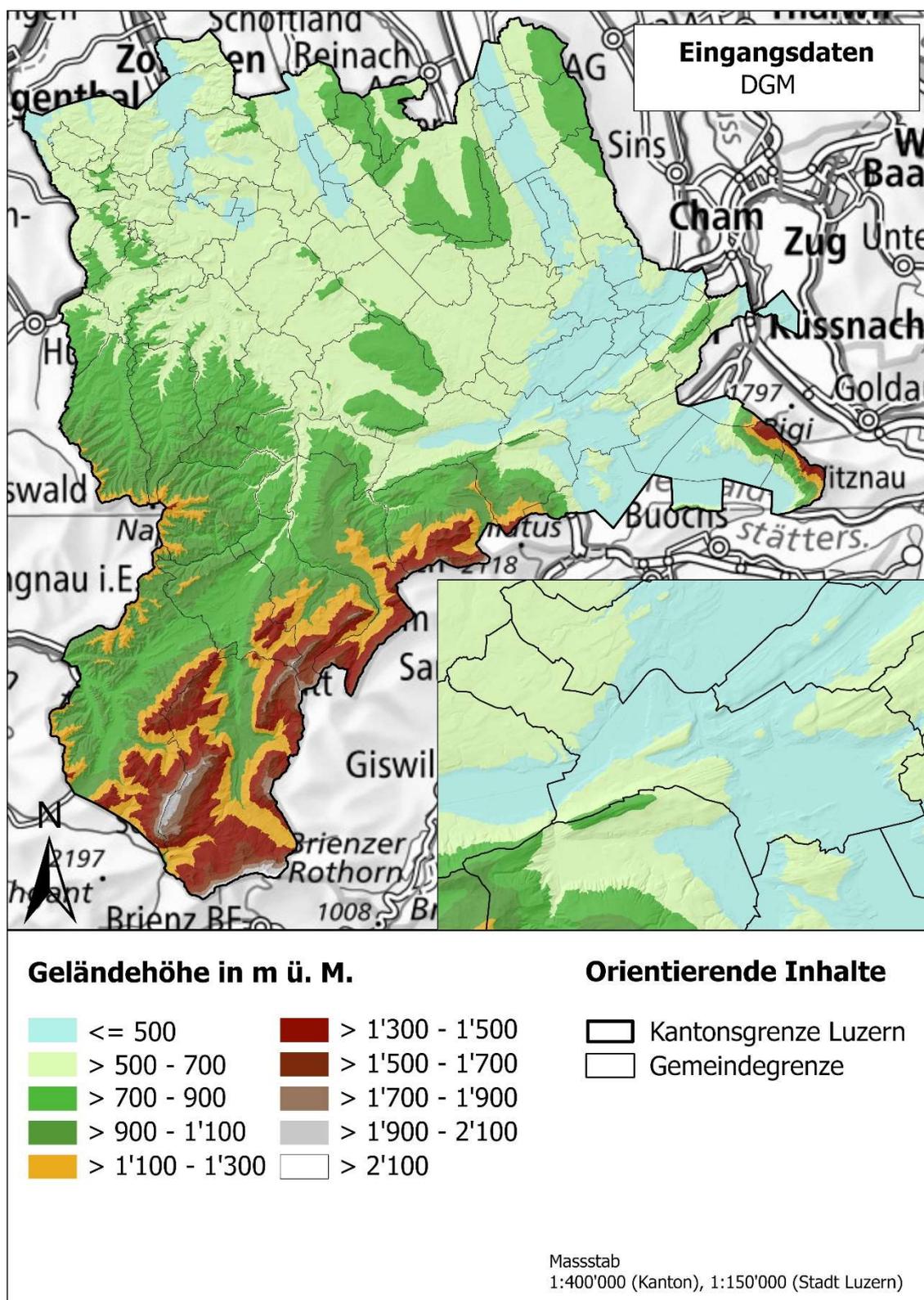


Abbildung 10: Geländehöhen im Kanton Luzern

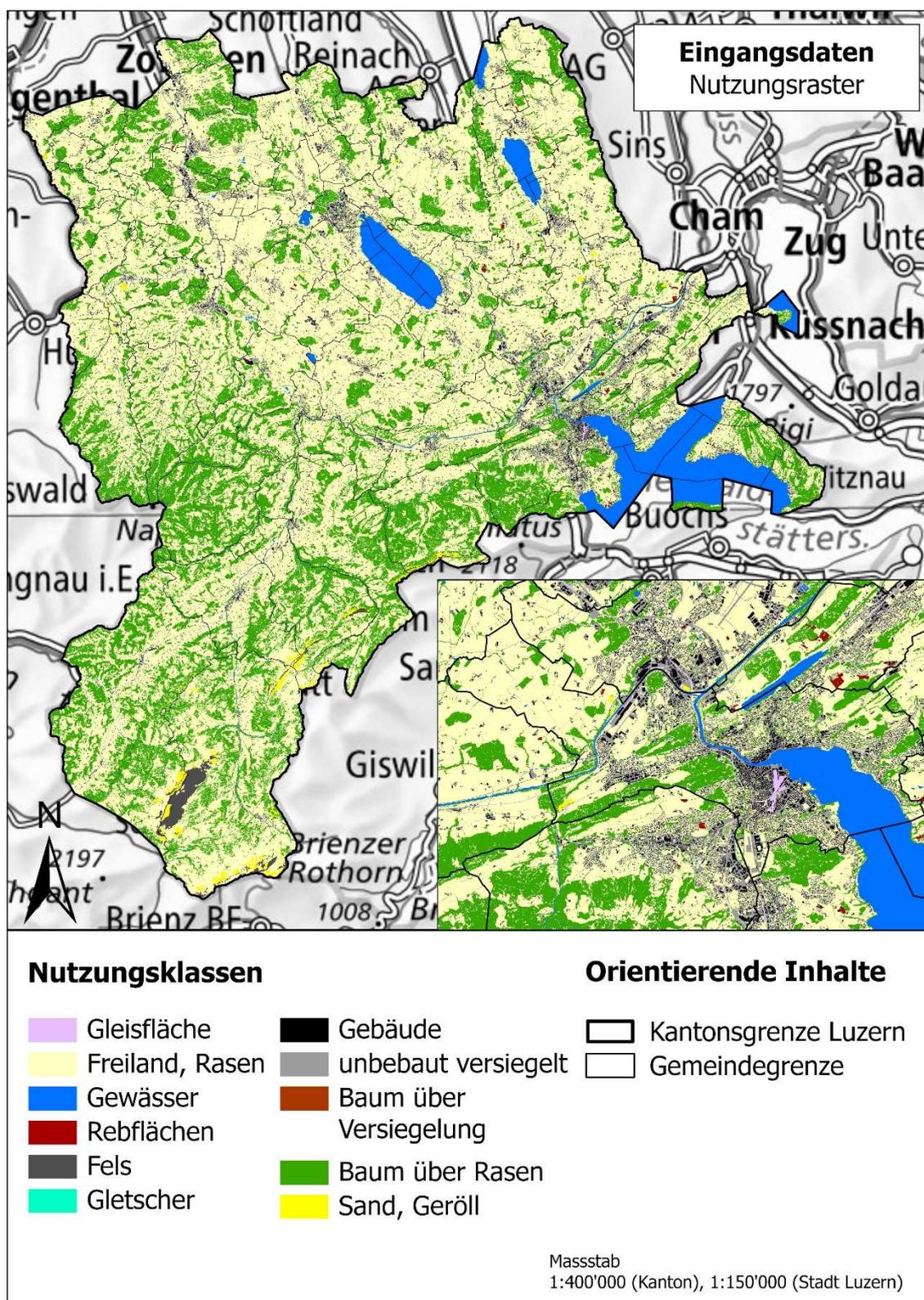


Abbildung 11: Landnutzung im Kanton Luzern

Neben einer individuellen bodennahen Lufttemperatur ist FITNAH-3D auch in der Lage, räumlich und tageszeitlich flexible Oberflächentemperaturen von offenen Wasserflächen zu berücksichtigen. Für die Ableitung der Wassertemperaturen wurden verschiedene Quellen genutzt. Es standen Messdaten der Ab-



teilung Umwelt und Energie (UWE) sowie der Eawag (Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs) zur Verfügung⁹. Grössere Seen ohne Messdaten wie bspw. der Hallwiler See wurden in Absprache mit dem Auftraggeber auf 20°C gesetzt.

Die Wassertemperaturen der Fließgewässer wurden aus Messstellen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) ermittelt¹⁰. Da jedoch nicht alle Fließgewässer und Seen durch einen Pegel und damit Messwerte repräsentiert werden, wurde ein höhenabhängiger Temperaturgradient für die Wassertemperatur aus allen übermittelten Pegeldata ermittelt, und dieser Zusammenhang übertragen. Auch kleinere Seen erhielten durch die Regressionsgleichung einen Temperaturwert. In Abbildung 12 ist das Ergebnis dieser Auswertung in Form einer linearen Regressionsgleichung sichtbar. Je 100 m Höhe nimmt die Wassertemperatur um 0,018 °C ab. In der Abbildung 13 sind die für die Modellierung angenommen Gewässertemperaturen für den Kanton Luzern zusammengetragen.

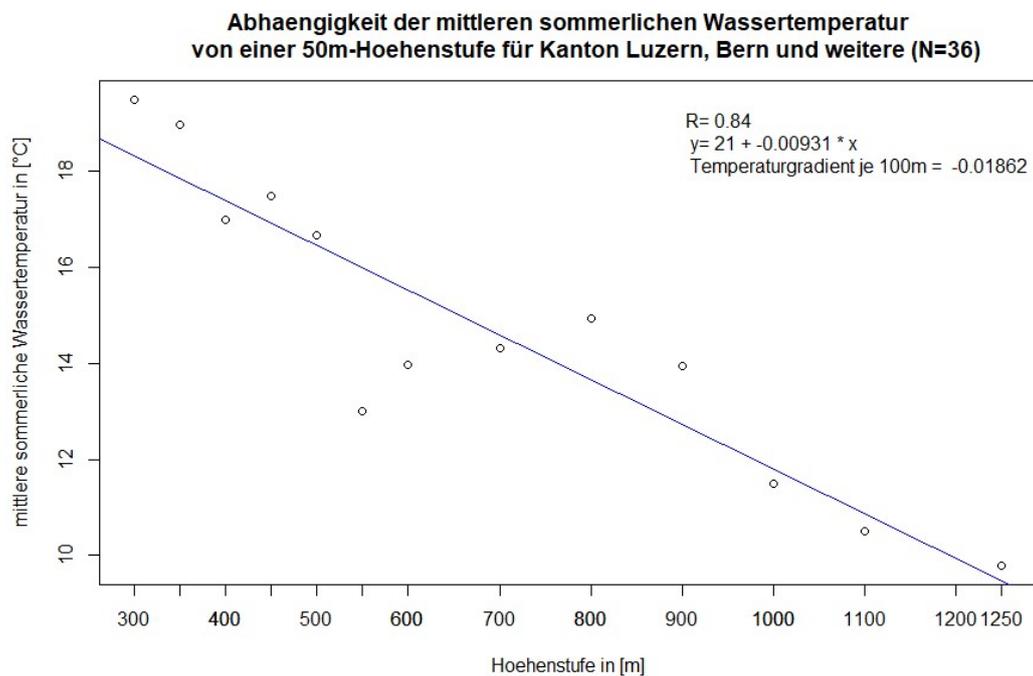


Abbildung 12: Ermittelte höhenabhängige Wassertemperatur. Quelle: Eigene Auswertung

⁹ Dies waren: Sempachersee, Baldeggersee, Rotsee, Obermatt, Seeburg, Tutensee, Soppensee, Mauensee

¹⁰ Folgende Flüsse waren mit Messdaten abgedeckt: Suhre, Reuss, Sellenbodenbach, Kleine Emme, Meienbach, Ron, Rotbach, Waldemme, Kleine Emme, grosse Entlen, Luthern, Würzenbach, Seewag, Dünnern, Reuss, Limmat, Aare, Biber, Grossbach, Ingenbühl, Lütschine, Gürbe, Sense, Allenbach, Sperbelgraben, Suze, Langeten, Saane, Worble

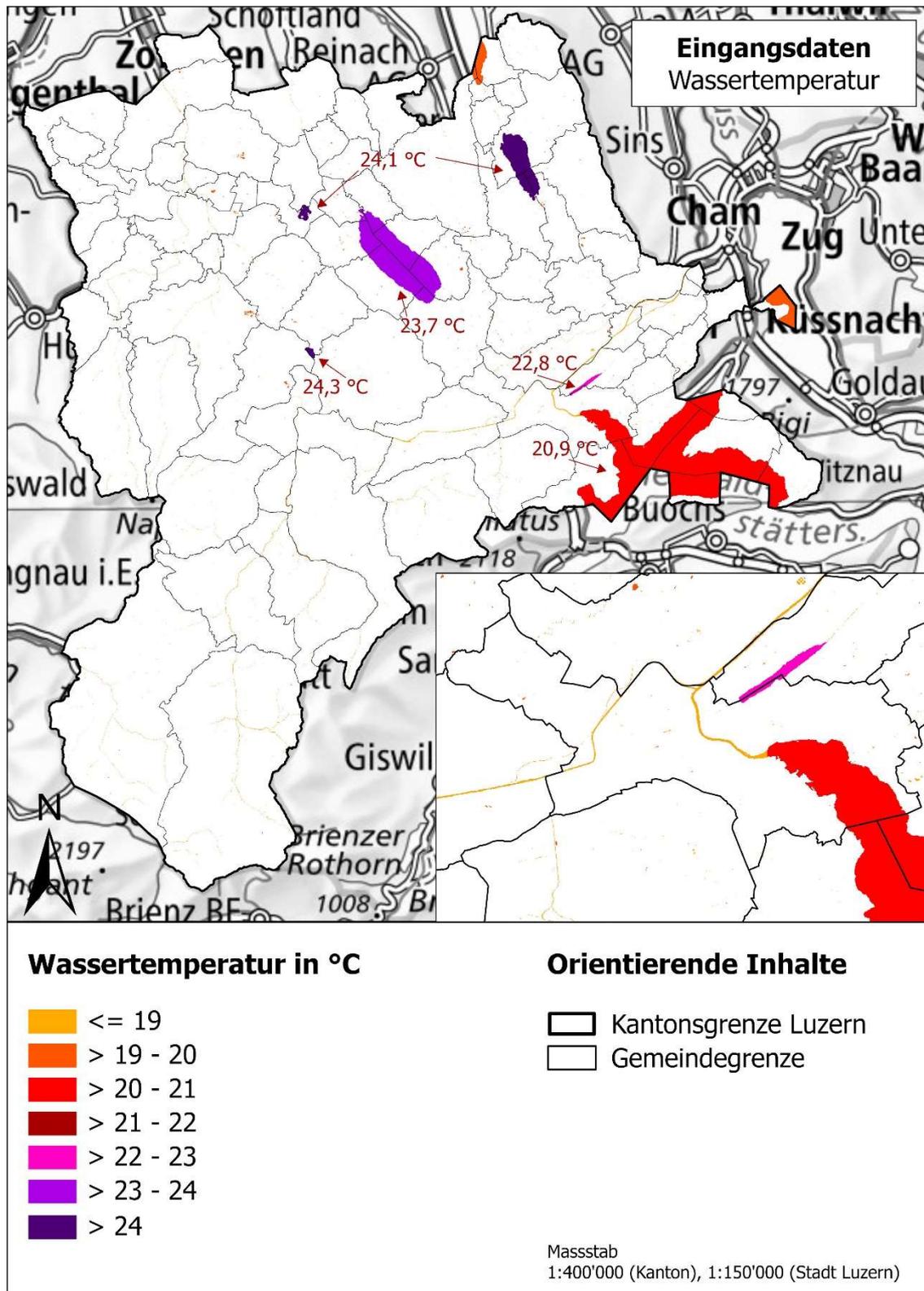


Abbildung 13: Sommerliche Wassertemperaturen im Kanton Luzern

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.



gen (Schritt 1 und Schritt 2 in Abbildung 14). 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 Nutzungsplanung verschnitten mit dem AV-Bodenbedeckungs-Datensatz, welche auf der Basis von weiteren Datenquellen noch einmal überarbeitet wurde. Die rasterbasierten Modellergebnisse werden nun auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4 in Abbildung 14).

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).

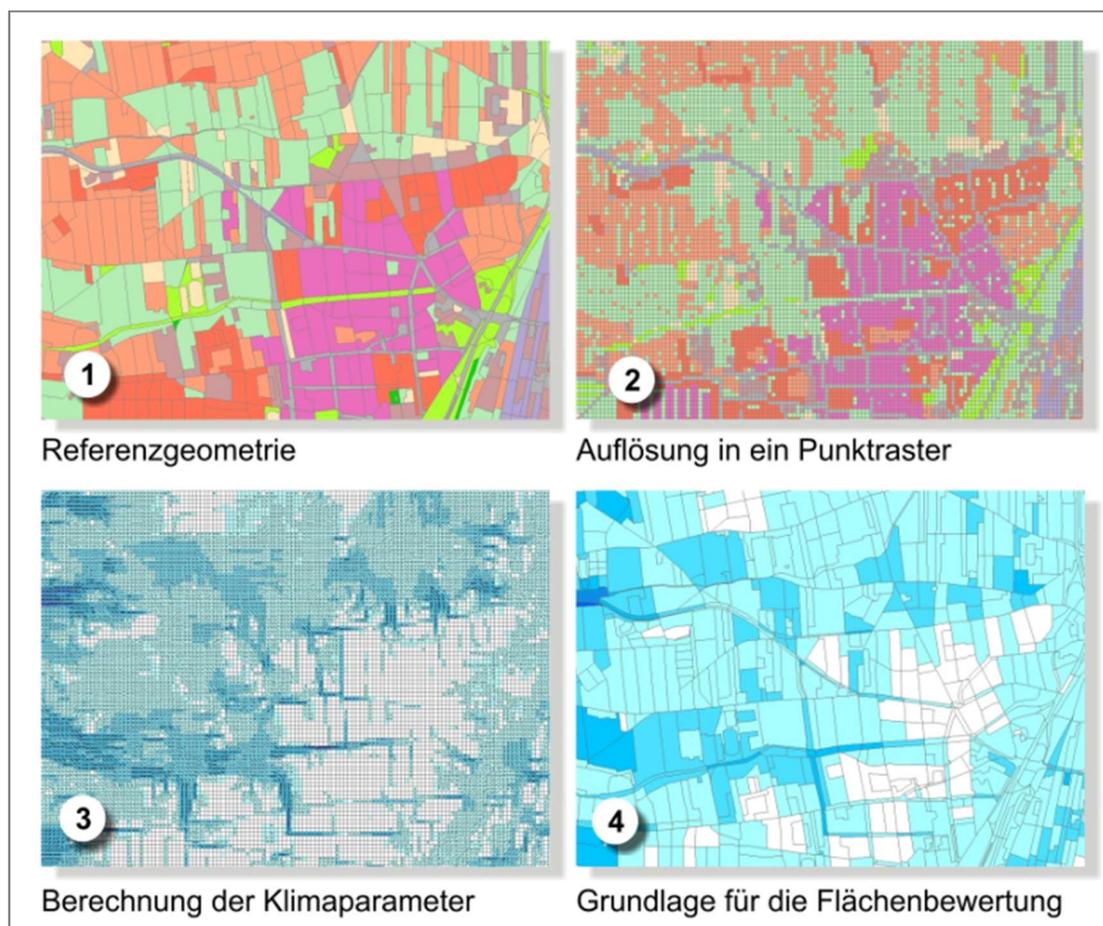


Abbildung 14: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation



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, dass noch bis Ende 2022 mit BMBF¹¹-Fördermitteln zu einem marktreifen Produkt reifen soll und 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

¹¹ Bundesministerium für Bildung und Forschung



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 2-3 Jahre in der Vergangenheit liegen. Diese Prämisse ist für die vorliegende Analyse weitestgehend erfüllt. Widersprüchliche und veraltete Daten konnten zudem anhand des Abgleichs mit dem Orthophoto zum Teil korrigiert bzw. aktualisiert werden; sie sind trotz Plausibilitätsprüfung jedoch nicht komplett auszuschliessen. 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 m² repräsentiert. Hierbei handelt es sich um die höchste Auflösung, die gegenwärtig für Kantone in der Grössenordnung Luzerns 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) beschrieben. Zusätzlich fasst die Klimaanalysekarte 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 Luzern mit seinen verschiedenen Flächennutzungen und Höhenstufen deutlich wird. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei Minimalwerten von etwa 4,4 °C in den Gipfelbereichen (Brienzer Rothorn, Hengst) und Maximalwerten bis zu 25,3 °C auf den grösseren Seen (Sempacher See, Baldeggersee, Vierwaldstättersee) eine Spannweite von 20,9 °C. Die mittlere Temperatur des gesamten Kantons liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei etwa 16 °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 Luzern noch Temperaturen über 20 °C erreicht (Abbildung 15). Mit steigender Entfernung zum Stadtzentrum bzw. den Ortskernen nimmt die Überwärmung ab. In den aufgelockerten, besiedelten Randbereichen der Stadt Luzern liegt die Temperatur im Bereich von 16 - 20 °C (z.B. Bramberg St. Karli, Bernstrasse). Die niedrigsten Siedlungstemperaturen werden auf Höhen von über 1100 m ü. M. in der Gemeinde Flüfli (insbesondere im Ortsteil Sörenberg) mit Werten von unter 12 °C erreicht.

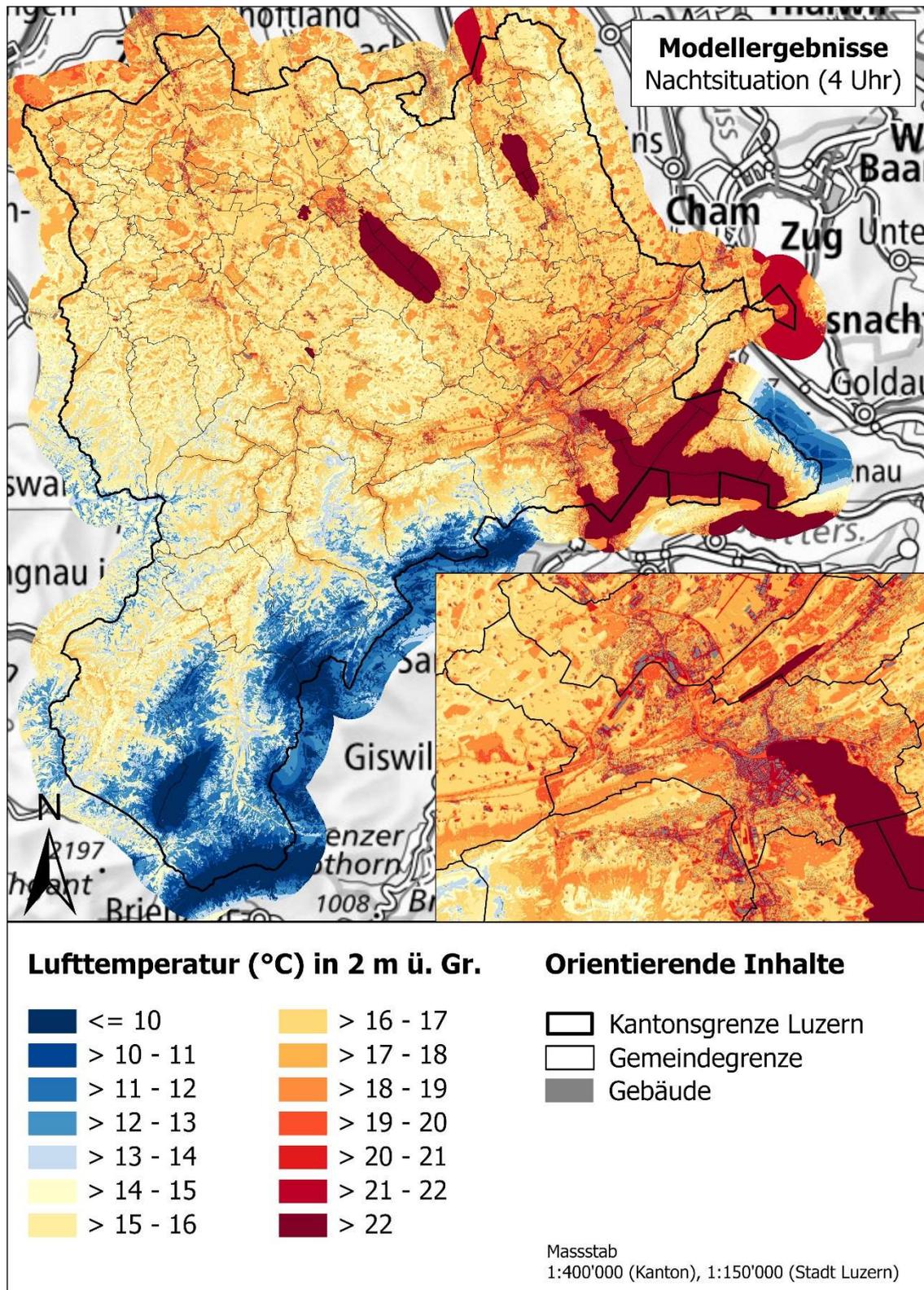


Abbildung 15: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld im Kanton Luzern

Unter den Grün- und Freiflächen zählen die Bergregionen zu den kältesten Bereichen des Kantons. So verfügt die Gemeinde Flühli mit dem Gebiet um Hengst und Briener Rothorn auch über die kühlfsten Ausgleichsräume. Neben der Höhenlage spielt jedoch auch die Art der Grün- und Freifläche eine Rolle. Dies kann am Beispiel der Stadt Luzern verdeutlicht werden: In Bodennähe kühlen sich am stärksten die



Acker- und Rasenflächen ab, welche ein Temperaturniveau von 15 - 17 °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 17 °C, wenn sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind (z.B. Stadion auf Tribschen, Ufschöttli Luzern). In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. Werte um 18 - 20 °C erreicht werden (z.B. Gütschwald). Nachts fällt daher die Kaltluftproduktion geringer aus als über unversiegelten Freiflächen, jedoch nehmen grössere Waldgebiete eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht.

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 m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fliesst (Abbildung 16).

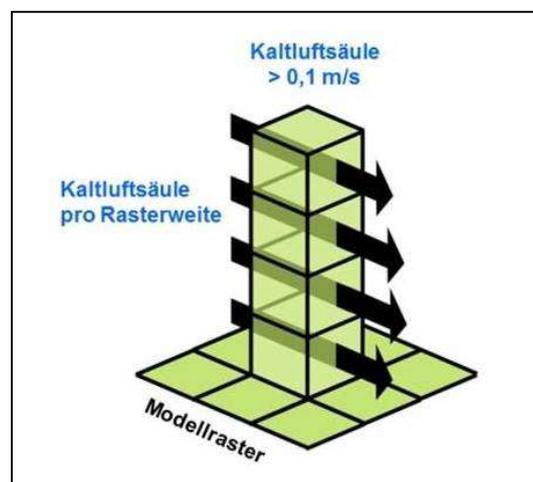


Abbildung 16: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom



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 luvseitig¹² markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von grösseren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee¹³ 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 $161,6 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ (Abbildung 17). Die höchsten Kaltluftvolumenströme werden in der Regel auf Acker-, Rasen- und Freiflächen in Hanglage erreicht. Dagegen sind die geringsten Kaltluftvolumenströme in dicht bebauten Gebieten, Wäldern und Talebenen zu finden. Der Mittelwert im Kanton Luzern liegt bei $29,5 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$.

Hervorzuheben ist, dass sich die meisten Siedlungen in Tallage befinden und die Kaltluft aus den umliegenden Höhenzügen nachts in Richtung der Ortschaften fliesst. Zusätzlich 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. Grünareal um den Wettsteinpark, Roterwald, Zimmereggewald, Gütschwald). 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.

Abbildung 18 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie Windrichtung (Pfeilsignatur in 500 m Auflösung¹⁴) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Eine potentielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m/s}$ angenommen.

¹² dem Wind zugewandte Seite

¹³ dem Wind abgewandte Seite

¹⁴ Die Pfeile wurden in einer geringeren räumlichen Auflösung abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.

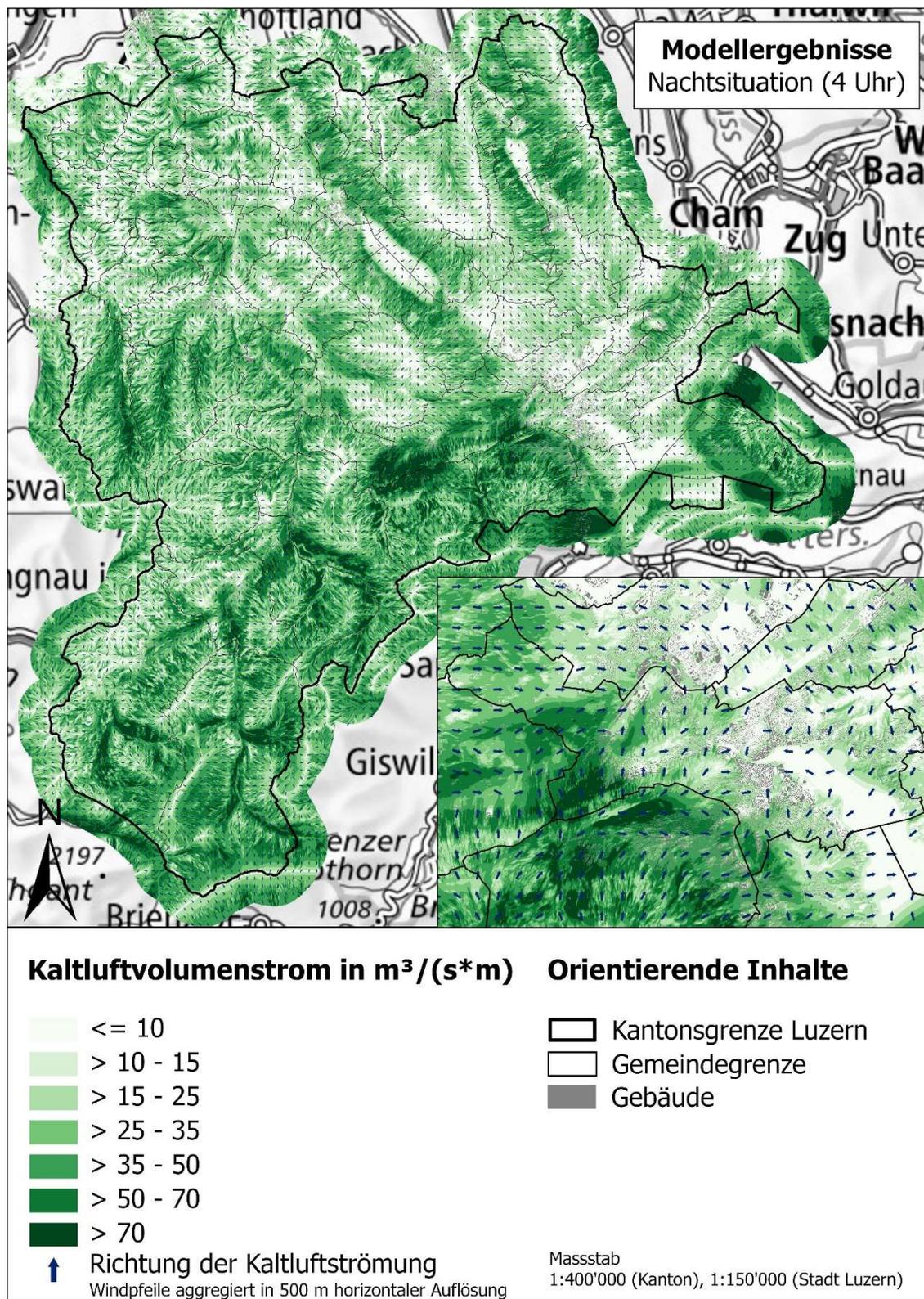


Abbildung 17: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Kanton Luzern inkl. Windfeld in 500 m horizontaler Auflösung.

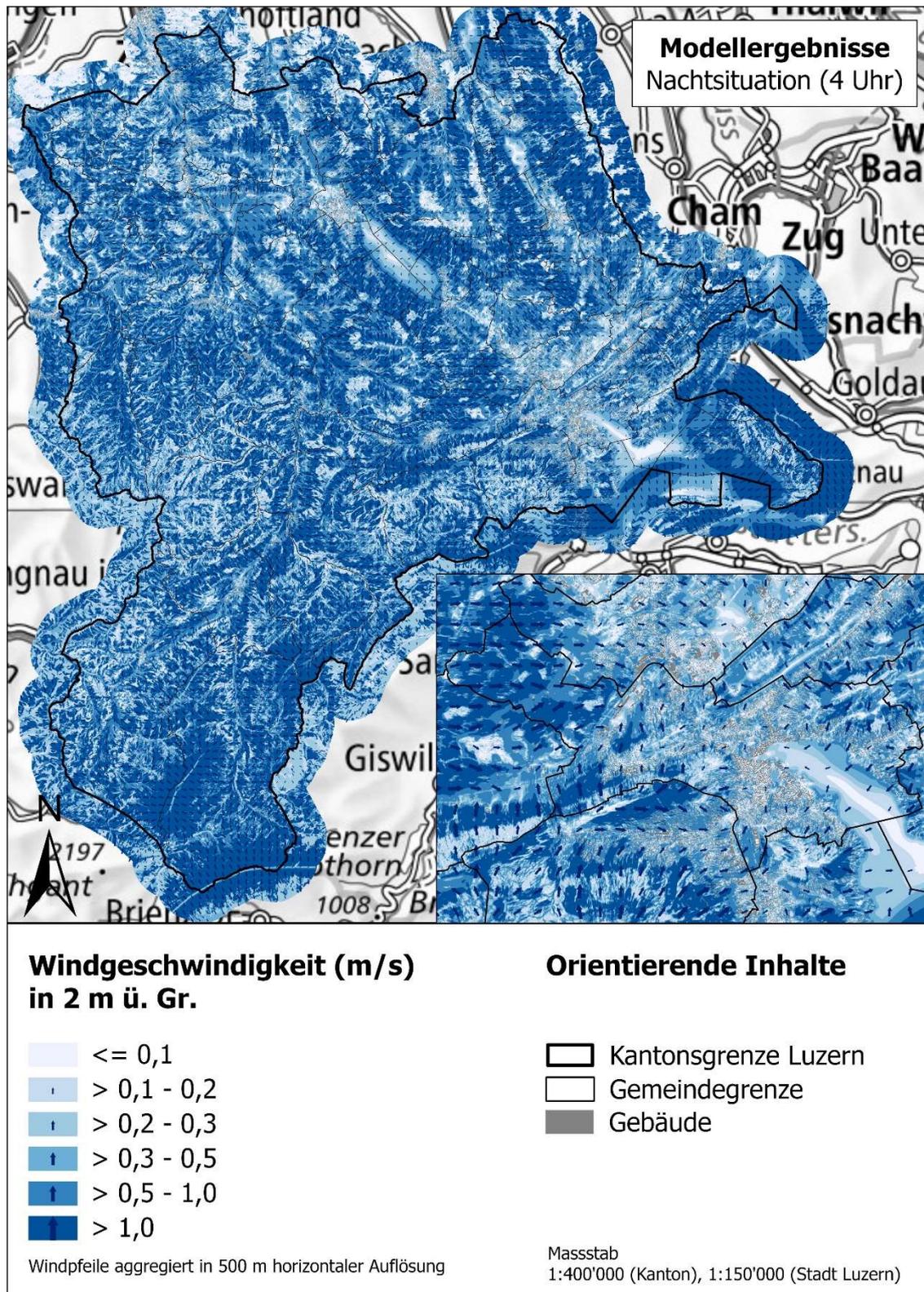


Abbildung 18: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Kanton **Luzern** inkl. Windfeld in 500 m Auflösung.

Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfeldes folgt grösstenteils dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. Im Kanton Luzern werden mit 3,3 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 Luzerner 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.

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 (Wärmeinseleffekt), 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 Legendeninhalten.

In der Klimaanalysekarte (Abbildung 19) sind für die Grün- und Freiflächen die Modellergebnisse des Kaltluftvolumenstroms in abgestufter Flächenfarbe dargestellt. Der **Wärmeinseleffekt** stellt die nächtliche Überwärmung der Siedlungs- und Verkehrsflächen gegenüber den Grün- und Freiflächen dar¹⁵. Vorteil des Wärmeinseleffekts ist die Lossagung von absoluten Temperaturen, welche nur für die betrachtete Wetterlage repräsentativ sind. Treten heissere Tage auf, gelten nach wie vor die relativen Unterschiede im Temperaturgefüge, sodass sich auch für diese Situation aus dem Wärmeinseleffekt so genannte Hotspots der Wärme erkennen lassen. Zur Berücksichtigung der individuellen Höhenlage der Grün- und Freiflächen und der mit der Höhe abnehmenden Lufttemperatur wurde für den Kanton Luzern nicht die mittlere Grünflächentemperatur des gesamten Kantons als Bezug genommen, sondern je nach Höhengniveau ein Mittel gebildet und dieses dann als Referenz für Siedlungsflächen in entsprechender Höhenlage verwendet (**höhenabhängiger Wärmeinseleffekt**; Tabelle 2).

Tabelle 2: Referenzwerte der Grün- und Freiflächen zur Berechnung des höhenabhängigen Wärmeinseleffekts

Höhenstufe (m ü. M)	Mittlere Temperatur (°C) der Grün- und Freiflächen
> 250 bis 500	17,2
> 500 bis 750	16,4
> 750 bis 1000	15,5
> 1000 bis 1250	14,2
> 1250 bis 1500	12,2
> 1500 bis 1750	10,5
> 1750 bis 2000	8,2
> 2000 bis 2348	7,7

¹⁵ Berechnung: Wärmeinseleffekt = Lufttemperatur (Siedlung) - Mittlere Temperatur der Grün- und Freiflächen

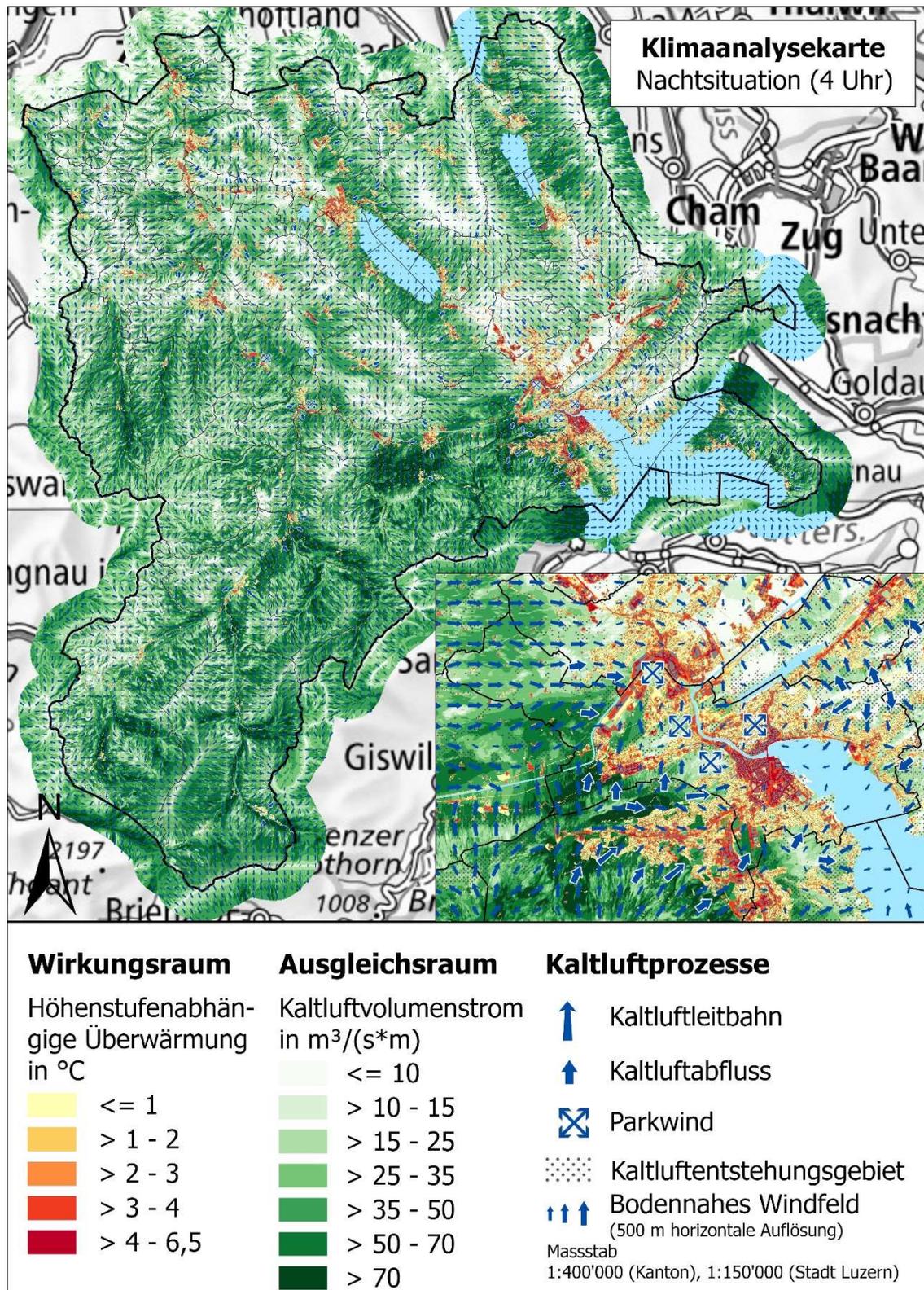


Abbildung 19: Klimaanalysekarte Kanton Luzern (verkürzte Legende).

Die Temperaturen und somit auch das Ausmass des Wärmeineffekts im Kanton Luzern befinden sich in einem zu erwartenden Niveau für Siedlungen entsprechender Grösse in der jeweiligen topographischen Umgebung. Die geringste Überwärmung der Siedlungs- und Verkehrsflächen gegenüber den Grünflächen des Kantons Luzern ist selbsterklärend in den direkten Randlagen der Siedlungen zu finden. Die grösste



zusammenhängende Wärmeinsel bildet das Stadtzentrum von Luzern mit einem Wärmeinseleffekt von meist über 4 °C.

Weiterhin ist in der Klimaanalysekarte 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 Luzern eine wichtige Rolle spielen. Dazu zählen Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüsse und Parkwinde (Kaltlufttransportbereiche) sowie Kaltluftentstehungsgebiete (Bereiche mit hoher Kaltluftbildung).

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 Luzern gibt es insgesamt acht verschiedene Kaltluftleitbahnen, welche effektiv vom Umland Kaltluft in die Siedlung transportieren. Dazu zählen der Bereich um das Schlössli Utenberg (Luzern), der Gigelwald mitsamt seiner westlich angrenzenden Ackerflächen (Luzern/Kriens), das Grünareal um das Schloss Schauensee (Kriens), der Bereich Sackweidstrasse/Hackenrainhöhe in der Nähe des Hubelbachs (Kriens), das Umfeld des Kasernengeländes (Emmen), der Grünzug am Stägbach (Hohenrain) sowie die Kaltluftleitbahnen in der Feldstrasse (Reiden) und Gross-Brunegg (Willisau). Alle acht 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 Luzern 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 insgesamt 137 relevante Kaltluftabflussbereiche identifiziert.

Im Kanton Luzern 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 unbauten Grünfläche, treten auf grösseren Grünflächen auf, die in eine deutlich wärmere Umgebung eingebettet sind. Da die Parkwinde im Vergleich zu Kaltluft-



abflüssen 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 sieben verschiedene Bereiche mit Parkwindsystemen identifiziert werden: Roterwald, Zimmereggewald, Gütschwald, das Grünareal um den Wettsteinpark (Luzern), Fluh (Wolhusen), Allmendweg (Menzna) und Unterwellberg (Schötz). 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 $41,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ 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.).

4.2 TAGSITUATION

4.2.1 LUFTTEMPERATUR AM TAG

Analog zur Lufttemperatur in der Nacht (vgl. Kap. 4.1.1) wird im Folgenden die Lufttemperatur um 14 Uhr im Kanton Luzern (Abbildung 20) näher betrachtet. Während zum Zeitpunkt 14 Uhr die vom Menschen empfundene Wärmebelastung maximal ist (intensive solare Einstrahlung in Kombination mit relativ hohen Lufttemperaturen; siehe auch Kap. 4.2.2), erreicht die Lufttemperatur ihre Maximalwerte in der Regel erst am späteren Nachmittag oder – je nach meteorologischen Bedingungen – in den frühen Abendstunden.

Im Kanton Luzern umfasst die modellierte Lufttemperatur um 14 Uhr bei Minimalwerten von etwa $16,1 \text{ }^\circ\text{C}$ in den zum Teil bewaldeten Hochlagen (u.a. Beichle, Fürstein) und Maximalwerten bis zu $38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ in den Kiesgruben der Gemeinden Eschenbach, Ballwil und Inwil eine Spannweite von $22,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Die mittlere Temperatur des gesamten Kantons liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei etwa $27,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Wie bereits in der Nachtsituation treten auch am Tag die besiedelten Gebiete als Hitzeeinseln deutlich hervor. So werden in den tiefer gelegenen, grösseren Städten und Gemeinden des Kantons Lufttemperaturen von meist über $34 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht. Der Wärmeinseleffekt (vgl. Kap. 4.1.3) in den Siedlungen ist in der Nacht jedoch stärker ausgeprägt als am Tag. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass sich die umliegenden Grün- und Freiflächen mit niedrigem Bewuchs (insbesondere Ackerflächen) tagsüber stärker aufheizen und nahezu ein ähnlich hohes Temperaturniveau erreichen wie versiegelte Flächen. Wälder und Wasserflächen, welche in der Nacht vergleichsweise warm ausfallen, treten am Tag als kühle Bereiche hervor. So beträgt die Lufttemperatur über dem Vierwaldstättersee tagsüber etwa $22\text{-}23 \text{ }^\circ\text{C}$ und im Bireggwald etwa $24\text{-}26 \text{ }^\circ\text{C}$.

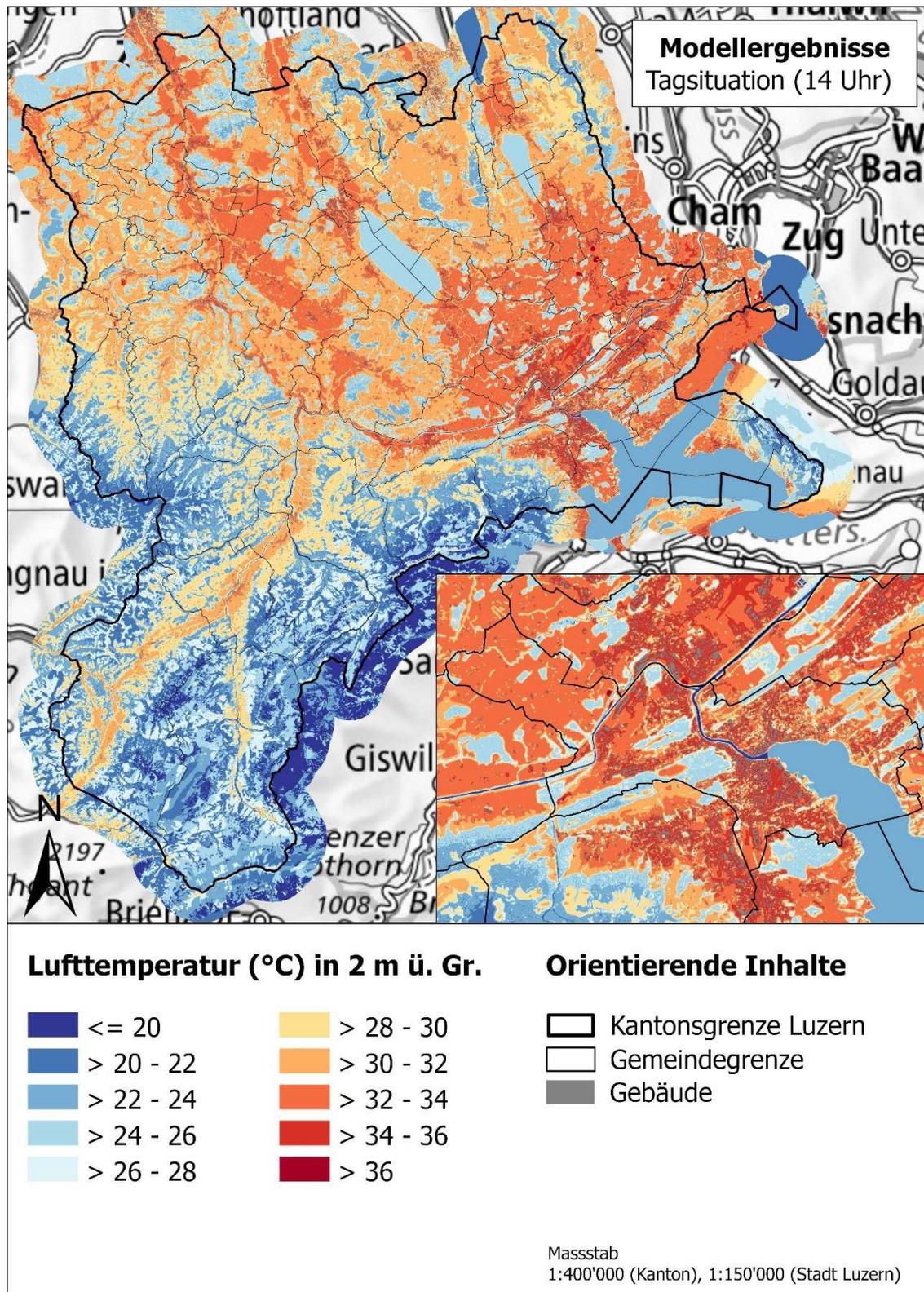


Abbildung 20: Lufttemperatur am Tag (14 Uhr) im Kanton Luzern

4.2.2 PET AM TAG

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 und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen¹⁶.

In dem vorliegenden Bericht wird zur Bewertung der Tagsituation neben der Lufttemperatur der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; Matzarakis & Mayer 1996). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit besser nachvollzogen werden zu können¹⁷. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass 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 Tageinsatzbar. 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).

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

Die PET wird tagsüber vor allem durch die Verschattung beeinflusst, wobei im Kanton Luzern 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. Gemeinde Flüfli). Zudem können tagsüber an steilen Hängen stärkere Talwinde auftreten, die eine Reduktion der PET bewirken.

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET mit einer Spannbreite von 36,2 °C grössere Unterschiede im Kanton auf und reicht von 11,9 - 48,1 °C (Abbildung 21). 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. Bireggwald in Horw, Sonnebergwald in Kriens/Luzern,

¹⁶ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).

¹⁷ Beispiele für weitere Kenngrössen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).



Surseerwald in Sursee). Auch unter grösseren Baumgruppen (z.B. Vögeligärtli und Inseli Park in Luzern) 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 des Vierwaldstättersees etwa 26 - 33 °C (bei einer angenommenen Wassertemperatur von 20,9 °C).

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, zu finden (mehr als 41 °C PET; *extreme Wärmebelastung*). 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. Bellpark und Amlehngarten in Kriens), Friedhöfe (z.B. Friedhof Gerliswil in Emmen) sowie grüne Uferbereiche (z.B. Uffschöttli Luzern) und Freibäder (z.B. Mooshüsli Usi Badi in Emmen, Waldschwimmbad Zimmeregg in Luzern) mit ihrer vergleichsweise geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar.

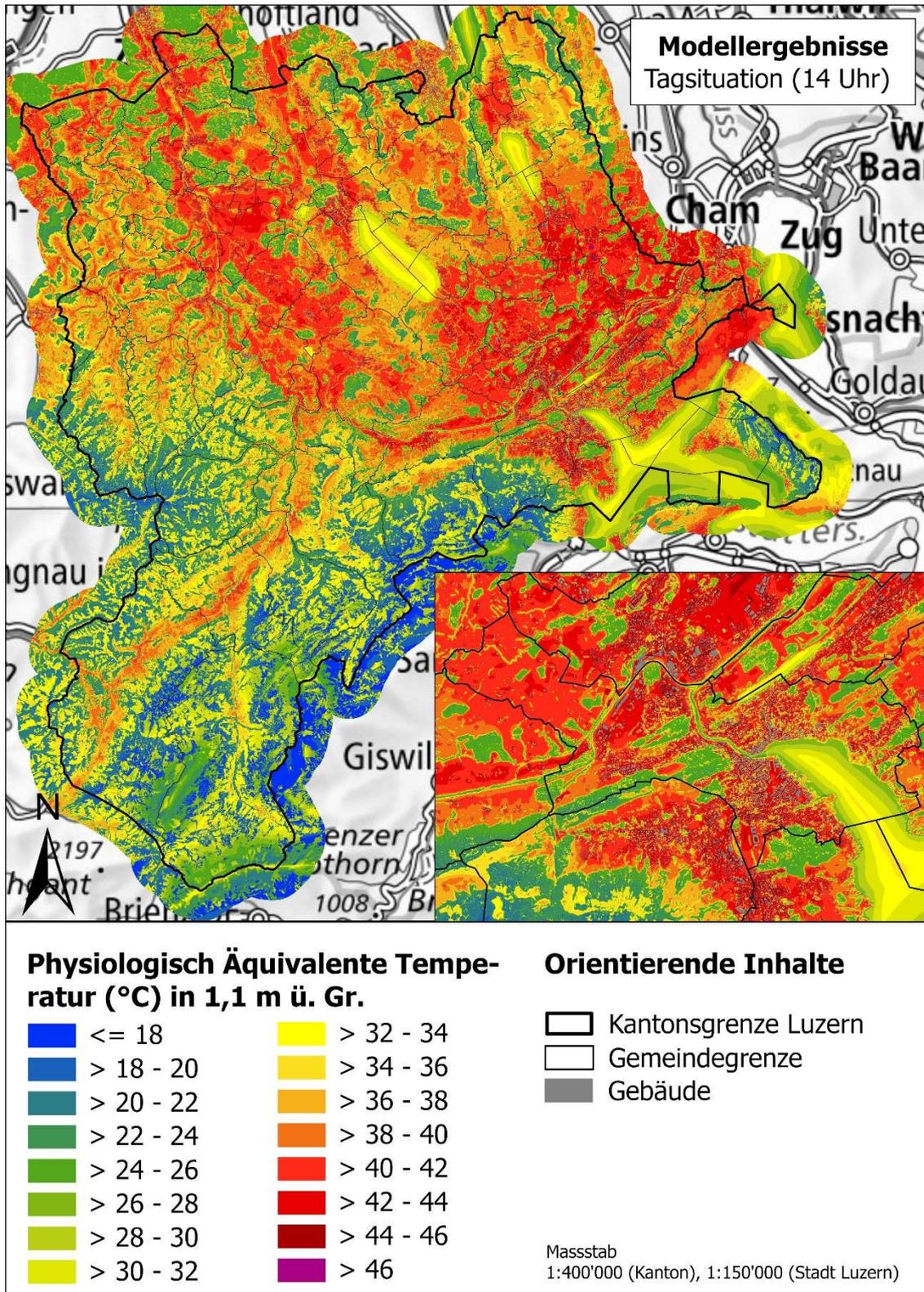


Abbildung 21: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) am Tag im Kanton Luzern



5. Planungshinweiskarten

5.1 BEWERTUNGSMETHODEN

Im Unterschied zur Klimaanalysekarte wurden jeweils separate Planungshinweiskarten (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils auf den Kanton Luzern beziehen. Die Bewertung der bioklimatischen Belastung 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 – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage. Die Bewertung in den Planungshinweiskarten fusst dagegen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um losgelöst von einer bestimmten Wetterlage 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 diese, 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 22).

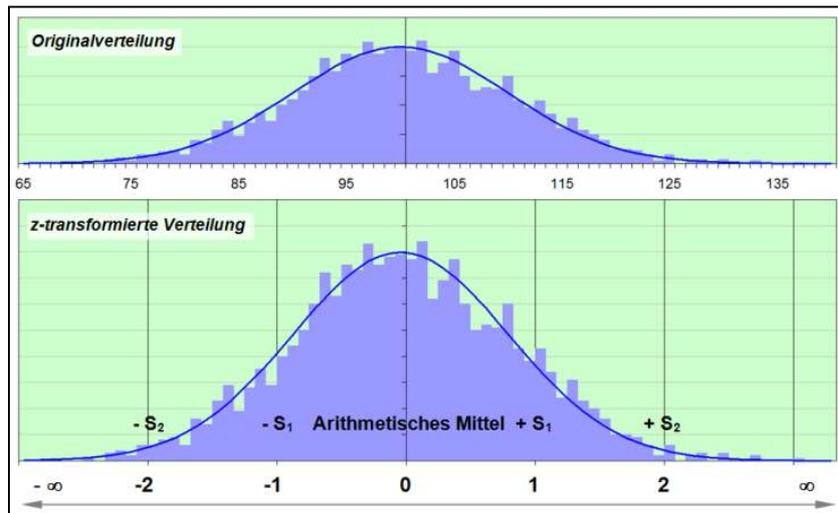


Abbildung 22: z-Transformation zur Standardisierung der vergleichenden Bewertung von Parametern

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 bioklimatischen Belastungssituation 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 ≥ 20 °C - eine mit der PET vergleichbare Bewertungsskala existiert für die nächtliche Situation im Innenraum jedoch (noch) nicht.

Tabelle 4: Einordnung der nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Verkehrsraum mittels z-Transformation

Mittlerer z-Wert	Qualitative Einordnung: Nächtliche Überwärmung	Lufttemperatur [°C] – Siedlungsflächen *	Lufttemperatur [°C] – Verkehrswege und Plätze **
bis -1	1 = Keine	bis 16,2	bis 16,5
> -1 bis -0,3	2 = Schwach	> 16,2 bis 17,4	> 16,5 bis 17,7
> -0,3 bis 0,5	3 = Mässig	> 17,4 bis 18,8	> 17,7 bis 19,1
> 0,5 bis 1	4 = Hoch	> 18,8 bis 19,6	> 19,1 bis 20,0
> 1	5 = Sehr hoch	> 19,6	> 20,0

* Mittelwert = 17,9 °C; Standardabweichung = 1,7 °C | ** Mittelwert = 18,2 °C; Standardabweichung = 1,75 °C
(Die Klassengrenzen für die Spalten 3 und 4 wurden auf eine Nachkommastelle gerundet.)



Für die PHK Nacht erfolgte die räumliche Bewertung anhand der nächtlichen Überwärmung (Lufttemperatur). Um die relativen Unterschiede im Kanton zu erfassen, liegt der Bewertung - Abweichend zur Klimaanalysekarte - eine z-Transformation und eine Berücksichtigung der Lufttemperatur (anstelle des höhenabhängigen Wärmeinseleffektes) zugrunde. Dabei wurde die nächtliche Überwärmung der 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 Luzern 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 Wärmelastung am Tag im Siedlungs- und Verkehrsraum mittels z-Transformation

Mittlerer z-Wert	Qualitative Einordnung: Wärmelastung am Tag	PET [°C] – Siedlungsflächen *	PET [°C] – Verkehrswege und Plätze **
bis -1	1 = Keine	bis 36,3	bis 35,7
> -1 bis -0,3	2 = Schwach	> 36,3 bis 39,0	> 35,7 bis 38,4
> -0,3 bis 0,5	3 = Mässig	> 39,0 bis 42,2	> 38,4 bis 41,4
> 0,5 bis 1	4 = Hoch	> 42,2 bis 44,1	> 41,4 bis 43,3
> 1	5 = Sehr hoch	> 44,1	> 43,3

* Mittelwert = 40,2 °C; Standardabweichung = 3,9 °C | ** Mittelwert = 39,5 °C; Standardabweichung = 3,8 °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

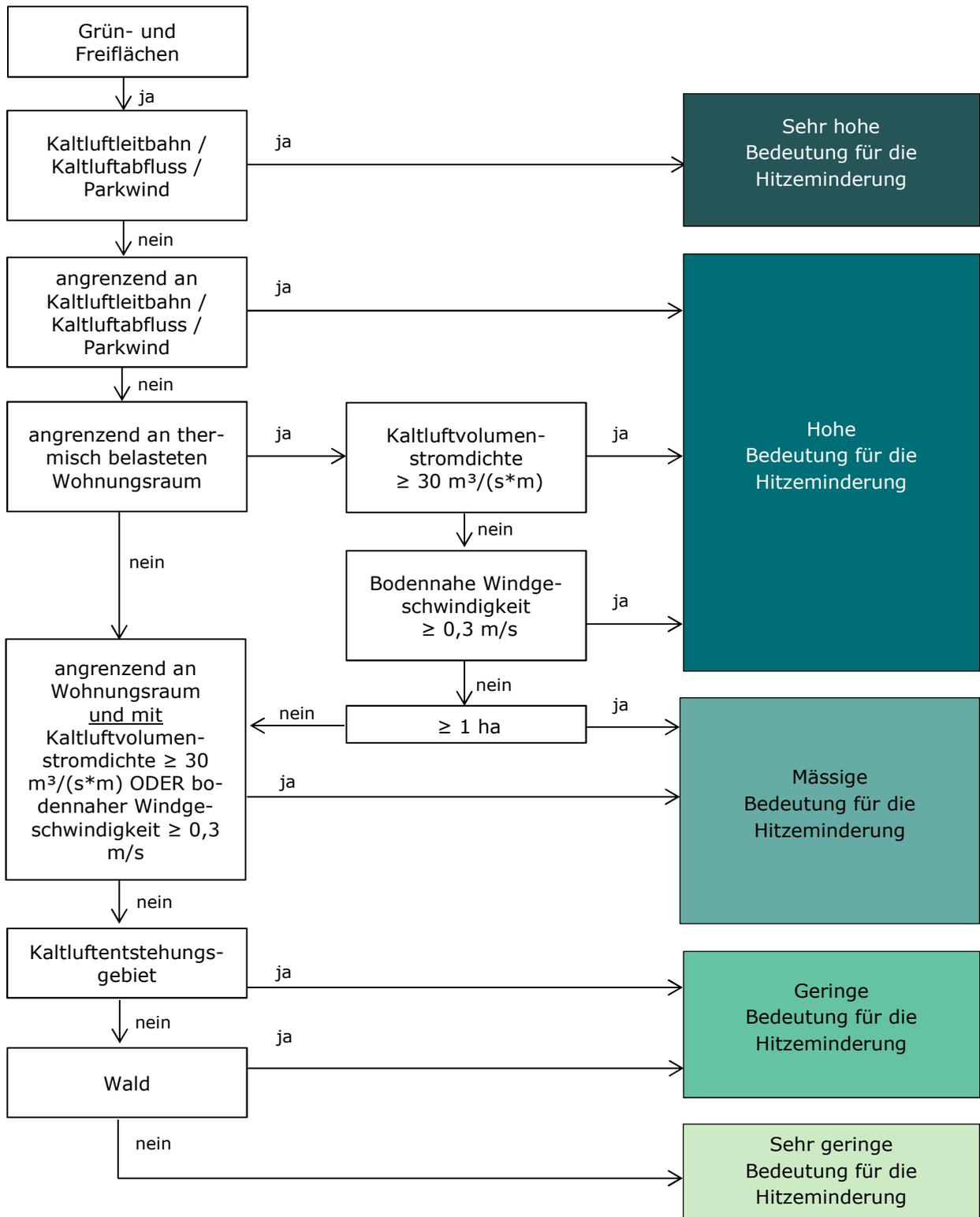


Abbildung 23: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation

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



tisch 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 23 dargestellte hierarchische Bewertungsschlüssel verwendet.

Da die Übergänge in Kaltluftleitbahnen¹⁸ 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 heranführen. 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 (≥ 1 ha) wird nicht die einzelne Teilfläche, sondern die Grösse des gesamten Grünflächenverbundes¹⁹ 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 $\geq 41,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ 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 Entfernung²⁰ zu belasteten Siedlungsflächen sowie der modellierten Wärmebelastung um 14 Uhr (PET). Zudem konnte keine Unterscheidung zwischen privatem und öffentlich zugänglichem Grün durchgeführt werden. 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 Luzerns 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.

¹⁸ Gleiches gilt für Kaltluftabflüsse und Parkwinde

¹⁹ Ein Grünflächenverbund wird durch eine andere Nutzung begrenzt, etwa dem Wirkungsraum (Siedlung, Verkehrswege) oder Gewässern. Der Roterwald setzt sich beispielsweise aus mehreren Teilflächen zusammen und bildet einen gesamten Grünflächenverbund.

²⁰ Die Entfernung basiert auf Luftlinie, ohne die tatsächliche Wegeführung zu berücksichtigen (Ampeln, kein Durchgang, etc.).



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 basierende Grünflächenklima wird in Kombination mit der Entfernung zu belasteten Siedlungsflächen als Bewertung der Grün- und Freiflächen für die Tagsituation genutzt (Abbildung 24).

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 aus- schliesslich der Wälder *
bis -1	Sehr günstig	bis 30,6
> -1 bis -0,3	Günstig	> 30,6 bis 34,3
> -0,3 bis 0,5	Mittel	> 34,3 bis 38,6
> 0,5 bis 1	Ungünstig	> 38,6 bis 41,3
> 1	Sehr ungünstig	> 41,3

* Mittelwert = 35,9 °C; Standardabweichung = 5,35 °C

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

Grünflächenklima (als Indikator für die Aufenthaltsqualität)

Erreichbarkeit	Sehr günstig	Günstig	Mittel	Ungünstig	Sehr ungünstig
1. Grünfläche sehr gut (300 m) erreichbar aus Siedlungsflächen (SF) mit sehr hoher Wärmebelastung	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Ausbaufähig	Begrenzt
2. Grünfläche gut (700 m) erreichbar aus SF sehr hoher Wärmebelastung bzw. sehr gut (300 m) erreichbar aus SF mit hoher Wärmebelastung	Sehr gut	Gut	Mässig	Ausbaufähig	Begrenzt
3. Grünfläche gut (700 m) erreichbar aus SF mit hoher Wärmebelastung bzw. sehr gut (300 m) erreichbar aus SF mit mässiger Wärmebelastung	Gut	Mässig	Ausbaufähig	Ausbaufähig	Begrenzt
4. übrige Grün- und Freiflächen	Mässig	Mässig	Ausbaufähig	Begrenzt	Begrenzt

Abbildung 24: Bewertungsschema für die Aufenthaltsqualität und Erreichbarkeit von Ausgleichsräumen am Tag (Wälder ausgeschlossen)



In Anlehnung an eine Studie des Bundinstituts 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 Luzerns 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 25).

Erreichbarkeit

1. **Gut** (700 m) erreichbar aus Siedlungsflächen (SF) mit **sehr hoher Wärmebelastung** bzw. **sehr gut** (300 m) erreichbar aus SF mit **hoher Wärmebelastung**
2. **Sehr gut** (300 m) erreichbar aus SF, unabhängig von deren Wärmebelastungsniveau: „siedlungsnaher Wald“
3. Übrige Wälder

Aufenthaltsqualität und Erreichbarkeit der Waldflächen

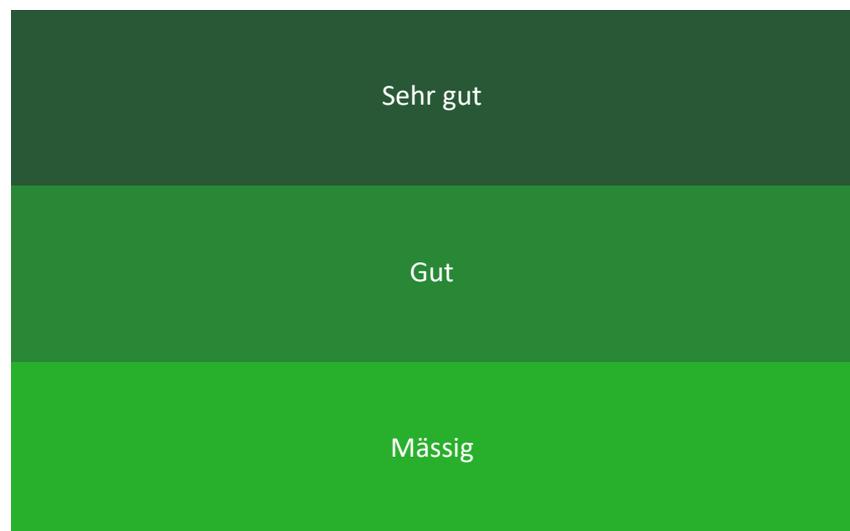


Abbildung 25: Bewertungsschema für die Aufenthaltsqualität und Erreichbarkeit von Wäldern am Tag

5.1.4 KALTLUFT EINWIRKBEREICH ALS NICHT BEWERTUNGSRELEVANTES KRITERIUM

In den vorherigen Unterkapiteln wurden die Bewertungsmethoden für die Planungshinweiskarten erläutert. Der Kaltlufteinwirkungsbereich ist ein Element der Planungshinweiskarte Nachtsituation, welches in der Karte abgebildet wird jedoch keinen Einfluss auf die Bewertung der Flächen nimmt.

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 Einwirkungsbereich 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 Luzerns gut mit Kaltluft durchströmt. Weite Teile der Gemeinden und Städte bis 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.

5.2 PLANUNGSHINWEISKARTEN

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Planungshinweiskarten Tag und Nacht im kantonalen Kontext beschrieben. Das Kartenmaterial liefert sowohl Hinweise für die Bestandssituation als auch für mögliche Nutzungsänderungen.

5.2.1 NACHTSITUATION

In der Nachtsituation haben etwa ein Drittel der Luzerner Siedlungsflächen keine bzw. nur eine schwache nächtliche Überwärmung, weniger als die Hälfte eine mässige Überwärmung und ein verbleibendes Viertel eine hohe bis sehr hohe Überwärmung (Tabelle 7). Die nicht vorhandene bis schwache Überwärmung in der Nacht ist vorrangig in den Höhenlagen (z.B. Gemeinde Flühli) und an den Siedlungsrändern (z.B. in Adligenswil und Kriens) 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. Stadtzentrum von Luzern) oder hoch versiegelte Industrie- und Gewerbeflächen (z.B. entlang der Emmenweidstrasse in Emmen) mit einer weitestgehend hohen bis sehr hohen nächtlichen Überwärmung gegenüber (Abbildung 26). Grundlegend ist im Verkehrsraum der Anteil der Flächenverteilung der maximal schwach überwärmten, der mässigen und der hoch bis sehr hoch überwärmten Flächen ähnlich zum Siedlungsraum. Als Beispiele für besonders belastete Verkehrswege und Plätze sind hier u.a. die Viertel Hirschmatt Kleinstadt, Bruch Gibraltar und Altstadt Wey in Luzern zu nennen. Verkehrswege mit geringer nächtlicher Überwärmung sind zum Grossteil ausserorts und in den Randlagen zu finden.

Unter den Luzerner Ausgleichsräumen haben etwa ein Achtel der Flächen eine hohe bis sehr hohe Bedeutung für die Hitzeminderung 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 etwa ein Zehntel der Luzerner Ausgleichsräume aus. Sie sind vorrangig in entlegenen Gebieten zu finden und stellen dem Menschen keine nennenswerten Klimafunktionen bereit. Mit einem Flächenanteil von 45,8 % machen Grün- Freiflächen mit einer geringen Bedeutung für die Hitzeminderung den Grossteil der Luzerner 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.

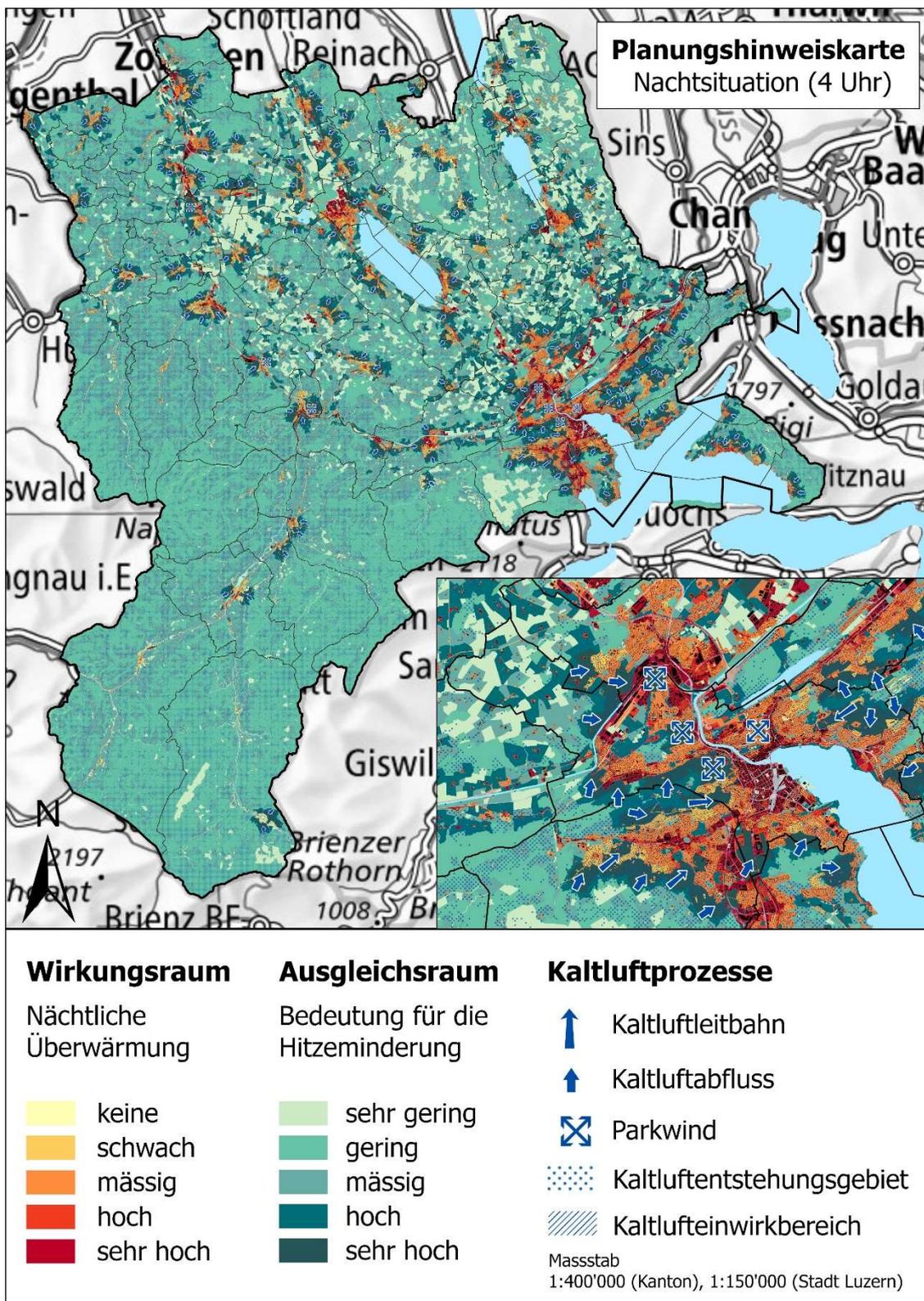


Abbildung 26: Planungshinweiskarte Nachtsituation für den Kanton Luzern (verkürzte Legende)



Tabelle 7: Wirkungsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Nachtsituation

Nächtliche Überwärmung	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Siedlungsflächen	Verkehrsflächen	
Keine	7,5	11	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
Schwach	24,4	19	Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
Mässig	43,8	36	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
Hoch	12,0	20	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden.
Sehr hoch	12,3	14	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmassnahmen durchgeführt werden.

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 Roterwald, Zimmereggwald und Gütschwald sowohl am Tag als auch in der Nacht gleichermaßen bedeutsam), teilweise jedoch auch gegensätzliche Ausprägungen (z.B. Sportanlagen Allmend in Luzern 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

Bedeutung für die Hitze-minderung	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
Sehr hoch	4,3	Grün- und Freiflächen, die eine zentrale Rolle im nächtlichen Kaltlufthaushalt spielen und die wichtigsten klimaökologischen Ausgleichsräume darstellen. Bauliche Eingriffe sind gänzlich zu vermeiden bzw. sollten, sofern bereits planungsrechtlich zulässig, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Die gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist zu erhalten und ggf. mit Hilfe von Grünverbindungen auszubauen.
Hoch	8,7	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden werden bzw., sofern bereits planungsrechtlich zulässig, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden.
Mässig	31,5	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
Gering	45,8	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereitgestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
Sehr gering	9,7	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.

5.2.2 TAGSITUATION

In der Tagsituation weisen etwa 23 % der Siedlungsflächen und 28 % der Verkehrswege und Plätze keine oder nur eine schwache Wärmebelastung auf (Tabelle 9). Ähnlich zur Nachtsituation schneiden auch tagsüber die Hochlagen und locker bebauten Ortsteile (z.B. Lützelmatte in Luzern) mit besonders günstigen Bedingungen ab. Zudem profitieren die Siedlungen in Gewässernähe tagsüber von der kühlenden Wirkung des Wassers, insbesondere im Umfeld des Vierwaldstättersees. Die Nähe zu Wäldern (z.B. Siedlungsflächen zwischen Gigeliwald und Gütschwald) bzw. ein hoher Baumanteil innerhalb der Siedlung (z.B. im Bereich Reckenbühlstrasse, Luzern) sind weitere Gunstfaktoren für eine geringe Wärmebelastung am Tag. Knapp drei Fünftel der Siedlungsflächen und etwa zwei Fünftel der Verkehrsflächen sind durch eine mässige Wärmebelastung gekennzeichnet. Alle übrigen Wirkungsräume sind als (sehr) hoch belastet einzustufen, wobei ein Grossteil dieser Flächen in sonnenexponierten und hoch versiegelten Bereichen (z.B. auf den grösseren Industrie- und Gewerbeflächen Ebikons und Dierikons) zu finden ist (Abbildung 27).



Abbildung 27: Planungshinweiskarte Tagsituation für den Kanton Luzern (verkürzte Legende)



Tabelle 9: Wirkungsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Tagsituation

Wärmebelastung am Tag	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Siedlungsflächen	Verkehrsflächen	
Keine	5,6	9	Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuss- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
Schwach	17,7	19	Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuss- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
Mässig	58,2	43	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten fussläufig erreichbar und zugänglich sein.
Hoch	17,9	23	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fussläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
Sehr hoch	0,6	6	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fussläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

Etwa einem Viertel der Ausgleichsräume im Kanton Luzern wird eine mindestens gute Aufenthaltsqualität und Erreichbarkeit 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 siedlungsnaher Wälder und innerstädtische Grünflächen (z.B. Ufschöttli und Bleichergärtli in Luzern). 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 bzw. begrenzten Aufenthaltsqualität und Erreichbarkeit (45,6 % der Ausgleichsräume Luzerns).



Tabelle 10: Ausgleichsraum: Flächenanteile und Planungshinweise für die Tagsituation

Aufenthaltsqualität und Erreichbarkeit	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
Sehr gut	3,3	Bestmöglich verschattete Grünflächen, die fussläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können (sofern kein Privatgrundstück) und tagsüber die höchste Aufenthaltsqualität bieten. Bäume sind zu erhalten und zu schützen, die sehr gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten.
Gut	21,1	Ausgleichsräume, welche eine hohe Aufenthaltsqualität am Tag aufweisen und als Rückzugsorte dienen. Hierzu zählen siedlungsnahe Wälder sowie gut verschattete Grünflächen, die fussläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Bäume sind zu erhalten und zu schützen, die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten.
Mässig	30,0	Siedlungsnahe Grünflächen mit einer mittleren bis hohen Aufenthaltsqualität, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und schützen bzw. ggf. auszubauen. Entlegene Grünflächen mit einer sehr hohen Aufenthaltsqualität (insbesondere siedlungsferne Wälder), für die eine gute Grünvernetzung zu gewährleisten ist.
Ausbaufähig	41,0	Grün- und Freiflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsräumen (nicht als Rückzugsort geeignet). Für siedlungsnahe Grünflächen ist der Baumanteil und die Mikroklimavielfalt zu erhöhen. Bei einer schlechten Erreichbarkeit ist eine gute Grünvernetzung zu gewährleisten.
Begrenzt	4,6	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Im siedlungsnahen Raum sind - insbesondere auf den öffentlichen Grünflächen - verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).



5.3 MASSNAHMENKATALOG SIEDLUNGSKLIMA

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 Luzern wurde ein Katalog aus 19 klimaökologisch wirksamen Einzelmassnahmen identifiziert, die einzelnen Basisgeometrien räumlich zugeordnet werden können. Dieser Katalog ergänzt die Planungshinweiskarten als GIS-gestützter „Aktionsplan Anpassung“ um eine weitere Informationsebene.

Die Zuordnung bestimmter Massnahmensets aus dem Portfolio der 19 Einzelmassnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in den Planungshinweiskarten ab (z.B. nächtliche Überwärmung oder Wärmebelastung am Tag, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt; Abbildung 28). Die Ergebnisse sind jeweils als Planungsempfehlungen zu verstehen, die bei Betrachtung einer konkreten Fläche oder spezifischen Massnahme einer genaueren Überprüfung bedürfen (z.B. beruht die Empfehlung *Dachbegrünung* auf der siedlungsklimatischen Situation, ohne zu berücksichtigen, ob deren bauliche Umsetzung tatsächlich möglich wäre, da keine Informationen über den Dachtyp der Gebäude auf der Blockfläche vorlagen). Die Massnahmen sind stichpunktartig in Tabelle 11 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

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

Die Wirkung der Massnahmen wird qualitativ beschrieben, da verifizierte Daten nur sehr vereinzelt für ganz spezielle Fallstudien zur Verfügung stehen. Zum anderen hängt die Wirkung stark von der konkreten Ausgestaltung der Massnahmen, ihrer Lage im Siedlungsgebiet 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 Luzerner Klimas beizutragen – werden die Massnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven lokalklimatischen Effekte der einzelnen Massnahmen.

Soweit möglich sollte der **Grünanteil** im Siedlungsgebiet erhöht werden, insb. in thermisch belasteten Bereichen (→ M01: Innen-/Hinterhofbegrünung, M02: Öffentliche Grünräume schaffen). 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 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).

Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tag 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. Dabei sind solche Gehölze (bspw. Ginkgo oder Japanische Ulme) zu



bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Grosskronige Laubbäume sind bei Neupflanzungen 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 (die Findung von resistenten Arten ist noch Stand der Forschung, Zwischenergebnisse sind u.a. beim „Projekt Stadtgrün 2021“ der LWG Bayern²¹ oder in der GALK-Strassenbaumliste²² nachzulesen; für den Schweizer Raum sind zu diesem Thema die Studien der Forschungsanstalt WSL²³ und der Berner Fachhochschule²⁴ zu nennen).

Massnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Strassen, Fuss- und Radwege oder Parkplätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M06: Begrünung und Verschattung des Verkehrsraumes). 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).

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 siedlungsklimatischer 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 (→ M19: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Krankenhäuser oder 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 (→ M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren, aber auch eine nachträgliche Dämmung von bereits bestehenden Bauten kann ein wesentliches Mass zur klimagerechten Gestaltung der Siedlung und zum thermischen Wohlbefinden der Bevölkerung beitragen. Bei Neubau ist auf die thermischen Eigenschaften der Baumaterialien 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 Reflektion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen grösser, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert

²¹ www.lwg.bayern.de/landespflege/urbanes_gruen/085113/index.php (Abruf 21.07.2022)

²² www.galk.de/index.php/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuuebersicht/strassenbaumliste (Abruf 21.07.2022)

²³ <https://www.wsl.ch/de/projekte/testpflanzungen.html> (Abruf 20.9.2022)

²⁴ https://www.nnbs.ch/documents/864304/1447481/Faktenblatt3-Urbane_Baumarten_und_Klimawandel-3.pdf (Abruf 20.9.2022)



gestalten). Bautechnische Massnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente²⁵ oder energetische Sanierung²⁶ sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M17, M18).

Bei **Nachverdichtung** im Siedlungsgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insb. die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus klimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar. 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.



- Sehr hohe nächtliche Überwärmung
- Kaltlufteinwirkungsbereich in der Nacht
- Bewohnte Fläche
- Hohe Wärmebelastung am Tag

- M01: Innen-/ Hinterhofbegrünung
- M03: Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert gestalten
- M04: Entsiegelung
- M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten
- M15: Dachbegrünung
- M16: Fassadenbegrünung
- M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen

Abbildung 28: Beispielhafte Ableitung von Massnahmen für Siedlungsflächen; Planungshinweiskarte Nachtsituation im Ausschnitt Horw (türkiser Rahmen zeigt die betrachtete Basisgeometrie)

²⁵ Bäume, Vordächer, Markisen, Jalousien/Aussenrollos, Sonnensegel, Sonnenschutzglas, etc.

²⁶ Wirkt nicht nur Energieverlusten im Winter entgegen, sondern auch gegen übermässiges Aufheizen der Fassaden im Sommer.



Tabelle 11: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer Siedlungsklimatisch wirksamer Massnahmen für den Kanton Luzern (Massnahmenkatalog Aktionsplan Anpassung).

Nr.	Massnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM				
01	Innen-/Hinterhofbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> Vegetation und Entsiegelung 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	Innen- und Hinterhöfe
02	Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen	<ul style="list-style-type: none"> Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Vernetzung von Grünflächen Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	Baulücken, grössere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)
03	Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert gestalten	<ul style="list-style-type: none"> Helle Farben und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 	Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze, Dächer
04	Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	<ul style="list-style-type: none"> Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und insb. nachts Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe
05	Blaugrüne Verkehrsraumgestaltung	<ul style="list-style-type: none"> Blaue oder grüne Massnahmen für den Verkehrsraum (blaugrün muss nicht zwangsläufig in Kombination erfolgen) Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.) sowie Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen) 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber (bei Pflanzung neuer Bäume) und nachts Synergien zum Niederschlagswassermanagement (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität 	Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze



Nr.	Massnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
06	Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien	<ul style="list-style-type: none"> Bäume oder bautechnische Massnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel) 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts 	Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld
07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	<ul style="list-style-type: none"> Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen) 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Synergien zur Biodiversität 	Grün- und Freiflächen, Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze
08	Erhalt und Verbesserung der Bodenkühlleistung	<ul style="list-style-type: none"> Schutz von Ausgleichsräumen mit einer sehr hohen Bodenkühlleistung und Aufwertung von Böden mit mittlerer bis geringer Bodenkühlleistung Verbesserung des Bodenaufbaus (Bodenlockerung, Bodenauftrag, usw.), Bodenschutz, Etablierung von verdunstungsstarken Pflanzen, Bewässerungsmassnahmen, Begrünung und Entsiegelung 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insbesondere nachts, aber auch tagsüber Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	Grün- und Freiflächen
09	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	<ul style="list-style-type: none"> Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Siedungsklima und vieler weiterer Funktionen (siehe rechts) 	<ul style="list-style-type: none"> Bedeutung für den Kaltlufthaushalt Wichtige Funktionen für die Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 	Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)
10	Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	<ul style="list-style-type: none"> Siedungsklimafunktion grösserer Fliess- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird 	<ul style="list-style-type: none"> Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) Oberflächennahe Temperatur kann nachts über der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken 	Gewässer, Grün- und Freiflächen



Nr.	Massnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG				
11	Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten	<ul style="list-style-type: none"> Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung) 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung Reduktion des Wärmestaus 	Neubau, Gebäudekomplexe
12	Entdichtung (Rückbau)	<ul style="list-style-type: none"> Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts Verbesserung der Durchlüftung Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen sowie Garagen, Lagerhallen, ggf. Industrie- und Gewerbebrachen, Bahnanlagen
13	Vermeidung von Austauschbarrieren	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> Schutz des Luftaustauschsystems 	Grün- und Freiflächen, gut durchlüftete Wohn- und Gewerbeflächen, Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze
14	Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	<ul style="list-style-type: none"> 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, z.B. als Kaltluftentstehungsgebiete dienen Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft Synergien zur Biodiversität 	<ul style="list-style-type: none"> Schutz vor stärkerer Überwärmung und Verschlechterung der Durchlüftung Synergien zur Biodiversität 	Grün- und Freiflächen



Nr.	Massnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM				
15	Dachbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen) 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas Bei grossflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Aussenraumklimas möglich Synergien zum Niederschlagswassermanagement, Biodiversität, Klimaschutz und PV-Produktion (Kühlwirkung) 	Flachdächer, ggf. flach geneigte Dächer
16	Fassadenbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen) 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Aussenraumklimas Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz 	Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)
17	Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Massnahmen	<ul style="list-style-type: none"> Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, bautechnische Massnahmen wie aussen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie 	<ul style="list-style-type: none"> Wirkung tagsüber und nachts Verbesserung des Innenraumklimas Synergien zum Klimaschutz 	Gebäude (Neubau und Bestand)
18	Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	<ul style="list-style-type: none"> Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung 	<ul style="list-style-type: none"> In erster Linie Klimaschutzmassnahme Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber 	Gebäude (Bestand)
19	Technische Gebäudekühlung	<p>Möglichst ressourcenschonende Lösung</p> <ul style="list-style-type: none"> Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird Erdkältenutzung Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden 	<ul style="list-style-type: none"> Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung 	Gebäude, in denen passive Massnahmen nicht ausreichend angewendet werden können
20	Anpassung des Raumnutzungskonzeptes	<ul style="list-style-type: none"> 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) 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen) 	Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (vorwiegend Neubau)



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 29 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).

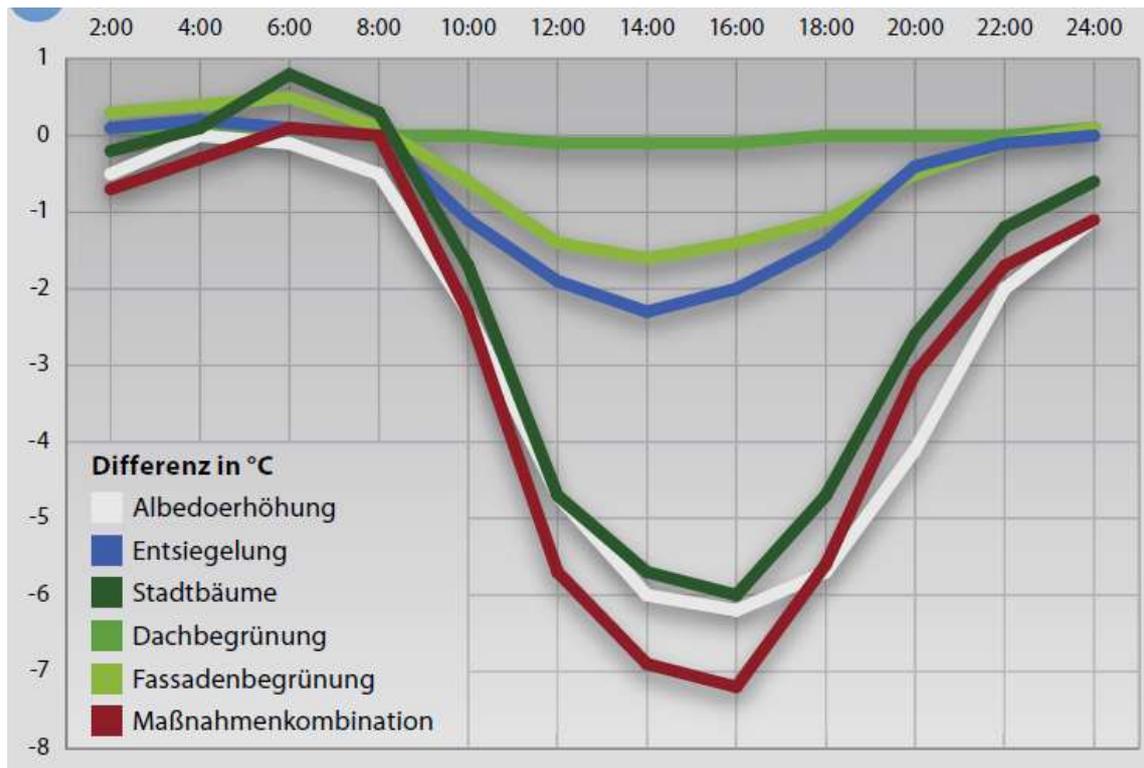


Abbildung 29: Veränderungen durch Anpassungsmassnahmen am Beispiel eines Tagesverlaufs der Aussentemperatur in zwei Metern Höhe.

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).

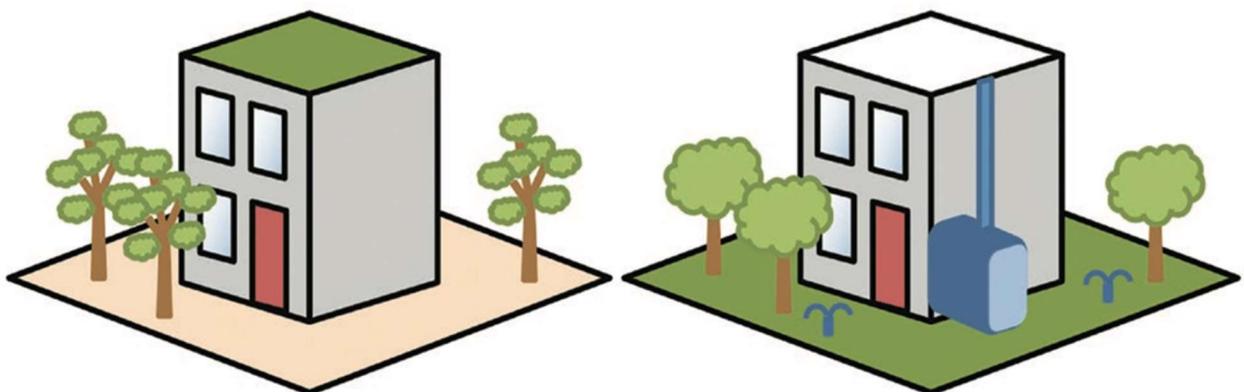


Figure 14: Human thermal comfort can be maximised by providing water at street level, rather than retaining on the rooftop

Abbildung 30: 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 29 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 31) 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).

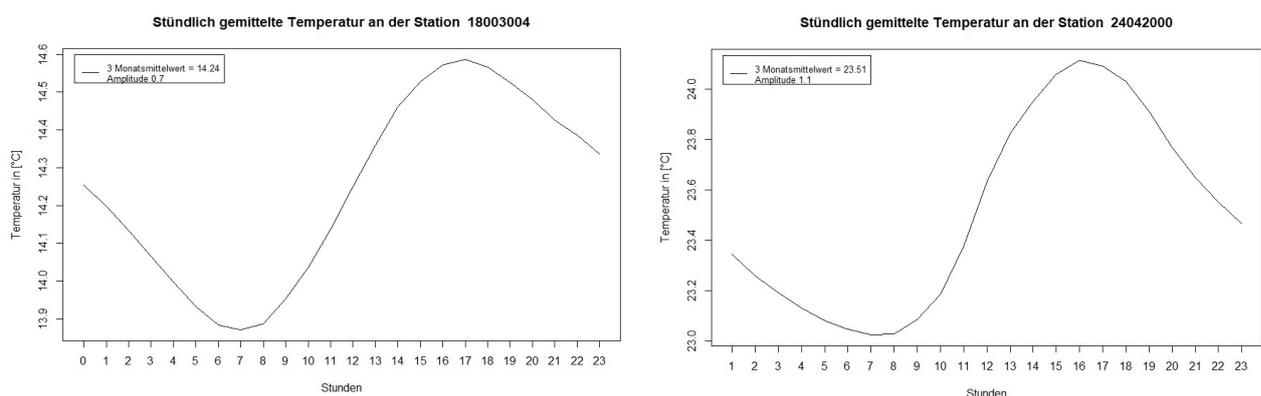


Abbildung 31: Mittlerer Tagesgang der Wassertemperatur in den Monaten Juni, Juli und August am Pegel des Inn bei Rosenheim (links) sowie am Pegel des Main in Würzburg (rechts)

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 32). 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 33). 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) „Siedungsklimaqualitätszielen“ anzugehen bzw. fortzuführen.

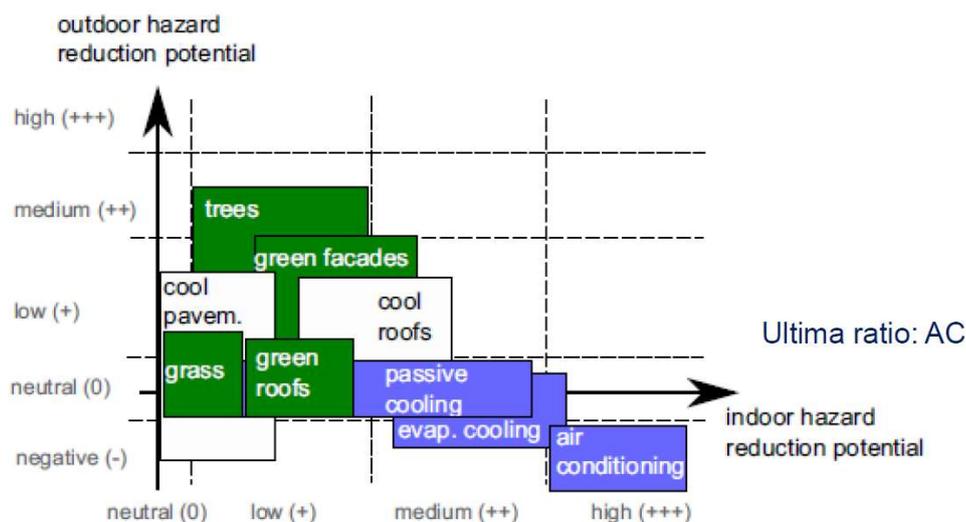


Abbildung 32: Wirksamkeit von Massnahmen zur Abkühlung im Innen- und Aussenraum (Buchin et al., 2016)



Abbildung 33: Strategische Bausteine einer hitzeangepassten Siedlungsentwicklung



6. Fazit und Ausblick

Mit der Klimaanalyse 2022 liegt eine modellgestützte, detaillierte Analyse der klimaökologischen Funktionen im Kanton Luzern vor. Im Fokus standen dabei insbesondere der nächtliche Kaltlufthaushalt 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 FITNAH3D 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 Luzerner 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.



Abbildung 34: Verwendungszweck der Planungshinweiskarten (Ergebnis aus einer Umfrage ausgewählter Luzerner Gemeinden)

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 wird unter anderem im Rahmen der kantonalen Richtplanung zur Anwendung kommen. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann hier neben der kantonalen Richtplanung erstmalig auch die Ortsplanung hinreichend gut bedient werden. Damit können nun basierend den Klimakarten gebietsweise Vorgaben zur Sicherung eines angenehmen Siedlungsklimas erlassen werden. Ausserdem sind nun auch valide Ersteinschätzungen z.B. hinsichtlich der Sensibilität einzelner Ent-



wicklungsvorhaben seitens der Verwaltung sowie bei Bedarf eines externen Gutachters möglich. Um die Hitzethematik möglichst früh bei einem Bauvorhaben mitzudenken können Planer und Architekten nun mit Hilfe 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.



Quellenverzeichnis

- 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.
- CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate, Services, Zurich, 271 pp.
- BfN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- Brito, Miguel. (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.
- 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
- Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.) (2008): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage.
- 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.de (Abruf 21.06.2021).
- 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 (2018): Frequently Asked Questions. In: *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- 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.
- Kuttler, W. (2009): *Klimatologie*. Paderborn: Schöningh (Grundriss allgemeine Geographie, 3099).
- 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 (2022a): Klimanormwerte Luzern. Normperiode 1991-2020. https://www.meteoschweiz.admin.ch/product/output/climate-data/climate-diagrams-normal-values-station-processing/LUZ/climate_LUZ_np9120_d.pdf



- MeteoSchweiz (2022b): 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 (2022c): 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
- MeteoSchweiz (2022d): Temperatur. Abweichung von der Normperiode 1981-2010. Kt. Luzern. Sommer. https://gate.meteoswiss.ch/mchbrowser/data/barplot-scen/tas/LU/RCP2.6-RCP8.5/JJA/barplot-scen_tas_LU_RCP2.6-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.
- Oke, Timothy R.; Mills, G.; Christen, A.; Voogt, J. A. (2017): *Urban climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Peters G.P., Andrew R.M., Boden T., Canadell J.G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M.R., Wilson C. (2012): The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nat. Clim. Change* 3, 4-6.
- Schönwiese, C.- D. (2008): *Klimatologie*. 3. Auflage. Stuttgart.
- 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 (2005): *Gesünder Wohnen – aber wie?* <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2885.pdf>
- UBA (2016): *Heizen, Raumtemperatur*. Online: 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/gebaeudeklimatisierung>
- 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.