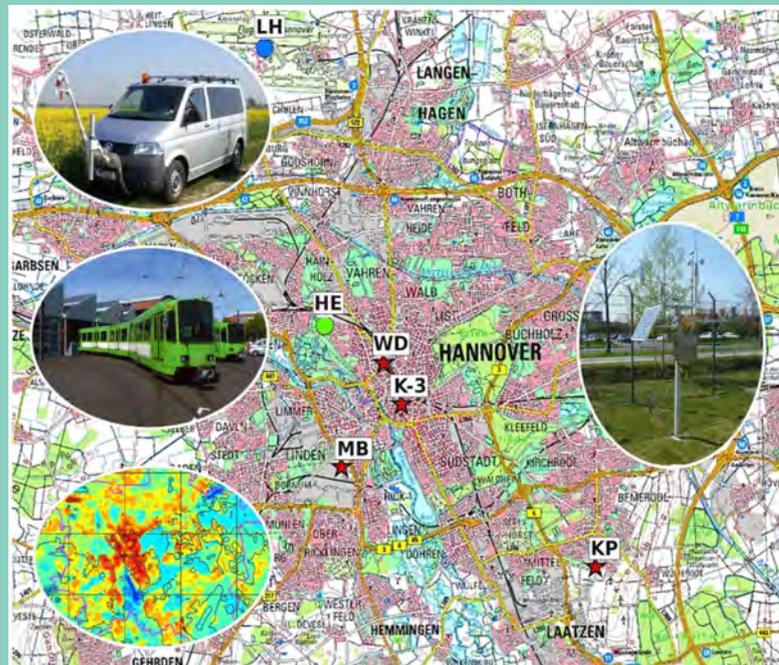


Das Stadtklimaprojekt Hannover

Untersuchung des Stadtklimas anhand verschiedener Messmethoden und dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3

von
Gabriele Krugmann und Stefanie Bauditz



Zitationsvorschlag:

Krugmann, G. und Bauditz, S., 2024: Stadtklimaprojekt Hannover. Untersuchung des Stadtklimas anhand verschiedener Messmethoden und dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 256, 125 Seiten. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.

Titelabbildung:

Ausschnitt aus dem Stadtplan von Hannover, in dem die Lage von sechs Messstationen markiert ist. Die Fotos im Vordergrund zeigen (links, von oben nach unten) das verwendete Messfahrzeug, eine Straßenbahn mit Messgeräten und eine mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 simulierte Temperaturverteilung, sowie (rechts) die Station Marianne-Baecker-Allee (MB).

Diese Arbeit ist im Rahmen einer Kooperation mit der Stadt Hannover, dem Land Niedersachsen und der ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG entstanden.



ISSN: 2194-5969 (Online)

ISBN: 978-3-88148-547-0 (Online)

Nutzungsbedingungen:

Dieses Dokument wird unter den Bedingungen der Creative Commons-Lizenz "Namensnennung 4.0 International" (CC-BY 4.0) zur Verfügung gestellt (www.creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de).



Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, weiterverbreiten und verändern: Sie müssen angemessene Urheber- und Rechteangaben machen, einen Link zur Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Diese Angaben dürfen in jeder angemessenen Art und Weise gemacht werden, allerdings nicht so, dass der Eindruck entsteht, der Lizenzgeber unterstütze gerade Sie oder Ihre Nutzung besonders. Sie dürfen keine zusätzlichen Klauseln oder technische Verfahren einsetzen, die anderen rechtlich irgendetwas untersagen, was die Lizenz erlaubt.

Die veröffentlichten Texte werden allein von ihren jeweiligen Autorinnen und Autoren verantwortet; die darin zum Ausdruck gebrachte Meinung entspricht nicht notwendig der Meinung des Herausgebers (Deutscher Wetterdienst).

Schriftleitung: Dipl.-Met. Peggy Hofheinz

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst
Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes
Am DFS-Campus 4
63225 Langen
selbstverlag@dwd.de
www.dwd.de/selbstverlag

Korrespondenzadresse:

Deutscher Wetterdienst
Dr. Stefanie Bauditz
Regionales Klimabüro Hamburg
Bernhard-Nocht-Str. 76
20359 Hamburg
Stefanie.Bauditz@dwd.de

Autorinnen:

Gabriele Krugmann
Dr. Stefanie Bauditz
(Deutscher Wetterdienst)

Vorwort

Der vorliegende Bericht stellt das Stadtklimaprojekt Hannover vor und präsentiert wesentliche Ergebnisse. Das Projekt war eine Zusammenarbeit des DWD mit der Stadt Hannover, der ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG und dem Land Niedersachsen. Das Stadtklima der Landeshauptstadt Hannover wurde im Zeitraum 2017 bis 2020 mit unterschiedlichen Methoden stationär und mobil vermessen und zusätzlich mit einem Stadtklimamodell untersucht. Die Auswertung der langjährigen Messungen an der im Umland gelegenen Wetterstation Hannover-Langenhagen diente als Vergleich für eine klimatische Einordnung der temporären städtischen Messungen während des Projektes.

Das Stadtklimaprojekt hatte zum Ziel, eine Analyse der klimatischen Bedingungen in der Stadt allgemein und im Vergleich mit dem Umland zu erstellen. Die Ergebnisse ermöglichen den Entscheidungsträgern, anstehende stadtplanerische Maßnahmen klimafreundlich zu gestalten. Insbesondere die im Zuge des Klimawandels weiter zunehmenden sommerlichen Hitzeperioden stellt die Städte vor große Herausforderungen. Für die Gesundheit aller Stadtbewohner ist es wichtig, die kühlen Bereiche im Stadtgebiet zu identifizieren, sie zu erhalten und für die Bevölkerung nutzbar zu machen. Die überwärmten Stadtbereiche müssen erkannt und derart umgestaltet werden, dass die Aufenthaltsqualität und letztendlich die Wohnbarkeit der Stadt für alle Bevölkerungsgruppen auch bei weiter steigenden Temperaturen gewährleistet bleibt.

Zusammenfassung

Bislang standen noch keine langjährigen homogenen Messreihen des Stadtklimas in Hannover zur Verfügung. Mit dem Stadtklimaprojekt Hannover wurde erstmals eine Basis für die Untersuchung des Stadtklimas geschaffen.

Wichtiger Bestandteil der Untersuchung ist die Auswertung der homogenen, seit 1948 nahezu lückenlosen Messreihe an der Wetterstation Hannover-Langenhagen. Die wichtigsten meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer und Wind wurden ausgewertet. Neben der Darstellung von Jahresgängen, Mittelwerten, Extremwerten und Kenntagen wurden auch die Veränderung der Häufigkeit und der Andauerzeiten von Hitzeperioden, Kälteperioden und Trockenperioden untersucht. Es hat sich gezeigt, dass das Temperaturniveau insgesamt und auch die Andauer und Häufigkeit von Hitzeperioden deutlich zugenommen hat.

Im Frühjahr 2017 wurden durch den DWD im Stadtgebiet mehrere temporäre Stationen eingerichtet und bis zum Jahresende 2020 betrieben. Die beiden Stationen Weidendamm (Nordstadt) und Marianne-Baecker-Allee (Linden) befanden sich in städtischem Umfeld, die Station Kattenbrookspark (Bemerode) auf einer Wiese in einem Park am Stadtrand. Zwei weitere Stationen haben die Verhältnisse in der unterirdischen Haltestelle Kröpcke vermessen. Zusätzlich standen die Messwerte der Station Herrenhausen zur Verfügung. Diese Station wird vom Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover betrieben. Die Auswertung aller Messergebnisse zeigt vor allem den nächtlichen Wärmeinseleffekt einer Großstadt deutlich.

Neben der Datenerhebung an festen Stationen wurde das Stadtklima auch mit mobilen Messungen untersucht. Zum einen sind mit einem Messwagen Temperatur- und Luftfeuchteprofile im Stadtgebiet erhoben worden. Während dreier Kampagnen bei hochsommerlichen Verhältnissen wurden insgesamt 32 Profildfahrten auf festen Routen während unterschiedlicher Tageszeiten durchgeführt. Des Weiteren wurden drei Straßenbahnen der ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG mit Temperatur- und Feuchtemessgeräten ausgerüstet. Die Trams waren im normalen Liniendienst im gesamten Stadtgebiet unterwegs. Die mobilen Messungen haben eindrucksvoll lokale Überwärmungen, aber auch den kühlenden Einfluss innerstädtischer Grünflächen gezeigt. Auch die Auswirkung großer Wasserflächen konnte nachgewiesen werden: sie wirken zwar – besonders im Hochsommer – tagsüber kühlend, nachts allerdings wärmen sie die Umgebung wie eine Warmwasserheizung.

Einen noch detaillierteren Blick auf das Stadtklima können Stadtklimamodelle bereitstellen. In dieser Untersuchung wurde ein typischer Hochsommertag mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 simuliert. In den Karten der Temperaturverteilung zeigt sich die nächtliche Ausprägung der städtischen Wärmeinsel eindrucksvoll, aber auch die über das gesamte Stadtgebiet verteilten Grünflächen fallen als ausgedehnte kühle Inseln auf.

Das Stadtklimaprojekt in Hannover, das sich durch seine Vielfalt an Messmethoden und Auswertungen auszeichnet, bietet einen umfassenden Überblick über das städtische Klima. Es dient somit als Grundlage für zukünftige Entscheidungen bei der Stadtplanung, um den Anforderungen eines sich wandelnden Klimas gerecht zu werden.

Summary

Until now, no long-term homogeneous series of measurements of the urban climate in Hanover were available. The Hanover Urban Climate Project has created a basis for analysing the urban climate for the first time.

An important part of the study is the evaluation of the homogeneous, almost uninterrupted series of measurements taken at the Hannover-Langenhagen weather station since 1948. The most important meteorological parameters of air temperature, precipitation, sunshine duration and wind were analysed. In addition to visualising annual trends, mean values, extreme values and threshold days, the changes in the frequency and duration of hot spells, cold spells and dry periods were also analysed. It was shown that the overall temperature level and also the duration and frequency of heatwaves have increased significantly.

In spring 2017, the DWD set up several temporary stations in the city and operated them until the end of 2020. The two stations Weidendamm (Nordstadt) and Marianne-Baecker-Allee (Linden) were located in an urban environment, while the Kattenbrookspark station (Bemerode) was located on a meadow in a park on the outskirts of the city. Two further stations measured the conditions in the underground Kröpcke railway station. The measured values from the Herrenhausen station were also available. This station is operated by the Institute for Meteorology and Climatology at the University of Hanover. The evaluation of all measurement results clearly shows the night-time heat island effect of a large city.

In addition to collecting data at fixed stations, the urban climate was also analysed using mobile measurements. On the one hand, temperature and humidity profiles were collected in the urban area using a measuring car. During three campaigns in midsummer conditions, a total of 32 profile runs were carried out on fixed routes at different times of day. Furthermore, three trams of ÜSTRA (Hannoversche Verkehrsbetriebe AG) were equipped with temperature and humidity measuring devices. The trams travelled throughout the entire city area as part of their regular service. The mobile measurements impressively demonstrated local overheating, but also the cooling effect of green spaces in the city area. The effect of large areas of water was also demonstrated: although they have a cooling effect during the day - especially in midsummer - they warm the surroundings at night like a water-based heating-system.

Urban climate models can provide an even more detailed view of the urban climate. In this study, a typical midsummer day was simulated using the MUKLIMO_3 urban climate model. The maps of the temperature distribution impressively show the nocturnal characteristics of the urban heat island, but the green spaces distributed across the entire urban area also stand out as extensive cool islands.

The urban climate project in Hanover, which is characterised by its variety of measurement methods and evaluations, provides a comprehensive overview of the urban climate. It thus serves as a basis for future urban planning decisions in order to meet the requirements of a changing climate.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung und Motivation | 9 |
| 2 | Untersuchungsgebiet - Lage der Stadt Hannover | 10 |
| 3 | Daten und Methoden | 11 |
| 4 | Klimatologische Zeitreihen an der Wetterstation Hannover-Langenhagen | 14 |
| 4.1 | Lufttemperatur..... | 14 |
| 4.1.1 | Jahresgang der Temperatur..... | 15 |
| 4.1.2 | Häufigkeitsverteilung der Tagesmaxima | 17 |
| 4.1.3 | Ereignistage der Temperatur..... | 18 |
| 4.2 | Sommerliche Höchsttemperaturen | 20 |
| 4.2.1 | Die Andauerzeiten sommerlicher Hitzeperioden | 21 |
| 4.2.2 | Milde Nächte und Sommernächte | 23 |
| 4.2.3 | Auswirkung des Klimawandels auf die Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden | 23 |
| 4.2.4 | Hohe Temperaturen in Abhängigkeit von der Windrichtung | 24 |
| 4.2.5 | Jahresgang der Tagesmaxima in den Jahren 2017 bis 2020 | 27 |
| 4.3 | Niederschlag | 30 |
| 4.3.1 | Jahresgang der Niederschlagssummen | 30 |
| 4.3.2 | Häufigkeiten einiger Niederschlagskenntage | 32 |
| 4.3.3 | Auftreten von Trockenperioden..... | 33 |
| 4.4 | Sonnenscheindauer | 35 |
| 4.4.1 | Jahresgang der täglichen und monatlichen Sonnenscheindauer | 37 |
| 4.4.2 | Vergleich der astronomisch möglichen mit der mittleren Sonnenscheindauer | 38 |
| 4.5 | Windverhältnisse | 38 |
| 4.5.1 | Windgeschwindigkeit und Windrichtung | 39 |
| 4.5.2 | Anzahl der Tage mit Sturm..... | 43 |
| 5 | Die temporären Messungen in Hannover | 45 |
| 5.1 | Lage der Messstationen | 45 |
| 5.2 | Lufttemperatur..... | 48 |
| 5.2.1 | Temperaturen an den Tunnelstationen | 52 |
| 5.2.2 | Kenntage der Temperatur | 56 |
| 5.2.3 | Tagesgänge der Lufttemperatur..... | 59 |
| 5.3 | Wärmeinseleffekt (UHI)..... | 61 |
| 5.4 | Relative Feuchte | 64 |
| 5.5 | Windverhältnisse | 66 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | Studie mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 | 77 |
| 6.1 | Das Temperaturfeld | 80 |
| 6.2 | Vergleich der Tagesgänge der Temperatur | 84 |
| 7 | Die Profilmessfahrten | 88 |
| 7.1 | Messfahrten auf zwei Routen..... | 89 |
| 7.2 | Temperaturverhältnisse während der Messfahrten | 91 |
| 7.3 | Messkampagne im Juli 2019 | 93 |
| 7.4 | Kartendarstellungen der Messfahrten 2019..... | 95 |
| 7.5 | Differenzendiagramme einiger Messfahrten 2019..... | 100 |
| 8 | Die Straßenbahnmessungen | 104 |
| 8.1 | Verfügbarkeit der Daten | 107 |
| 8.2 | Auswertung der räumlichen Temperaturanomalien zwischen den Streckenabschnitten und der Referenzstation Kattenbrookspark..... | 108 |
| 8.3 | Allgemeine Auswertungen | 108 |
| 8.4 | Jahresgang der räumlichen Temperaturanomalie..... | 110 |
| 8.5 | Tagesgang der räumlichen Temperaturanomalie..... | 111 |
| 8.6 | Abhängigkeit der Temperaturanomalie von der Lufttemperatur | 112 |
| 8.7 | Abhängigkeit der Temperaturanomalie von der Windrichtung | 113 |
| 8.8 | Auswertungen der Temperatur- und relative Feuchtemessungen im Innen- und Außenbereich der Klimatram | 115 |
| 8.9 | Zusammenfassung der Ergebnisse der Tram-Messungen | 117 |
| | Danksagung | 118 |
| | Literaturverzeichnis..... | 119 |
| | Abbildungsverzeichnis | 120 |
| | Tabellenverzeichnis | 124 |

1 Einleitung und Motivation

Die Stadtklimatologie hat erheblich an Bedeutung gewonnen, da die klimatischen und lufthygienischen Änderungen in urbaner Umgebung Anpassungsmaßnahmen durch die städtischen Verantwortlichen erfordern. Durch umwelt- und klimagerechte Stadtplanung muss der Wärmeinseleffekt vermindert werden, um für die Bewohner ein lebenswertes, wenig belastendes Umfeld zu schaffen. Mit der zusätzlichen Erwärmung auf Grund des bestehenden Klimawandels wird das allgemeine Temperaturniveau einer Region nochmals angehoben, wobei der relative Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland allerdings keine Änderung erfährt. Insgesamt werden sich also wärmebelastende Wettersituationen in Andauer und Ausmaß verstärken und dabei die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel weiter verschärfen.

Im Rahmen des vorbeugenden Katastrophenschutzes arbeiten das Land Niedersachsen und der Deutsche Wetterdienst (DWD) auf der Grundlage der Verwaltungsvereinbarung vom 18.01.2013 eng zusammen. Ziel des vorbeugenden Katastrophenschutzes ist es, die Auswirkungen extremer Wetterereignisse zu reduzieren und die Vulnerabilität gefährdeter Bevölkerungsgruppen und Strukturen im Vorfeld zu mindern. Dieses Vorgehen ist in der „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)“ der Bundesregierung bereits dargelegt. Danach ist die Entwicklung einer entsprechenden lokalen Strategie zu den Sektoren der Anpassung notwendig.

Die Untersuchung des Stadtklimas von Hannover erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Stadt Hannover, Fachbereich Umwelt und Stadtgrün, dem Land Niedersachsen und der hannoverschen Verkehrsgesellschaft ÜSTRA.

Von der Wetterstation Hannover-Langenhagen des Deutschen Wetterdienstes stehen vieljährige Klimadaten zur Beschreibung der historischen Zustandsentwicklung zur Verfügung. Um einen städtischen Wärmeinseleffekt herauszuarbeiten, wurden im Mai 2017 drei temporäre Stationen im Stadtbereich von Hannover eingerichtet. Daneben wurden zwei temporäre Stationen im Tunnelsystem des zentralen Umsteigebahnhofs Kröpcke installiert.

Zur Auflösung feinerer Stadtstrukturen wurden in Zusammenarbeit mit der ÜSTRA im Frühsommer 2017 insgesamt drei Straßenbahnen mit Temperatur- und Feuchtemessgeräten ausgestattet. Eine der Straßenbahnen verfügt zusätzlich über Messgeräte im Innenraum. Darüber hinaus wurden mit einem unserer meteorologischen Messfahrzeuge mehrere Profilmessfahrten durch verschiedene Stadtteile Hannovers während sommerlicher Hochdrucklagen durchgeführt. Zudem wurde mit dem Stadtklima-Modell MUKLIMO die Temperaturverteilung an einem Sommertag im Stadtgebiet von Hannover simuliert.

2 Untersuchungsgebiet - Lage der Stadt Hannover

Hannover ist die Landeshauptstadt des Bundeslandes Niedersachsen und liegt im Norddeutschen Tiefland. Zwischen der Calenberger und der Braunschweig-Hildesheimer Lössbörde sowie der Hannoverschen Moorgeest im Norden liegt der Verdichtungsraum Hannover im Tal der Leine (Abb. 2.1). Die Stadtfläche umfasst etwa 350 km² und ist stark strukturiert. Das Stadtbild wird geprägt durch einen großen Anteil an Grünflächen, eine große sowie weitere kleinere Wasserflächen und einige Flussläufe. Viele Stadtbereiche sind durch Grüngürtel voneinander getrennt. Hannover liegt im Mittel etwa 55 m über NHN, die höchsten Erhebungen innerhalb des Stadtgebietes sind der Kronsberg mit 118 m über NHN und der Lindener Berg mit 89 m über NHN.

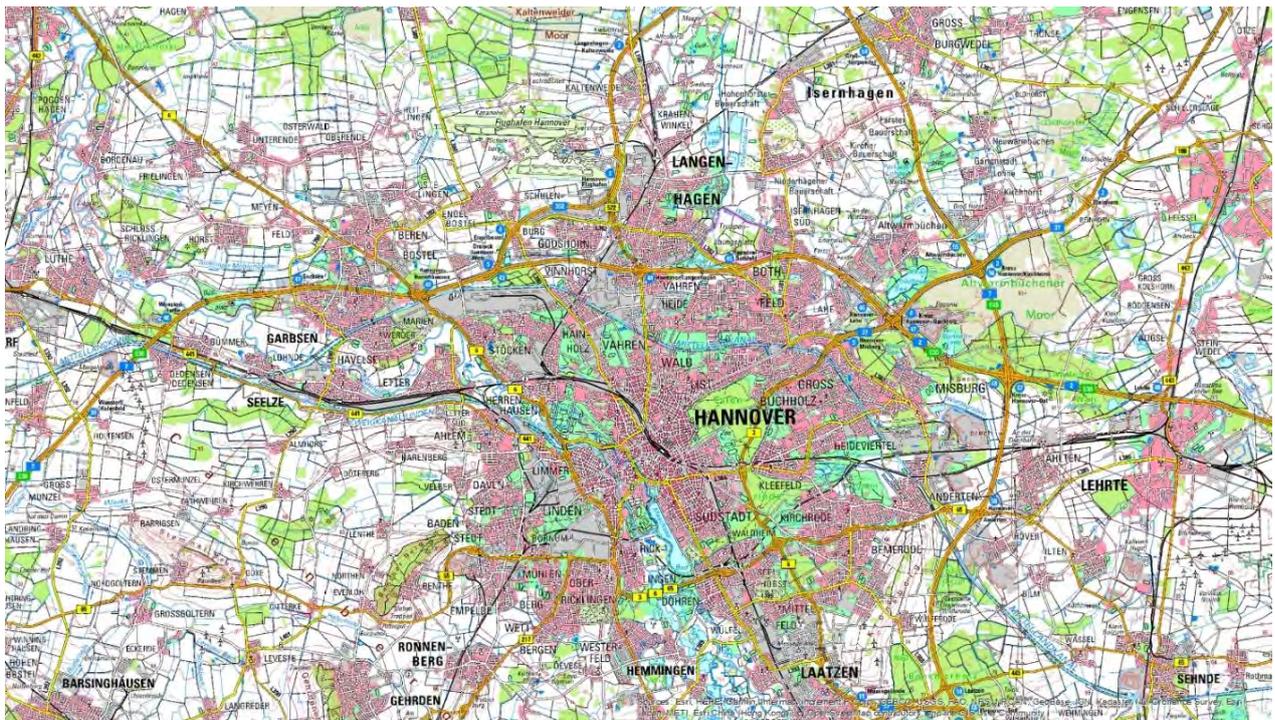


Abb. 2.1: Lage der Stadt Hannover. Quelle: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, © 2022.

3 Daten und Methoden

Für die Untersuchung des Stadtklimas in Hannover standen bislang keine geeigneten meteorologischen Daten zur Verfügung. Die Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes Hannover-Langenhagen (WMO 10338) befindet sich auf dem Gelände des Flughafens von Hannover. Die Station liegt am Stadtrand in einer freien und ungestörten Umgebung, wie es die internationalen Vereinbarungen zur Vergleichbarkeit weltweiter meteorologischer Messungen vorgeben. In Kapitel 4 werden die Klimaverhältnisse an der Station Langenhagen ausführlich betrachtet. Eine weitere meteorologische Station wird vom Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover im Stadtteil Herrenhausen betrieben. Diese Station befindet sich auf dem Universitätsgelände im inneren Stadtbereich, in einer relativ grünen Umgebung und in der Nähe ausgedehnter Park- und Grünflächen. Die Messungen dieser Station werden zum Vergleich herangezogen.

Für dieses Stadtklimaprojekt wurden vom Deutschen Wetterdienst, in Abstimmung mit der Stadt Hannover, Fachbereich Umwelt und Stadtgrün, mehrere Standorte ausgewählt, an denen für die Dauer von dreieinhalb Jahren temporäre Wetterstationen eingerichtet worden sind. Die Ergebnisse der Messungen an den temporären Stationen werden in Kapitel 5 zusammengefasst. Die Lage der Stationen im Stadtgebiet, zeigt Abbildung 3.1. Die Stationen sind markiert mit roten Sternen sowie einem blauen und einem grünen Punkt.

- Mit dem Standort Weidendamm (WD) im Stadtteil Nordstadt ist ein perfekter Platz für eine innerstädtische Wetterstation gefunden worden. Nach dem Ende der Messkampagne für das Stadtklimaprojekt wird der DWD an diesem Standort eine Stadtklimastation einrichten. Damit werden in Hannover auch in Zukunft meteorologische Daten für stadtklimatische Fragestellungen zur Verfügung stehen.
- Der Standort Marianne-Baecker-Allee 11 (MB) liegt in einem Gewerbegebiet im Stadtteil Linden-Süd. Die temporäre Wetterstation steht dort, gut geschützt, auf dem Gelände des Zentralen Kriminaldienstes.
- Am Standort Kattenbrookspark (KP) in Kronsberg, im Stadtteil Bemerode, wurde eine Freifläche in einem Park gewählt, gelegen am südlichen Stadtrand von Hannover, nahe des Messegeländes.

In vielen Großstädten verlaufen die Trassen des öffentlichen Nahverkehrs nicht nur oberirdisch. Daher ist ein weiterer Aspekt in diesem Stadtklimaprojekt die Untersuchung der unterirdischen Temperatur- und Feuchteverhältnisse durch temporäre Messungen im Tunnelsystem.

- Die Straßenbahnhaltestelle Kröpcke, nahe dem Hauptbahnhof, ist ein Knotenpunkt im Straßenbahnnetz mit mehreren unterirdischen Plattformen. In den Ebenen -3 und -5 wurden zwei temporäre Messstationen eingerichtet (K-3, K-5).

Das Stadtklima kann auch mit einem Stadtklimamodell untersucht werden. Hier wurde eine Studie mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO durchgeführt und ein typischer Sommertag im Juli simuliert. Die Ergebnisse werden in Kapitel 6 vorgestellt.

In Ergänzung zu den stationären Messungen sind während der Sommer 2018, 2019 und 2020 Messfahrten im Stadtgebiet von Hannover durchgeführt worden, siehe Kapitel 7. Mit einem Messfahrzeug des DWD wurden Temperatur und relative Luftfeuchte mehrmals täglich auf zwei festen Routen gemessen. Die Messfahrten wurden während sommerlicher Hochdrucklagen vorgenommen. Während dieser Wetterlagen kann sich die städtische Wärmeinsel besonders markant ausprägen.

Ein weiterer wichtiger Teilbereich des Messprogramms waren mobile Messungen mit Straßenbahnen. Der große Vorteil von Straßenbahnmessungen ist eine hohe zeitliche und ausgedehnte räumliche Erfassung meteorologischer Daten im städtischen Lebensraum. Die Straßenbahntrassen ziehen sich durch das gesamte Stadtgebiet und die Fahrpläne sind auf das öffentliche Leben abgestimmt. Im Rahmen des Stadtklimaprojektes wurden drei Straßenbahnwagen mit Messsensorik (Temperatur, Luftfeuchte) im Außenbereich ausgestattet. In einer der Trams wurden auch Innenraummessungen durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 8 dargestellt.



Abb. 3.1: Lage der Messtationen im Stadtgebiet (rote Sterne, grüner und blauer Punkt). Temporäre Stationen: WD = Weidendamm, MB = Marianne-Baecker-Allee, KP = Kattenbrookspark, K-3 = Kröpcke, Ebene -3 und Ebene -5. Permanente Stationen: LH = Langenhagen (DWD), HE = Herrenhausen (IMuK). Karte: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, © 2022.

4 Klimatologische Zeitreihen an der Wetterstation Hannover-Langenhagen

Von der Wetterstation Hannover des Deutschen Wetterdienstes liegen langjährige meteorologische Mess- und Beobachtungsdaten in einer sehr guten Qualität vor. Die Wetterstation befand sich zunächst von März 1935 bis November 1945 auf dem Flughafen Hannover-Vahrenwald. Nach dessen Schließung wurde die Wetterstation im November 1945 auf den Flughafen Hannover-Langenhagen verlegt. In dieser Untersuchung werden die Messungen der homogenen Reihe seit 1946 verwendet.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Parameter Lufttemperatur, Niederschlagshöhe, Sonnenscheindauer (alle gemessen in 2 m über Grund) sowie Wind (gemessen in 10 m über Grund) der Station Hannover-Langenhagen für den Zeitraum 1946-2020 präsentiert. In den Abbildungen und Tabellen sind zum einen die Jahreswerte dargestellt, zum anderen die Mittelwerte der 30-jährigen Normalperioden. Die aktuelle Normalperiode umfasst den Zeitraum 1991-2020. Zum Aufzeigen etwaiger Änderungen werden zudem die davorliegenden Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1981-2010 betrachtet.

4.1 Lufttemperatur

Die Jahresmitteltemperaturen in Hannover-Langenhagen weisen von Jahr zu Jahr markante Schwankungen auf. Der Mittelwert im Zeitraum 1946-2020 beträgt 9,3 °C.

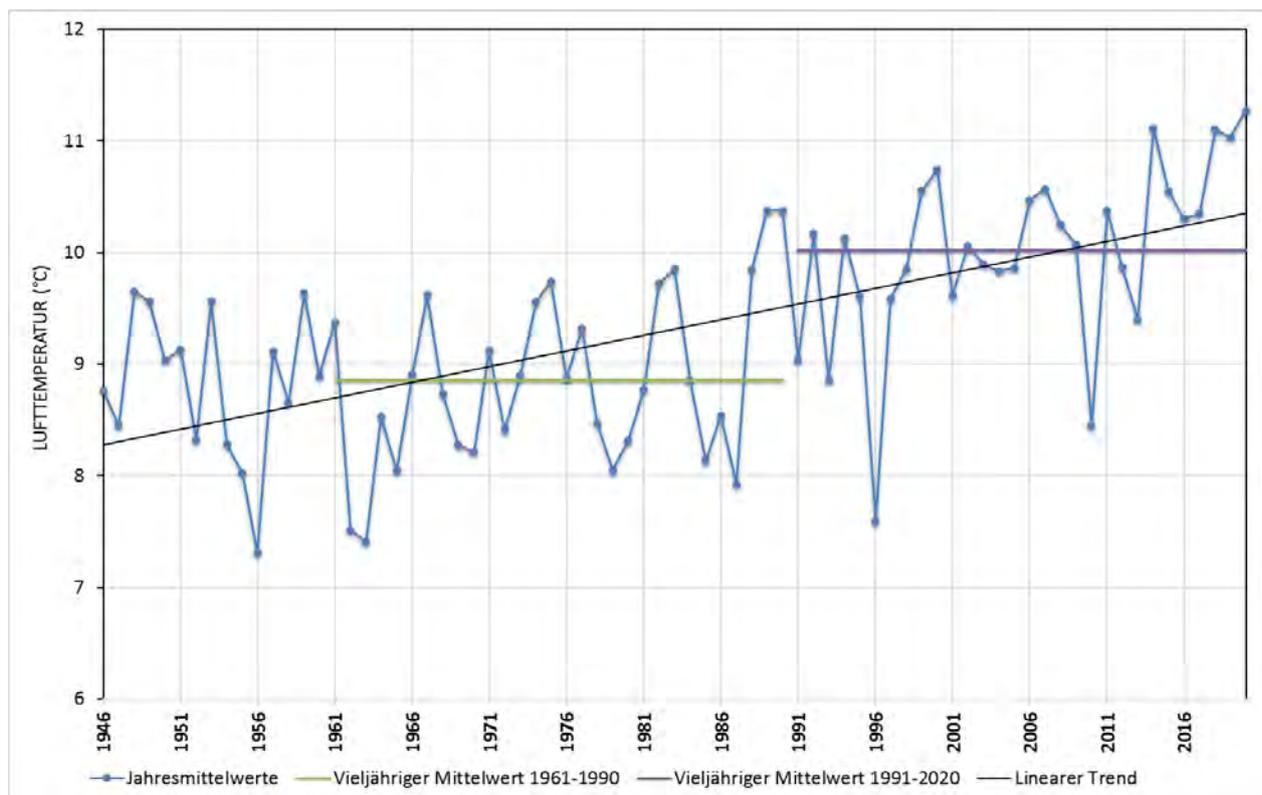


Abb. 4.1: Jahresmitteltemperaturen in Hannover-Langenhagen im Zeitraum 1946-2020 (blauer Graph). Zusätzlich sind die vieljährigen Mittelwerte für die Zeiträume 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (lila) dargestellt.

Das kälteste Jahr war 1956 mit einer Jahresmitteltemperatur von 7,3 °C. Die vier wärmsten Jahre sind alle im Zeitraum 2010 bis 2020 zu finden, wobei mit 11,3 °C 2020 das bisher wärmste Jahr in Hannover-Langenhagen gewesen ist. Insgesamt ist in den hier betrachteten 75 Jahren ein klarer Trend zu höheren Temperaturen zu verzeichnen, wie die Abbildung 4.1 zeigt.

4.1.1 Jahresgang der Temperatur

Abbildung 4.2 zeigt den mittleren Jahresgang der Lufttemperatur an der Station Hannover-Langenhagen für die beiden vieljährigen Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020. Es sind jeweils die monatlichen mittleren Tagesmittelwerte, Tagesmaximum und Tagesminimum dargestellt. Die zugehörigen Werte sowie weitere Zeiträume sind in Tabelle 4.1 zu finden. Der Temperaturverlauf zeigt einen für unsere Breiten typischen Jahresgang mit einem Maximum im Sommer und einem Minimum im Winter. Die Jahresmitteltemperatur des Zeitraumes 1991-2020 liegt bei 10,0 °C. Dieser Wert ist um 1,1 K höher als noch im Zeitraum 1961-1990. Im Jahresverlauf schwankt das mittlere Tagesmittel zwischen 2,1 °C im Januar und 18,7 °C im Juli, die mittlere Jahresschwankung für den Zeitraum 1991-2020 beträgt 16,6 K. Bei einem Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 wird ersichtlich, dass sowohl die monatlichen Tagesmitteltemperaturen, als auch die Tagesmaxima und Tagesminima in jedem Monat angestiegen sind, siehe Tabelle 4.1. Die stärkste

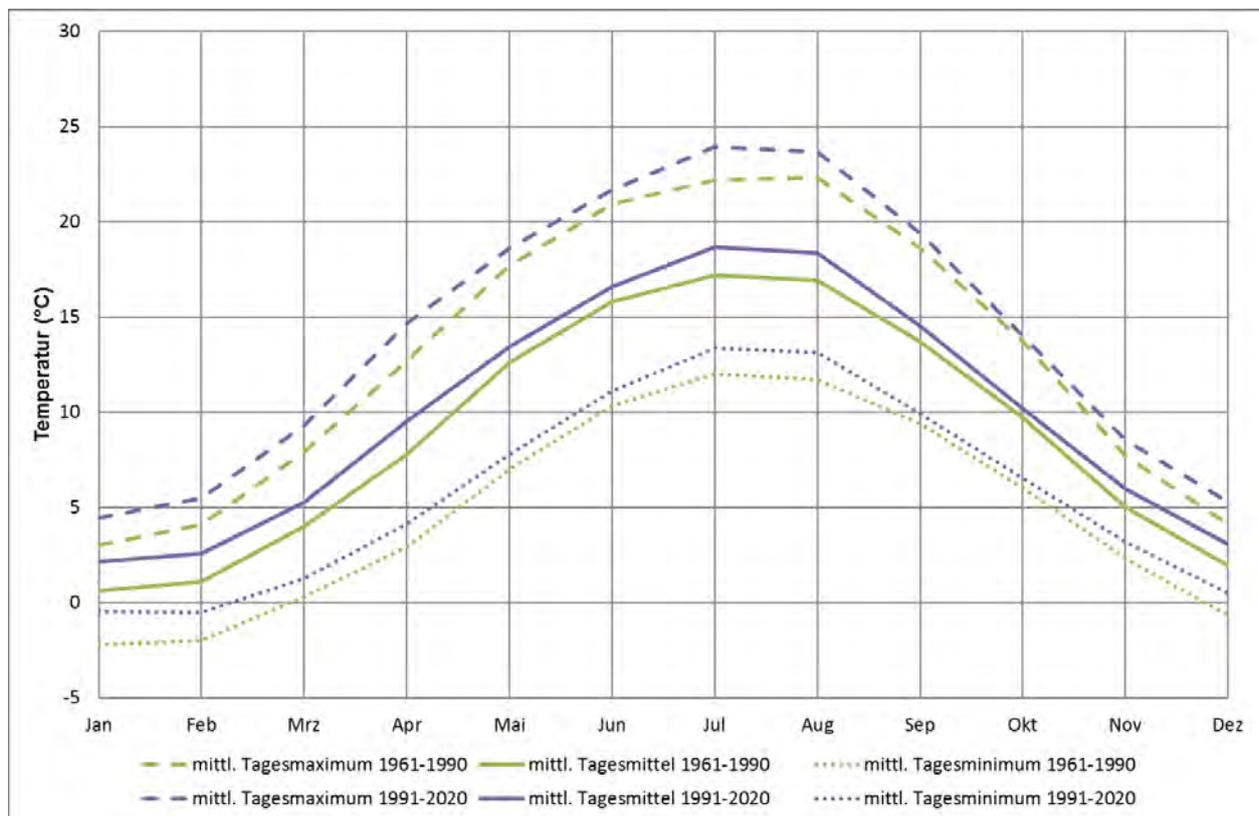


Abb. 4.2: Jahresgang der monatlichen mittleren Tageshöchsttemperaturen (- - -), Tagesmitteltemperaturen (- -) und mittleren Tagestiefsttemperaturen (...) in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (lila).

Erhöhung mit 1,7 K (Tagesmittel) ist dabei im April und die geringste Erhöhung mit 0,5 K (Tagesmittel) im Oktober zu verzeichnen.

Der höchste Monatsmittelwert des Messzeitraumes 1946-2020 war 22,3 °C (Juli 2006), der niedrigste Wert -9,3 °C (Februar 1956). Die mittleren täglichen Tagesmaxima lagen im Zeitraum 1991-2020 zwischen 4,4 °C im Januar und 23,9 °C im Juli. Das höchste Tagesmaximum betrug 37,9 °C, gemessen am 25.07.2019. Die mittleren täglichen Tagesminima lagen im Zeitraum 1991-2020 zwischen -0,5 °C im Januar und Februar sowie 13,3 °C im Juli. Von November bis März kann auch strenger Frost mit Temperaturen im zweistelligen Minusbereich vorkommen. Das niedrigste gemessene Tagesminimum der Lufttemperatur war -24,3 °C, registriert am 16.02.1956.

Tab. 4.1: Monatswerte der Lufttemperatur (°C) in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020. Absolute Extremwerte aus dem Zeitraum 1946-2020.

| Parameter | Jan | Feb | Mrz | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr | Zeitraum |
|-------------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-----------|
| absolutes Maximum | 15,7 | 18,3 | 24,4 | 29,7 | 32,1 | 35,7 | 37,9 | 37,4 | 33,0 | 27,4 | 20,6 | 16,3 | 37,9 | 1946-2020 |
| mittleres Tagesmaximum | 3,0 | 4,1 | 7,9 | 12,7 | 17,7 | 20,9 | 22,2 | 22,3 | 18,6 | 13,7 | 7,7 | 4,1 | 12,9 | 1961-1990 |
| | 3,8 | 4,7 | 8,7 | 13,0 | 18,2 | 20,6 | 22,8 | 22,9 | 18,5 | 13,4 | 7,7 | 4,9 | 13,3 | 1971-2000 |
| | 4,0 | 4,9 | 8,9 | 13,9 | 18,5 | 20,9 | 23,5 | 23,2 | 18,9 | 13,7 | 8,1 | 4,5 | 13,6 | 1981-2010 |
| | 4,4 | 5,5 | 9,3 | 14,7 | 18,6 | 21,7 | 23,9 | 23,7 | 19,4 | 14,0 | 8,5 | 5,3 | 14,1 | 1991-2020 |
| mittleres Tagesmittel | 0,6 | 1,1 | 4,0 | 7,8 | 12,6 | 15,8 | 17,2 | 16,9 | 13,7 | 9,7 | 5,0 | 1,9 | 8,9 | 1961-1990 |
| | 1,4 | 1,7 | 4,8 | 8,1 | 13,0 | 15,7 | 17,7 | 17,5 | 13,7 | 9,5 | 5,1 | 2,7 | 9,2 | 1971-2000 |
| | 1,6 | 1,9 | 5,0 | 8,9 | 13,4 | 16,0 | 18,4 | 17,9 | 14,1 | 9,9 | 5,5 | 2,3 | 9,6 | 1981-2010 |
| | 2,1 | 2,6 | 5,3 | 9,5 | 13,5 | 16,6 | 18,7 | 18,4 | 14,5 | 10,2 | 6,0 | 3,0 | 10,0 | 1991-2020 |
| mittleres Tagesminimum | -2,2 | -2,0 | 0,3 | 2,9 | 7,0 | 10,3 | 12,0 | 11,7 | 9,4 | 6,0 | 2,3 | -0,7 | 4,8 | 1961-1990 |
| | -1,3 | -1,4 | 1,1 | 3,2 | 7,3 | 10,5 | 12,6 | 12,2 | 9,5 | 5,9 | 2,4 | 0,2 | 5,2 | 1971-2000 |
| | -1,1 | -1,1 | 1,2 | 3,8 | 7,8 | 10,8 | 13,1 | 12,9 | 9,9 | 6,3 | 2,8 | -0,2 | 5,5 | 1981-2010 |
| | -0,5 | -0,5 | 1,3 | 4,2 | 7,8 | 11,1 | 13,3 | 13,1 | 9,9 | 6,5 | 3,2 | 0,5 | 5,8 | 1991-2020 |
| absolutes Minimum | -22,4 | -24,3 | -18,3 | -7,4 | -3,2 | 0,3 | 3,3 | 3,3 | -1,3 | -6,6 | -17,1 | -20,9 | -24,3 | 1946-2020 |

Tabelle 4.2 gibt die Tagesmitteltemperaturen für die Jahreszeiten an. Speziell im Winter fällt auf, dass die Erhöhung der Lufttemperatur zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1971-2000 sowie zwischen 1981-2010 und 1991-2020 deutlich stärker ausfällt als zwischen 1971-2000 und 1981-2010. In den Sommermonaten ist eine gleichmäßige Erhöhung der Lufttemperatur über die verschiedenen Zeiträume zu beobachten. Vergleicht man das mittlere Tagesmittel der Lufttemperatur der einzelnen Jahreszeiten der Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020, ist die größte Erwärmung im Winter mit 1,4 K und die geringste im Herbst mit 0,7 K zu verzeichnen. Im Frühling und Sommer liegt die Erhöhung bei 1,2 bzw. 1,3 K.

Tab. 4.2: Mittlere Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (°C) in Hannover-Langenhagen für die Jahreszeiten (Frühling = März, April, Mai; Sommer = Juni, Juli, August; Herbst = September, Oktober, November; Winter = Dezember, Januar, Februar) und die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020.

| Frühling | Sommer | Herbst | Winter | Zeitraum |
|----------|--------|--------|--------|-----------|
| 8,2 | 16,6 | 9,5 | 1,2 | 1961-1990 |
| 8,6 | 17,0 | 9,4 | 2,0 | 1971-2000 |
| 9,1 | 17,4 | 9,9 | 2,0 | 1981-2010 |
| 9,4 | 17,9 | 10,2 | 2,6 | 1991-2020 |

4.1.2 Häufigkeitsverteilung der Tagesmaxima

Abbildung 4.3 zeigt die mittlere Häufigkeitsverteilung der Tagesmaxima der Temperatur an der Station Hannover-Langenhagen für die Referenzzeiträume 1961-1990 und 1991-2020. Bei der Häufigkeitsverteilung der Tageshöchsttemperaturen sind zwei Maxima zu erkennen. Das aus der Normalverteilung berechnete erste Maximum lag im Zeitraum 1991-2020 bei etwa 8,4 °C und damit 1 K höher als im Zeitraum 1961-1990. Auch das zweite Maximum lag mit 20,8 °C im Zeitraum 1991-2020 1 K höher als in dem früheren Zeitraum (siehe Tabelle in Abb. 4.3).

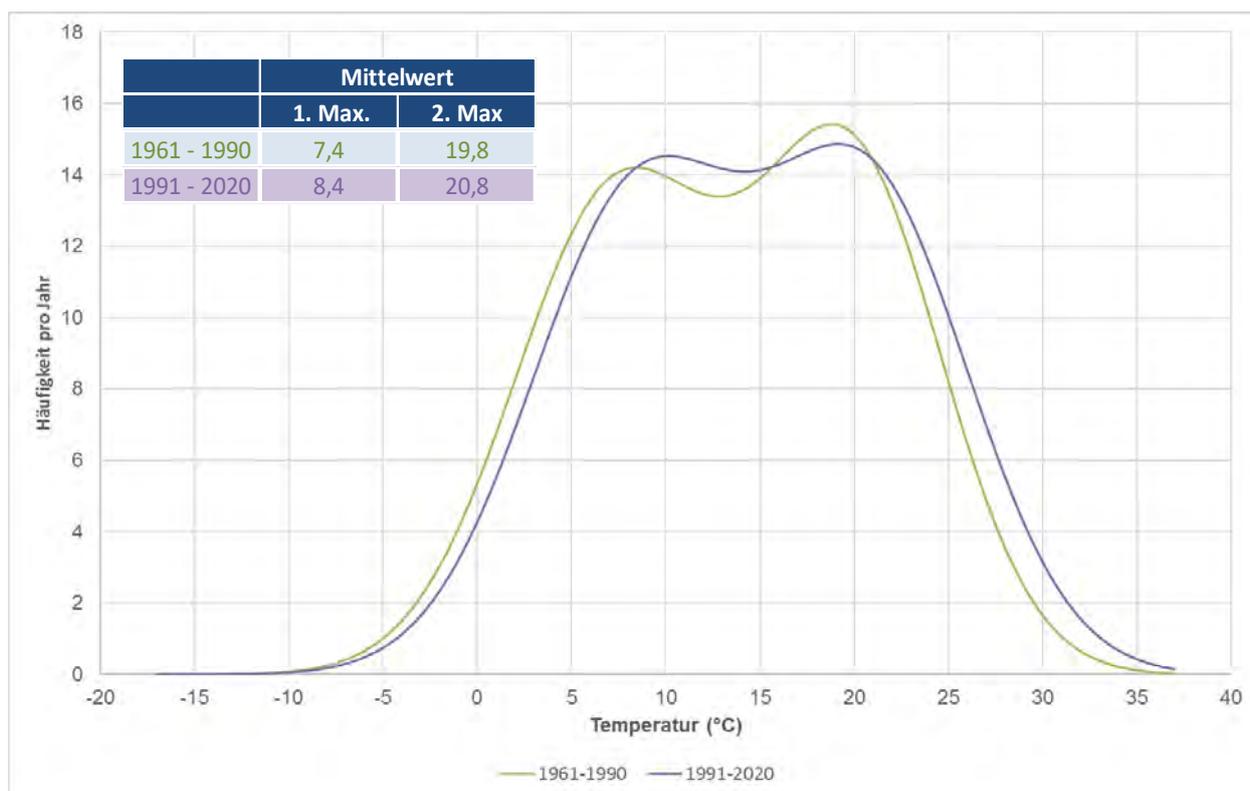


Abb. 4.3: Normalverteilung der Tagesmaxima der Temperatur für die Zeiträume 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (lila). Die Tabelle oben links gibt die Temperaturwerte der Maxima der zweigipfligen Häufigkeitsverteilungen für die beiden Zeiträume an.

Insgesamt ist eine Verschiebung hin zu höheren Tagesmaxima zu erkennen. In gleichem Maße kommen die niedrigen Tagesmaxima seltener vor. Dies spiegelt sich auch in den Ereignistagen wider, also Tage an denen bestimmte Schwellenwerte der Lufttemperatur über- bzw. unterschritten werden. Diese werden im Folgenden näher betrachtet.

4.1.3 Ereignistage der Temperatur

Die Tabelle 4.3 gibt die mittleren monatlichen Anzahlen für verschiedene Temperatur-Ereignistage an der Station Hannover-Langenhagen an. Dabei ist zu erwähnen, dass die Ereignistage erst seit 1951 erfasst werden. Abbildung 4.4 zeigt eine grafische Darstellung der Differenz der Ereignistage vom Referenzzeitraum 1991-2020 zum Referenzzeitraum 1961-90. Nach dem vieljährigen Mittel (1991-2020) ist mit 36 Sommertagen (Tagesmaximum der Lufttemperatur mindestens 25 °C) pro Jahr zu rechnen, welche sich vorrangig auf die Monate Juni, Juli und August verteilen, aber auch bereits im April und noch im Oktober vorkommen können. Im Zeitraum 1961-1990 waren es noch 10 Tage weniger. Allgemein ist die Anzahl der Sommertage von Jahr zu Jahr sehr variabel, so war im Juli 2006 mit 27 Sommertagen fast jeder Tag ein Sommertag, hingegen gab es im Juli 2000 nur einen Sommertag. Das Jahr mit den bisher meisten Sommertagen war mit großem Abstand 2018, hier gab es 78 Sommertage, davon bereits 11 im Mai. Das Schlusslicht bildet das Jahr 1962 mit nur 6 Sommertagen.

Hitzetage (Tagesmaximum der Lufttemperatur mindestens 30 °C) treten wesentlich seltener auf. Sie kommen ausschließlich von Mai bis September vor mit einem Maximum im Juli. Die mittlere Anzahl hat sich in den vergangenen Jahrzehnten von 4 Tagen (1961-1990) auf rund 8 Tage (1991-2020) verdoppelt. Erwähnenswert sind die Jahre 2003 und 1994 mit jeweils 17 sowie das Jahr 2018 mit insgesamt 22 Hitzetagen. In manchen Jahren gab es gar keinen Hitzetag, wie beispielsweise 1993 oder 1988.

Die sogenannten Tropennächte (Nachtminimum der Lufttemperatur sinkt nicht unter 20 °C) kamen im Zeitraum 1991-2010 im Mittel einmal pro Jahr vor, insgesamt gab es in diesen 30 Jahren 32 Tropennächte. Damit hat sich die Anzahl der Tropennächte im Vergleich zum vorangegangenen Zeitraum 1981-2010 fast verdoppelt. 2010 ist mit insgesamt 5 Tropennächten das Jahr mit der bisher größten Anzahl, gefolgt von 2018 mit 4 Tropennächten. Im Zeitraum 1961-1990 gab es nur ca. jedes 6. Jahr eine Tropennacht (insgesamt 5 Tropennächte in 30 Jahren). Zwischen 1951 und 1964 wurde nicht eine Tropennacht registriert.

Bei den Frosttagen (Tagesminimum kleiner als 0 °C) und Eistagen (Tagesmaximum kleiner als 0 °C) hat es in den letzten Jahrzehnten einen auffälligen Rückgang gegeben. So gab es im Zeitraum 1961-1990 im Mittel noch 80 Frost- und 21 Eistage im Jahr, wohingegen im Zeitraum 1991-2020 im Mittel nur noch 64 Frost- und 15 Eistage im Jahr registriert wurden. Frosttage treten vorrangig von Dezember bis Februar auf, können aber auch bereits im September und noch im Mai vorkommen.

Die Eistage beschränken sich auf die Monate November bis März mit einem Maximum im Januar. Die meisten Frosttage seit 1951 gab es im Jahr 1996 mit 113 Tagen, insgesamt waren es sechs Jahre mit jährlich mehr als 100 Frosttagen.

Tab. 4.3: Ereignistage der Lufttemperatur pro Monat in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990 (grün), 1971-2000 (hellblau), 1981-2010 (dunkelblau) und 1991-2020 (lila). Hinweis: 0,0 = mittlere Anzahl kleiner als 0,05 Tage/Monat.

| Ereignistage | Jan | Feb | Mrz | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr | Zeitraum |
|--|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|------|-----------|
| mittlere Anzahl der Sommertage (Tagesmaximum ≥ 25 °C) | | | | 0,3 | 2,2 | 5,7 | 8,5 | 7,3 | 1,8 | 0,2 | | | 26,0 | 1961-1990 |
| | | | | 0,4 | 3 | 5,2 | 9,7 | 8,9 | 1,6 | 0,2 | | | 29,0 | 1971-2000 |
| | | | | 0,5 | 2,9 | 5,8 | 11,3 | 9,6 | 2,3 | 0,1 | | | 32,5 | 1981-2010 |
| | | | | 0,6 | 3,1 | 6,8 | 11,7 | 10,6 | 2,97 | 0,2 | | | 36,0 | 1991-2020 |
| mittlere Anzahl der Hitzetage (Tagesmaximum ≥ 30 °C) | | | | | 0,0 | 0,6 | 1,9 | 1,5 | 0,0 | | | | 4,0 | 1961-1990 |
| | | | | | 0,0 | 0,8 | 2,4 | 2,0 | 0,0 | | | | 5,2 | 1971-2000 |
| | | | | | 0,1 | 0,8 | 3,0 | 2,3 | 0,1 | | | | 6,3 | 1981-2010 |
| | | | | | 0,1 | 1,1 | 3,3 | 2,9 | 0,3 | | | | 7,7 | 1991-2020 |
| mittlere Anzahl der Tropennächte (Nachtminimum ≥ 20 °C) | | | | | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | | | | | 0,2 | 1961-1990 |
| | | | | | | 0,1 | 0,1 | 0,0 | | | | | 0,3 | 1971-2000 |
| | | | | | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,0 | | | | 0,6 | 1981-2010 |
| | | | | | 0,0 | 0,2 | 0,5 | 0,3 | 0,0 | | | | 1,1 | 1991-2020 |
| mittlere Anzahl der Frosttage (Tagesminimum < 0 °C) | 17,7 | 16,7 | 13,1 | 5,7 | 0,6 | | | | 0,1 | 2,2 | 8,3 | 15,4 | 79,9 | 1961-1990 |
| | 15,7 | 14,9 | 11,1 | 5,6 | 0,6 | | | | 0,1 | 2,7 | 8,1 | 13,2 | 71,9 | 1971-2000 |
| | 15,1 | 14,8 | 10,8 | 4,6 | 0,2 | | | | 0,0 | 2,3 | 7,3 | 14,8 | 69,8 | 1981-2010 |
| | 14,5 | 14,0 | 10,7 | 4,1 | 0,3 | | | | 0,0 | 2,2 | 6,2 | 12,2 | 64,3 | 1991-2020 |
| mittlere Anzahl der Eistage (Tagesmaximum < 0 °C) | 7,3 | 5,8 | 1,1 | | | | | | | | 1,1 | 5,7 | 21,1 | 1961-1990 |
| | 5,7 | 5,1 | 0,7 | | | | | | | | 0,9 | 4,3 | 16,7 | 1971-2000 |
| | 6,3 | 4,7 | 0,6 | | | | | | | | 0,9 | 5,3 | 17,8 | 1981-2010 |
| | 5,97 | 3,6 | 0,47 | | | | | | | | 0,57 | 3,93 | 14,5 | 1991-2020 |

Erwähnenswert ist der Winter 1962/1963 in dem es fast nur Frosttage gab (Dezember 1962: 24 FT, Januar 1963: 31 FT, Februar 1963: 28 FT). Die wenigsten Frosttage wies das Jahr 2020 auf mit nur 30 Tagen. Die meisten Eistage gab es 1963 mit 66 Tagen (davon jeweils 25 im Januar und Februar), 1974 und 2020 wurde nicht ein Eistag verzeichnet.

Die Abbildung 4.4 zeigt anschaulich, wie sich die mittleren Anzahlen der Temperatur-Ereignistage im Zeitraum 1991-2020 im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 verändert haben. Insgesamt ist ein deutlicher Trend hin zu höheren Temperaturen zu erkennen, wie es schon bei den Jahresmitteltemperaturen in der Abbildung 4.1 zu sehen war. Dieser zeigt sich sowohl in der Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von 8,9 °C auf 10,0 °C aber auch in der erhöhten Anzahl an Sommertagen und Hitzetagen, sowie der reduzierten Anzahl an Frost- und Eistagen.

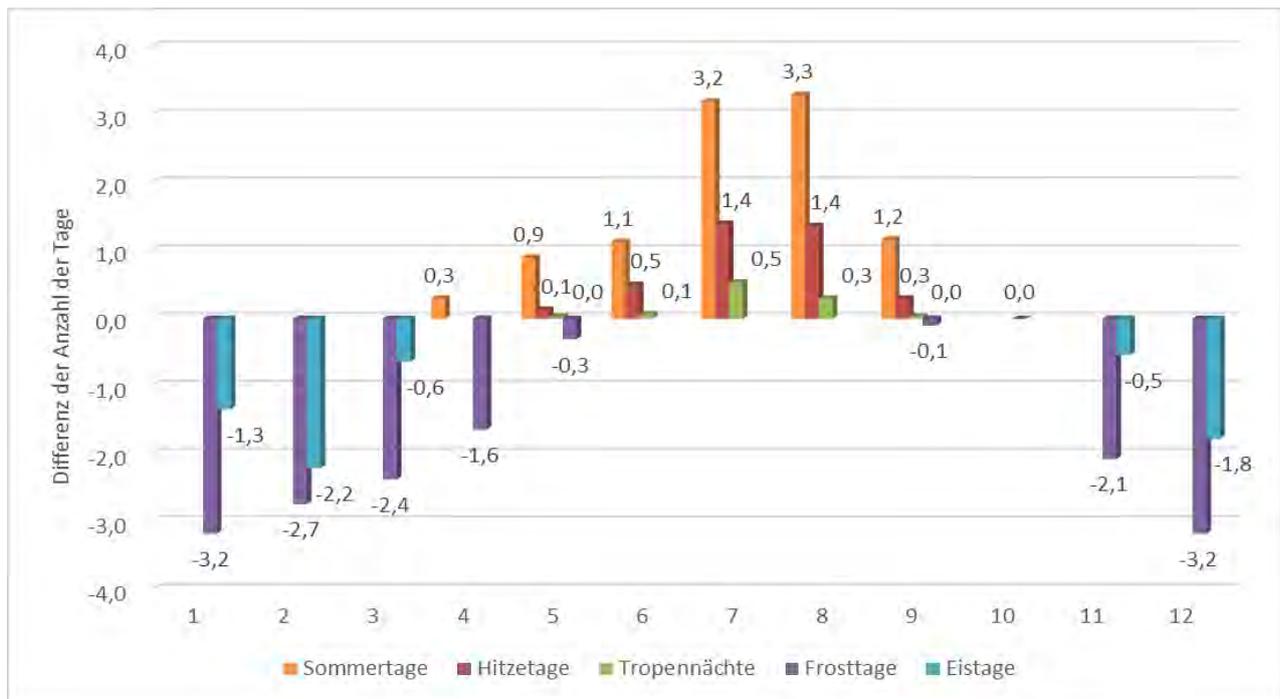


Abb. 4.4: Differenzen der monatlichen Anzahlen der Ereignistage der Temperatur in Hannover-Langenhagen zwischen den Referenzzeiträumen 1991-2020 und 1961-1990.

4.2 Sommerliche Höchsttemperaturen

Im Zeitraum Januar 1946 bis Dezember 2020 hat es in Hannover-Langenhagen insgesamt 409 Hitzetage, also Tage mit Höchsttemperaturen von mindestens 30 °C, gegeben; insgesamt 17 Mal erreichten die Höchsttemperaturen sogar 35 °C und mehr. Während der Hitzewelle im Juli 2019 wurden in ganz Deutschland und auch in Niedersachsen verbreitet neue Temperaturrekorde erreicht. In Langenhagen stieg die Temperatur am 25.07.2019 bis auf 37,9 °C. Das ist der zweithöchste Wert in der hannoverschen Temperatur-Hitliste. Das absolute Maximum beträgt 38,0 °C; es wurde am 21.08.1943 an der damaligen Wetterstation in Vahrenwald gemessen. In der vorliegenden Auswertung werden allerdings ausschließlich Daten der Station Hannover-Langenhagen aus dem Zeitraum 01.01.1946 bis 31.12.2020 betrachtet. Zwar beginnt die Messreihe (damals noch in Hannover-Vahrenwald) schon 1936, aber aus den Jahren 1941, 1942 und 1945 stehen keine Daten zur Verfügung. Lückenlose Daten aus Langenhagen gibt es erst seit November 1945.

Die Sommermonate in Norddeutschland können sehr unterschiedlich sein, zwischen kühlen und niederschlagsreichen (z.B. 2017 und 1981) und heißen und trockenen Sommern (z.B. 1959 und 2018) ist alles möglich. Insgesamt sind die Sommer aber schon seit geraumer Zeit immer wärmer geworden. Als Marker für die Sommergüte können die Mitteltemperatur des Sommers und auch die Anzahl der Hitzetage genommen werden. In Hannover lag im Zeitraum 1951 bis 2020 die jährliche Anzahl der Hitzetage zwischen 0 und 22, siehe Abbildung 4.5. Relativ wenige Hitzetage traten in den 1950er und 60er Jahren auf. Immer mal wieder gab es auch Jahre, in denen die Temperaturmarke 30 °C an keinem einzigen Tag erreicht wurde, zuletzt war das im Jahr 1993 der Fall. Allerdings gab es seit 2010 alleine sechs Jahre mit

mindestens 10 Hitzetagen. Mit Abstand am häufigsten wurden Hitzetage im Juli und August registriert; nur ganz vereinzelt gab es schon im Mai und auch noch im September Höchsttemperaturen über 30 °C. Im Zeitraum 1991-2020 traten im Mittel jährlich 7,7 Hitzetage auf.

In der Abbildung 4.5 ist die gemittelte Temperatur der Monate Juni, Juli und August (Sommertemperatur) eingetragen, zum Vergleich auch die Jahresmitteltemperatur. Beide Durchschnittstemperaturen zeigen große Schwankungen von Jahr zu Jahr, aber auch einen linearen Anstieg um etwa 2 Grad über die vergangenen 70 Jahre.

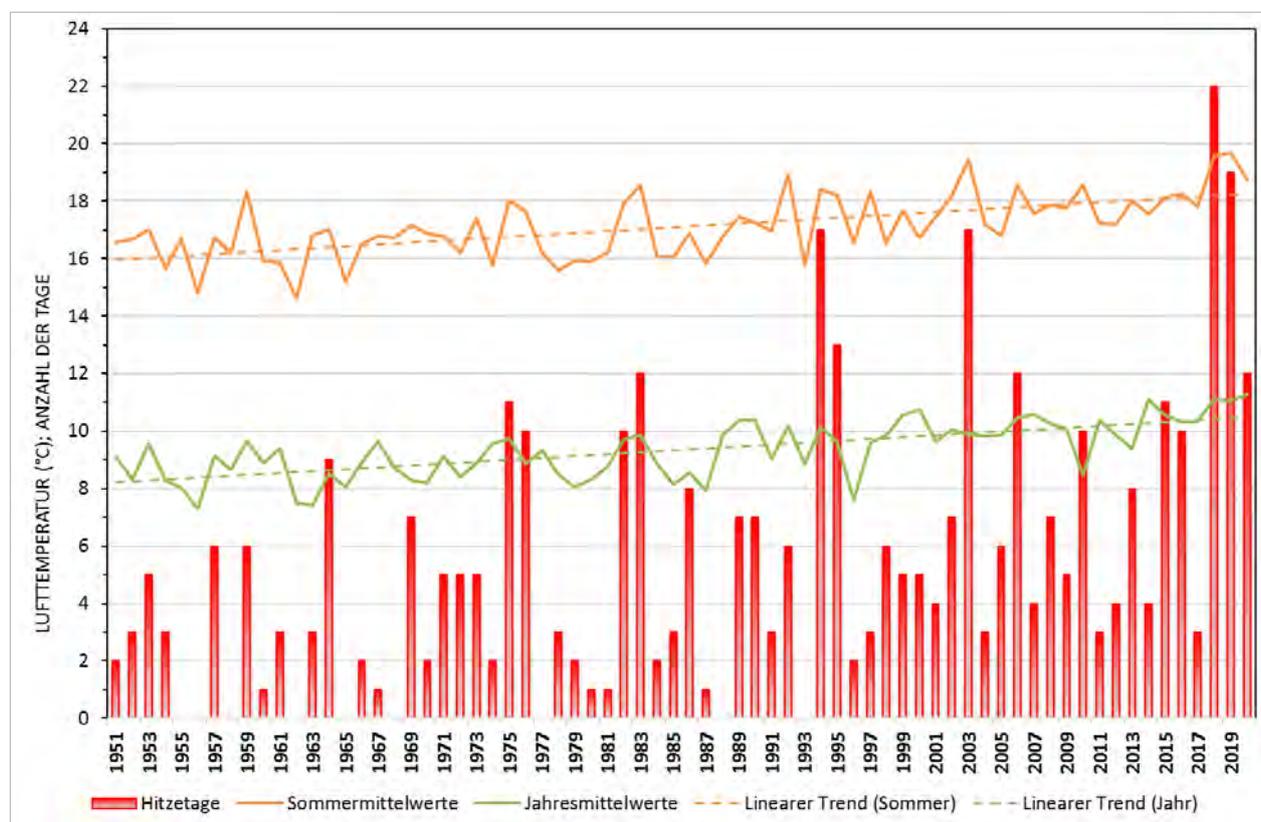


Abb. 4.5: Mitteltemperaturen pro Jahr sowie im Sommer (Juni, Juli, August) als farbige Graphen. Jährliche Anzahl der Hitzetage ($T_x \geq 30 \text{ °C}$) als rote Balken. Station: Hannover-Langenhagen, Zeitraum: 1951-2020.

4.2.1 Die Andauerzeiten sommerlicher Hitzeperioden

Neben der Häufigkeit sehr hoher Temperaturen an einem Ort ist auch die Andauer sommerlicher Hitzeperioden von Interesse. Hitzewellen, die über mehrere Tage anhalten, sind für Menschen, Tiere und Pflanzen besonders belastende Extremereignisse.

Für diese spezielle Untersuchung wurde aus den täglichen Höchsttemperaturen von Hannover-Langenhagen (Zeitraum 1946-2020) die Andauer des Auftretens bestimmter Höchsttemperaturen bestimmt.

Die Tabelle 4.4 gibt die Häufigkeit des Auftretens von Andauern zwischen 3 und 25 Tagen an. Die Andauerzeiten wurden berechnet für die drei Schwellenwerte 25, 28

bzw. 30 °C, jeweils für den langen Zeitraum 1946-2020 und den aktuellen 30-jährigen Zeitraum 1991-2020. In der Tabelle 4.5 sind die daraus berechneten Wiederkehrzeiten (in Jahren) angegeben.

Tab. 4.4: Häufigkeit des Auftretens (Anzahl) mehrtägiger Hitzeperioden in Hannover-Langenhagen für drei Schwellenwerte der Tageshöchsttemperatur Tx ($\geq 25 / \geq 28 / \geq 30$ °C); Bezugszeiträume: 1946-2020; 1991-2020. „-“ kein Ereignis; Blaue Markierung: Beispiel fünftägige Andauer.

| Tx | Zeitraum | Andauer (Tage) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|----------------|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|-----------|
| | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20-25 | ≥ 26 |
| ≥ 25 °C | 1946-2020 | 108 | 64 | 37 | 29 | 17 | 11 | 9 | 6 | 2 | 5 | - | 2 | - | 4 | - | - | 1 | - | 1 |
| | 1991-2020 | 46 | 36 | 21 | 11 | 9 | 5 | 4 | 4 | 1 | 2 | - | 1 | - | 3 | - | - | 1 | - | 1 |
| ≥ 28 °C | 1946-2020 | 50 | 19 | 14 | 6 | 6 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - |
| | 1991-2020 | 26 | 10 | 6 | 5 | 3 | 2 | - | 1 | 1 | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - |
| ≥ 30 °C | 1946-2020 | 20 | 9 | 5 | 2 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 1991-2020 | 12 | 4 | 4 | 2 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tab. 4.5: Wiederkehrzeiten (Jahre) mehrtägiger Hitzeperioden in Hannover-Langenhagen für drei Schwellenwerte der Tageshöchsttemperatur Tx ($\geq 25 / \geq 28 / \geq 30$ °C); Bezugszeiträume: 1946-2020; 1991-2020. „-“ kein Ereignis; Blaue Markierung: siehe obige Tab. 4.4.

| Tx | Zeitraum | Andauer (Tage) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|----------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|----|------|----|------|------|-------|-----------|
| | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20-25 | ≥ 26 |
| ≥ 25 °C | 1946-2020 | 0,7 | 1,2 | 2,0 | 2,6 | 4,4 | 6,8 | 8,3 | 12,5 | 37,5 | 15,0 | - | 37,5 | - | 18,8 | - | 75,0 | 75,0 | - | 75,0 |
| | 1991-2020 | 0,7 | 0,8 | 1,4 | 2,7 | 3,3 | 6,0 | 7,5 | 7,5 | 30,0 | 15,0 | - | 30,0 | - | 10,0 | - | - | 30,0 | - | 30,0 |
| ≥ 28 °C | 1946-2020 | 1,5 | 4,0 | 5,4 | 13,0 | 13,0 | 38,0 | 75,0 | 75,0 | 75,0 | 75,0 | - | 75,0 | - | 75,0 | - | - | - | - | - |
| | 1991-2020 | 1,2 | 3,0 | 5,0 | 6,0 | 10,0 | 15,0 | - | 30,0 | 30,0 | - | - | 30,0 | - | 30,0 | - | - | - | - | - |
| ≥ 30 °C | 1946-2020 | 3,8 | 8,3 | 15,0 | 37,5 | 75,0 | 75,0 | 75,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 1991-2020 | 2,5 | 7,5 | 7,5 | 15,0 | 30,0 | 30,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Als Beispiel für die Erläuterung der Tabellen 4.4 und 4.5 wird hier eine fünftägige Andauerzeit für die drei Höchsttemperatur-Schwellenwerte 25 / 28 / 30 °C gewählt. Dieser Fall ist in den Tabellen blau markiert. Die jeweiligen Häufigkeiten und Wiederkehrzeiten für kürzere und längere Andauern der Hitzeperioden können den Tabellen entnommen werden.

Im langen Zeitraum 1946-2020 kamen Hitzeperioden mit Tageshöchsttemperaturen von mindestens 25 °C (das entspricht dem Kenntag Sommertag) an fünf Folgetagen insgesamt 37 Mal vor, siehe Tab. 4.4. Diese 37 Ereignisse traten übrigens in nur 31 Jahren auf, da es in einigen Jahren mehrere 5-tägige Hitzeperioden gab. Bezogen auf diesen Zeitraum ereignete sich damit eine 5-tägige Hitzeperiode im Durchschnitt alle 2,0 Jahre. Werden lediglich die letzten 30 Jahre (1991-2020) betrachtet, gab es im Durchschnitt schon alle 1,4 Jahre ein derartiges Ereignis. Eine ununterbrochene Folge von Sommertagen über mehr als zwei Wochen tritt selten auf (6 Mal in 75 Jahren). Die bisher längste Andauerperiode von Tageshöchsttemperaturen ≥ 25 °C betrug 26 Tage, aufgetreten war diese lange Hitzeperiode im Sommer 2018.

Tageshöchsttemperaturen von mindestens 28 °C an fünf Tagen in Folge wurden bisher 14 Mal erfasst. Damit kam eine derartige Hitzewelle im langen Zeitraum alle

5,4 Jahre vor, in den letzten 30 Jahren bereits alle 5,0 Jahre. Selten wurden Andauern von mehr als 10 Tagen beobachtet (4 Mal in 75 Jahren). Die längste Hitzeperiode mit $T_x \geq 28 \text{ °C}$ trat im Sommer 2018 auf, sie dauerte 16 Tage.

Wird als Tagesmaximum der Schwellenwert von 30 °C gewählt (das entspricht dem Kenntag Hitzetag), kam eine 5-tägige Andauer seit 1946 nur fünf Mal vor, das entspricht einer Wiederkehrzeit von 17 Jahren. Davon traten alleine vier Ereignisse in den letzten 30 Jahren auf (Wiederkehrzeit: 7,5 Jahre). Selten dauerten diese extremen Hitzewellen länger als 5 Tage (5 Mal), maximal waren es bisher 9 Tage (1975).

Diese Auswertung verdeutlicht, dass sommerliche Hitzeperioden häufiger geworden sind. Im Zuge des Klimawandels haben die Häufigkeit und die Andauerperioden von Sommertagen und Hitzetagen im Zeitraum 1991-2020 merklich zugenommen.

4.2.2 Milde Nächte und Sommernächte

Der allgemeine Temperaturanstieg zeigt sich auch in einer Anhebung der Nachttemperaturen. Die Häufigkeit von Tropennächten (Minimumtemperatur der Nacht $\geq 20 \text{ °C}$) wurde bereits im Kapitel 4.1 dargestellt. Hier werden zusätzlich ‚milde Nächte‘, in denen es nicht unter 18 °C und ‚Sommernächte‘, in denen es nicht unter 15 °C abkühlt, betrachtet.

Milde Nächte hat es vor 1990 nur recht selten gegeben, im Durchschnitt war es weniger als eine pro Jahr. Mittlerweile haben sich die Verhältnisse deutlich geändert: Seit 1990 gab es nur wenige Sommer, in denen keine milden Nächte auftraten, im Durchschnitt sind es jetzt 5,2 pro Jahr. Mehrtägige Serien kommen dabei nicht selten vor. Drei milde Nächte in Serie gab es im Zeitraum 1991-2020 bereits 11 Mal. Die bisher längste Periode war sieben Tage, sie wurde im August 2020 beobachtet.

Sommernächte gibt es deutlich häufiger: im Durchschnitt waren es vor 1990 knapp über 10 pro Jahr, seit 1991 sind es bereits 28,5 pro Jahr. Drei Sommernächte in Folge kommen im Mittel jedes Jahr vor (31 Mal im Zeitraum 1991-2020). Die bisher längste Periode war sieben Tage, sie wurde im August 2020 beobachtet.

Milde Nächte - und damit natürlich auch Tropennächte - treten nicht isoliert auf, sondern sind immer mit hohen Tagestemperaturen gekoppelt. Vor einer milden Nacht liegt also immer ein Sommertag oder ein Hitzetag, manchmal sogar mehrere in Serie. Dieser Effekt der fehlenden nächtlichen Abkühlung trägt wesentlich zu den gesundheitlichen Beeinträchtigungen bei, die durch längere Hitzeperioden hervorgerufen werden.

4.2.3 Auswirkung des Klimawandels auf die Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden

Der gegenwärtige Klimawandel wird weiter zu teils markanten, teils schleichenden Änderungen im Klima Norddeutschlands führen. Das Temperaturniveau steigt allmählich weiter an, dadurch steigt auch die Wahrscheinlichkeit für höhere

Höchsttemperaturen. Einen Vorgeschmack darauf gab die Hitzeperiode, die Deutschland - und weite Teile Europas - Ende Juli 2019 erreicht hat. Es wurden auch in Norddeutschland verbreitet Maxima von 38 bis über 40 °C gemessen, bislang waren derartige Extremwerte nur im Mittelmeerraum aufgetreten. Die Klimaprojektionen und die Attributionsforschung zeigen auf, dass Hitzeperioden im Klimawandel zukünftig häufiger auftreten und länger anhalten werden.

Mit dem einfachen Trick ‚Temperaturaufschlag‘ kann aus den gemessenen, also den historischen Klimadaten eines Ortes die zukünftige Häufigkeit des Auftretens extremer Hitzeperioden zumindest grob abgeschätzt werden. Für diese Auswertung wurden die Tageshöchsttemperaturen aus dem Zeitraum 1946 - 2020 nachträglich um 1, 2, 3 oder 4 Kelvin erhöht und jeweils erneut die Andauerzeiten für Höchsttemperaturen von mindestens 30 °C errechnet. Tabelle 4.6 zeigt die Ergebnisse. Schon für eine moderate Temperaturerhöhung um 1 K ergibt sich ein markanter Anstieg in der Auftretenshäufigkeit von kurzen Andauern, aber auch eine Verlängerung der maximalen Andauerzeit. Um bei dem Beispiel einer 5-tägigen Hitzeperiode zu bleiben: die Häufigkeit hat sich von 5 auf 8 Ereignisse erhöht. Bei einem Aufschlag von 2 K auf die Tageshöchsttemperaturen hat sich die Häufigkeit sogar fast verdreifacht. Die maximale Andauerzeit von bisher neun Tagen hat sich bei einem Temperaturaufschlag von +1 K auf 14 Tage verlängert, bei einem Temperaturaufschlag von +2 K sogar auf 16 Tage.

Tab. 4.6: Häufigkeit des Auftretens (Anzahl) mehrtägiger Hitzeperioden in Hannover-Langenhagen bei nachträglich um 1 bis 4 K angehobenen Höchsttemperaturen. Grau unterlegt: tatsächliche Häufigkeiten (1946-2020), siehe Tab. 4.5.

| Tages- Höchsttemperatur | Andauer (Tage) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|----------------|----|----|----|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Tx ≥ 30 °C | 20 | 9 | 5 | 2 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Tx Erhöhung um | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| + 1K | 29 | 14 | 8 | 4 | 4 | 1 | 1 | - | - | - | - | 2 | - | - | - | - | - | - |
| + 2 K | 50 | 19 | 14 | 6 | 6 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - |
| + 3 K | 69 | 37 | 17 | 15 | 11 | 3 | 1 | 3 | - | 1 | - | 2 | - | 1 | - | - | - | - |
| + 4 K | 89 | 52 | 20 | 23 | 13 | 8 | 6 | 2 | 2 | 2 | - | - | - | 2 | 1 | - | - | - |

4.2.4 Hohe Temperaturen in Abhängigkeit von der Windrichtung

An der Wetterstation Hannover-Langenhagen kommt der Wind am häufigsten aus den Richtungen West und Westsüdwest, ein sekundäres Maximum zeigt die Windrichtung Ost, siehe auch Kapitel 4.5. Hier werden die Temperaturen in Abhängigkeit von der Windrichtung untersucht, um herauszufinden, ob extreme Temperaturen mit bestimmten Windrichtungen gekoppelt sind. Als Basis für diese Auswertung dienen die stündlichen Daten von Lufttemperatur und Windrichtung aus den synoptischen Wettermeldungen des Zeitraums 01.01.1991-31.12.2020 (über 262.000 Datensätze, Fehlwerte unter 0,3 %).

Bei dieser Auswertung werden die sogenannten Stundenwerte der beiden Parameter untersucht. Als Stundenwerte von Temperatur und Windrichtung werden die 10-Minuten-Mittelwerte der Messwerte aus einem definierten Zeitintervall, das kurz vor der jeweiligen Stunde (hh) endet, bezeichnet. Dieses 10-minütige Zeitintervall beginnt jeweils um (hh-1):41 und endet um (hh-1):50 UTC. International einheitlich werden diese Daten mit der Zeitmarke hh:00 UTC verbreitet.

Die Abbildung 4.6 zeigt Windrosen in unterschiedlichen Farben für die unterschiedlichen Temperaturklassen. Der schwarze Graph beschreibt die klassische Windrose für den Zeitraum 1991-2020, unabhängig von den Temperaturwerten. Die häufigsten Windrichtungen sind West und Westsüdwest, ein weiteres Maximum gibt es bei Ost. Sobald die Stundenwerte in die Temperaturklassen $\geq 15\text{ °C}$ / $\geq 20\text{ °C}$ / $\geq 25\text{ °C}$ einsortiert werden, ergeben sich die farbigen Graphen. Hier wurde für jede Temperaturklasse separat die Windverteilung bestimmt, es handelt sich daher jeweils um relative Auftretenshäufigkeiten. Die Windrichtungsverteilungen zeigen für die Temperaturklassen $\geq 20\text{ °C}$ und $\geq 25\text{ °C}$ eine markante Verschiebung des Häufigkeitsmaximums hin zu östlichen Windrichtungen. Temperaturen von mindestens 15 °C traten in 26,8 % aller Stundenwerte auf, Temperaturen $\geq 20\text{ °C}$ gab es in 9,8 %, Temperaturen $\geq 25\text{ °C}$ nur in 2,6 % aller Fälle.

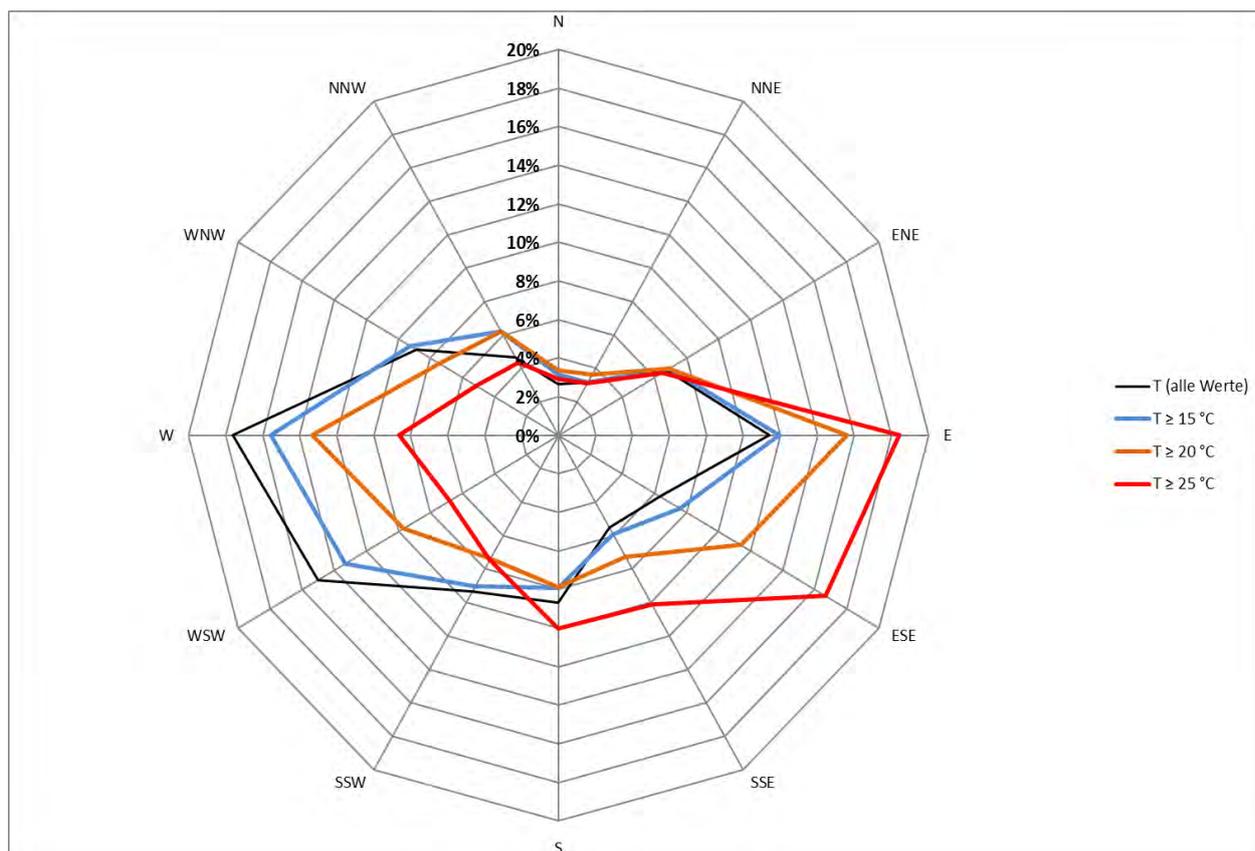


Abb. 4.6: Temperaturwindrose für Hannover-Langenhagen. Alle Werte (schwarzer Graph) sowie für die Temperaturklassen $T \geq 15\text{ °C}$ / $\geq 20\text{ °C}$ / $\geq 25\text{ °C}$. Datenbasis: Stundenwerte 0 bis 23 UTC (1991-2020).

Für die Temperaturklasse $\geq 15\text{ °C}$ ist keine Veränderung in der Windrichtungsverteilung zu sehen: das primäre Maximum erscheint weiterhin in den Richtungen West und Westsüdwest, das sekundäre Maximum bei Ost. Für die nächstfolgende Temperaturklasse $\geq 20\text{ °C}$ ergibt sich allerdings eine deutliche Verschiebung, das primäre Maximum findet sich jetzt bei Ost (15,5 %) und Ostsüdost (11 %), das sekundäre Maximum bei West (13,3 %) und Westsüdwest (9,5 %). Temperaturwerte von mindestens 25 °C sind noch häufiger mit Winden aus Ost (17 %) und Ostsüdost (16,3 %) verbunden, das sekundäre Maximum liegt dann bei West (9,1 %). Die Ursache für diese Verschiebung liegt in den sommerlichen

Wetterlagen. Hochsommerliche Wetterlagen sind sehr häufig mit Hochdruckgebieten über Ost- bzw. Südosteuropa gekoppelt, wodurch mit östlichen bzw. südlichen Luftströmungen kontinentale Warmluft herangeführt wird.

Aufschlussreich ist auch eine getrennte Betrachtung von Tag und Nacht. Die Abbildungen 4.7 und 4.8 zeigen die jeweiligen Temperaturwindrosen für den Tag (Messzeitraum: 6 bis 17 UTC) bzw. für die Nacht (Messzeitraum: 18 bis 5 UTC). In diesen Abbildungen werden absolute Häufigkeitsverteilungen gezeigt. Temperaturen von mindestens 15 °C sind tagsüber am häufigsten mit westlichen Windrichtungen gekoppelt, ihr Anteil an der Grundgesamtheit aller Messungen (ca. 262.000) beträgt 17,3 %. Das nächtliche Häufigkeitsmaximum verschiebt sich bei dieser Temperaturklasse in Richtung Ost, siehe Abb. 4.8. Nächtliche Temperaturwerte von mindestens 15 °C kamen in 9,5 % aller Stunden vor.

Temperaturwerte ≥ 20 °C sind tagsüber gleich häufig mit West- wie mit Ostwind verbunden, während der Nachtstunden zeigt die Windrichtung Ost ein markantes Maximum. Sehr hohe Temperaturen von mindestens 25 °C kommen in Hannover-Langenhagen nicht sehr häufig vor, tagsüber an 2,2 %, nachts sogar nur an 0,4 % aller Jahresstunden. Sie sind für beide Tagesabschnitte am häufigsten mit Ostwind gekoppelt, tagsüber kommen noch südliche und südöstliche Windkomponenten dazu.

Die Dominanz östlicher Windrichtungen (Ostnordost, Ost, Ostsüdost) ist bei hohen Temperaturen in der Nachthälfte besonders stark ausgeprägt. Nachttemperaturen von ≥ 20 °C sind zu 42 %, Werte von ≥ 25 °C sogar zu 51 % mit östlichen Winden gekoppelt.

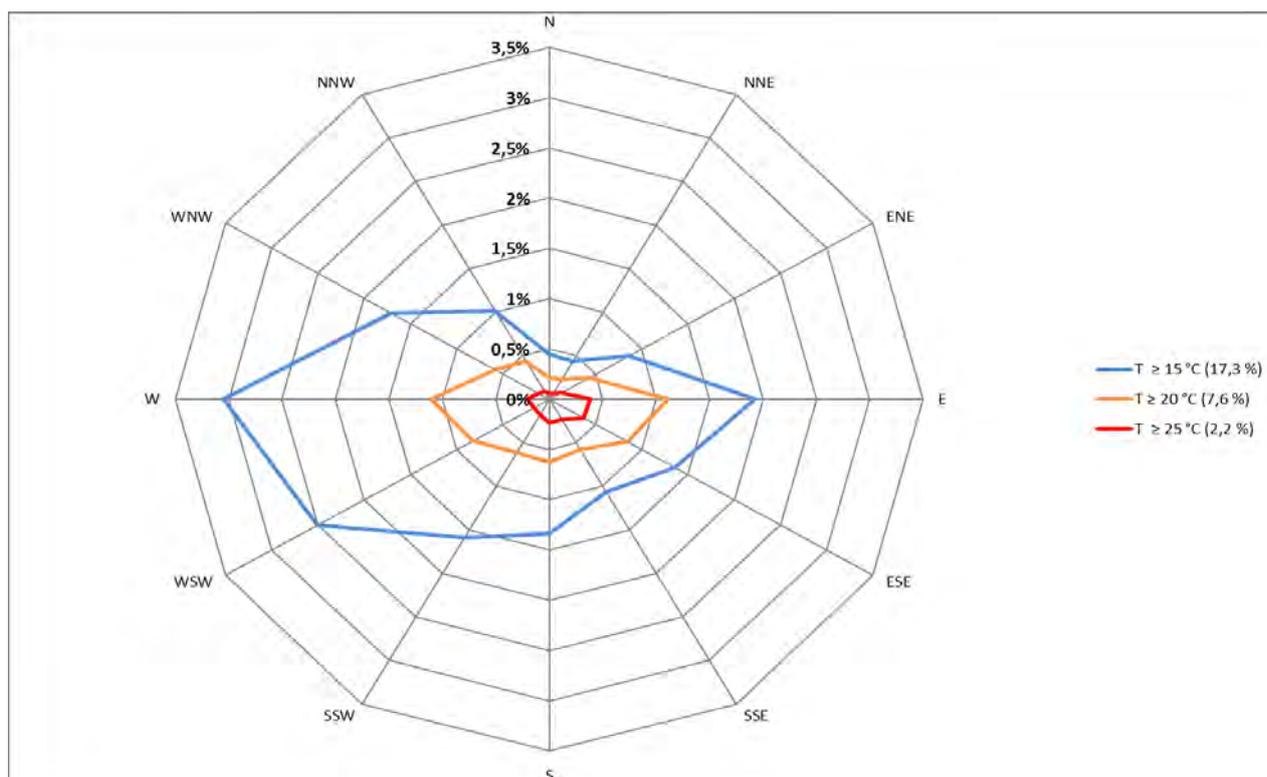


Abb. 4.7: Temperaturwindrose der Station Hannover-Langenhagen tagsüber, für die Temperaturklassen $T (\geq 15$ °C, ≥ 20 °C, ≥ 25 °C); Datenbasis: Stundenwerte, Zeitraum: 6 bis 17 UTC (1991-2020).

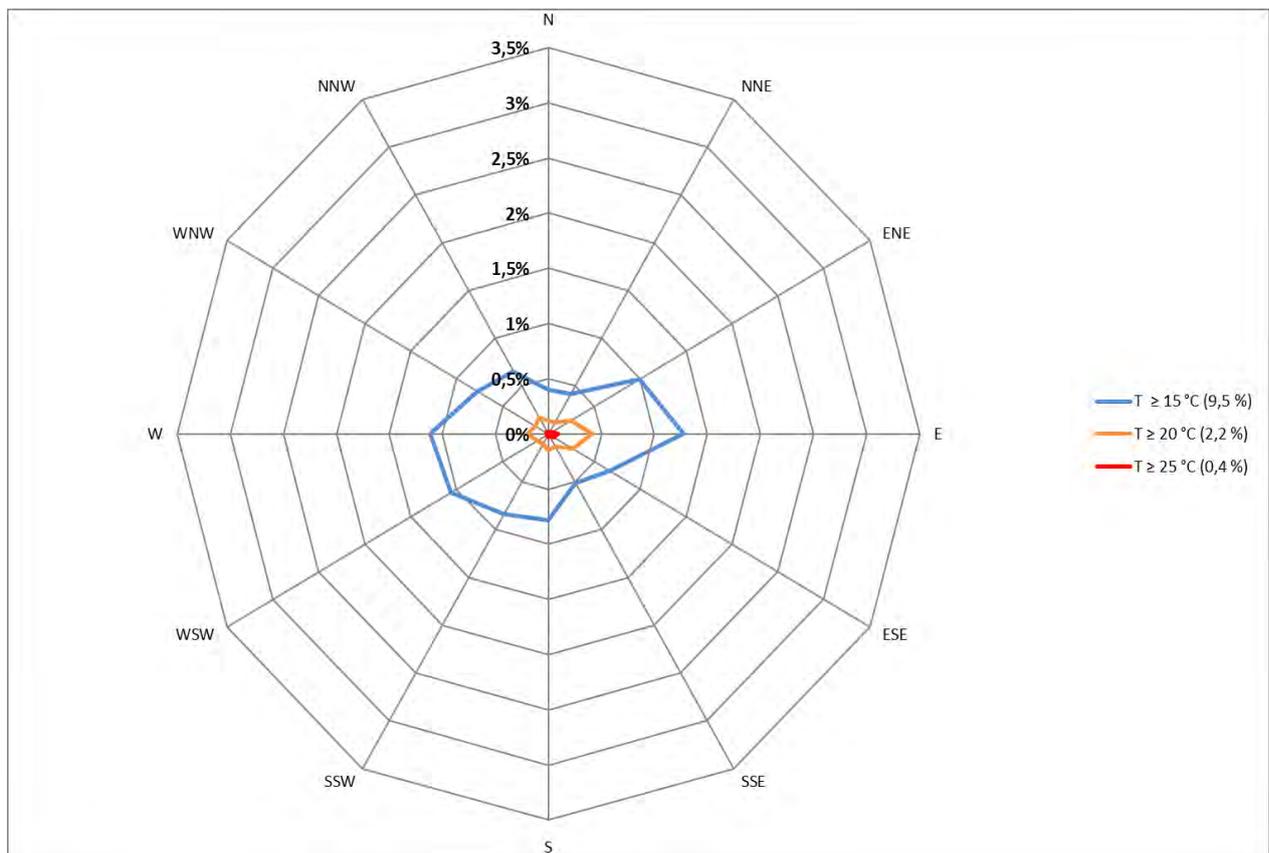


Abb. 4.8: Temperaturwindrose der Station Hannover-Langenhagen in der Nacht, für die Temperaturklassen $T (\geq 15\text{ °C}, \geq 20\text{ °C}, \geq 25\text{ °C})$; Datenbasis: Stundenwerte, Zeitraum: 18 bis 5 UTC (1991-2020).

4.2.5 Jahrgang der Tagesmaxima in den Jahren 2017 bis 2020

Die folgenden Diagramme zeigen den Jahrgang der täglichen Höchsttemperatur an der Wetterstation Hannover-Langenhagen in den Jahren 2017-2020 im Vergleich mit den mittleren Tageshöchsttemperatur des Zeitraums 1981-2010. Die Messkampagne begann im Juni 2017, dennoch wird hier das gesamte Jahr 2017 dargestellt.

Die Abweichungen der jeweiligen Tagesmaxima von den 30-jährigen Mittelwerten sind in den Diagrammen farbig gekennzeichnet durch rote (positive Abweichung = Tagesmaximum ist höher als der Mittelwert) bzw. blaue Markierungen (negative Abweichung = Tagesmaximum ist niedriger als der Mittelwert). Diese Art der Darstellung ermöglicht einen schnellen Vergleich der Witterung des Jahres mit dem klimatologischen Mittel. Zudem kann über die Temperatur-Achse an den Marken 25 und 30 °C die Häufigkeit von Sommertagen und Hitzetagen abgelesen werden. Ebenso ist eine Einschätzung des Winters anhand der Häufigkeit von Eistagen (Maximumtemperatur unter 0 °C) möglich. Die jeweiligen Werte der Kenntage sind in den Diagrammen aufgelistet. Frosttage werden über das Tagesminimum der Temperatur definiert ($T_n < 0\text{ °C}$) und sind daher in diesen Diagrammen nicht aufgeführt.

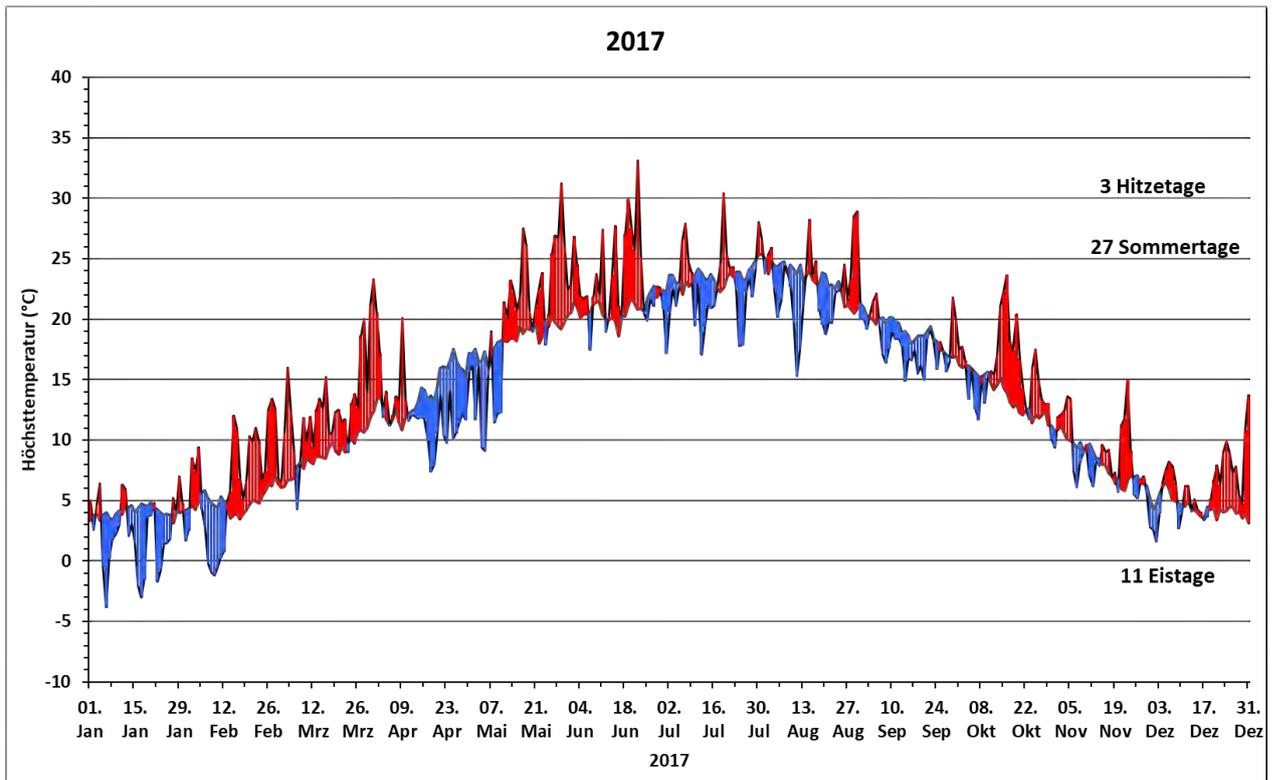


Abb. 4.9: Jahresgang der Tageshöchsttemperatur 2017 in Hannover-Langenhagen. Schwarze Linie: Mittelwerte 1981–2010; rote bzw. blaue Markierung: Differenz Tageswert (2017) – Mittelwert (1981–2010).

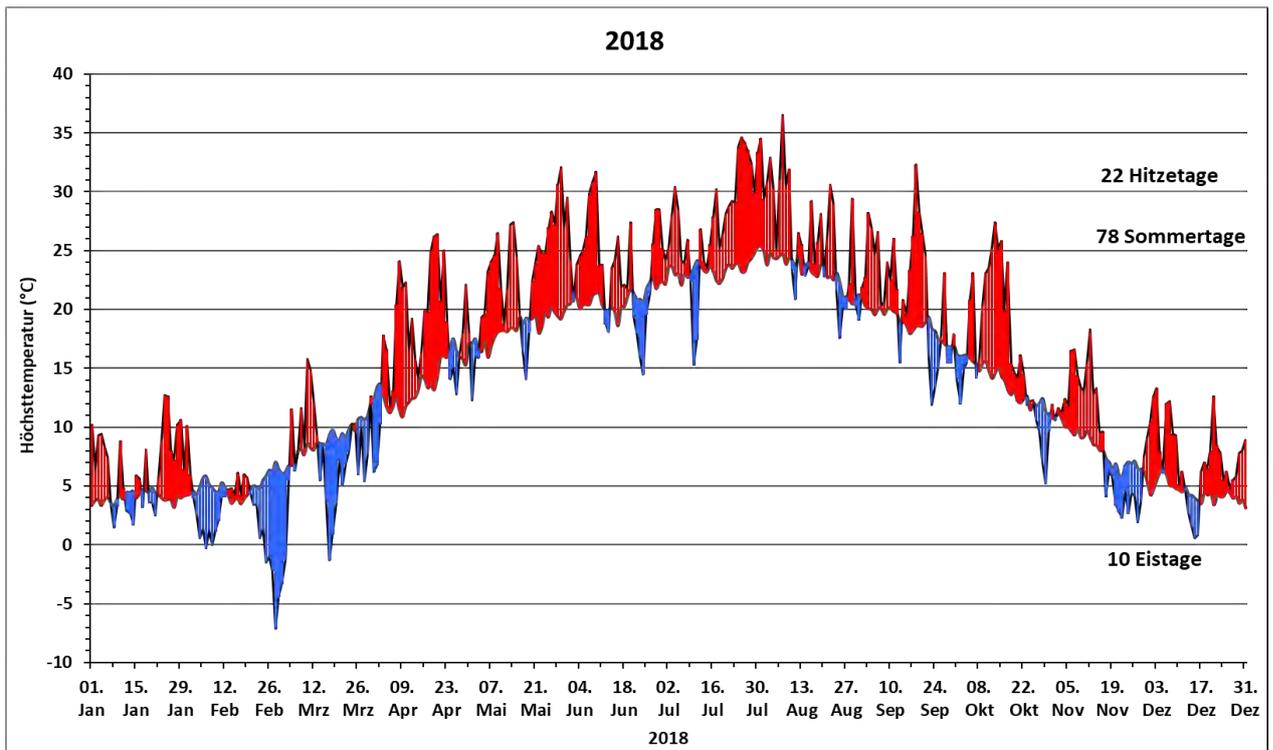


Abb. 4.10: Jahresgang der Tageshöchsttemperatur 2018 in Hannover-Langenhagen. Schwarze Linie: Mittelwerte 1981–2010; rote bzw. blaue Markierung: Differenz Tageswert – Mittelwert (1981–2010).

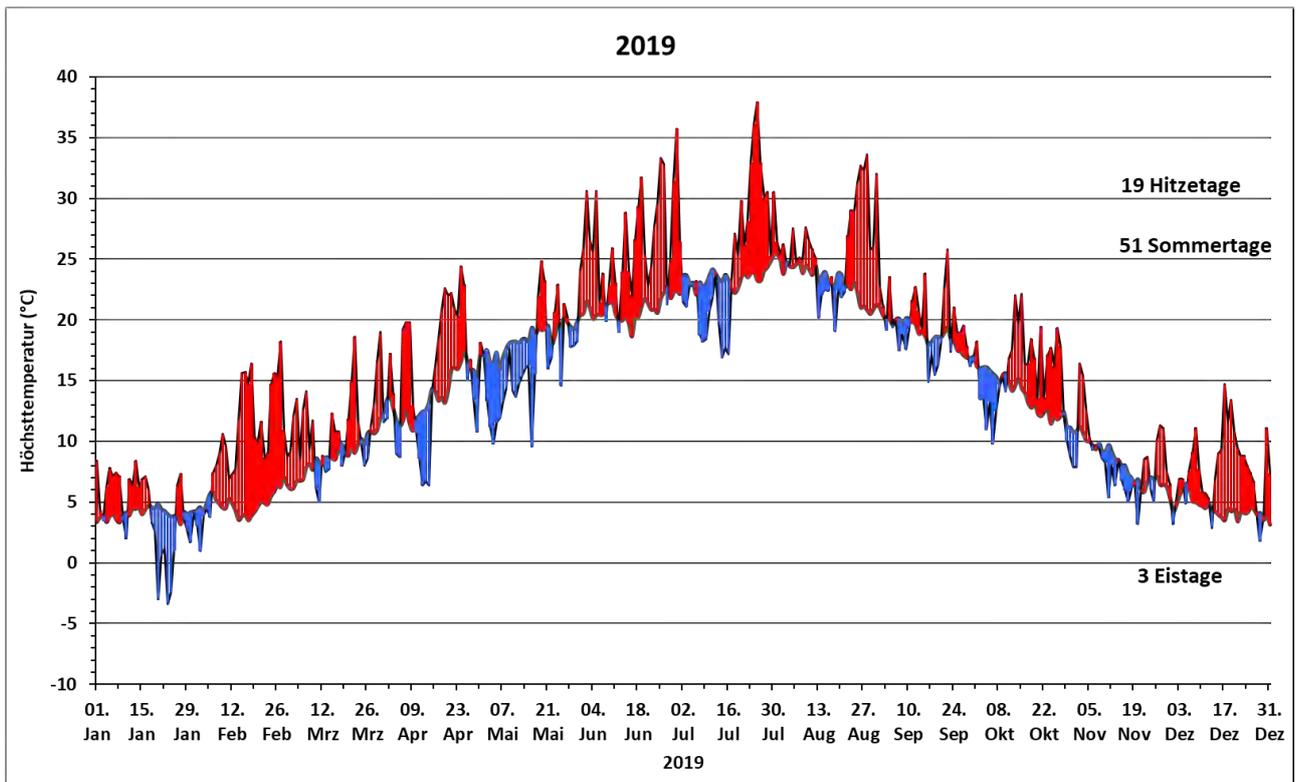


Abb. 4.11: Jahrgang der Tageshöchsttemperatur 2019 in Hannover-Langenhagen. Schwarze Linie: Mittelwerte 1981-2010; rote bzw. blaue Markierung: Differenz Tageswert - Mittelwert (1981-2010).

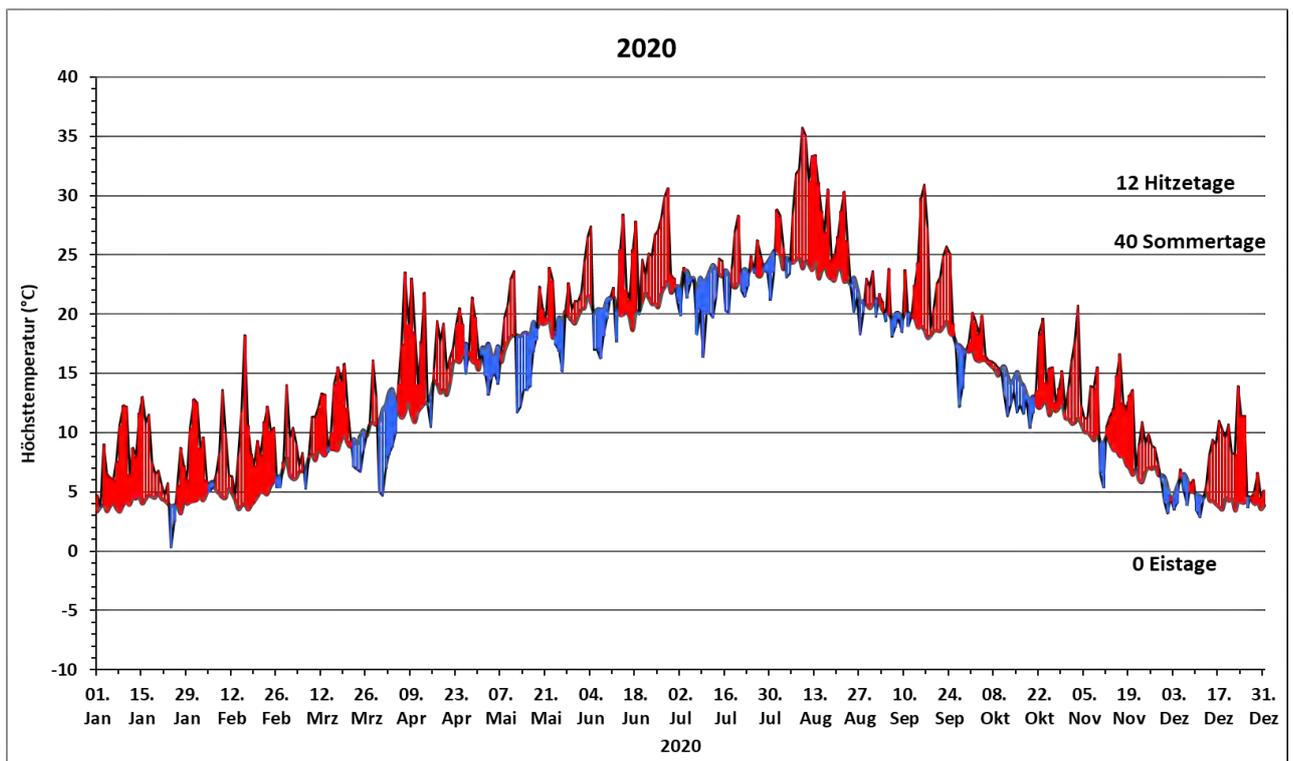


Abb. 4.12: Jahrgang der Tageshöchsttemperatur 2020 in Hannover-Langenhagen. Schwarze Linie: Mittelwerte 1981-2010; rote bzw. blaue Markierung: Differenz Tageswert - Mittelwert(1981-2010).

4.3 Niederschlag

Als Basis der nachfolgenden Darstellungen zu den Niederschlagsverhältnissen in Hannover dienen erneut die Messwerte der Wetterstation Hannover-Langenhagen der Jahre 1946 bis 2020, mit besonderem Blick auf die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020. Wie in Abbildung 4.13 zu sehen, variieren die jährlichen Niederschlagssummen sehr stark von Jahr zu Jahr. Dies wird auch durch die relativ hohe Standardabweichung von rund 110 l/m^2 deutlich. Der Mittelwert beträgt 644 l/m^2 . Das mit Abstand niederschlagsärmste Jahr im Messzeitraum 1946-2020 war 1959 mit nur 337 l/m^2 , danach folgt 2018 mit 433 l/m^2 . Auch 2020 zählt mit 494 l/m^2 zu den sechs niederschlagsärmsten Jahren seit 1946. Das niederschlagsreichste Jahr war mit 935 l/m^2 1981 gefolgt von 2007 mit 909 l/m^2 und 2001 mit 840 l/m^2 . Von den hier betrachteten klimatologischen Zeiträumen zeigt sich 1981-2010 mit einer mittleren Jahressumme von 661 l/m^2 als nassester Zeitraum (siehe Tab. 4.7).

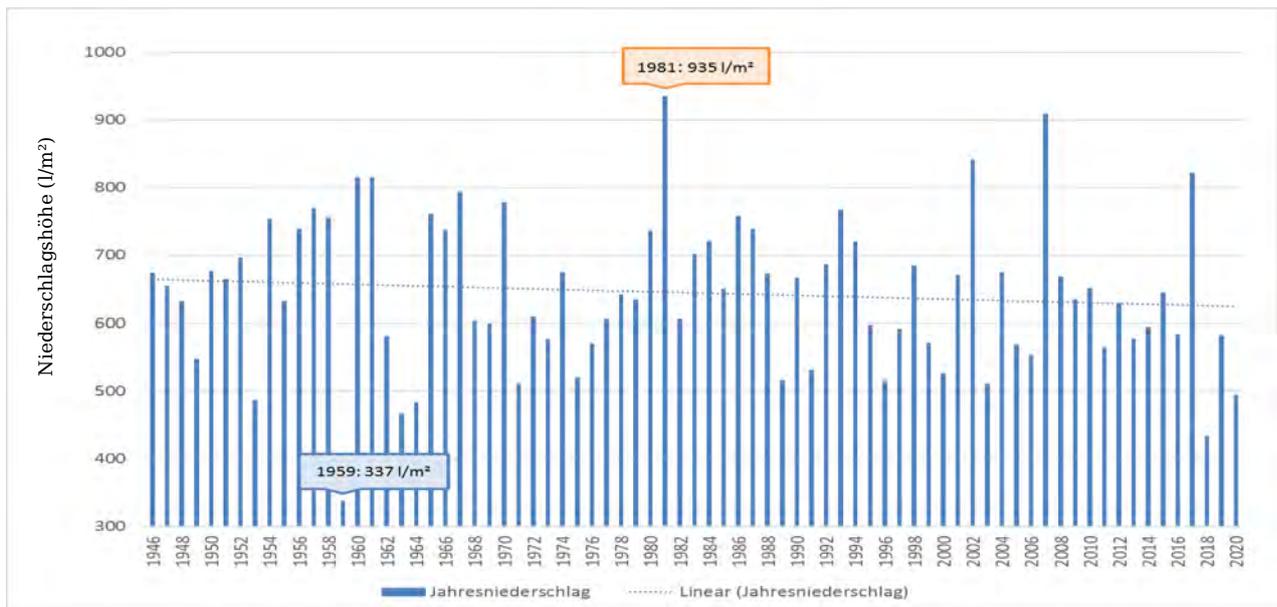


Abb. 4.13: Jahressummen der Niederschlagshöhe (l/m^2) in Hannover-Langenhagen im Zeitraum 1946 bis 2020.

4.3.1 Jahrgang der Niederschlagssummen

Nicht nur jährlich, sondern auch monatlich ergaben sich große Unterschiede in den Niederschlagssummen. Werte von über 100 l/m^2 pro Monat sind im Messzeitraum 1946-2020 insgesamt 71-mal vorgekommen, am häufigsten im Juli (16 Mal). Die höchste Monatssumme wurde im Juli 1954 gemessen (189 l/m^2). Die nächsten in der Rangfolge sind der Juli 2002 mit 170 l/m^2 und der Juli 2017 mit 158 l/m^2 Regen. Monatliche Niederschlagssummen von unter 10 l/m^2 kamen hingegen recht selten vor, insgesamt nur 22-mal im betrachteten Gesamtzeitraum. Der niederschlagsärmste Monat war der September 1959 mit einer Monatssumme von $0,1 \text{ l/m}^2$.

Die mittleren monatlichen Niederschlagssummen sind in Abbildung 4.14 für die vier betrachteten Zeiträume dargestellt, die zugehörigen Werte sind in Tabelle 4.7 zu

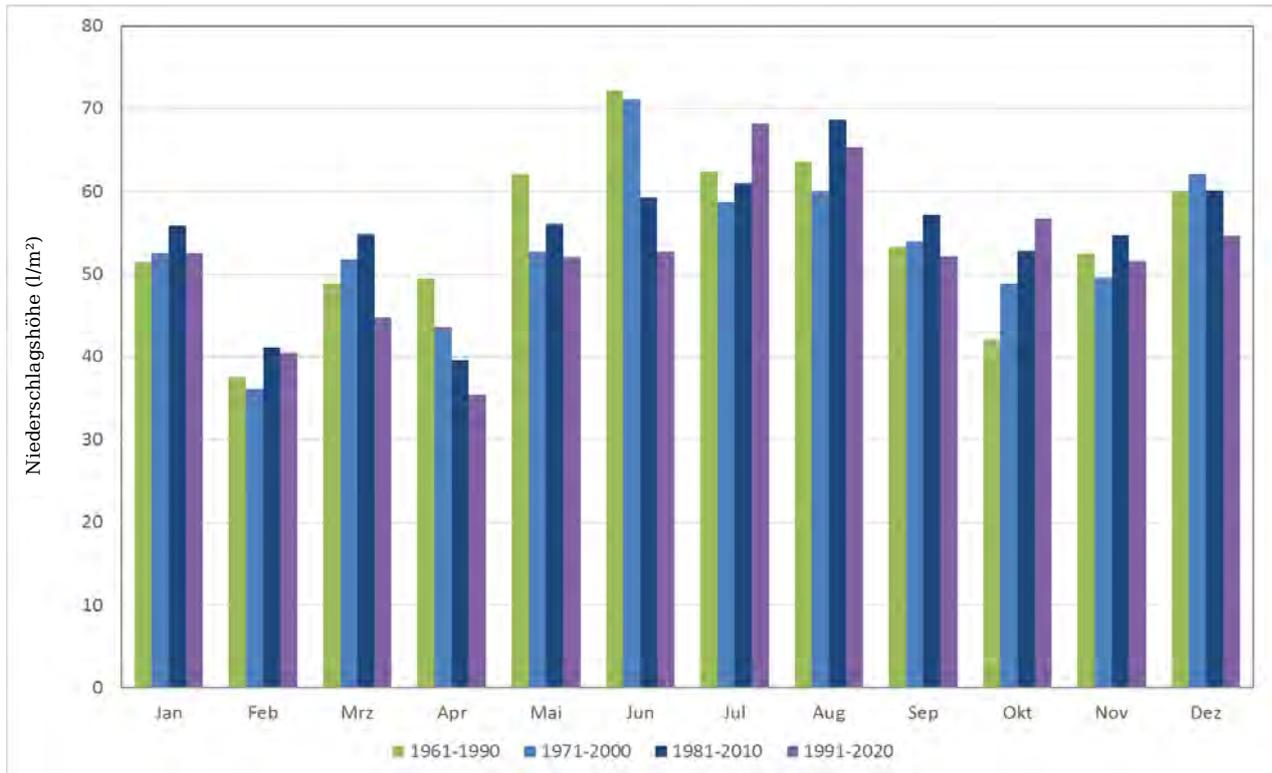


Abb. 4.14: Monatliche Niederschlagssummen (l/m²) in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990 (grün), 1971-2000 hellblau), 1981-2010 (dunkelblau) und 1991-2020 (lila).

Tab. 4.7: Mittlere monatliche Niederschlagssummen (l/m²) in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990 (grün), 1971-2000 (hellblau), 1981-2010 (dunkelblau) und 1991-2020 (lila).

| Parameter | Jan | Feb | Mrz | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr | Zeitraum |
|-------------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| höchste Monats-/Jahressumme | 149,8 | 91,0 | 132,8 | 111,5 | 170,7 | 148,9 | 189,2 | 172,0 | 126,3 | 136,1 | 113,8 | 160,3 | 935,4 | 1946-2020 |
| Mittlere Monats-/Jahressumme | 51,5 | 37,5 | 48,8 | 49,5 | 62,1 | 72,2 | 62,4 | 63,5 | 53,3 | 42,1 | 52,5 | 60,0 | 655,6 | 1961-1990 |
| | 52,5 | 36,1 | 51,8 | 43,6 | 52,7 | 71,2 | 58,7 | 60,0 | 54,0 | 48,8 | 49,6 | 62,2 | 641,3 | 1971-2000 |
| | 55,9 | 41,1 | 54,9 | 39,6 | 56,1 | 59,2 | 61,0 | 68,7 | 57,2 | 52,8 | 54,7 | 60,2 | 661,4 | 1981-2010 |
| | 52,6 | 40,5 | 44,8 | 35,5 | 52,0 | 52,7 | 68,2 | 65,3 | 52,1 | 56,7 | 51,6 | 54,6 | 626,6 | 1991-2020 |
| kleinste Monats-/Jahressumme | 3,1 | 3,6 | 10,2 | 7,7 | 7,6 | 19,8 | 22,1 | 9,0 | 0,1 | 4,2 | 2,0 | 8,7 | 337,4 | 1946-2020 |

finden. Der Niederschlag verteilt sich in Hannover-Langenhagen recht gleichmäßig übers Jahr mit einem schwach ausgeprägten Hauptmaximum im Sommer. Der im langjährigen Mittel niederschlagreichste Monat hat sich zwischen den betrachteten Zeiträumen von Juni (1961-1990 sowie 1971-2000) in den August (1981-2010) und schließlich in den Juli (1991-2020) verschoben. Dabei haben die Niederschlagssummen minimal, aber stetig abgenommen (Juni 1961-1990: 72,2 l/m², Juli 1991-2020: 68,2 l/m²). Das sekundäre Maximum erscheint in allen Zeiträumen im Dezember, auch hier zeigt der aktuelle Zeitraum 1991-2020 mit etwa 55 l/m² einen niedrigeren Wert als die vorangegangenen Zeiträume (um 60 l/m²). Bei dem niederschlagsärmsten Monat zeigt sich wiederum eine Verschiebung. In den

Zeiträumen 1961-1990 sowie 1971-2000 gab es im Februar mit 37,5 bzw. 36,1 l/m² die mit Abstand niederschlagsärmsten Monate. In den Zeiträumen 1981-2010 und 1991-2020 ist es nun der April mit 39,6 bzw. 35,5 l/m². Bei Betrachtung der einzelnen Monate wird deutlich, dass vor allem April und Juni Abnahmen der Niederschlagssumme zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2020 erfahren haben (14 bzw. 19 l/m² weniger). Im Gegensatz dazu hat der Oktober mit rund 14 l/m² eine Zunahme zu verzeichnen.

4.3.2 Häufigkeiten einiger Niederschlagskenntage

Die Häufigkeiten einiger Niederschlagskenntage sind in Tabelle 4.8 zusammengefasst. Laut Definition zählt ein Kalendertag als Niederschlagstag, sobald die Niederschlagssumme mindestens 0,1 l/m² beträgt. Bei festen Niederschlägen wird übrigens das geschmolzene Äquivalent gemessen. In der Praxis bedeutet das, dass auch Tage, an denen nur kurzzeitig vereinzelte Tropfen fallen, als Niederschlagstage gezählt werden. Diese geringen Mengen tragen nichts zur Monatssumme des Niederschlags und zum Wasserhaushalt eines Naturraums bei. Daher wird für eine Auswertung der Häufigkeit von Niederschlagstagen hier zusätzlich der Schwellenwert von 1,0 l/m² betrachtet. Aber auch das andere Ende der Skala, also das Auftreten hoher Niederschlagssummen an einem Tag, ist von Interesse. Daher werden auch die Tage mit Niederschlagssummen von mindestens 10 l/m² ausgezählt.

Tab. 4.8: Anzahl der Tage mit bestimmten Niederschlagssummen in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990 (grün), 1971-2000 (hellblau), 1981-2010 (dunkelblau) und 1991-2020 (lila).

| Parameter | Jan | Feb | Mrz | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr | Zeitraum |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-----------|
| mittlere Anzahl der Tage mit $\geq 0,1$ l/m ² Niederschlag | 18,5 | 15,2 | 17,2 | 15,9 | 14,9 | 15,5 | 14,6 | 15,0 | 15,2 | 15,0 | 17,9 | 19,0 | 194,0 | 1961-1990 |
| | 17,7 | 14,8 | 17,1 | 14,1 | 13,7 | 15,9 | 13,9 | 14,3 | 15,1 | 15,7 | 17,9 | 18,5 | 188,8 | 1971-2000 |
| | 17,6 | 15,3 | 17,1 | 13,4 | 13,9 | 14,9 | 14,7 | 14,8 | 14,4 | 15,2 | 17,9 | 18,0 | 187,1 | 1981-2010 |
| | 17,4 | 15,5 | 15,4 | 12,6 | 13,5 | 14,0 | 15,2 | 15,0 | 13,4 | 15,5 | 17,2 | 18,3 | 183,0 | 1991-2020 |
| mittlere Anzahl der Tage mit $\geq 1,0$ l/m ² Niederschlag | 10,7 | 8,7 | 10,4 | 10,2 | 10,4 | 11,2 | 10,2 | 10,3 | 9,4 | 8,5 | 10,7 | 11,7 | 122,4 | 1961-1990 |
| | 10,5 | 8,6 | 10,9 | 9,2 | 8,8 | 11,0 | 9,9 | 9,5 | 9,5 | 9,3 | 10,5 | 11,8 | 119,4 | 1971-2000 |
| | 11,0 | 9,6 | 11,1 | 8,8 | 9,3 | 9,8 | 10,0 | 10,1 | 9,4 | 9,7 | 10,6 | 11,4 | 121,0 | 1981-2010 |
| | 11,1 | 9,0 | 9,8 | 8,0 | 8,7 | 8,8 | 10,4 | 10,0 | 8,9 | 10,0 | 10,4 | 11,5 | 116,5 | 1991-2020 |
| mittlere Anzahl der Tage mit $\geq 10,0$ l/m ² Niederschlag | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 1,1 | 1,5 | 1,9 | 1,8 | 1,7 | 1,4 | 0,7 | 1,3 | 1,4 | 15,1 | 1961-1990 |
| | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,9 | 1,3 | 2,1 | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,0 | 1,1 | 1,5 | 15,1 | 1971-2000 |
| | 1,1 | 0,5 | 1,0 | 0,6 | 1,1 | 1,7 | 1,6 | 2,0 | 1,7 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 15,3 | 1981-2010 |
| | 0,9 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 1,0 | 1,5 | 1,8 | 1,9 | 1,5 | 1,4 | 1,1 | 1,0 | 14,1 | 1991-2020 |
| höchste Tagessumme | 25,2 | 24,7 | 27,3 | 26,8 | 48,7 | 52,5 | 76,1 | 78,8 | 43,0 | 41,6 | 28,9 | 33,1 | 78,8 | 1946-2020 |

Die mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag (Tagessumme des Niederschlags $\geq 0,1 \text{ l/m}^2$) variiert leicht im Jahresverlauf. So ist in den Sommermonaten (Juni bis August) mit 14 bis 15 Regentagen und im November/Dezember mit monatlich 17 bis 18 Regentagen zu rechnen (bezogen auf den Zeitraum 1991-2020). Insgesamt gibt es im Mittel 183 Tage mit Niederschlägen von mindestens $0,1 \text{ l/m}^2$. Im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 sind das 11 Tage weniger. Das Jahr mit den bisher meisten Niederschlagstagen (im Zeitraum 1946 bis 2020) war 1965 mit 230 Tagen, dicht gefolgt von 1967 mit 229 Tagen. Die wenigsten Niederschlagstage gab es 1959 mit 126 Tagen, den zweiten Platz teilen sich 1996 und 2018 mit 144 Tagen.

Der etwas höhere Schwellenwert von mindestens 1 l/m^2 Niederschlag pro Tag wird nicht ganz so häufig erreicht und liegt zwischen 8 Tagen im April und über 11 Tagen im Januar und Dezember. Insgesamt gab es im Zeitraum 1991-2020 im Mittel 116,5 Tage im Jahr mit Niederschlägen von mindestens 1 l/m^2 . Dieser Wert hat sich im Vergleich zu 1961-1990 um 6 Tage verringert.

Relativ selten kommen Tage mit Niederschlagssummen von mindestens 10 l/m^2 vor, im Mittel etwa 14 Mal im Jahr. Die Unterschiede in den Vergleichszeiträumen sind gering. Derartige Niederschlagsereignisse können das ganze Jahr über auftreten, tendenziell sind sie aber im Sommer wahrscheinlicher. So kann im August an ca. 2 Tagen mit Niederschlagssummen $\geq 10 \text{ l/m}^2$ gerechnet werden, zwischen Februar und April kommt so ein Ereignis nicht in jedem Jahr vor.

Die höchste Tagessumme im Zeitraum 1946-2020 wurde in Hannover-Langenhagen am 26.08.2010 mit $78,8 \text{ l/m}^2$ gemessen.

Zusammenfassend kann man in Hannover-Langenhagen von einem leicht negativen Trend beim Niederschlag sprechen, sowohl in den Jahressummen als auch in den Kenntagen. Vor allem in den Frühlingsmonaten März und April haben die Niederschlagssummen abgenommen. Eine belastbare Aussage über die Tendenz zu mehr Starkniederschlagsereignissen kann allerdings nicht gegeben werden, dafür treten diese Ereignisse insgesamt zu selten auf.

4.3.3 Auftreten von Trockenperioden

Anhaltende Trockenperioden sind nicht nur für die Landwirtschaft ein großes Problem. Im Folgenden wird das Auftreten von Zeiträumen mit sehr wenig Regen an der Station Hannover-Langenhagen für den gesamten Messzeitraum 1946-2020 sowie für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 verglichen.

In Tabelle 4.9 sind die Andauerhäufigkeiten von Trockenperioden für drei verschiedene Intensitätsstufen dargestellt. Es werden Tage mit wenig Niederschlag ($< 5 \text{ l/m}^2$), trockene Tage ($< 1 \text{ l/m}^2$) und niederschlagsfreie Tage ($< 0,1 \text{ l/m}^2$) untersucht. Beim Vergleich der verschiedenen Zeiträume fallen Unterschiede zwischen den einzelnen Intensitätsstufen auf.

Der Fall, dass es an mindestens 7 aufeinander folgenden Tagen weniger als 5 l/m^2 Niederschlag gibt (Tage mit wenig Regen), trat im Zeitraum 1946-2020 insgesamt 1103-mal auf, davon 473-mal im Zeitraum 1961-1990 und 468-mal im Zeitraum 1991-2020. In dieser Intensitätsstufe hat die Häufigkeit also insgesamt etwas abgenommen. Es gibt jedoch Unterschiede, wenn die einzelnen Andauerzeiten

Tab. 4.9: Häufigkeit von Perioden mit wenig Niederschlag innerhalb des gesamten Messzeitraums (1946-2020) und in den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2020. Hier werden drei Intensitätsstufen unterschieden: Tage mit wenig Niederschlag ($< 5 \text{ l/m}^2$), trockene Tage ($< 1 \text{ l/m}^2$) und niederschlagsfreie Tage ($< 0,1 \text{ l/m}^2$). Die letzte Spalte zeigt jeweils die Anzahl der Perioden mit Andauern von mindestens 7 Tagen.

| | Zeitraum | Andauer in Tagen | | | | | | | | | | | | | | | | ≥ 7 | | |
|-----------------------|-----------|------------------|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|-------|----------|-------|-------|
| | | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21-25 | 26-30 | | 31-35 | 36-40 |
| $< 5 \text{ l/m}^2$ | 1946-2020 | 106 | 84 | 92 | 78 | 79 | 71 | 47 | 47 | 56 | 46 | 41 | 27 | 35 | 31 | 122 | 60 | 48 | 33 | 1103 |
| | 1961-1990 | 53 | 32 | 41 | 32 | 33 | 26 | 16 | 17 | 21 | 21 | 16 | 8 | 14 | 15 | 50 | 20 | 21 | 12 | 473 |
| | 1991-2020 | 36 | 32 | 33 | 28 | 33 | 30 | 21 | 19 | 23 | 17 | 17 | 13 | 10 | 11 | 56 | 29 | 23 | 11 | 468 |
| $< 1 \text{ l/m}^2$ | 1946-2020 | 154 | 137 | 111 | 85 | 63 | 61 | 38 | 35 | 34 | 28 | 17 | 23 | 15 | 22 | 40 | 8 | 2 | 2 | 875 |
| | 1961-1990 | 62 | 55 | 47 | 30 | 22 | 28 | 12 | 13 | 15 | 8 | 5 | 7 | 8 | 8 | 19 | 4 | | | 343 |
| | 1991-2020 | 69 | 50 | 38 | 37 | 26 | 23 | 14 | 15 | 15 | 16 | 8 | 10 | 5 | 11 | 12 | 3 | 2 | 1 | 355 |
| $< 0,1 \text{ l/m}^2$ | 1946-2020 | 110 | 110 | 66 | 42 | 33 | 24 | 17 | 14 | 13 | 6 | 7 | 3 | 5 | 3 | 9 | 2 | 1 | | 465 |
| | 1961-1990 | 47 | 48 | 26 | 12 | 11 | 8 | 6 | 6 | 5 | 3 | 1 | | 2 | 2 | 5 | | | | 182 |
| | 1991-2020 | 44 | 35 | 27 | 21 | 13 | 11 | 7 | 5 | 5 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | | 183 |

betrachtet werden. So hat besonders die Häufigkeit der 7-tägigen Andauer abgenommen (von 53 Mal auf 36 Mal). Andauern zwischen 21 und 35 Tagen haben dagegen um 17 zugenommen.

Bei der Intensitätsstufe ‚trockene Tage‘, also Tage mit weniger als 1 l/m^2 Niederschlag, hat es für Andauerzeiten von mindestens sieben Tagen in Folge eine leichte Zunahme zwischen 1961-1990 (343-mal) und 1991-2020 (355-mal) gegeben. Andauern von 31 bis 40 Tage traten im Zeitraum 1961-1990 nicht auf, im Zeitraum 1991-2020 kamen diese 3-mal vor.

Längere Andauern der Intensitätsstufe ‚niederschlagsfreie Tage‘ (weniger als $0,1 \text{ l/m}^2$ Niederschlag pro Tag) von mindestens sieben Tagen sind im Gesamtzeitraum (1946-2020) 465-mal registriert worden. Zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2020 zeigt sich eine Verschiebung zu längeren Trockenphasen. So gab es beispielsweise im Zeitraum 1991-2020 zweimal Trockenperioden mit Andauerzeiten von 26 bis 35 Tagen. Derart lange Trockenperioden waren im Zeitraum 1961-1990 nicht aufgetreten.

In Abbildung 4.15 sind Trockenperioden von mindestens sieben Tagen für jedes Jahr im Messzeitraum 1946 bis 2020 dargestellt. Die drei längsten Trockenperioden gab es im Januar 1996 mit 33 Tagen, im November 2011 mit 30 Tagen und im Oktober 1959 mit 27 Tagen, das Jahr 2020 belegt mit 25 aufeinanderfolgenden Tagen mit weniger als $0,1 \text{ l/m}^2$ Niederschlag den 4. Platz. Bei Betrachtung der letzten 10 Jahre sticht das Jahr 2018 heraus, hier gab es drei längere Trockenperioden: im Mai mit 14 Tagen, im Juli mit 16 Tagen und im Oktober mit 17 Tagen. Insgesamt ist kein eindeutiger Trend zu länger anhaltenden Trockenperioden zu erkennen. Auffallend ist jedoch, dass sehr lange Trockenperioden von 25 Tagen und mehr vor 1996 nur einmal aufgetreten sind, seitdem aber insgesamt 3 Mal vorkamen.

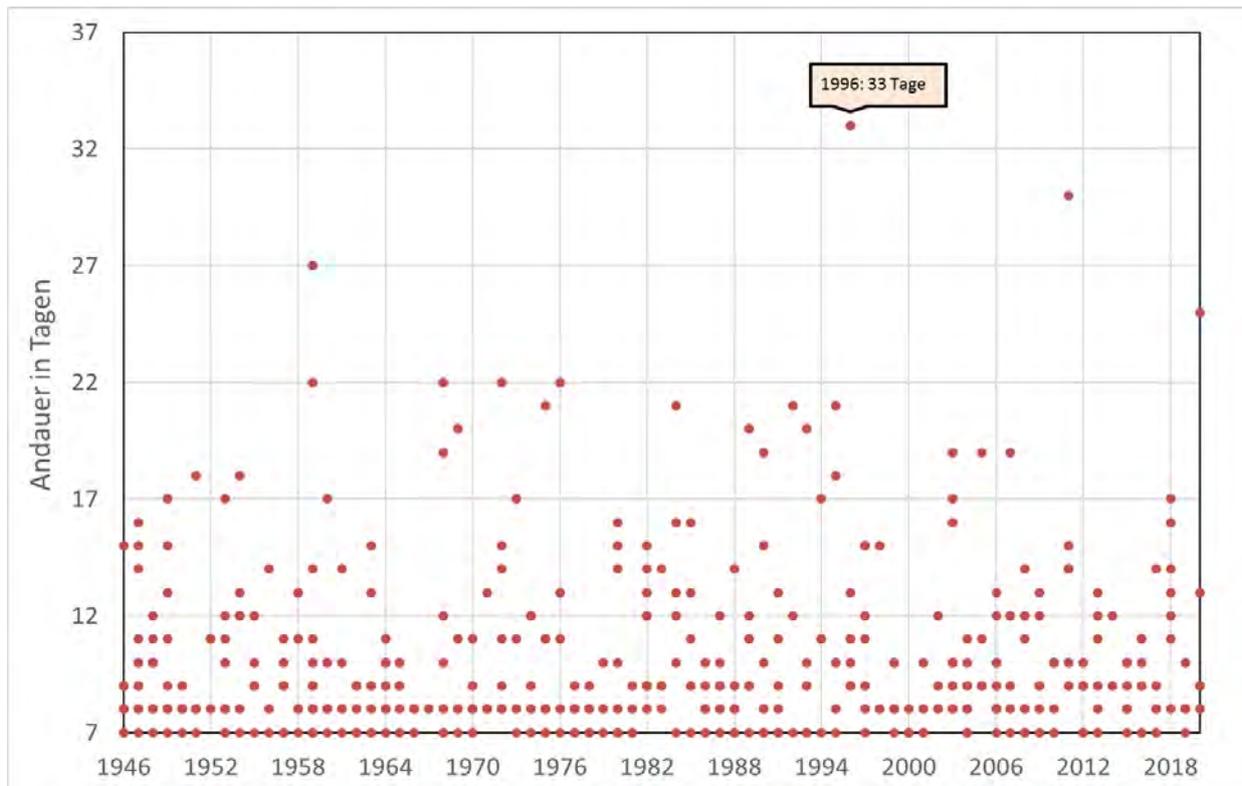


Abb. 4.15: Andauern von trockenen Tagen (Tagessummen des Niederschlags $< 0,1 \text{ l/m}^2$) in Hannover-Langenhagen ab einer Andauerzeit von 7 Tagen für den Messzeitraum 1946 bis 2020.

4.4 Sonnenscheindauer

Die jährlichen Sonnenstunden in Hannover-Langenhagen sind in Abbildung 4.16 für den Zeitraum 1951 bis 2020 dargestellt. Die Messung der Sonnenscheindauer begann erst mit dem Jahr 1951. Von Jahr zu Jahr zeigen sich starke Schwankungen; so weist das sonnenscheinreichste Jahr 1959 eine Jahressumme von 1972 Stunden auf, das sonnenscheinärmste Jahr war 1998 mit nur 1274 Stunden. Bei Betrachtung des gesamten Zeitraums zeigt sich ein leicht positiver Trend hin zu mehr Sonnenstunden. Dieser Trend ist auch in den 30-jährigen Mittelwerten der hier betrachteten Zeiträume zu sehen (siehe auch Tab. 4.11): Im Zeitraum 1961-1990 waren es im Mittel 1501 Sonnenstunden pro Jahr, im Zeitraum 1991-2020 hat sich diese Summe um über 90 Stunden auf 1594 Sonnenstunden erhöht.

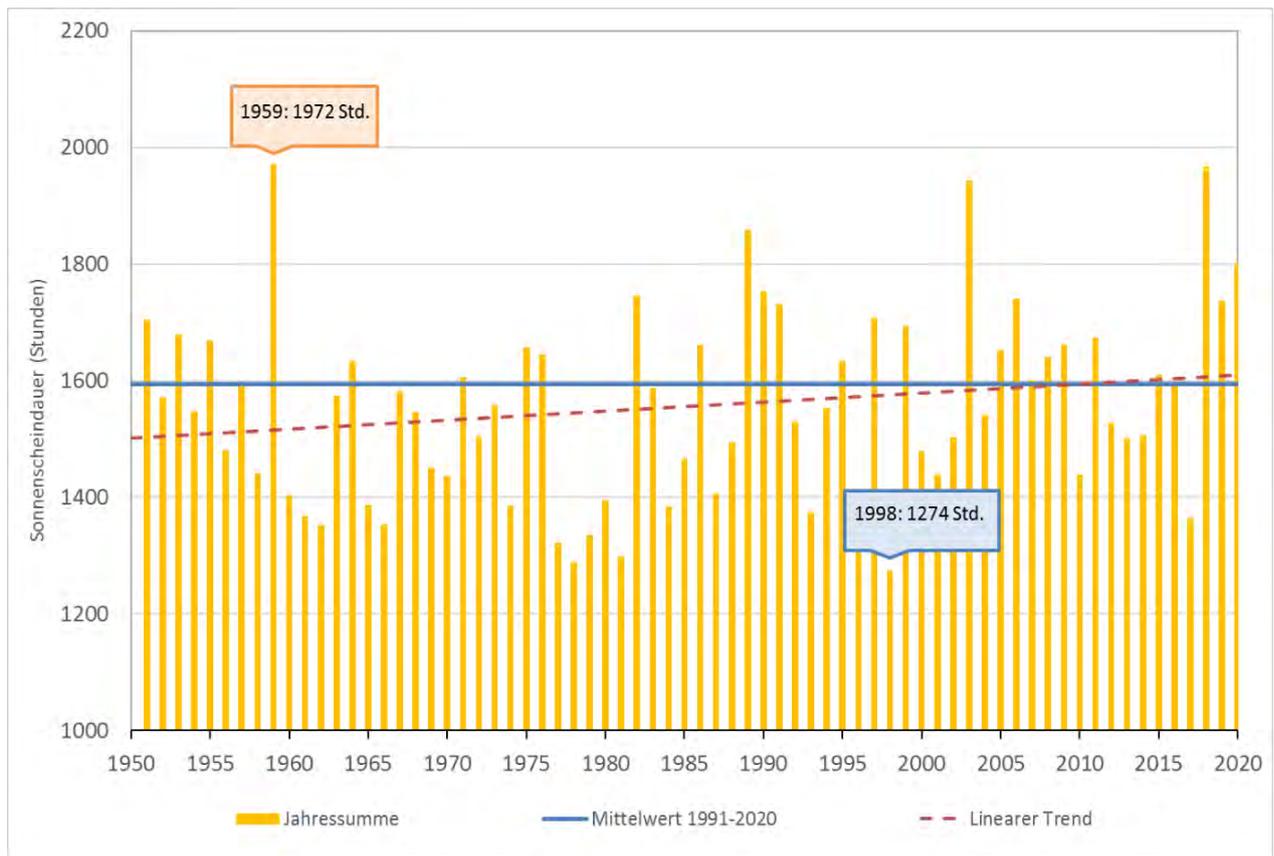


Abb. 4.16: Jahressummen der Sonnenscheindauer in Hannover-Langenhagen; Zeitraum: 1951-2020. Blaue Linie: Mittelwert 1991-2020 (1595 Std), rote gestrichelte Linie: linearer Trend.

In der nachstehenden Tabelle 4.10 sind für Hannover-Langenhagen die zehn sonnenscheinreichsten Jahre aufgelistet. Die sonnigsten Jahre 1959, 2018 und 2003 weisen deutlich mehr als 1900 Sonnenstunden auf. Es fällt auch auf, dass die letzten drei Jahre des Messzeitraums (2018, 2019 und 2020) alle in die Top 10 fallen. Das Jahr 2017 hingegen gehört mit nur 1364 Sonnenstunden zu den 10 Jahren mit den wenigsten Sonnenstunden.

Tab. 4.10: Die zehn sonnenscheinreichsten Jahre in Hannover-Langenhagen (1951-2020).

| | Jahr | Summe |
|----|------|-------|
| 1 | 1959 | 1972 |
| 2 | 2018 | 1967 |
| 3 | 2003 | 1943 |
| 4 | 1989 | 1859 |
| 5 | 2020 | 1801 |
| 6 | 1990 | 1754 |
| 7 | 1982 | 1746 |
| 8 | 2006 | 1740 |
| 9 | 2019 | 1737 |
| 10 | 1991 | 1732 |

4.4.1 Jahrgang der täglichen und monatlichen Sonnenscheindauer

Wiederum dient als Basis der nachfolgenden Darstellungen im Wesentlichen der Zeitraum 1991-2020. Zum Aufzeigen etwaiger Änderungen werden zudem die klimatologischen Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1981-2010 betrachtet. Abbildung 4.17 zeigt den Jahrgang der mittleren täglichen Sonnenscheindauer an der Station Hannover-Langenhagen für die vier betrachteten Zeiträume. Die entsprechenden Werte sind auch in Tabelle 4.11 zu finden. In der Tabelle sind neben den Tagesmittelwerten pro Monat auch die mittleren Monatssummen aufgelistet.

Tab. 4.11: Mittelwerte der Sonnenstunden pro Monat (jeweils obere Zeile) und pro Tag (jeweils untere Zeile) sowie die höchsten und niedrigsten Monats- bzw. Jahressummen in Hannover-Langenhagen. Mittelwerte berechnet für die Zeiträume 1961-1990 (grün), 1971-2000 (hellblau), 1981-2010 (dunkelblau) und 1991-2020 (lila).

| Parameter | Jan | Feb | Mrz | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr | Zeitraum |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----------|
| Maximum | 88 | 109 | 163 | 263 | 332 | 300 | 351 | 287 | 258 | 185 | 123 | 77 | 1972 | 1951-2020 |
| mittlere Anzahl an Monats- bzw. Tagesstunden | 42 | 67 | 105 | 150 | 206 | 208 | 198 | 197 | 139 | 104 | 52 | 34 | 1501 | 1961-1990 |
| | 1.3 | 2.4 | 3.4 | 5.0 | 6.7 | 6.9 | 6.4 | 6.4 | 4.6 | 3.4 | 1.7 | 1.1 | 4.1 | |
| | 47 | 68 | 105 | 154 | 214 | 196 | 206 | 204 | 136 | 105 | 52 | 36 | 1525 | 1971-2000 |
| | 1.5 | 2.4 | 3.4 | 5.1 | 6.9 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 4.5 | 3.4 | 1.7 | 1.2 | 4.2 | |
| | 50 | 71 | 108 | 166 | 216 | 205 | 213 | 200 | 144 | 107 | 53 | 39 | 1574 | 1981-2010 |
| | 1.6 | 2.5 | 3.5 | 5.5 | 7.0 | 6.8 | 6.9 | 6.5 | 4.8 | 3.5 | 1.8 | 1.3 | 4.3 | |
| | 47 | 68 | 117 | 177 | 212 | 211 | 213 | 199 | 152 | 106 | 52 | 39 | 1595 | 1991-2020 |
| | 1.5 | 2.4 | 3.8 | 5.9 | 6.8 | 7.0 | 6.9 | 6.4 | 5.1 | 3.4 | 1.7 | 1.3 | 4.4 | |
| Minimum | 14 | 33 | 63 | 88 | 111 | 120 | 101 | 122 | 69 | 50 | 13 | 6 | 1274 | 1951-2020 |

Im Zeitraum 1991-2020 sind die Monate Mai, Juni und Juli mit jeweils über 210 Sonnenstunden die sonnenscheinreichsten Monate. Das entspricht pro Tag etwa 7 Stunden Sonne. Über 200 Stunden Sonnenschein können in einzelnen Jahren aber auch schon im April und noch im September erreicht werden. Bereits im März und noch im Oktober ist im Mittel mit mehr als 100 Stunden Sonnenschein zu rechnen (das entspricht mehr als 3 Stunden und 15 Minuten pro Tag). In einzelnen Jahren konnte diese Summe auch im Februar sowie im November registriert werden. Die wenigsten Sonnenstunden sind im Dezember zu erwarten, hier scheint die Sonne im langjährigen Mittel gerade mal für 1 Stunde und 15 Minuten pro Tag bzw. 39 Stunden im gesamten Monat. Beim Vergleich der verschiedenen Zeiträume miteinander fällt auf, dass vor allem der April einen stetigen Zuwachs an Sonnenstunden erfahren hat (1961-90: 154, 1991-2020: 177). Auch in allen anderen Monaten, sind die Sonnenstunden zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2020 angestiegen. Werden die mittleren monatlichen Sonnenstunden der einzelnen Jahreszeiten der Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 verglichen, ist die größte Zunahme mit 29 Stunden im Frühling (März bis Mai) zu beobachten, die geringste im Winter (Dezember bis Februar) mit 9 zusätzlichen Sonnenstunden.

4.4.2 Vergleich der astronomisch möglichen mit der mittleren Sonnenscheindauer

In Abbildung 4.17 ist zusätzlich zu der mittleren täglichen Sonnenscheindauer pro Monat auch die astronomische Sonnenscheindauer, also die maximal mögliche tägliche Sonnenscheindauer abgebildet. Es ist deutlich zu sehen, dass die astronomische Sonnenscheindauer wesentlich höher liegt als die über längere Zeiträume gemittelte tägliche Sonnenscheindauer. Der Grund hierfür ist vor allem die für unsere Breiten typische Witterung mit einem über das Jahr beständigen Wechsel von Sonne und Wolken. An einzelnen Tagen im Jahr scheint die Sonne die maximal mögliche Zeit, an anderen dafür gar nicht. Bezogen auf den Mittelungszeitraum 1991-2020 hat der August mit 45 % der maximal möglichen Sonnenscheindauer die beste Bilanz. Im Dezember hingegen werden nur rund 17 % der maximal möglichen Sonnenscheindauer erreicht. Die mittlere Jahressumme von 1595 Stunden entspricht einem Mittelwert von 4,4 Sonnenstunden pro Tag, das sind etwa 36 % der maximal möglichen Sonnenausbeute. Zum Vergleich: das sonnenscheinreichste Jahr (1959) erreichte mit 1971,6 Stunden 45 % der maximal möglichen Sonnenstundensumme, der sonnenscheinreichste Monat Juli 2006 schafft es mit 351 Sonnenstunden auf immerhin 71 %.

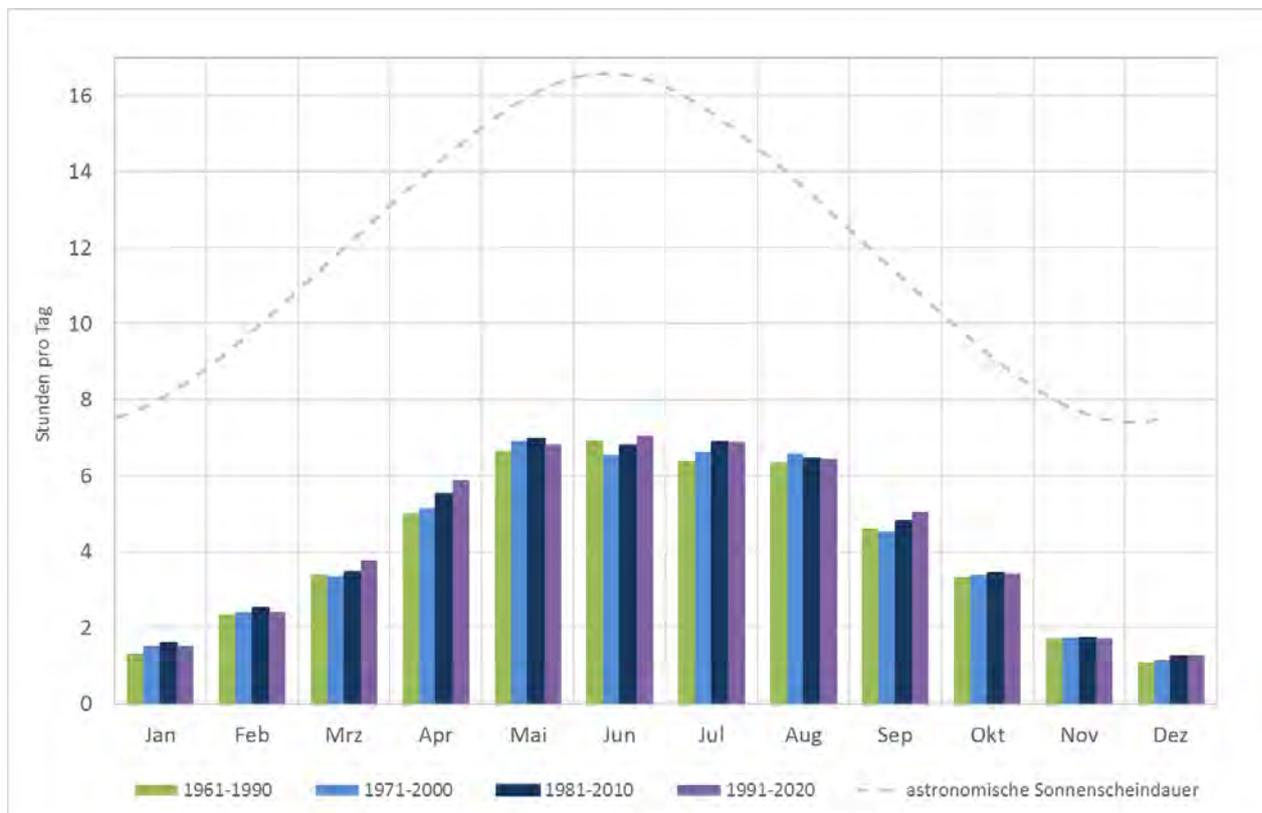


Abb. 4.17: Jahrgang der mittleren täglichen Sonnenscheindauer in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020. Gestrichelte graue Linie: Jahrgang der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer.

4.5 Windverhältnisse

Die Windverhältnisse an einem Ort werden im Wesentlichen von der allgemeinen Luftdruckverteilung bestimmt. Das Geländere relief sowie Vegetation, Bebauung und

Untergrund haben jedoch einen erheblichen Einfluss auf Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Da die Topografie im norddeutschen Raum meist nur schwach ausgeprägt ist, werden die in Mitteleuropa vorherrschenden westlichen Windrichtungen zunächst kaum modifiziert. In stark bebauter Umgebung muss jedoch mit einem veränderten Windfeld gerechnet werden. Für die folgende Auswertung wurden stündliche Windmessungen aus dem Zeitraum Januar 1991 bis Dezember 2020 verwendet.

Der Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit beträgt an der Station Hannover-Langenhagen 3,8 m/s, das entspricht der Windstärke 3 Bft. Die Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit sind in Abbildung 4.18 dargestellt. Mit 4,6 m/s ist der Januar der Monat mit der höchsten, der August mit 3,2 m/s der mit der niedrigsten mittleren Windgeschwindigkeit.

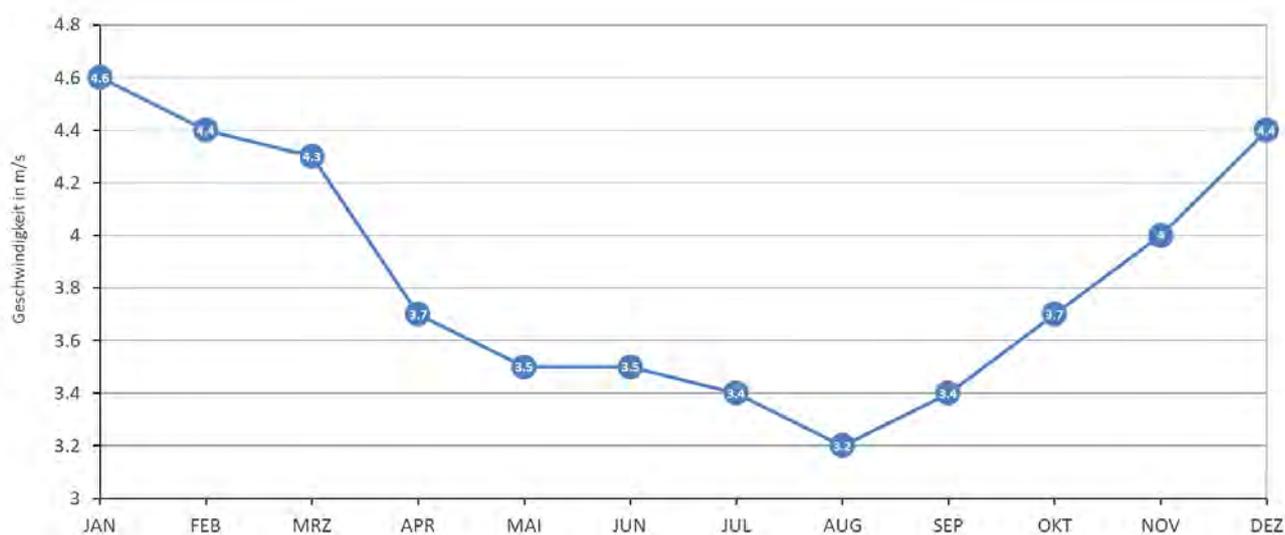


Abb. 4.18: Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit (m/s) in Hannover-Langenhagen. Zeitraum: 1991-2020.

4.5.1 Windgeschwindigkeit und Windrichtung

In Tabelle 4.12 sind die Häufigkeitsmaxima und -minima der Windrichtungsverteilung gemittelt über den Zeitraum 1991-2020 an der Station Hannover-Langenhagen für das gesamte Jahr sowie für die einzelnen Jahreszeiten angegeben, Abbildung 4.19 zeigt eine Jahreszeitenwindrose, Abbildung 4.20 die Stärkewindrose.

In Hannover-Langenhagen zeigen die Sektorbereiche West (260°-280°) mit Anteilen von 17,9 % und Westsüdwest (230°-250°) mit 15,1 % der Jahresstunden die größten Häufigkeiten. Das sekundäre Maximum liegt im Ostsektor (80°-100°) mit 11,6 %. Am seltensten weht der Wind aus nördlichen Richtungen.

Im Zeitraum 1991 bis 2020 gab es insgesamt nur sechs Jahre, in denen die Hauptwindrichtung (Jahresmittel) nicht auf den Westsektor fiel. Viermal kam der Wind am häufigsten aus Westsüdwest (1992, 1998, 1999, 2011). In einzelnen Jahren

Tab. 4.12: Windrichtungsverteilung in Hannover-Langenhagen (1991-2020); Richtungsangaben für 30°-Sektoren, Prozentangaben: Häufigkeit, bezogen auf die Stunden pro Jahr.

| | Hauptmaximum | | sekundäres Maximum | | Minimum | |
|----------|--------------|-------|--------------------|-------|------------|------|
| Jahr | W (270°) | 17,9% | O (90°) | 11,6% | NNW (330°) | 4,6% |
| | WSW (240°) | 15,1% | | | NNO (30°) | 3,1% |
| | | | | | N (360°) | 2,5% |
| Frühling | W (270°) | 17,4% | O (90°) | 13,5% | SSO (150°) | 4,2% |
| | WSW (240°) | 11,8% | | | NNO (30°) | 4,0% |
| | WNW (300°) | 11,6% | | | N (360°) | 3,2% |
| Sommer | W (270°) | 20,5% | O (90°) | 9,1% | SSO (150°) | 3,9% |
| | WSW (240°) | 14,2% | | | N (360°) | 3,2% |
| | WNW (300°) | 12,4% | | | NNO (30°) | 3,1% |
| Herbst | WSW (240°) | 15,7% | O (90°) | 12,3% | NNW (330°) | 3,0% |
| | W (270°) | 15,6% | | | NNO (30°) | 2,6% |
| | | | | | N (360°) | 1,9% |
| Winter | WSW (240°) | 18,8% | O (90°) | 11,7% | NNW (330°) | 2,6% |
| | W (270°) | 18,0% | | | NNO (30°) | 2,5% |
| | | | | | N (360°) | 1,7% |

kann sich das Windregime allerdings auch gänzlich anders präsentieren. In den Jahren 1996 und 2018 lag das Windrichtungsmaximum mit 18,3 und 17,7 % im Ostsektor. Auffällig waren auch die Jahre 2007 und 2017, in denen Westwinde mit 22,2 und 22,4 % besonders dominant waren.

Bei Betrachtung der Windrosen der einzelnen Jahreszeiten, siehe Abbildung 4.19, fällt auf, dass im Sommer (Juni, Juli, August) die Westkomponente stärker ausgeprägt ist (20,5 %), Ostwinde hingegen seltener vorkommen (9,1 %) als in den anderen Jahreszeiten. Letztere haben im Frühling (März, April, Mai) mit 13,5 % ihre größte Häufigkeit. Vor allem im Winter (Dezember, Januar, Februar) finden sich häufiger Winde aus Westsüdwest (18,8 %) und Südwinde gibt es im Herbst und Winter häufiger als im Frühling und Sommer.

Die Stärkewindrose (Abb. 4.20) zeigt die Häufigkeitsverteilung der Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung. Die gemessenen Windgeschwindigkeiten werden in 1-m/s-Klassen eingeteilt, die Windrichtungen in 30°-Sektoren (12-teilige Windrose). Die Farbstufen ermöglichen die Zuordnung zu den Windklassen, die Länge der Farbstufen entspricht der prozentualen Häufigkeit, mit der die jeweilige Windgeschwindigkeitsklasse aus der gegebenen Windrichtung auftrat. Sehr hohe mittlere Windgeschwindigkeiten sind fast immer mit Wind aus den westlichen Sektoren gekoppelt. In Hannover-Langenhagen kamen im Zeitraum 1991-2020 Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit von mindestens 14,1 m/s (entsprechend Windstärke 7 Bft) insgesamt 69 Mal vor, diese verteilten sich ausschließlich auf die Sektoren SSW (1-mal), WSW (8-mal), W (44-mal), WNW (15-mal) und NNW (1-mal).

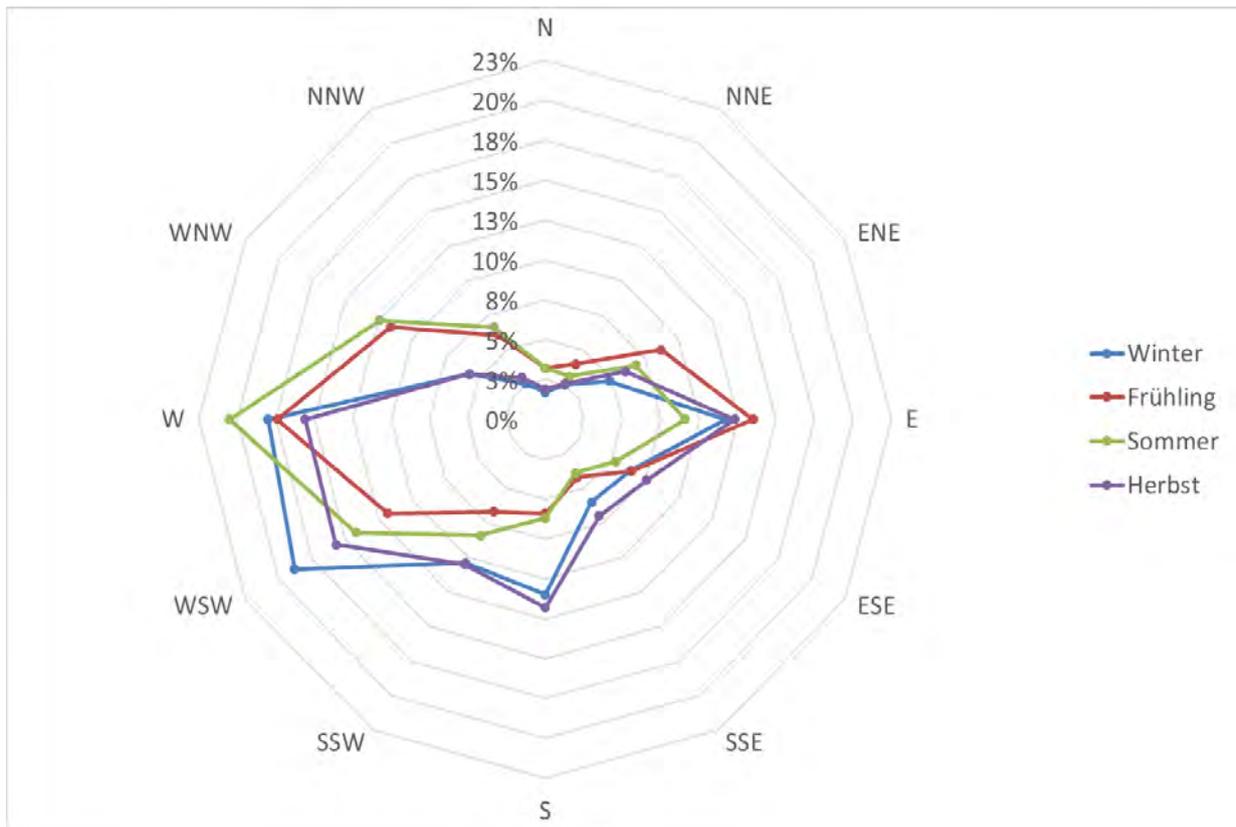
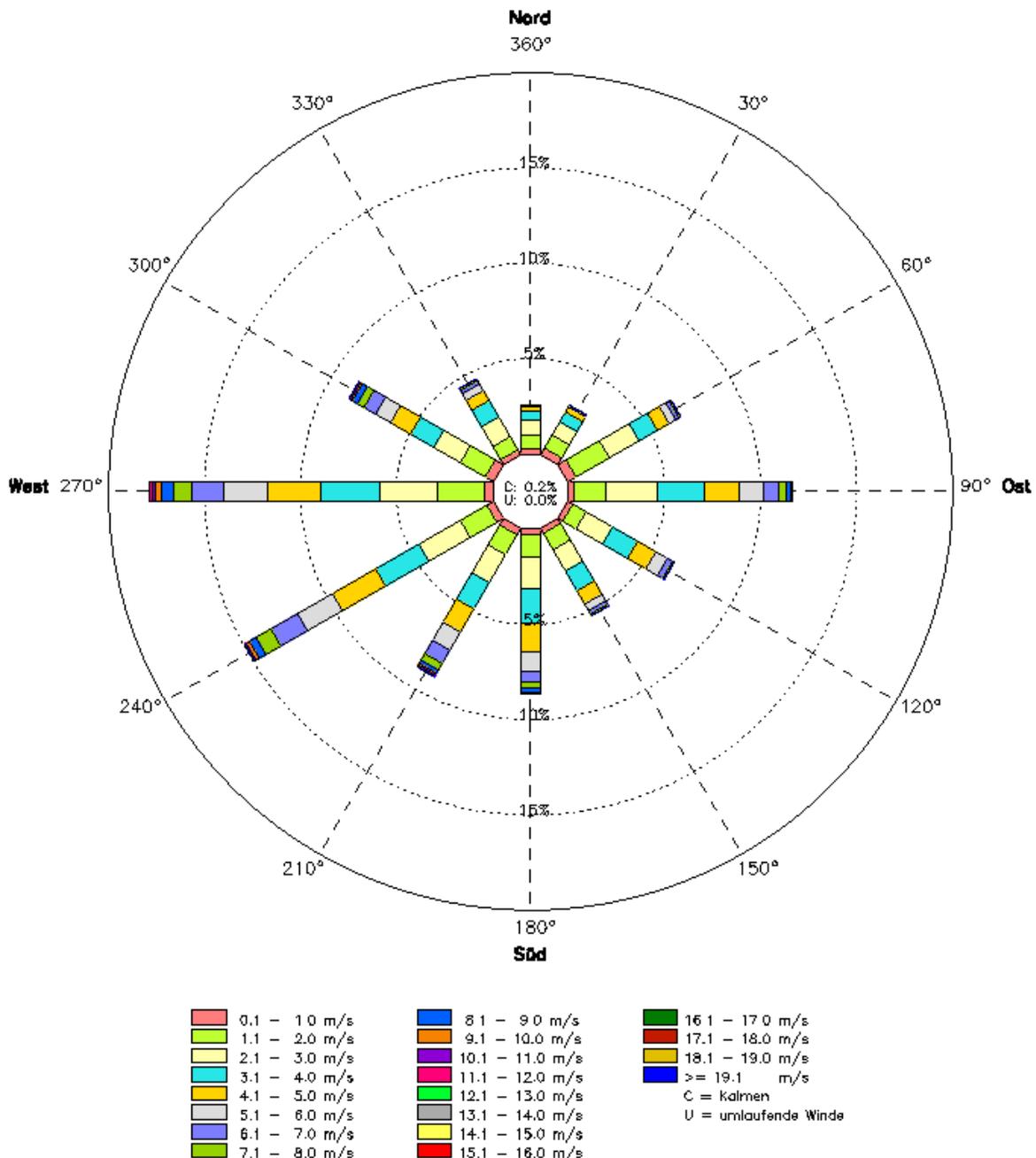


Abb. 4.19: Jahreszeitenwindrose von Hannover-Langenhagen (Häufigkeitsverteilung der Stundenwerte der Windrichtung in Abhängigkeit von der Jahreszeit), Zeitraum: 1991-2020.

Stärkewindrose

in Prozent der Jahresstunden

Station: Hannover Langenhagen (1538)
Zeitraum: 01/1991 – 12/2020



Die Länge der einzelnen Farbstufen entspricht der prozentualen Häufigkeit, mit der die jeweilige Windgeschwindigkeit aus der angegebenen Windrichtung auftritt.

Abb. 4.20: Stärkewindrose von Hannover-Langenhagen (Häufigkeitsverteilung der Stundenmittlerwerte der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung). Zeitraum: 1991-2020.

4.5.2 Anzahl der Tage mit Sturm

Neben den mittleren Windverhältnissen an einem Ort ist vor allem auch das Auftreten von Windspitzen (Böen) von Interesse. Da solche Starkwindereignisse nicht sehr häufig vorkommen, wurde für diese Auswertung der Betrachtungszeitraum erweitert auf 1954 bis 2020. Aus der Zeit vor 1954 stehen keine kontinuierlichen Böenmessungen zur Verfügung. In Abbildung 4.21 ist die Häufigkeit der jährlichen Sturmtage seit 1954 dargestellt. Als Sturmtag gilt ein Tag, an dem mindestens einmal eine Böe mit einer Windgeschwindigkeit größer oder gleich 17,2 m/s, entsprechend Windstärke 8 Bft (stürmischer Wind), gemessen wurde. Die Grafik zeigt einen Trend zu abnehmender Sturmhäufigkeit an der Wetterstation Hannover-Langenhagen. Im Jahr 1967 gab es mit 64 Tagen die bisher meisten Tage mit Windstärke 8 Bft oder höher, dagegen gab es 1996 nur insgesamt 10 solcher Tage.

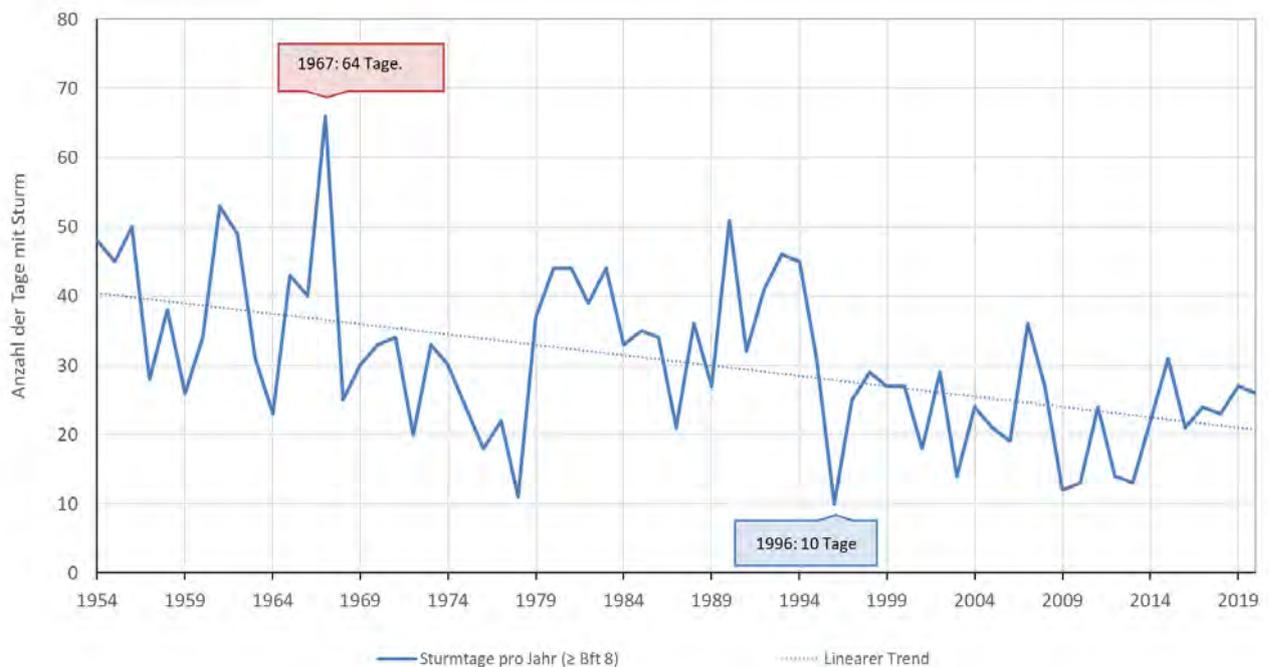


Abb. 4.21: Anzahl der Sturmtage (Windspitzen mit 8 Bft oder mehr) pro Jahr in Hannover-Langenhagen (1954 - 2020).

Für eine weitergehende Analyse der Entwicklung der Sturmtage wird im Folgenden wieder der Bezugszeitraum 1991 bis 2020, sowie die davorliegenden Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1981-2010 betrachtet. Abbildung 4.22 zeigt den Jahresgang der Anzahl der Tage mit Sturm (\geq Bft 8) für die vier Zeiträume. Es ist ein Jahresgang erkennbar mit einem Maximum im Winter und einem Minimum im Sommer. In Tabelle 4.13 sind die Werte für die drei Zeiträume zusammengefasst. Zusätzlich zu den Tagen mit Windstärke \geq 8 Bft ist auch die Anzahl der Tage mit \geq 6 und \geq 10 Bft dargestellt. Bei einer Windstärke von 6 Bft (ab 10,8 m/s) spricht man von starkem Wind, bei 10 Bft (ab 24,5 m/s) von schwerem Sturm. Es ist ersichtlich, dass die Jahressumme der Ereignistage für jede der drei Stärkestufen von Zeitraum zu Zeitraum leicht abnimmt.

Bei Betrachtung der einzelnen Monate fallen jedoch unterschiedliche Trends auf. So ist im Januar die Anzahl an Sturmtagen von 4,6 Tagen im Zeitraum 1961-1990 zunächst auf 5,4 Tage im Zeitraum 1981-2010 angestiegen, im Zeitraum 1991-2020

aber auf 4,4 Tage zurückgegangen. Auch für die anderen Stärkestufen zeigt sich im Januar dieser Verlauf. Die stärkste Abnahme für die Tage mit maximalen Windstärken größer oder gleich 6, 8 und 10 Bft kann im November beobachtet werden.

Sehr hohe Windgeschwindigkeiten mit Böen in Orkanstärke, also Windstärke 12 Bft (ab 32,8 m/s), wurden an der Station Langenhagen bisher (seit 1954) insgesamt 8-mal gemessen, zuletzt im Februar 1990. Die höchste an der Station gemessene Windböe gab es im Januar 1976 mit 42,2 m/s. Windspitzen der Windstärke 11 Bft (ab 28,5 m/s) sind seit 1954 insgesamt 59-mal vorgekommen, davon 21-mal im Januar und insgesamt nur 5-mal in den vergangenen 10 Jahren.

Tab.4.13: Mittlere Anzahl der Tage pro Monat und Jahr mit Windspitzen (Böen) \geq 6, 8 und 10 Bft in Hannover-Langenhagen; Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020.

| Zeitraum | Windstärke | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Jahr |
|-----------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1961-1990 | \geq Bft 6 | 16.1 | 12.6 | 16.9 | 15.3 | 14.7 | 12.7 | 13.8 | 12.4 | 11.8 | 12.3 | 15.4 | 16.3 | 170.2 |
| | \geq Bft 8 | 4.6 | 3.2 | 4.8 | 2.5 | 1.9 | 1.4 | 1.4 | 1.5 | 1.8 | 2.6 | 4.3 | 4.3 | 34.3 |
| | \geq Bft 10 | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.7 | 0.4 | 3.8 |
| 1971-2000 | \geq Bft 6 | 16.4 | 12.6 | 16.7 | 14.7 | 13.7 | 12.3 | 13.1 | 11.6 | 11.7 | 12.5 | 15.0 | 16.3 | 166.7 |
| | \geq Bft 8 | 5.1 | 3.1 | 4.4 | 2.3 | 1.3 | 1.4 | 0.8 | 1.2 | 1.4 | 2.5 | 3.5 | 4.6 | 31.7 |
| | \geq Bft 10 | 1.0 | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.4 | 3.2 |
| 1981-2010 | \geq Bft 6 | 16.4 | 13.3 | 16.0 | 14.0 | 13.3 | 13.0 | 13.6 | 12.2 | 10.8 | 12.8 | 13.6 | 14.1 | 163.1 |
| | \geq Bft 8 | 5.4 | 3.3 | 4.1 | 1.6 | 1.5 | 1.7 | 1.0 | 1.2 | 1.1 | 2.3 | 2.6 | 3.8 | 29.7 |
| | \geq Bft 10 | 0.9 | 0.4 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 2.9 |
| 1991-2020 | \geq Bft 6 | 15.6 | 13.3 | 15.2 | 13.7 | 13.8 | 13.7 | 13.4 | 12.1 | 10.1 | 11.6 | 12.1 | 14.8 | 159.6 |
| | \geq Bft 8 | 4.4 | 2.8 | 3.4 | 1.5 | 1.1 | 1.5 | 1.2 | 1.0 | 0.7 | 1.7 | 2.0 | 3.5 | 25.0 |
| | \geq Bft 10 | 0.6 | 0.3 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 2.0 |

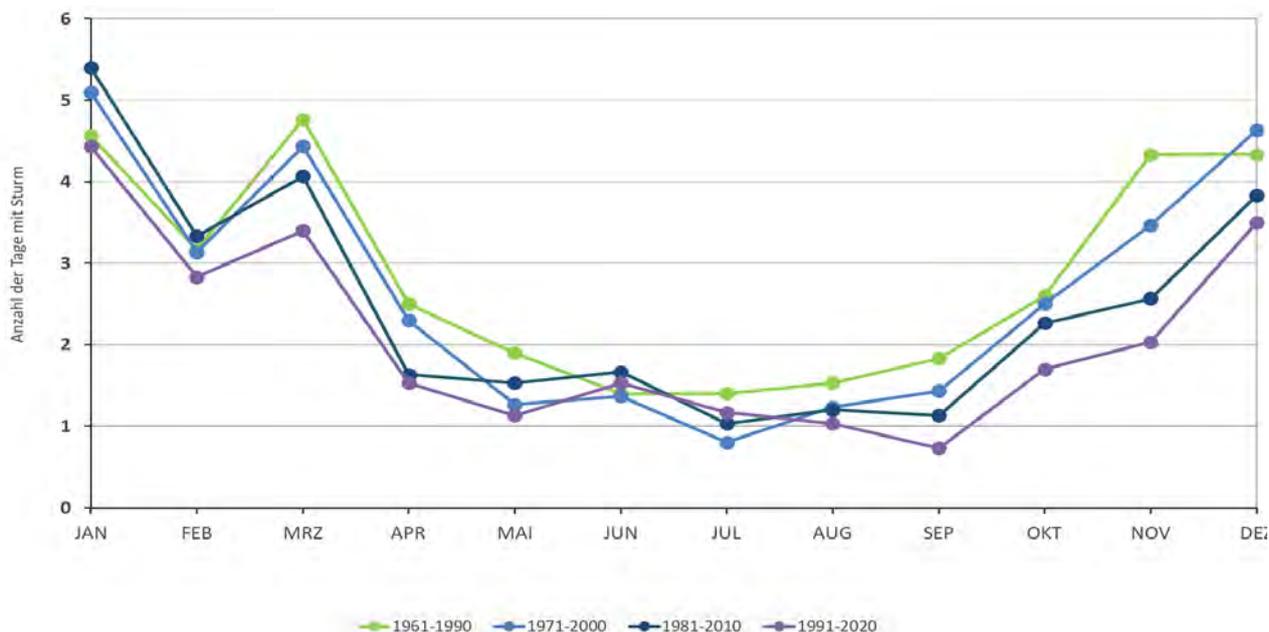


Abb.4.22: Monatliche Anzahl der Sturmtage (Tagesmaximum \geq 17,2 m/s, Bft 8) in Hannover-Langenhagen; Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020.

5 Die temporären Messungen in Hannover

5.1 Lage der Messstationen

Im Mai 2017 wurden im Stadtgebiet von Hannover die temporären Messstationen am Weidendamm (im Folgenden mit WD abgekürzt) in der Nordstadt, in der Marianne-Baecker-Allee (kurz: MB) in Linden und im Kattenbrookspark (kurz: KP) in Bemerode eingerichtet, an denen (in 2 m Höhe) die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie an der Station Weidendamm die Globalstrahlung gemessen wird. Als Referenz werden die Messungen der Wetterstation Hannover-Langenhagen (LH) verwendet. Bereits einige Monate zuvor wurden zwei Stationen in den Tiefebenen der Haltestelle Kröpcke installiert. Die Messkampagne begann am 01.06.2017 und endete am 31.12.2020. Es stehen von allen Stationen 10-Minuten-Mittelwerte der meteorologischen Messwerte zur Verfügung, das sind jährlich über 50.000 Datensätze. Zusätzlich gehen noch die Daten der Wetterstation Hannover-Herrenhausen (HE) in den Vergleich ein, die vom Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMUK) der Leibniz Universität Hannover betrieben wird.

Alle Stationen haben zuverlässig gemessen, der Datenausfall liegt für fast alle Parameter bei deutlich unter 1 %. Lediglich die Station Herrenhausen war zeitweise kurz außer Betrieb, aber auch dort beträgt der Datenausfall – je nach Parameter – lediglich zwischen 1 und 5 %.



Abb. 5.1: Station Weidendamm (WD).



Abb. 5.2: Station Marianne-Baecker-Allee (MB).



Abb. 5.3: Station Kattenbrookspark (KP).

Am Standort der Station Weidendam wird vom Deutschen Wetterdienst eine permanente Stadtklimastation eingerichtet. Dann werden dort u.a. zusätzlich Strahlung, Niederschlag sowie Erdbodentemperaturen in verschiedenen Tiefen gemessen.

An der Straßenbahnhaltestelle Kröpcke sind in zwei unterirdischen Plattformen, in Ebene -3 (K-3) und Ebene -5 (K-5), zwei Messstationen installiert worden, an denen laufend Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind gemessen wurde. Die Messgeräte standen im nicht öffentlich zugänglichen Tunnelbereich, jeweils kurz hinter dem Ende des Bahnsteigs, in Ausfahrtrichtung aus dem Tunnel, siehe Abbildungen 5.4 und 5.5.



Abb. 5.4: Messstation in der Haltestelle Kröpcke, Ebene -3 (K-3).

Abb. 5.5: Messstation in der Haltestelle Kröpcke, Ebene -5 (K-5).

Die DWD-Wetterstation Hannover-Langenhagen, siehe Abbildung 5.6, befindet sich auf dem Gelände des Flughafens in einer weitgehend ungestörten Umgebung am nördlichen Stadtrand. Die Station Herrenhausen, siehe Abbildung 5.7, liegt auf dem Gelände der Leibniz Universität Hannover an der Herrenhäuser Straße. In unmittelbarer Umgebung gibt es Gebäude und Gewächshäuser, nicht weit entfernt liegen die Grünanlagen Georgengarten und Herrenhäuser Gärten.

Die beiden Stationen Weidendam und Marianne-Baecker-Allee repräsentieren städtische Verhältnisse mit dichter, innerstädtischer Bebauung (WD) bzw. Gewerbeflächen mit starker Versiegelung zwischen der lockeren Bebauung (MB). Die Stationen Kattenbrookspark und Langenhagen stehen für Umlandgebiete mit geringer Versiegelung und nahezu ungestörten meteorologischen Verhältnissen. Für die Station Herrenhausen ist die Zuordnung zu ‚städtisch‘ oder ‚Umland‘ nicht einfach zu treffen. In der Nähe liegen zwar ausgedehnte Grünflächen, aber in der unmittelbaren Umgebung befinden sich unterschiedlich hohe Gebäude der

Universität sowie große Gewächshäuser mit Lüftungsanlagen. Diese Station kann keiner der beiden Kategorien eindeutig zugeordnet werden. Wie später gezeigt wird, ist sie tagsüber durch die städtische Umgebung, nachts allerdings durch das Umland geprägt.



Abb. 5.6: Messfeld der DWD Wetterstation Hannover-Langenhagen (LH).



Abb. 5.7: Station Herrenhausen (HE), betrieben vom Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover (IMUK).

5.2 Lufttemperatur

Einen Überblick über die Temperaturverhältnisse an den sieben Stationen zeigt Tabelle 5.1. Für alle Stationen werden die Mitteltemperatur, das mittlere Minimum, das mittlere Maximum sowie die Extremwerte für jeden Monat und das Jahr angegeben. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund des Messbeginns im Juni 2017 für die Monate Januar bis Mai nur jeweils drei Jahre zur Verfügung stehen, bei den anderen Monaten aber vier Jahre in die Berechnungen eingehen.

Tab. 5.1: Monats- und Jahresmittelwerte des Tagesmaximums, der Tagesmitteltemperatur und des Tagesminimums sowie die Extremwerte an den Stationen (Zeitraum: 06.2017-12.2020).

| Absolutes Tagesmaximum (°C) | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
| LH | 13,0 | 18,2 | 19,0 | 26,4 | 32,1 | 35,7 | 37,9 | 36,5 | 32,3 | 27,4 | 20,7 | 14,7 | 37,9 |
| WD | 13,2 | 18,3 | 19,5 | 28,1 | 32,5 | 36,7 | 38,2 | 37,1 | 31,4 | 27,0 | 21,1 | 14,9 | 38,2 |
| MB | 13,6 | 20,1 | 20,0 | 28,5 | 31,8 | 37,2 | 38,9 | 37,8 | 32,7 | 28,0 | 21,8 | 14,8 | 38,9 |
| KP | 13,5 | 19,2 | 19,4 | 27,7 | 31,6 | 36,7 | 37,9 | 36,7 | 32,0 | 27,8 | 21,5 | 15,0 | 37,9 |
| HE | 13,7 | 19,5 | 20,5 | 28,8 | 33,7 | 36,7 | 39,6 | 38,0 | 33,4 | 28,6 | 22,0 | 15,0 | 39,6 |
| K-3 | 17,9 | 17,7 | 18,9 | 22,1 | 26,8 | 27,6 | 29,7 | 30,2 | 27,2 | 24,8 | 21,9 | 18,6 | 30,2 |
| K-5 | 16,2 | 16,0 | 17,2 | 21,2 | 25,5 | 26,7 | 28,3 | 28,9 | 25,8 | 23,1 | 20,7 | 16,4 | 28,9 |
| Mittleres Tagesmaximum (°C) | | | | | | | | | | | | | |
| LH | 6,2 | 7,1 | 9,3 | 16,9 | 19,3 | 24,2 | 24,5 | 25,3 | 20,0 | 15,5 | 9,3 | 6,9 | 15,6 |
| WD | 6,5 | 7,3 | 9,7 | 17,5 | 19,8 | 24,6 | 24,8 | 25,8 | 20,3 | 15,6 | 9,5 | 7,2 | 16,0 |
| MB | 6,4 | 7,5 | 9,7 | 17,7 | 20,1 | 25,0 | 25,2 | 26,2 | 20,8 | 16,0 | 9,6 | 7,1 | 16,2 |
| KP | 6,2 | 7,3 | 9,5 | 17,3 | 19,4 | 24,4 | 24,9 | 25,8 | 20,4 | 15,7 | 9,3 | 7,0 | 15,9 |
| HE | 6,5 | 7,8 | 9,9 | 18,1 | 20,6 | 25,4 | 25,6 | 26,6 | 21,2 | 16,3 | 9,8 | 7,2 | 16,5 |
| K-3 | 15,9 | 15,6 | 15,7 | 18,8 | 21,1 | 24,5 | 25,4 | 26,6 | 24,5 | 22,0 | 19,0 | 16,8 | 20,6 |
| K-5 | 13,7 | 13,4 | 13,5 | 17,1 | 19,6 | 23,1 | 23,8 | 25,1 | 22,7 | 20,1 | 16,6 | 14,6 | 18,7 |
| Mittlere Tagesmitteltemperatur (°C) | | | | | | | | | | | | | |
| LH | 3,8 | 3,6 | 5,4 | 11,0 | 13,5 | 18,5 | 18,7 | 19,6 | 14,7 | 11,7 | 6,6 | 4,9 | 11,1 |
| WD | 4,4 | 4,4 | 6,2 | 12,3 | 14,7 | 19,5 | 19,8 | 20,8 | 15,8 | 12,5 | 7,2 | 5,4 | 12,1 |
| MB | 4,1 | 4,1 | 6,0 | 12,1 | 14,6 | 19,5 | 19,7 | 20,6 | 15,5 | 12,2 | 6,9 | 5,1 | 11,9 |
| KP | 3,8 | 3,8 | 5,6 | 11,4 | 13,8 | 18,6 | 19,0 | 19,8 | 14,8 | 11,8 | 6,5 | 4,8 | 11,3 |
| HE | 4,2 | 4,1 | 5,9 | 12,1 | 14,7 | 19,5 | 19,7 | 20,5 | 15,3 | 12,2 | 6,9 | 5,1 | 11,8 |
| K-3 | 15,1 | 14,6 | 14,7 | 17,5 | 19,7 | 23,1 | 24,0 | 25,3 | 23,4 | 21,1 | 18,2 | 16,0 | 19,5 |
| K-5 | 12,7 | 12,2 | 12,2 | 15,6 | 18,3 | 21,7 | 22,5 | 23,8 | 21,5 | 19,0 | 15,5 | 13,7 | 17,5 |
| Mittleres Tagesminimum (°C) | | | | | | | | | | | | | |
| LH | 1,2 | 0,1 | 1,2 | 4,5 | 6,9 | 12,4 | 12,8 | 13,7 | 9,3 | 8,1 | 3,7 | 2,5 | 6,3 |
| WD | 2,2 | 1,6 | 2,8 | 7,0 | 9,6 | 14,7 | 15,0 | 16,2 | 11,6 | 9,6 | 4,9 | 3,5 | 8,3 |
| MB | 1,8 | 1,0 | 2,2 | 6,6 | 9,1 | 14,3 | 14,7 | 15,5 | 10,8 | 9,1 | 4,3 | 3,1 | 7,8 |
| KP | 1,2 | 0,6 | 1,5 | 5,2 | 7,5 | 12,6 | 13,1 | 13,9 | 9,6 | 8,3 | 3,6 | 2,5 | 6,7 |
| HE | 1,8 | 0,8 | 2,0 | 5,9 | 8,3 | 13,7 | 13,9 | 14,6 | 10,1 | 8,7 | 4,2 | 2,9 | 7,3 |
| K-3 | 13,9 | 13,4 | 13,3 | 16,1 | 18,3 | 21,6 | 22,7 | 24,0 | 22,3 | 20,1 | 17,0 | 14,9 | 18,2 |
| K-5 | 11,5 | 10,8 | 10,8 | 14,2 | 16,9 | 20,3 | 21,3 | 22,5 | 20,3 | 17,9 | 14,3 | 12,5 | 16,2 |
| Absolutes Tagesminimum (°C) | | | | | | | | | | | | | |
| LH | -9,3 | -12,1 | -11,9 | -3,7 | -1,9 | 5,7 | 6,1 | 7,1 | 1,0 | -2,7 | -4,8 | -4,5 | -12,1 |
| WD | -7,2 | -11,3 | -11,6 | -1,1 | 1,6 | 8,8 | 0,0 | 9,8 | 5,2 | -0,4 | -2,9 | -1,6 | -11,6 |
| MB | -7,4 | -11,3 | -11,6 | -2,4 | 0,9 | 8,2 | 9,3 | 8,5 | 3,9 | -0,5 | -3,1 | -2,3 | -11,6 |
| KP | -9,5 | -11,6 | -11,8 | -3,1 | -4,3 | 5,9 | 7,1 | 6,6 | 1,9 | -3,0 | -4,3 | -3,7 | -11,8 |
| HE | -8,6 | -11,3 | -11,7 | -3,3 | 0,7 | 7,3 | 8,9 | 7,4 | 3,2 | -1,0 | -3,2 | -2,3 | -11,7 |
| K-3 | 10,2 | 6,8 | 5,3 | 13,0 | 16,2 | 18,8 | 21,1 | 21,9 | 20,3 | 17,3 | 13,3 | 12,6 | 5,3 |
| K-5 | 5,5 | 0,7 | -0,8 | 9,8 | 14,1 | 16,9 | 19,4 | 19,9 | 17,7 | 12,6 | 8,9 | 8,8 | -0,8 |

An allen Stationen erweist sich der August als wärmster Monat, sowohl beim Maximum, als auch bei der Mitteltemperatur und dem Minimum. Der kälteste Monat bezogen auf das Minimum ist an allen oberirdischen Stationen der Februar, bezogen auf die Mitteltemperatur sind es Januar und Februar, bezogen auf das Maximum ist der Januar. An den beiden Tunnelstationen zeigen alle Parameter im Februar und März die niedrigsten Werte.

Im Einzelnen ergibt sich für die 43 Monate der Messkampagne folgendes Bild: die monatlichen Mitteltemperaturen an den Umlandstationen Langenhagen und Kattenbrookspark unterscheiden sich kaum, während die drei städtischen Stationen Weidendam, Marianne-Baecker-Allee und Herrenhausen während der Sommermonate um etwa 1 K höhere Werte zeigen. Die höchsten Monatsmittelwerte von 20,9 bis 22 °C wiesen die Stationen im Juli 2018 (WD, MB, KP, HE) bzw. im August 2020 (LH, WD) auf. Die beiden Tunnelstationen zeigen erwartungsgemäß einen gedämpften Jahresgang. In der Ebene -5 liegen die Mitteltemperaturen zwischen 9 und 13 °C im Winter und 22 bis 25 °C im Sommer, in der Ebene -3 zwischen nahe 15 °C im Winter und 23 bis 26,5 °C im Sommer. Die niedrigsten Monatsmittelwerte wurden im Februar 2018 registriert mit -0,2 °C (WD) und -1,0 °C (LH).

Die größte Temperaturspanne zwischen den monatlichen Maximum- und Minimumwerten zeigt sich an den oberirdischen Stationen in den Monaten April und Mai mit 10,3 bis 12,4 K, die geringste im Dezember und Januar mit 3,7 bis 5,0 K, siehe Tab. 5.2. In der Stadt (Stationen WD, MB) ist die Temperaturspanne allgemein etwas geringer als im Umland. Die beiden Tunnelstationen weisen nur eine sehr niedrige Temperaturspanne zwischen dem mittleren monatlichen Maximum und Minimum auf, die Werte liegen zwischen 1,9 und 2,9 K.

Tab. 5.2: Mittlere Monats- und Jahreswerte der Temperaturspanne (Maximum - Minimum) an den Stationen, angegeben in K.

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|
| LH | 5,0 | 7,0 | 8,1 | 12,4 | 12,4 | 11,8 | 11,6 | 11,6 | 10,7 | 7,3 | 5,6 | 4,5 | 9,3 |
| WD | 4,3 | 5,7 | 6,9 | 10,5 | 10,3 | 9,9 | 9,8 | 9,6 | 8,7 | 6,0 | 4,5 | 3,7 | 7,7 |
| MB | 4,7 | 6,5 | 7,5 | 11,1 | 11,0 | 10,8 | 10,6 | 10,7 | 10,0 | 6,9 | 5,2 | 4,1 | 8,4 |
| KP | 5,0 | 6,6 | 8,0 | 12,1 | 11,9 | 11,8 | 11,8 | 12,0 | 10,8 | 7,4 | 5,7 | 4,5 | 9,2 |
| HE | 4,7 | 6,9 | 7,9 | 12,2 | 12,3 | 11,7 | 11,6 | 11,9 | 11,2 | 7,7 | 5,6 | 4,3 | 9,2 |
| K-3 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 2,7 | 2,6 | 2,2 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 2,4 |
| K-5 | 2,2 | 2,6 | 2,6 | 2,9 | 2,7 | 2,8 | 2,6 | 2,6 | 2,4 | 2,1 | 2,4 | 2,1 | 2,6 |

An der Station Langenhagen liegt eine langjährige Reihe vor, damit können für diesen Standort die Temperaturverhältnisse während der Messkampagne mit denen der Referenzperioden 1961-1990 und 1991-2020 verglichen werden. Abbildung 5.8 zeigt die Monatsmittelwerte der Lufttemperaturen für die einzelnen Jahre und die Referenzperioden.

In einzelnen Monaten der Messkampagne wurden markante Abweichungen von den klimatologischen Erwartungswerten beobachtet. So waren z.B. im Jahr 2018 die Monate Februar und März deutlich kälter als zu erwarten, April, Mai und Juli deutlich wärmer. Der Monat Mai war in den Jahren 2019 und 2020 etwas zu kalt. Insgesamt überwogen allerdings die positiven Abweichungen deutlich. Das zeigt sich auch in den Jahresmitteltemperaturen: in Langenhagen waren sie in den Jahren 2017-2020 um 0,4 bis 1,3 K höher als in der Referenzperiode 1991-2020.

Die kalten Monate Februar und März 2018, Mai 2019 und Mai 2020 liegen auch beim mittleren Minimum deutlich unter den Erwartungswerten, siehe linkes Diagramm in Abb. 5.9. Beim mittleren Maximum übertreffen relativ viele Monate die Erwartungswerte, siehe rechtes Diagramm in Abbildung 5.9.

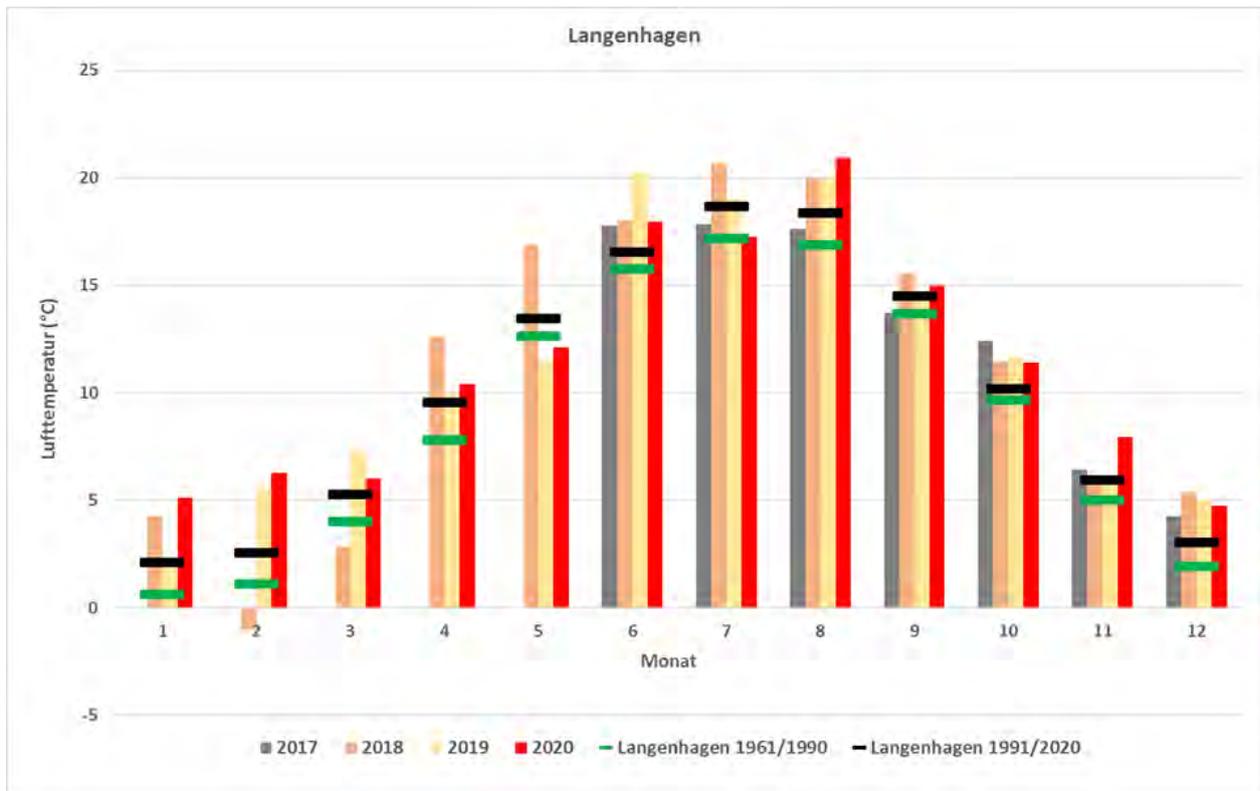


Abb. 5.8: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an der Station Langenhagen für jedes Jahr der Messkampagne (06.2017-12.2020) und im Vergleich mit den Referenzperioden 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (schwarz).

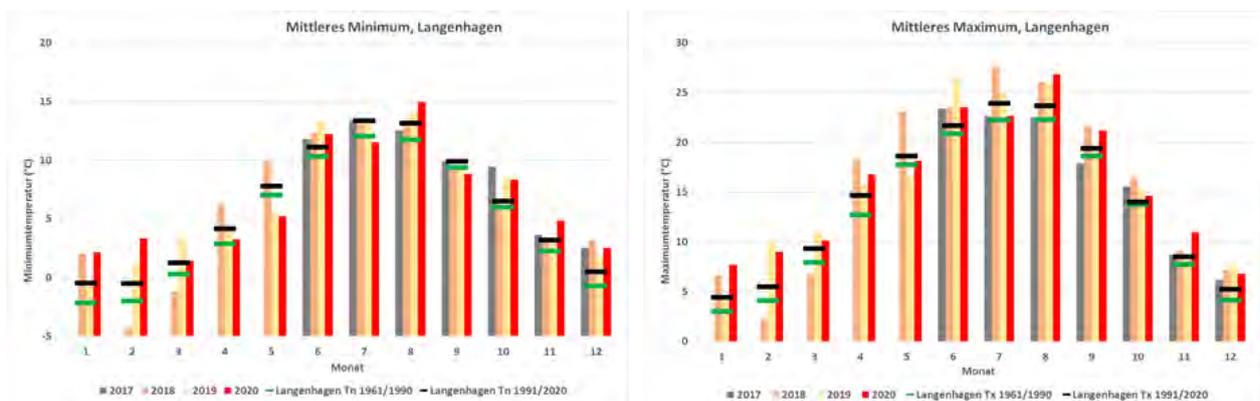


Abb. 5.9: Monatsmittelwerte des Minimums (links) und des Maximums (rechts) der Lufttemperatur an der Station Langenhagen während der Messkampagne (06.2017-12.2020) und im Vergleich mit den Referenzperioden 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (schwarz).

Für die Stationen Langenhagen, Weidendam, Marianne-Baecker-Allee, Kattenbrookspark und Herrenhausen sind in der folgenden Abbildung 5.10 für jeden Monat der Messkampagne die Mittelwerte der Tagesmaxima und Tagesminima als Zeitreihe dargestellt. Es zeigt sich, dass die Monatsmittelwerte der Maximumtemperaturen aller Stationen dicht beieinander liegen. Deutliche Abweichungen gibt es bei den Minimumtemperaturen. Langenhagen und Kattenbrookspark weisen die niedrigsten Werte auf, wie es für Umlandstationen zu erwarten ist. Die Stationen Weidendam und Marianne-Baecker-Allee zeigen im

Sommerhalbjahr um 2 bis 3 Kelvin, im Winterhalbjahr um 1 Kelvin höhere Werte. Hier erweist es sich, dass es in allen Jahreszeiten innerstädtisch nachts deutlich wärmer bleibt.

Die Messungen der Station Herrenhausen geben ein anderes Bild. Tagsüber wurden dort häufig die höchsten Temperaturen gemessen, besonders im Sommer; nachts kühlte es stark ab, nahezu bis auf das Niveau der Umlandstation Langenhagen. Die Station Herrenhausen scheint durch die unmittelbare Umgebung stark beeinflusst zu sein. Möglicherweise erzeugen die naheliegenden Gewächshäuser tagsüber durch reflektierte Sonnenstrahlung oder durch Abwärme eine lokale Wärmeinsel. Nachts überwiegt der kühlende Einfluss der umliegenden ausgedehnten Grünanlagen, entweder durch Kaltluftflüsse oder thermisch induzierte Flurwinde.

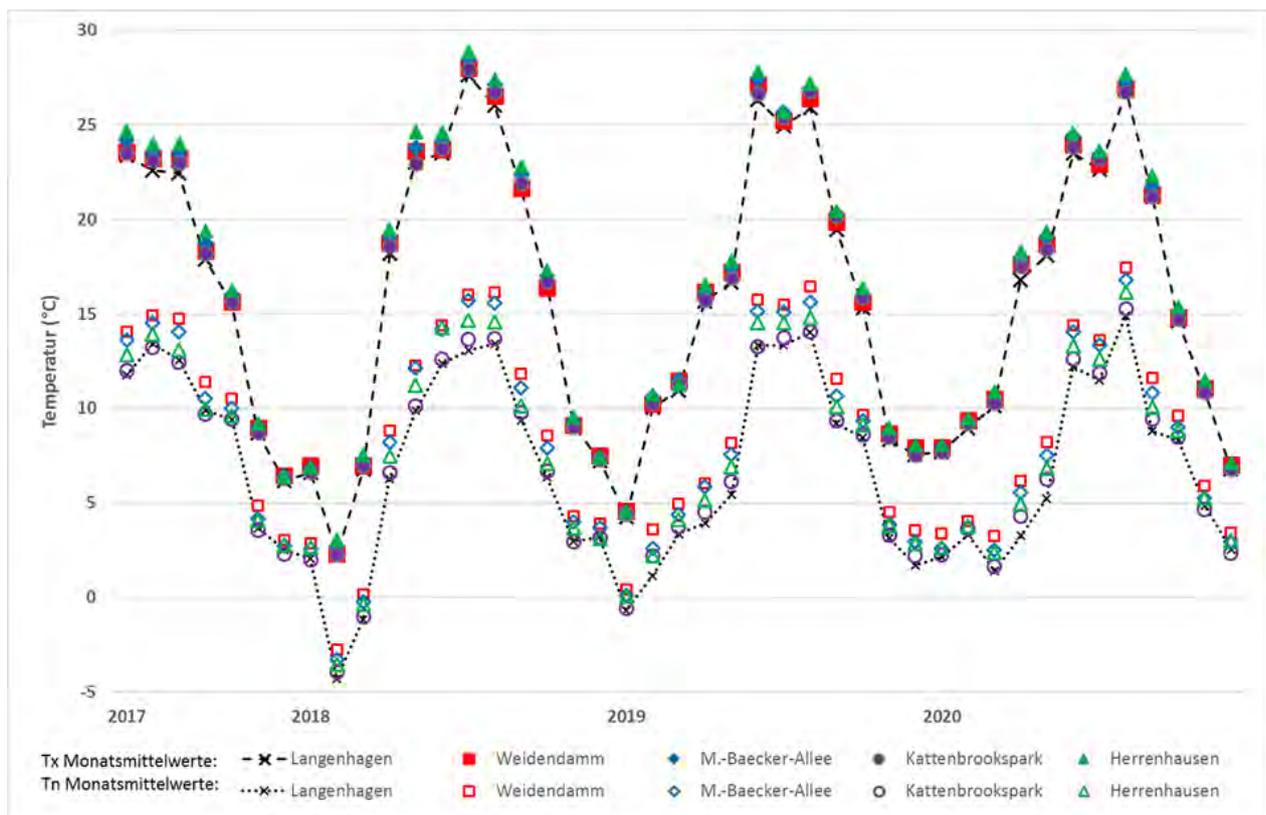


Abb. 5.10: Zeitreihen der mittleren monatlichen Maximum- (Tx) und Minimumtemperaturen (Tn) an den Stationen im Zeitraum 06.2017-12.2020.

Während die höchsten mittleren Monatsmaxima - mit Werten zwischen 27,6 °C (LH) und 29,9 °C (HE) - im Juli 2018 registriert wurden, zeigte sich an allen (oberirdischen) Stationen das höchste Tagesmaximum mit knapp unter 40 °C im Juli 2019: die höchsten Werte wurden an den Stationen Herrenhausen mit 39,6 °C und Marianne-Baecker-Allee mit 38,9 °C registriert. Knapp darunter lagen Weidendam mit 38,2 °C sowie Langenhagen und Kattenbrookspark mit 37,9 °C. Während ausgeprägter sommerlicher Hitzeperioden unterscheiden sich die Höchsttemperaturen an innerstädtischen Stationen und dem Umland nur wenig. An den beiden Tunnelstationen wurden von Juni bis September Maxima meist über 25, aber unter 30 °C erreicht. Lediglich im August 2018 gab es auch in der Ebene-3 mit 30,2 °C einmalig einen Hitzetag.

Bei den Monatsmittelwerten der Minimumtemperaturen liegen die Umlandstationen Langenhagen und Kattenbrookspark meist deutlich unter den drei Stadtstationen. Allerdings zeigt sich auch bei diesem Parameter: Während anhaltender winterlicher Kälteperioden, wie sie z.B. im Februar und März 2018 auftraten, ist es in der Stadt und im Umland nahezu gleich frostig kalt. Die absoluten Tiefstwerte lagen zwischen -11,6 (WD, MB) und -12,1 °C (LH). An den beiden Tunnelstationen wurden selten Tiefstwerte unter +10 °C registriert, siehe auch Tabelle 5.1. Lediglich in der Ebene-5 traten im Februar und März 2018 an einigen Tagen Minima nahe dem Gefrierpunkt auf. Während der Sommermonate gingen die Temperaturen im Tunnelbereich nachts kaum unter 20 °C zurück.

5.2.1 Temperaturen an den Tunnelstationen

Die Monatsmittelwerte, sowie mittleren und absoluten Tiefst- und Höchsttemperaturen an den beiden Tunnelstationen K-3 und K-5 für den gesamten Messzeitraum zeigt Tabelle 5.1. Einen Vergleich der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an den beiden Tunnelstationen mit den Klimawerten der Station Langenhagen gibt Abbildung 5.11. Wie zu erwarten, war es an beiden Tunnelstationen im Mittel deutlich wärmer als in Langenhagen. Der Unterschied betrug in den Sommermonaten 3 bis 8 Kelvin, im Winter um 12 Kelvin.

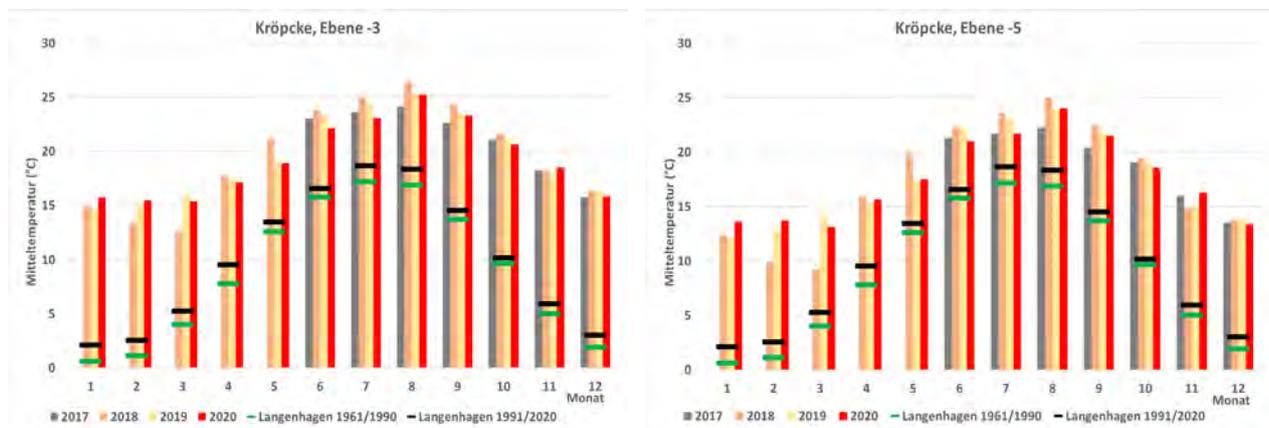


Abb. 5.11: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an den unterirdischen Stationen Kröpcke-3 und Kröpcke-5 (Zeitraum: 06.2017-12.2020), im Vergleich mit den Temperaturwerten der Station Langenhagen für die Referenzperioden 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (schwarz).

Für den Zeitraum 01.06.-31.08.2019 sind in Abbildung 5.12 die täglichen Maximum- und Minimumtemperaturen an den beiden Tunnelstationen K-3 und K-5 dargestellt. Das mittlere Minimum betrug während dieser Zeit 22,9 bzw. 21,7 °C, das mittlere Maximum 25,8 bzw. 24,5 °C. Die Höchstwerte lagen zwischen 22 und 29 °C, die Tiefstwerte zwischen 19 und 25 °C. In der oberen Ebene (K-3) war es immer etwas wärmer als in der unteren Ebene (K-5), im Mittel beträgt der Unterschied 1,7 Grad. Der Tagesgang war in beiden Ebenen mit 2-3 Grad nur schwach ausgeprägt, selten wurden bis zu 5 Grad erreicht. Während sommerlicher Hitzeperioden ist es im Tunnelbereich bis zu 10 Grad kühler als oben, während es bei kühlen Witterungsabschnitten in der Unterwelt bis zu 5 Grad wärmer sein kann. Insbesondere in den Nächten bildet sich regelmäßig ein sehr großer Temperaturunterschied zwischen der Ober- und Unterwelt aus. Nachts bleibt es im

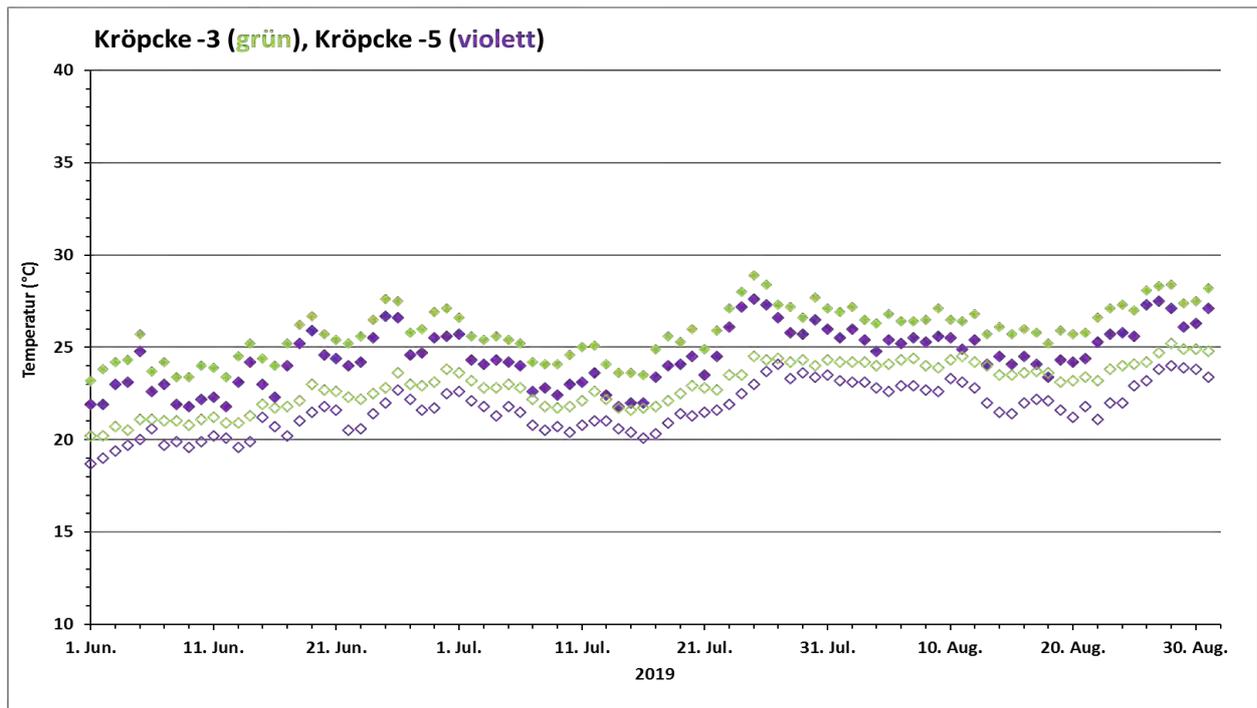


Abb. 5.12: Tagesminimum (offene Karos) und Tagesmaximum der Temperatur (gefüllte Karos) an den Tunnelstationen K-3 und K-5. Zeitraum: 01.06.-31.08.2019.

Tunnelbereich sehr warm, wie es auch die enorme Anzahl an Tropennächten (Minimum ≥ 20 °C) zeigt (siehe Tab. 5.3).

In der Abbildung 5.13 sind die Tageshöchsttemperaturen der Tunnelstationen mit den Werten der nächstgelegenen Station Weidendamm kombiniert für den Zeitraum 01.06.-31.08.2019. Im Sommer 2019 wechselten mehrfach Perioden sehr hoher Temperaturen mit kühleren Abschnitten. Die Temperaturunterschiede zwischen Tunnel- und Oberwelt waren häufig recht groß, insbesondere an Hitzetagen. Im Tunnelbereich herrschten einheitlichere Temperatur- und Feuchteverhältnisse.

Es zeigt sich, dass die Temperaturen im Tunnelbereich unmittelbar mit denen der Oberwelt korrespondieren, sowohl im Zeitpunkt, als auch beim Anstieg und im Rückgang. Es gibt also keine wesentliche Verzögerung beim Temperaturwechsel. Das liegt möglicherweise daran, dass die Tunnelstrecken bis zu den Messstationen Kröpcke-3 und -5 nicht besonders lang sind und durch die beständig fahrenden Straßenbahnen ein regelmäßiger Luftaustausch stattfindet. Von der Haltestelle Kröpcke bis zur nächsten oberirdischen Station, sind es, je nach Linie, zwei bis vier weitere Tunnel-Haltestellen. Die aus der Oberwelt mitgeführten heißen - oder kalten - Luftpakete vermischen sich rasch mit den Luftmassen im Tunnelsystem. Temperaturänderungen laufen im Tunnelbereich gedämpft ab, aber nicht verzögert.

Die Stundenmittelwerte der Temperaturen an den Tunnelstationen können mit denen der Stationen Langenhagen und Weidendamm verglichen werden. Eine Auswertung nach Stunde und Monat für den gesamten Messzeitraum zeigt, dass im Mittel die geringsten Abweichungen zwischen Tunnel und Oberwelt von April bis August auftraten, und zwar tagsüber zwischen 12 und 18 Uhr MESZ. Die größten Differenzen wurden von November bis Februar nachts zwischen 21 und 08 Uhr MEZ beobachtet.

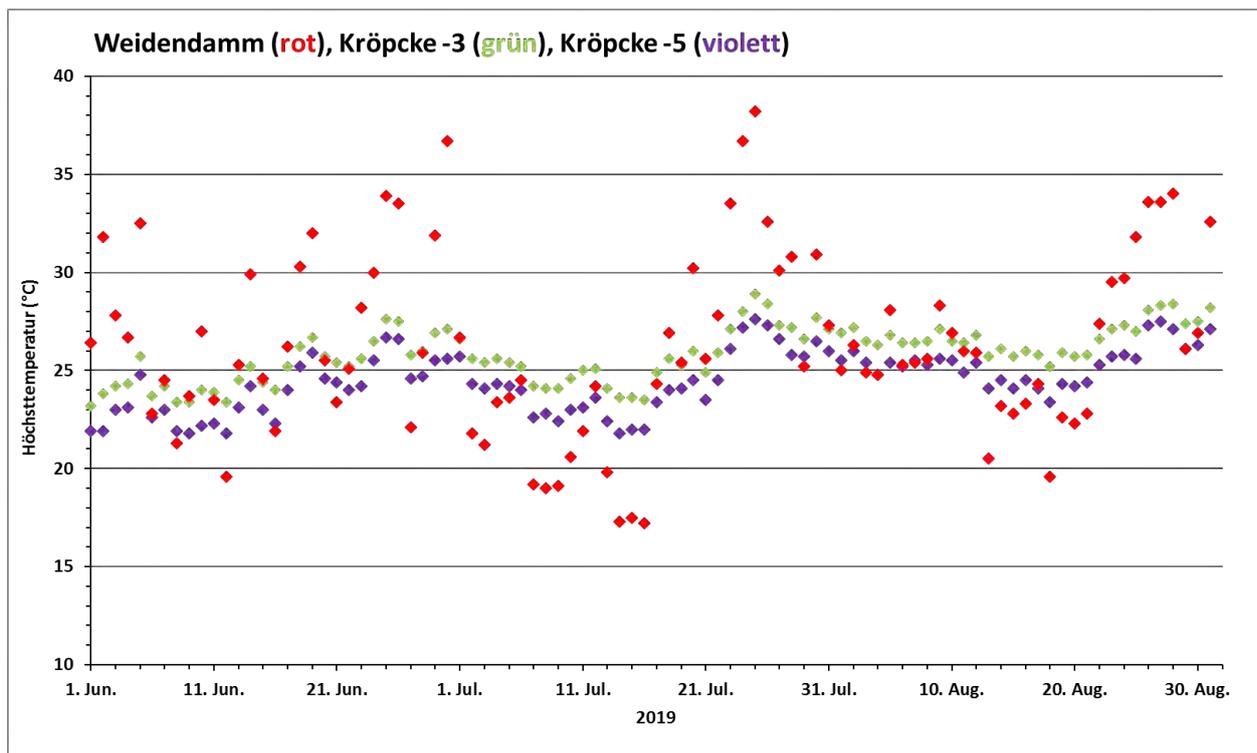


Abb. 5.13: Tageshöchsttemperaturen an den Tunnelstationen und Weidendamm im Vergleich. Zeitraum: 01.06.-31.08.2019.

In Abbildung 5.14 ist der Tagesgang der Temperaturdifferenzen zwischen den Tunnelstationen K-3 und K-5 und den Stationen Langenhagen bzw. Weidendamm gezeigt. In allen vier Fällen sind die Differenzen zwischen Ober- und Unterwelt am geringsten zwischen 12 und 15 UTC, am größten zwischen 2 und 4 UTC. In der Ebene-3 sind die Abweichungen zu Langenhagen und Weidendamm immer etwa 2 K größer als in der unteren Ebene. Für beide Tiefebenen gilt, dass die Abweichungen zu Langenhagen immer größer sind als zu Weidendamm, die Differenz beträgt vormittags etwa 0,2 K, in der zweiten Nachthälfte etwa 1 K.

Die mittleren Jahrgänge der Temperaturdifferenzen zwischen den Stationen gibt Abbildung 5.15 wieder. Auch hier ist das Bild einheitlich: alle Graphen haben das Minimum im Juni, das Maximum im November. Die Temperaturunterschiede zwischen Ober- und Unterwelt sind in der Ebene-3 größer. Bezogen auf die Station Weidendamm war es im Mittel in der Ebene-3 im Sommer etwa 4 K wärmer, im Winter um 11 K; in der unteren Ebene-5 war es im Sommer nahe 3 K, im Winter etwa 8 K wärmer.

Durchschnittlich, im Mittel über den gesamten Messzeitraum, betrug der Temperaturunterschied zwischen der Ebene-3 und Langenhagen 8,4 K, zu Weidendamm 7,5 K. Für die Ebene-5 waren es 6,4 K (zu Langenhagen) bzw. 5,5 K (zu Weidendamm). In Einzelfällen, allerdings dann meist über mehrere Stunden, war es an den Tunnelstationen bis zu 10 K kälter als oberirdisch (während Hitzeperioden) bzw. bis 20 K wärmer (während Kälteperioden).

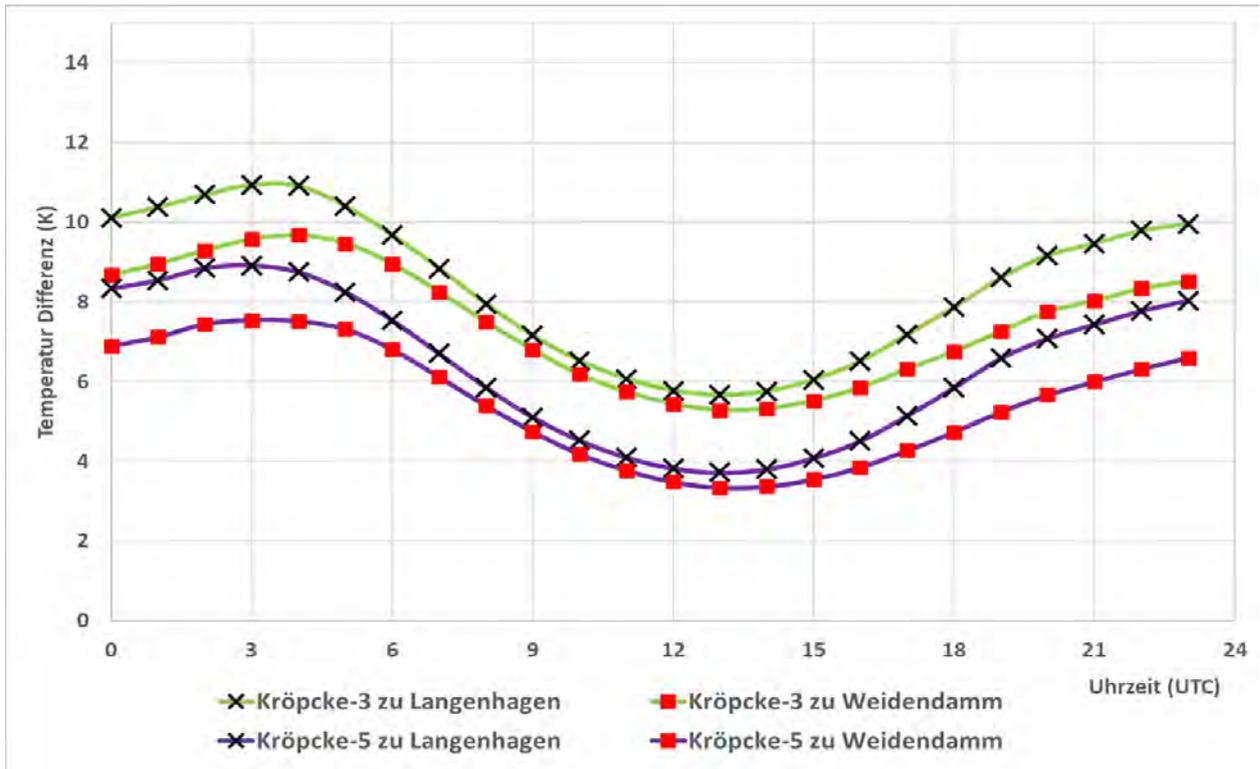


Abb. 5.14: Mittlerer Tagesgang der Temperaturdifferenz zwischen den Tunnelstationen Kröpcke-3 und -5 und den oberirdischen Stationen Langenhagen und Weidendam. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 6.2017-12.2020.

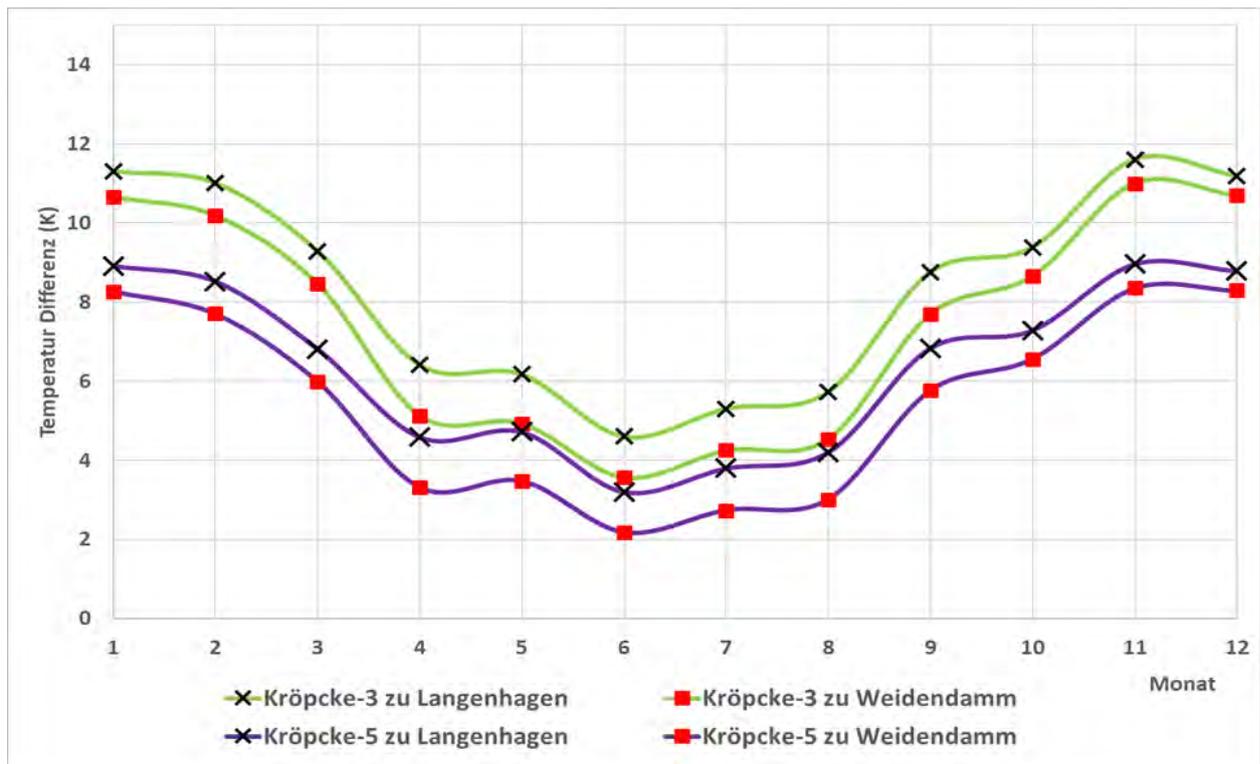


Abb. 5.15: Mittlerer Jahrgang der Temperaturdifferenz zwischen den Tunnelstationen (Kröpcke-3 und Kröpcke-5) und den oberirdischen Stationen Langenhagen bzw. Weidendam. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 6.2017-12.2020.

5.2.2 Kenntage der Temperatur

Aus den Tageswerten wurden auch die Temperatur-Kenntage für alle Stationen bestimmt, siehe Tabelle 5.3. An allen Stationen wurden im Jahr 2018 die höchste Anzahl an Sommertagen (Maximumtemperatur ≥ 25 °C) und Hitzetagen (Maximumtemperatur ≥ 30 °C) registriert. Die Stationen Marianne-Baecker-Allee und Herrenhausen weisen gegenüber den anderen Stationen in allen Jahren jeweils die höchsten Werte auf. Aber auch Frosttage (Tiefsttemperatur < 0 °C) und Eistage (Höchsttemperatur < 0 °C) traten im Jahr 2018 am häufigsten auf, bedingt durch eine anhaltende Kälteperiode im Februar und März. Das milde und einheitliche Tunnelklima zeigt sich besonders an der sehr großen Anzahl der Tropennächte: für die Tunnelstationen wurden 122-157 (Ebene-3) bzw. 91-120 (Ebene-5) Tropennächte errechnet.

In dem relativ kühlen und niederschlagsreichen Sommer 2017 gab es an der Station Marianne-Baecker-Allee 29, in Herrenhausen 36, in Langenhagen lediglich 20 Sommertage (bezogen auf das gesamte Jahr 2017 waren es in Langenhagen 27 Sommertage). In den heißen Sommern 2018 und 2019 waren es in Langenhagen 78 bzw. 51 Sommertage, an der Marianne-Baecker-Allee 88 bzw. 60 Sommertage, in Herrenhausen wurden sogar 101 bzw. 64 Sommertage erreicht. Zur Erinnerung: die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen in Hannover-Langenhagen beträgt 36 Tage (Zeitraum 1991-2020).

Tab. 5.3: Jährliche Anzahlen der Kenntage der Temperatur an den Stationen in Hannover. 2017* = Zeitraum 01.06.-31.12.2017.

| Kenntag | Jahr | Langenhagen | Weidendamm | Marianne-Baecker-Allee | Kattenbrooks-park | Herrenhausen | Kröpcke-3 | Kröpcke-5 |
|---|-------|-------------|------------|------------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------|
| Hitzetag ($T_x \geq 30$ °C) | 2017* | 2 | 3 | 5 | 2 | 6 | 0 | 0 |
| | 2018 | 22 | 27 | 30 | 28 | 32 | 1 | 0 |
| | 2019 | 19 | 22 | 24 | 20 | 25 | 0 | 0 |
| | 2020 | 12 | 11 | 14 | 12 | 16 | 0 | 0 |
| Sommertag ($T_x \geq 25$ °C) | 2017* | 20 | 25 | 29 | 23 | 36 | 48 | 1 |
| | 2018 | 78 | 81 | 88 | 79 | 101 | 104 | 54 |
| | 2019 | 51 | 58 | 60 | 57 | 64 | 76 | 40 |
| | 2020 | 40 | 45 | 51 | 45 | 57 | 44 | 20 |
| Tropennacht ($T_n \geq 20$ °C) | 2017* | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 144 | 82 |
| | 2018 | 4 | 13 | 9 | 3 | 10 | 157 | 120 |
| | 2019 | 3 | 11 | 8 | 1 | 6 | 142 | 103 |
| | 2020 | 2 | 12 | 8 | 3 | 6 | 122 | 91 |
| Frosttag ($T_n < 0$ °C) | 2017* | 8 | 4 | 6 | 8 | 7 | 0 | 0 |
| | 2018 | 64 | 45 | 50 | 62 | 54 | 0 | 2 |
| | 2019 | 50 | 22 | 27 | 40 | 35 | 0 | 0 |
| | 2020 | 30 | 14 | 19 | 28 | 20 | 0 | 0 |
| Eistag ($T_x < 0$ °C) | 2017* | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2018 | 9 | 9 | 9 | 10 | 8 | 0 | 0 |
| | 2019 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0 |
| | 2020 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Hitzetage, das sind Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 °C, kommen deutlich seltener vor. Im Sommer 2018 wurden in Langenhagen 22 Hitzetage registriert, im Mittel sind es 7,7 Tage (Zeitraum 1991 - 2020). In

Herrenhausen waren es 32, an der Marianne-Baecker-Allee 30, am Weidendamm 27; im Kattenbrookspark 28 Hitzetage. Sowohl im Sommer 2018 als auch in 2019 wurden also an den städtischen Stationen bis zu 4-mal mehr Hitzetage registriert, als im Durchschnitt im Umland zu erwarten sind.

Bemerkenswert ist auch die Häufigkeit von Tropennächten in den Sommern 2018 bis 2020. In Tropennächten bleibt es nachts sehr warm, das nächtliche Minimum fällt nicht unter 20 °C. Durchschnittlich wird in Hannover-Langenhagen nur alle 2 Jahre eine Tropennacht verzeichnet. In diesen beiden warmen Sommern wurden in Langenhagen aber 2 - 4, in Herrenhausen 6 - 10, an der Marianne-Baecker-Allee 8 - 9 und am Weidendamm sogar 11 - 13 Tropennächte registriert, siehe Tabelle 5.3. Dabei verdient der Sommer 2020 besondere Aufmerksamkeit: während der Hitzeperiode vom 05. bis 22. August wurden am Weidendamm alleine 11 der insgesamt 12 Tropennächte registriert, davon 7 in Folge. An den Stationen Marianne-Baecker-Allee gab es 8 (davon 6 in Folge), in Herrenhausen 6, im Kattenbrookspark 3 und in Langenhagen 2 Tropennächte.

Tropennächte sind keine Einzelereignisse, sondern werden in der Regel flankiert von Sommertagen oder Hitzetagen. Auch in Norddeutschland dauern sommerliche Hitzeperioden häufig mehrere Tage, manchmal sogar Wochen an. Durch die geringe nächtliche Abkühlung ergibt sich in diesen Zeiten eine besonders große Wärmebelastung. Die Messungen an den Stationen Weidendamm und Marianne-Baecker-Allee zeigen, dass innerstädtisch deutlich mehr Tropennächte, aber auch Sommertage und Hitzetage zu verzeichnen sind als im Umland (Hannover-Langenhagen, Kattenbrookspark) und dass die sehr warmen Perioden länger andauern.

Neben der Häufigkeit des Auftretens hoher Temperaturen spielt auch die Andauer dieser Perioden eine große Rolle, denn je länger eine Hitzeperiode anhält, desto belastender ist sie für Mensch und Tier. Anhand der langjährigen Reihe von Langenhagen wurde das bereits im Kapitel 4.2.1 dargestellt. In unserem Untersuchungszeitraum, der insgesamt vier Sommer umfasste, gab es drei längere Hitzeperioden: im Juli/August 2018, Juli/August 2019 und im August 2020. In Langenhagen zeigte die längste Periode 8 Hitzetage in Folge, an den anderen Stationen waren es 12 (WD) bis 14 (MB) Tage. An allen Stationen, außer in Langenhagen, gab es zwei sehr lange Hitzeperioden mit 8 oder mehr Hitzetagen in Folge, siehe Tabelle 5.4. Am häufigsten wurden allerdings kurze Andauern von 1 bis 2 Tagen registriert.

Tab. 5.4: Anzahl der Hitzetage ($T_x \geq 30$ °C) an den Stationen in Hannover und Häufigkeit des Auftretens mehrtägiger Hitzeperioden („-“ kein Ereignis) im Zeitraum 06.2017-12.2020.

| Hitzetage ($T_x \geq 30$ °C) | Anzahl Gesamt | Andauer (Tage) | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | ≥ 14 |
| Langenhagen | 55 | 15 | 5 | 1 | 2 | 1 | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - |
| Weidendamm | 63 | 17 | 3 | 2 | 2 | - | 1 | - | 1 | - | - | - | 1 | - | - |
| Marianne-Baecker-Allee | 73 | 18 | 7 | 1 | 1 | - | 2 | - | 1 | - | - | - | - | - | 1 |
| Kattenbrookspark | 62 | 15 | 6 | - | 2 | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | 1 | - |
| Herrenhausen | 79 | 21 | 7 | 2 | 1 | - | 2 | - | - | 1 | - | - | - | 1 | - |

Längere Folgen von Sommertagen (Höchsttemperatur $\geq 25\text{ °C}$) traten an allen Stationen deutlich häufiger auf und sie hielten auch länger an, die längsten Perioden dauerten 26 Tage (WD, LH) bis 28 Tage (HE), siehe Tabelle 5.5. Anhaltend hochsommerliche Perioden von 14 Tagen oder länger gab es in Langenhagen im Untersuchungszeitraum zwei, während der Periode 1991-2020 waren es sechs, siehe Tabelle 4.4.

Tab. 5.5: Anzahl der Sommertage ($T_x \geq 25\text{ °C}$) an den Stationen in Hannover und Häufigkeit des Auftretens mehrtägiger Hitzeperioden („-“ kein Ereignis) im Zeitraum 06.2017-12.2020.

| Sommertage ($T_x \geq 25\text{ °C}$) | Anzahl Gesamt | Andauer (Tage) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|----------------|----|---|----|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|----|----|-----------|--|--|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19-25 | 26 | 27 | ≥ 28 | | | |
| Langenhagen | 189 | 22 | 15 | 4 | 7 | 4 | 1 | 1 | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | 1 | - | - | - | 1 | - | - | | | |
| Weidendam | 209 | 23 | 13 | 7 | 10 | 4 | - | 1 | 1 | - | 1 | - | 1 | - | - | - | 1 | - | - | - | 1 | - | - | | | |
| Marianne-Baecker-Allee | 228 | 18 | 16 | 9 | 9 | 4 | 1 | 1 | 2 | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | 1 | - | | | |
| Kattenbrookspark | 204 | 24 | 13 | 7 | 8 | 4 | - | 1 | - | - | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | 1 | - | | | |
| Herrenhausen | 258 | 25 | 11 | 9 | 8 | 3 | 3 | 2 | - | 1 | 1 | - | 2 | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | 1 | | | |

Zwei weitere Temperatur-Kenntage, die im Sommer eine große Rolle spielen, sind Sommerabende und Biergartentage, siehe Tabelle 5.6. Hier wird die Lufttemperatur zu einer bestimmten Uhrzeit betrachtet. Einen Biergartentag erleben wir, sobald die Temperatur um 20 Uhr (MESZ) noch mindestens 20 °C beträgt. Bleibt es abends noch länger so warm, wird ab 22 Uhr ein Sommerabend daraus. An den innerstädtischen Stationen Weidendam und Marianne-Baecker-Allee gab es während der Messkampagne jährlich um die 80 Biergartentage. Außerdem wurden dort jährlich 50 – 55 Sommerabende registriert, an den Umlandstationen nur knapp über 30. Die Station Herrenhausen muss hier auch als Umlandstation angesehen werden, offensichtlich setzt im Laufe des Abends die Zufuhr von Kaltluft aus den nahegelegenen, ausgedehnten Grünanlagen ein.

Tab. 5.6: Jährliche Anzahlen der Biergartentage und Sommerabende an den Stationen in Hannover; 2017* = Zeitraum 01.06.-31.12.2017.

| Kenntag | Jahr | Langenhagen | Weidendam | Marianne-Baecker-Allee | Kattenbrookspark | Herrenhausen |
|-----------------------|--------|-------------|-----------|------------------------|------------------|--------------|
| Biergartentag | 2017* | 44 | 55 | 57 | 44 | 53 |
| T $\geq 20\text{ °C}$ | 2018 | 100 | 114 | 111 | 103 | 103 |
| um 20 Uhr | 2019 | 72 | 82 | 81 | 73 | 78 |
| | 2020 | 53 | 73 | 70 | 60 | 62 |
| | Mittel | 67,3 | 81,0 | 79,8 | 70,0 | 74,0 |
| Sommerabend | 2017* | 13 | 33 | 29 | 15 | 19 |
| T $\geq 20\text{ °C}$ | 2018 | 54 | 82 | 80 | 55 | 59 |
| um 22 Uhr | 2019 | 36 | 59 | 51 | 39 | 40 |
| | 2020 | 25 | 44 | 40 | 28 | 30 |
| | Mittel | 32,0 | 54,5 | 50,0 | 34,3 | 37,0 |

Auch bei der Häufigkeit von Kälteereignissen sind innerstädtische Wärmeinselleffekte gut zu erkennen: In den Wintermonaten wurden an den Umlandstationen

deutlich mehr Frosttage verzeichnet, als in der Stadt, siehe Tabelle 5.7. Allerdings zeigt sich auch: je länger die Frostperioden andauern, desto geringer sind die Unterschiede in den Häufigkeiten des Auftretens zwischen Stadt und Land. Bei anhaltend starkem Nachtfrost verringert sich der Stadteffekt. Frostperioden von 6 Tagen oder länger wurden in Langenhagen 7 Mal registriert, an den anderen Stationen 4 bis 6 Mal.

Tab. 5.7: Anzahl der Frosttage ($T_n < 0 \text{ °C}$) an den Stationen in Hannover und Häufigkeit des Auftretens mehrtägiger Frostperioden („-“ kein Ereignis) im Zeitraum 06.2017-12.2020.

| Frosttage ($T_n < 0 \text{ °C}$) | Anzahl Gesamt | Andauer (Tage) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------|----------------|----|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|-------|----|-------|----|-------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14-16 | 17 | 18-20 | 21 | 22-23 | ≥ 24 |
| Langenhagen | 152 | 20 | 17 | 8 | 1 | - | 2 | - | 2 | 1 | - | - | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - |
| Weidendam | 85 | 9 | 11 | 2 | 2 | 1 | 1 | - | 2 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - |
| Marianne-Baecker-Allee | 102 | 11 | 14 | 3 | 2 | - | 1 | 1 | 2 | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - |
| Kattenbrookspark | 138 | 23 | 14 | 8 | - | 2 | 1 | 1 | 2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| Herrenhausen | 116 | 11 | 14 | 8 | 1 | - | 2 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - |

Dieses bestätigt sich auch beim Auftreten von Eistagen: sie sind an allen Stationen nahezu gleich häufig bzw. selten, siehe Tabelle 5.8. Offensichtlich kann sich bei anhaltend strenger Kälte kein Wärmeinseleffekt ausbilden. Die strengste Frostperiode mit 7 Eistagen in Folge begann am 25.02.2018 und wurde an allen Stationen einheitlich registriert. Ansonsten gab es im Untersuchungszeitraum meist nur sehr kurze Tagfrostereignisse.

Tab. 5.8: Anzahl der Eistage ($T_x < 0 \text{ °C}$) an den Stationen in Hannover und Häufigkeit des Auftretens mehrtägiger Frostperioden („-“kein Ereignis) im Zeitraum 06.2017-12.2020.

| Eistage ($T_x < 0 \text{ °C}$) | Anzahl Gesamt | Andauer (Tage) | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | ≥ 10 |
| Langenhagen | 12 | 3 | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - |
| Weidendam | 12 | 3 | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - |
| Marianne-Baecker-Allee | 12 | 3 | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - |
| Kattenbrookspark | 13 | 4 | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - |
| Herrenhausen | 11 | 2 | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - |

5.2.3 Tagesgänge der Lufttemperatur

Die Tagesgänge der Mitteltemperatur verdeutlichen die Unterschiede zwischen den Stationen, siehe Abbildung 5.16. Die Umlandstationen Langenhagen und Kattenbrookspark zeigen ähnliche Tagesgänge, die mittleren Temperaturen liegen immer unter denen der Vergleichsstationen. Auch die Tagesgänge der beiden Stadtstationen Weidendam und Marianne-Baecker-Allee verlaufen recht ähnlich, sie unterscheiden sich lediglich nachts: Am Weidendam bleibt es nachts wärmer. Die Station Herrenhausen überrascht mit einem besonderen Verlauf: nachts sind die Temperaturen fast so niedrig wie an den Umlandstationen, während der frühen Morgenstunden erfolgt ein rascher Anstieg, so dass zwischen 06 und 15 UTC die Temperaturkurve über den Kurven aller anderen Stationen liegt.

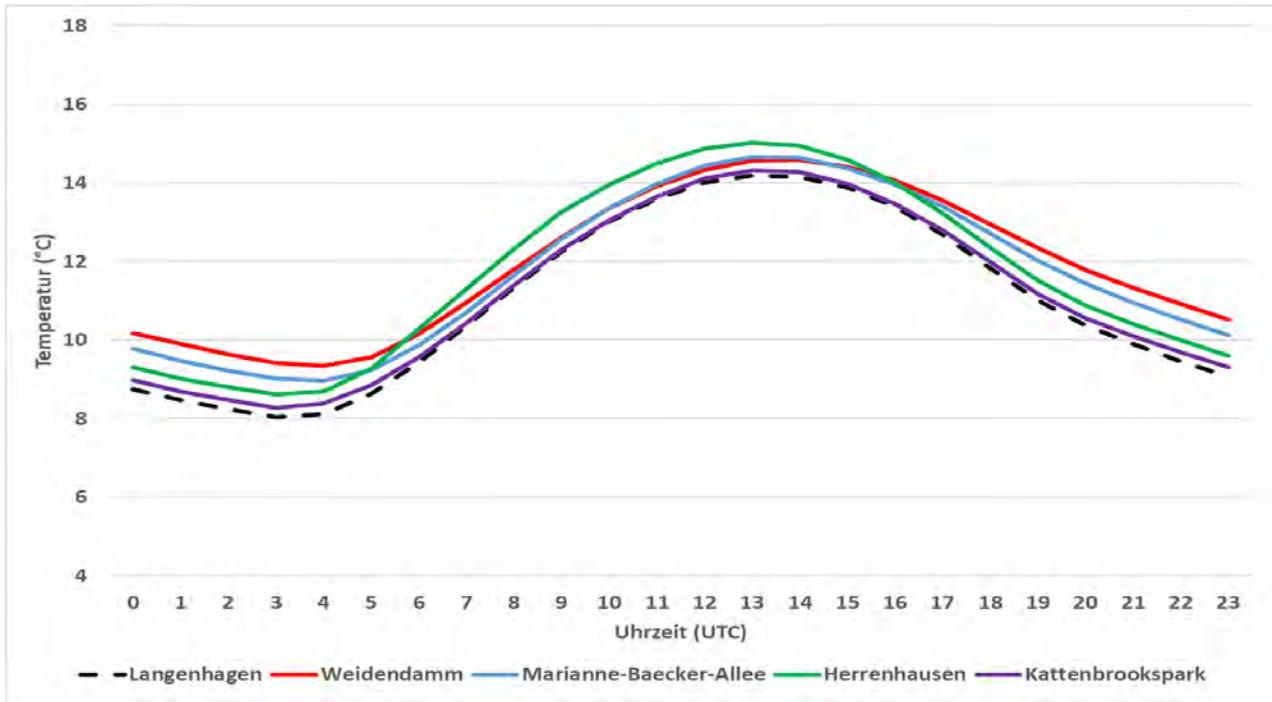


Abb. 5.16: Tagesgänge der Lufttemperatur an den Stationen in Hannover. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

Einen Vergleich der Temperaturtagesgänge an den Stationen (durchgezogene Linien) mit Langenhagen (gestrichelte Linien) für jede Jahreszeitzeit separat zeigt die folgende Abbildung 5.17.

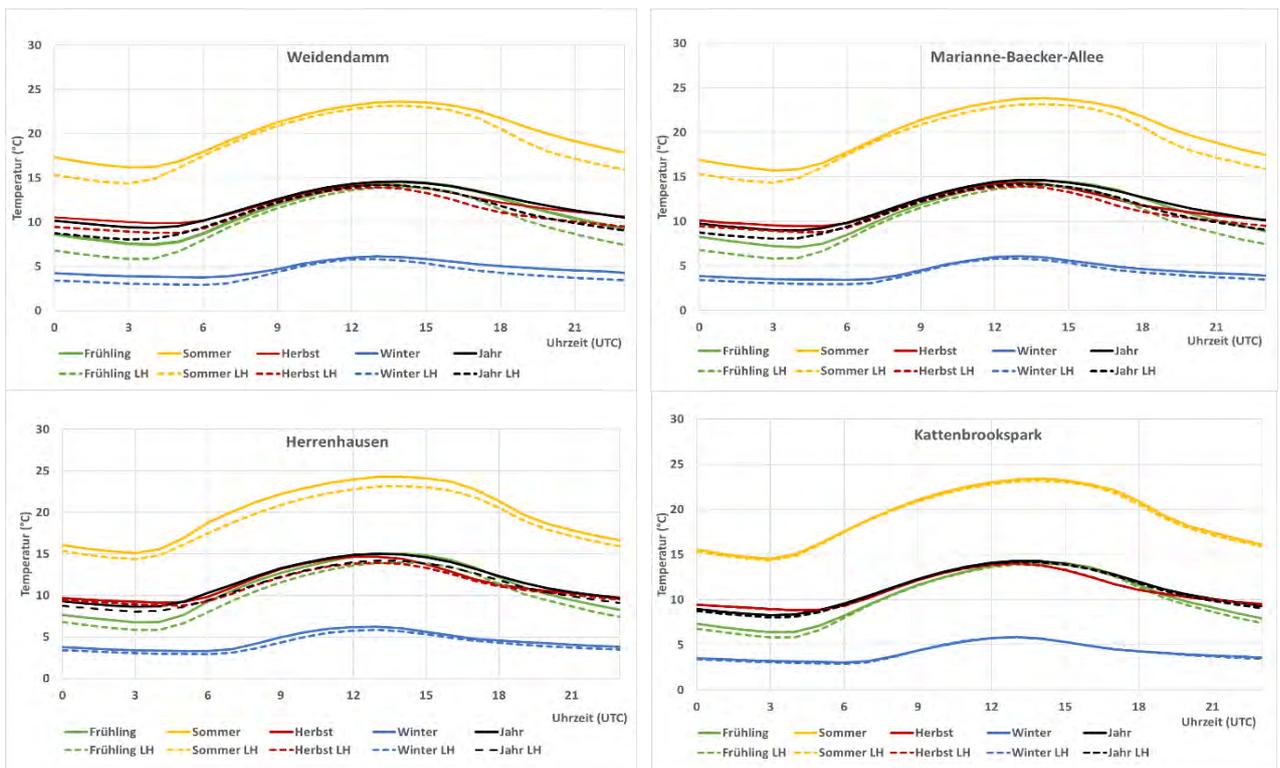


Abb. 5.17: Tagesgänge der Lufttemperatur pro Jahreszeit und im Jahr an den Stationen in Hannover (durchgezogene Linien) und jeweils im Vergleich mit Langenhagen (gestrichelte Linien), Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

An den Stationen Weidendamm und Marianne-Baecker-Allee sind die Temperaturunterschiede zu Langenhagen abends und nachts im Frühling und Sommer besonders ausgeprägt, tagsüber nur gering. Im Herbst und Winter wird ein ähnliches Verhalten beobachtet, allerdings in etwas abgeschwächter Form. An der Station Herrenhausen sind die Differenzen zu Langenhagen ebenfalls im Frühling und Sommer am größten, hier allerdings tagsüber ausgeprägter als nachts. An der Station Kattenbrookspark verlaufen die Temperaturtagesgänge nahezu analog zu Langenhagen, nur im Frühling zeigen sich nachts kleine Unterschiede.

5.3 Wärmeinseleffekt (UHI)

Als Wärmeinseleffekt wird der Temperaturunterschied zwischen der (wärmeren) Innenstadt und dem (kälteren) Umland bezeichnet. Anhand der stündlichen Temperaturmessungen an den Stationen Langenhagen, Weidendamm, Marianne-Baecker-Allee und Herrenhausen kann an den innerstädtischen Standorten der Wärmeinseleffekt, im Folgenden UHI (*Urban Heat Island*) abgekürzt, bestimmt werden. Hier wurden dafür die stündlichen Mittelwerte der in 2 m Höhe gemessenen Temperatur verwendet. Von jeder Station stehen über 31.000 Temperaturwerte zur Verfügung. Es gibt lediglich vereinzelte Ausfälle, die Datenverfügbarkeit liegt zwischen 98,9 % (Herrenhausen) und 99,8 % (Marianne-Baecker-Allee). Der Wärmeinseleffekt (UHI) wird hier definiert als Differenz der Temperaturwerte (Stundenmittelwerte) zwischen der jeweiligen Stadtstation und der Umlandstation Langenhagen. Positive Werte des UHI zeigen eine städtische Überwärmung an.

In dieser Messreihe betrug der mittlere Wärmeinseleffekt am Weidendamm 0,92 K, an den beiden anderen Stationen 0,71 K. Am häufigsten, und zwar in rund dreiviertel aller Fälle (~ Stunden), liegen die UHI-Werte zwischen 0 und 2 K. Werte des UHI von 2 K oder höher wurden mit einer Häufigkeit von 14,3 % (WD), 10,6 % (MB) bzw. 6,4 % (HE) registriert, noch höhere Werte deutlich seltener, siehe Tab. 5.9. Der höchste UHI-Wert betrug am Weidendamm 6,3 K, an der Marianne-Baecker-Allee 5,2 K, in Herrenhausen 5,7 K. Negative UHI-Werte ergeben sich, sobald die Temperatur im Umland höher ist als in der Stadt. Dieses kommt vor, sehr hohe negative Werte sind aber selten. Während der Messkampagne waren lediglich zwischen 0,2 % (WD) und 0,9 % (HE) der UHI-Werte kleiner oder gleich -1,0 K. Der niedrigste Wert am Weidendamm war -3,6 K, an der Marianne-Baecker-Allee -3,1 K, in Herrenhausen -6,8 K. Die hohen negativen UHI-Werte waren immer mit lokalen Niederschlägen gekoppelt: ein starker Schauer oder ein Gewitter ereignete sich an einer Stadtstation und führte dort zu einem Temperaturrückgang, an der Umlandstation war es (noch) trocken und warm.

Tab. 5.9: Minimum, Mittelwert und Maximum des UHI an den drei Stationen und Häufigkeit des Auftretens (angegeben in %) negativer bzw. positiver UHI-Werte für verschiedene Klassen. Umlandstation: Langenhagen. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

| UHI | Minimum (K) | Mittelwert (K) | Maximum (K) | Häufigkeit (%) | | | | |
|-----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|---------|-------------|---------|---------|
| | | | | UHI ≤ -1 | UHI ≤ 0 | 0 < UHI < 2 | UHI ≥ 2 | UHI ≥ 4 |
| Weidendamm | -3,6 | 0,92 | 6,3 | 0,2 | 9,6 | 76,1 | 14,3 | 1,6 |
| M-Baecker-Allee | -3,1 | 0,71 | 5,2 | 0,8 | 19,9 | 69,5 | 10,6 | 0,4 |
| Herrenhausen | -6,8 | 0,71 | 5,7 | 0,9 | 15,1 | 78,5 | 6,4 | 0,0 |

Die folgenden Abbildungen 5.18 bis 5.20 zeigen die Tagesgänge des UHI an den Stationen Weidendamm, Marianne-Baecker-Allee und Herrenhausen. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte für den gesamten Zeitraum (schwarze gestrichelte Linien) sowie farblich gekennzeichnet für die einzelnen Jahreszeiten (Frühling = März, April, Mai; Sommer = Juni, Juli, August; Herbst = September, Oktober, November; Winter = Dezember, Januar, Februar). Die Stationen Weidendamm und Marianne-Baecker-Allee weisen einen typischen Tagesgang des UHI auf: das Maximum wird während der Nachtstunden beobachtet, das Minimum tagsüber, die Übergänge erfolgen jeweils rasch. Dieses Muster wird sowohl für das Jahr, als auch in den einzelnen Jahreszeiten abgebildet. Die Ausprägung ist allerdings unterschiedlich: Im Frühling und Sommer zeigen sich die höchsten UHI-Werte mit einem ausgeprägten Tagesgang. Im Herbst und Winter sind die Tagesgänge flacher.

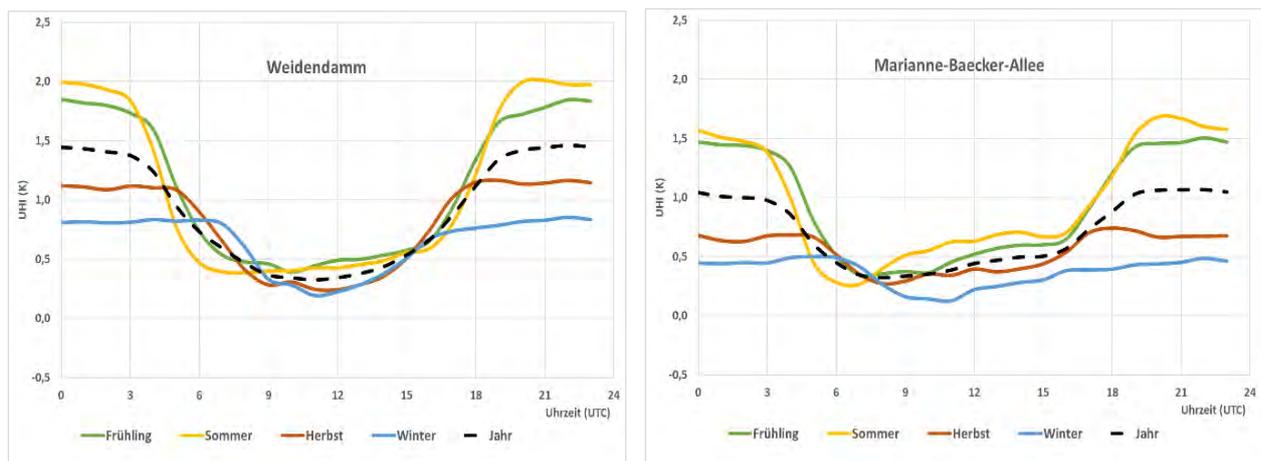


Abb. 5.18: Tagesgang des UHI in den Jahreszeiten und im Jahr an den Stationen Weidendamm (links) und Marianne-Baecker-Allee (rechts). Datenbasis: Stundenmittelwerte der Temperatur, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

Am Weidendamm wird im Frühling und Sommer zwischen 19 und 03 UTC (das entspricht 21 und 5 Uhr MESZ) das Maximum des UHI bei 1,7 bis 2,0 K beobachtet, siehe Abbildung 5.18, linke Seite. Die niedrigsten Werte treten zwischen 06 und 16 UTC (dieses entspricht 8 und 18 Uhr MESZ) auf und liegen nahe 0,5 K. Im Herbst liegen die nächtlichen Höchstwerte nahe 1,1 K (zwischen 18 und 05 UTC), im Winter nahe 0,8 K, die niedrigsten Werte (um 0,3 K) werden zwischen 09 und 14 UTC registriert. An der Marianne-Baecker-Allee (Abb. 5.18, rechts) werden im Frühling und Sommer in der Nacht zwischen 19 und 03 UTC die höchsten UHI-Werte mit 1,4 bis 1,7 K erreicht, tagsüber (zwischen 06 und 16 UTC) betragen sie 0,3 bis 0,7 K. Im Herbst liegt das Maximum bei 0,7 K, im Winter knapp unter 0,5 K.

Die Mittelwerte des UHI für jeden Monat und jede Stunde lassen sich anschaulich mit einer Isoliniengrafik (Isoplethen) darstellen. Diese Art der Darstellung ermöglicht es, die Verhältnisse an den Stationen mit einem Blick zu erfassen und Unterschiede zwischen den Stationen leichter zu erkennen, siehe Abbildung 5.19. An der Station Weidendamm zeigen sich die höchsten UHI-Werte mit über 2 K von April bis Juni nachts zwischen 20 und 03 UTC sowie im Juli/August abends zwischen 20 und 22 UTC. UHI-Werte von über 1,5 K gibt es von April bis September abends und nachts. Die kurzen Nächte im Juni und Juli werden gut abgebildet: die Isolinien

sind dann eingedellt. An der Station Marianne-Baecker-Allee liegen die höchsten mittleren UHI-Werte über 1,5 K zwischen April und Juli nachts zwischen 19 und 03 UTC, mittlere Werte über 2 K kamen nicht vor.

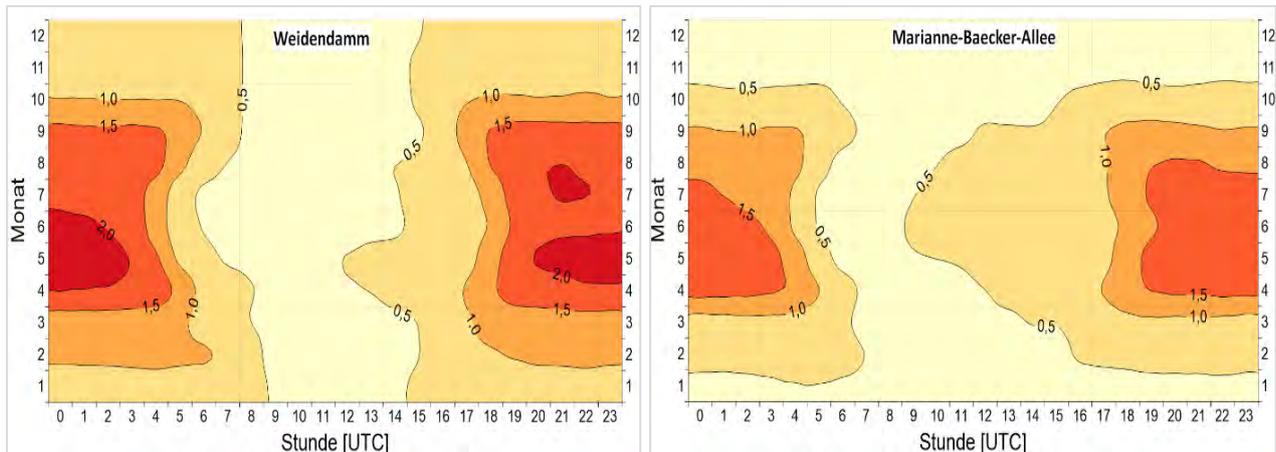


Abb. 5.19: Isoplethen des UHI an den Stationen Weidendamm (links) und Marianne-Baecker-Allee (rechts). Datenbasis: Stundenmittelwerte der Temperatur, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

Einen untypischen Tagesgang des UHI zeigt die Station Herrenhausen, siehe Abbildung 5.20. An dieser Station werden die niedrigsten UHI-Werte während der Nacht beobachtet, zwischen 18 und 04 UTC. Anschließend erfolgt ein rascher Anstieg bis zum Maximum, welches im Frühjahr und Sommer um 06 UTC erreicht wird und bei 1,3 K liegt. Im Herbst und Winter wird das Maximum um 09 UTC erreicht und liegt bei 1,0 bzw. 0,6 K. Im weiteren Tagesverlauf nehmen die UHI-Werte stetig ab. Wie oben erwähnt, wurden in Herrenhausen sehr häufig die höchsten Tagestemperaturen gemessen, zudem gingen die Temperaturen nachts immer stark zurück, bis auf das Niveau einer Umlandstation. Diese Station scheint durch ihre unmittelbare Umgebung stark beeinflusst zu werden. Wenige Meter nördlich befindet sich ein Gewächshaus, siehe Abbildung 5.7. Möglicherweise führt tagsüber die Reflektion der solaren Strahlung an der Glasfassade zu einer lokalen Erwärmung. Nachts überwiegt der Einfluss der naheliegenden Grünflächen.

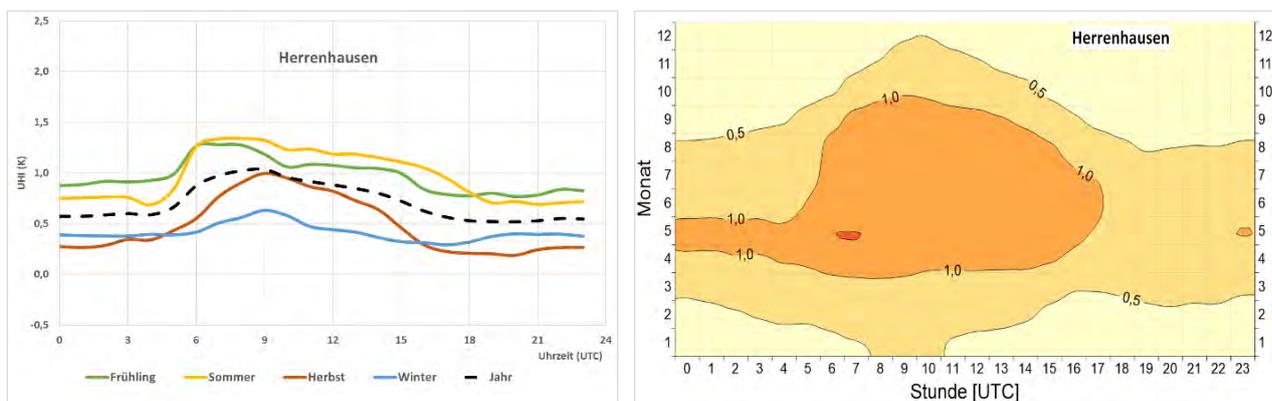


Abb. 5.20: Tagesgang (links) und Isoplethen (rechts) des UHI, Station Herrenhausen. Datenbasis: Stundenmittelwerte der Temperatur, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

Auch die Isoliniendarstellung (Abb. 5.20, rechtes Diagramm) zeigt den Unterschied zu den anderen beiden anderen Stationen: Mittelwerte über 1,5 K sind selten. UHI über 1 K gibt es hauptsächlich tagsüber; von April bis Juli etwa zwischen 06 und 16 UTC, im August/September etwa zwischen 07 und 14 UTC, im April und Mai auch schon während der zweiten Nachthälfte.

Die Monatsmittelwerte des UHI zeigt die folgende Abbildung 5.21. An allen drei Stationen ergibt sich das Maximum des UHI im April bzw. Mai. Die Station Weidendamm weist im August ein markantes sekundäres Maximum auf, an der Station Marianne-Baecker-Allee ist dieses nur schwach ausgeprägt im Juli erkennbar. An der Station Herrenhausen fällt der UHI vom Maximum im Mai nahezu gleichmäßig ab bis zum Minimum im Dezember.

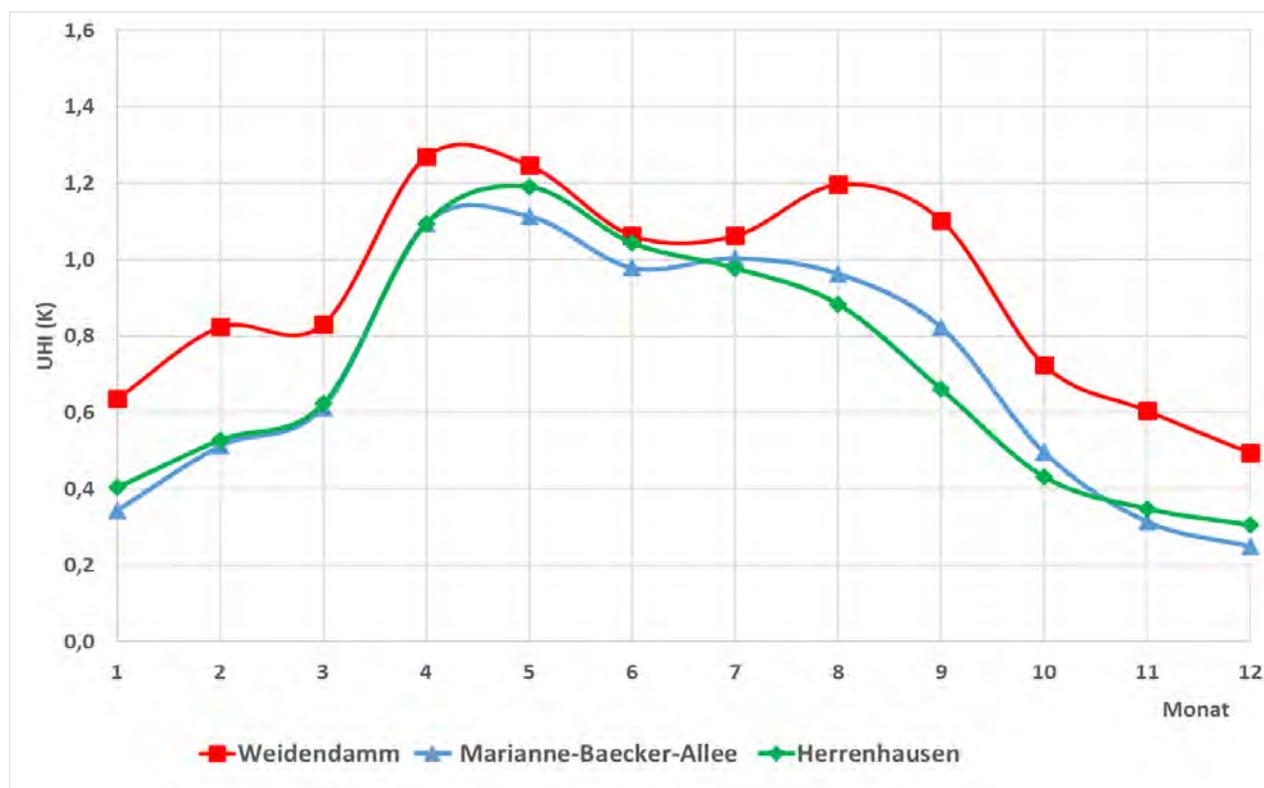


Abb. 5.21: Monatsmittelwerte des UHI an den Stationen Weidendamm, Marianne-Baecker-Allee, Herrenhausen. Datenbasis: Stundenmittelwerte der Temperatur, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

5.4 Relative Feuchte

Die relative Luftfeuchtigkeit weist einen ausgeprägten Jahresgang und einen deutlichen Tagesgang auf. Die Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit an allen Stationen sind in Abbildung 5.22 dargestellt. Der Tagesgang mit den Stundenmittelwerten der oberirdischen Stationen, bezogen auf die Jahreszeiten und das Jahr, in den Abbildungen 5.23 und 5.24. Die beiden Tunnelstationen zeigen nahezu keinen Tagesgang in der relativen Luftfeuchtigkeit.

Die oberirdischen Stationen zeigen einen ähnlichen Verlauf mit einem Maximum um 85 % von November bis Januar und einem Minimum um 60 % im April und Mai. Die Werte von Weidendamm und Marianne-Baecker-Allee liegen immer etwas niedriger als die der anderen drei oberirdischen Stationen, in der Stadt ist die Luft also ganzjährig etwas trockener als im Umland. Interessant ist der Verlauf der relativen Feuchte an den Tunnelstationen. Hier werden deutlich geringere Werte gemessen. Der Jahresgang ist nur schwach ausgeprägt mit dem Maximum im Juni (nahe 55 %) und dem Minimum im Februar (nahe 45 %). In der Ebene-3 war es immer etwas trockener als in der Ebene-5.

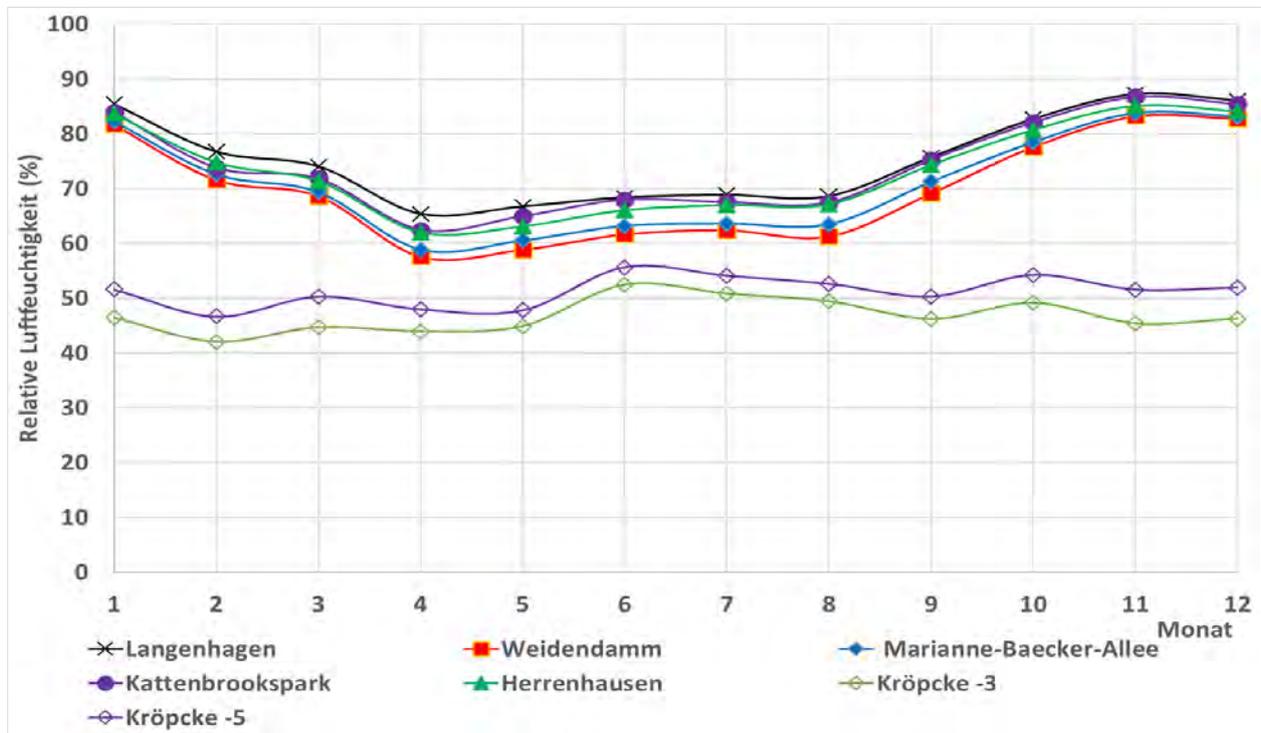


Abb. 5.22: Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit an den Stationen in Hannover. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

Der Tagesgang der relativen Feuchte hat an den beiden innerstädtischen Stationen WD und MB in allen Jahreszeiten ähnliche Verläufe. Die Graphen für Sommer und Frühling liegen parallel, mit dem Maximum ($\approx 78\%$) in den frühen Morgenstunden und dem Minimum ($\approx 50\%$) zwischen 12 und 16 UTC. Im Herbst und Winter sind die Tagesgänge flacher und die Werte etwas höher: das Maximum liegt bei 82-85 %, das Minimum bei 68 bzw. 72 %.

Auch an den Stationen Kattenbrookspark und Herrenhausen sind die Tagesgänge der relativen Luftfeuchtigkeit in den Jahreszeiten recht ähnlich, siehe Abb. 5.24. Die Graphen für Sommer und Frühling verlaufen nahezu parallel, mit dem Maximum ($\approx 80\%$) in den frühen Morgenstunden und dem Minimum ($\approx 50\%$) zwischen 12 und 16 UTC. Im Herbst und Winter sind die Tagesgänge deutlich flacher und die Werte etwas höher: das Maximum erscheint in den frühen Morgenstunden ein und erreicht 90 bzw. 85 %, das Minimum bildet sich zwischen 12 und 14 UTC aus und liegt bei 69 bzw. 75 %.

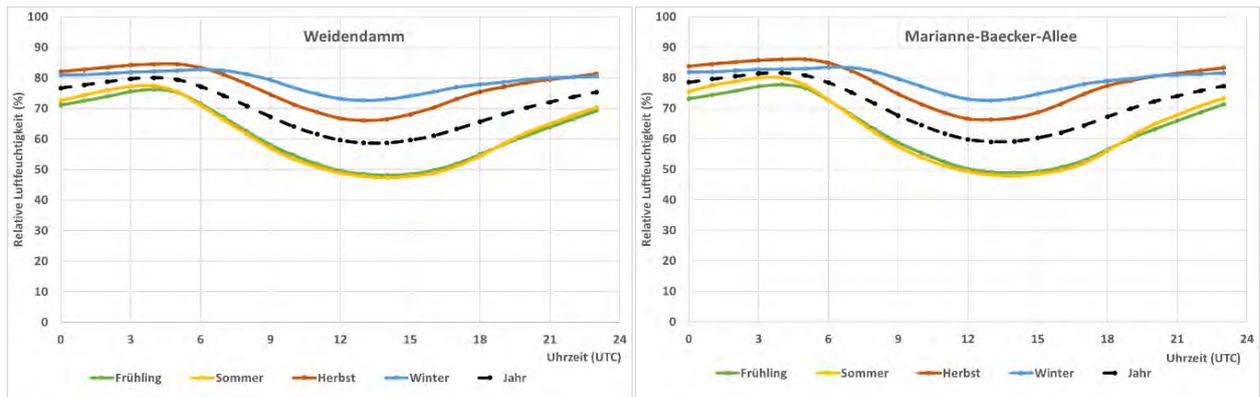


Abb. 5.23: Tagesgang der relativen Luftfeuchtigkeit in den Jahreszeiten und im Jahr an den Stationen Weidendamm (links) und Marianne-Baecker-Allee (rechts). Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

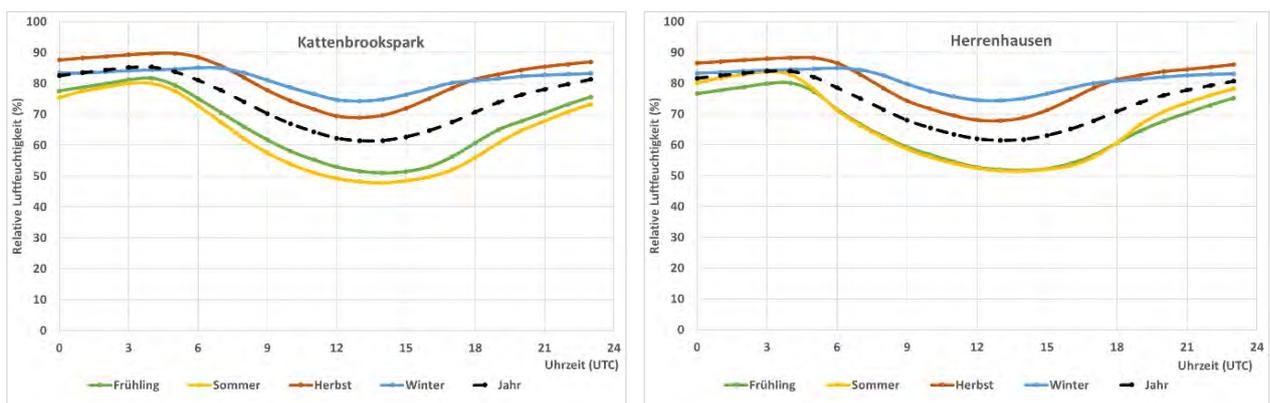


Abb. 5.24: Tagesgang der relativen Luftfeuchtigkeit in den Jahreszeiten und im Jahr an den Stationen Kattenbrookspark (links) und Herrenhausen (rechts). Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

5.5 Windverhältnisse

Die großräumige Luftdruckverteilung bestimmt die vorherrschende Richtung des Höhenwindes in einer Region. Im Jahresmittel ergeben sich im norddeutschen Tiefland häufig südsüdwestliche bis westliche Windrichtungen. Ein sekundäres Maximum zeigt die Windrichtungsverteilung bei Ost. Das Geländerelev hat einen erheblichen Einfluss sowohl auf die Windrichtung infolge Ablenkung oder Kanalisierung als auch auf die Windgeschwindigkeit durch Effekte der Windabschattung oder Düsenwirkung. Außerdem modifiziert die Beschaffenheit des Untergrundes (Freiflächen, Wald, Bebauung, Wasserflächen) die lokale Windgeschwindigkeit.

Bei windschwachem und wolkenarmem Wetter können wegen der unterschiedlichen Erwärmung und Abkühlung der Erdoberfläche thermisch induzierte Zirkulationssysteme wie z. B. Berg- und Talwinde oder Land-Seewind entstehen. Besonders bedeutsam ist die Bildung von Kaltluft, die nachts bei klarem und windschwachem Wetter als Folge der Ausstrahlung vorzugsweise auf Wiesen entsteht und dem

Geländegefälle folgend mehr oder weniger langsam abfließt. Diese Kaltluftflüsse haben in der Regel nur eine geringe vertikale Erstreckung und sammeln sich an Geländetiefpunkten zu Kaltluftseen an.

Einen Überblick über die Windverhältnisse an den Stationen geben die Tabellen 5.10 und 5.11. In Langenhagen betrug die mittlere Windgeschwindigkeit 3,9 m/s, der höchste Stundenmittelwert 18,2 m/s; in Herrenhausen waren es 2,1 m/s und 11,8 m/s, jeweils gemessen in 10 m Höhe. An den drei anderen Stationen wurden Mittelwerte von 1,3 bis 1,7 m/s und höchste Stundenmittelwerte von 6,7 m/s (MB), 7,7 m/s (WD) und 10,7 m/s (KP) registriert, allerdings betrug dort die Messhöhe 2 m.

Bedingt durch die unterschiedlichen Messhöhen sind die Windmessungen der temporären Stationen nur eingeschränkt vergleichbar mit denen von Langenhagen. An den Stationen Weidendamm und Marianne-Baecker-Allee lässt sich dennoch ein Stadteffekt erkennen im Vergleich mit der freistehenden Station Kattenbrookspark. An den Stationen Weidendamm und Marianne-Baecker-Allee erfüllten um die 95 % aller Stundenmittelwerte das Schwachwind-Kriterium: die Windgeschwindigkeit ist kleiner oder gleich 3 m/s, siehe Tab. 5.11. Im Kattenbrookspark waren das lediglich knapp 87 %. Stunden mit Schwachwind gab es in Langenhagen nur 40 %, in Herrenhausen immerhin 79 %, an diesen beiden Stationen jeweils in einer Höhe von 10 m gemessen. Hohe Windgeschwindigkeiten von über 6 m/s wurden in Langenhagen in gut 15 % aller Stunden gemessen, an den anderen Stationen traten derart hohe Werte nur äußerst selten auf.

Tab. 5.10: Mittelwert und höchster Stundenmittelwert der Windgeschwindigkeit an den Stationen in Hannover. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum 06.2017-12.2020.

| | Langen- hagen | Herren- hausen | Weiden- damm | M.-Baecker- Allee | Kattenbrooks- park |
|-------------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| Messhöhe | 10 m | 10 m | 2 m | 2 m | 2 m |
| Maximum | 18,2 m/s | 11,8 m/s | 7,7 m/s | 6,7 m/s | 10,7 m/s |
| Mittelwert | 3,9 m/s | 2,1 m/s | 1,6 m/s | 1,3 m/s | 1,7 m/s |

Tab. 5.11: Häufigkeit des Auftretens bestimmter Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit an den Stationen in Hannover. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

| Windge- schwindigkeit | Langen- hagen (10 m) | Herren- hausen (10 m) | Weiden- damm (2 m) | M.-Baecker- Allee (2 m) | Kattenbrooks- park (2 m) |
|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|
| ≤ 3 m/s | 40,21 % | 78,93 % | 93,53 % | 95,34 % | 86,56 % |
| ≤ 6 m/s | 84,61 % | 99,28 % | 99,92 % | 99,99 % | 99,72 % |
| ≤ 9 m/s | 98,19 % | 99,99 % | 100,00 % | 100,00 % | 99,99 % |
| > 9 m/s | 1,81 % | 0,01 % | 0,00 % | 0,00 % | 0,01 % |

Auch für die Windgeschwindigkeit werden die Tagesgänge betrachtet, in jeder Jahreszeit und im gesamten Jahr. Abbildung 5.25 zeigt die mittleren Windgeschwindigkeiten pro Stunde an der Station Langenhagen und Weidendamm. Die Höchstwerte zeigen sich an allen Stationen zu jeder Jahreszeit tagsüber zwischen 9 und 15 UTC, die niedrigsten Werte werden nachts registriert, zwischen

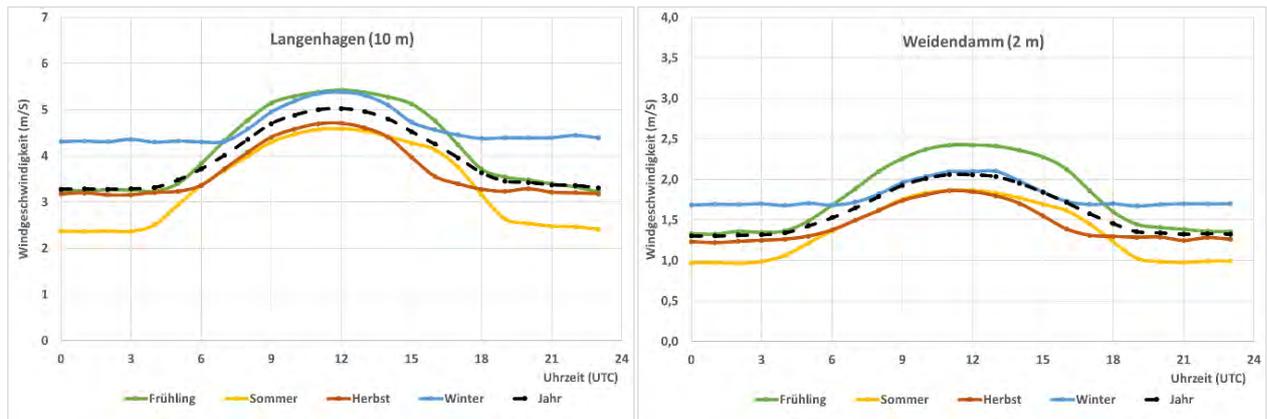


Abb. 5.25: Tagesgang der Windgeschwindigkeit (m/s) in den Jahreszeiten und im Jahr an den Stationen Langenhagen (links, Messhöhe: 10 m) und Weidendam (rechts, Messhöhe: 2 m). Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

19 und 4 UTC. Im Winter und Frühling sind die mittleren Geschwindigkeiten höher als im Sommer und Herbst.

Die Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit an den Stationen im direkten Vergleich zeigt Abbildung 5.26. Alle Stationen weisen die höchsten Mittelwerte von Dezember bis März auf, die niedrigsten im September. Die beiden in 10 m Höhe messenden Stationen Langenhagen und Herrenhausen zeigen deutlich unterschiedliche Werte: die mittlere Windgeschwindigkeit ist in Herrenhausen zwischen 1,4 (Juli) und 2,3 m/s (Februar) niedriger als in Langenhagen. Damit liegen die Werte von Herrenhausen nahezu im Niveau der temporären Stationen. Vom Windklima her betrachtet, ist Herrenhausen also eindeutig eine städtische Station.

Die anderen drei Stationen weisen recht ähnliche Werte auf. Obgleich Kattenbrookspark eine Umlandstation ist, liegen die mittleren Windgeschwindigkeiten im Sommer lediglich um bis zu 0,3 m/s, im Winter um bis zu 0,7 m/s über denen der beiden Stadtstationen. An der Station Marianne-Baecker-Allee wurden die niedrigsten Werte gemessen, zwischen April und November sind sie um etwa 0,3 m/s niedriger als am Weidendam.

Diese Untersuchung deutet an, dass Windmessungen in 2 m Höhe nur geringe Unterschiede zwischen Stadt und Umland aufweisen, erst ab 10 m Höhe scheinen sich größere Unterschiede auszubilden.

Die mittleren Windverhältnisse können anschaulich mit Windrosen dargestellt werden. Die Stärkewindrose der Station Langenhagen (1991-2020) ist bereits in Abbildung 4.20 (Kapitel 4.5) gezeigt worden. Die Windmessung in Langenhagen erfolgt in 10 m über Grund in ungestörter Umgebung, wie es von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) vorgegeben ist. An den temporären Stationen Weidendam, Marianne-Baecker-Allee und Kattenbrookspark wurden die Windmessungen in 2 m über Grund vorgenommen. Diese Messhöhe wird für die Untersuchung des Stadtklimas bevorzugt.

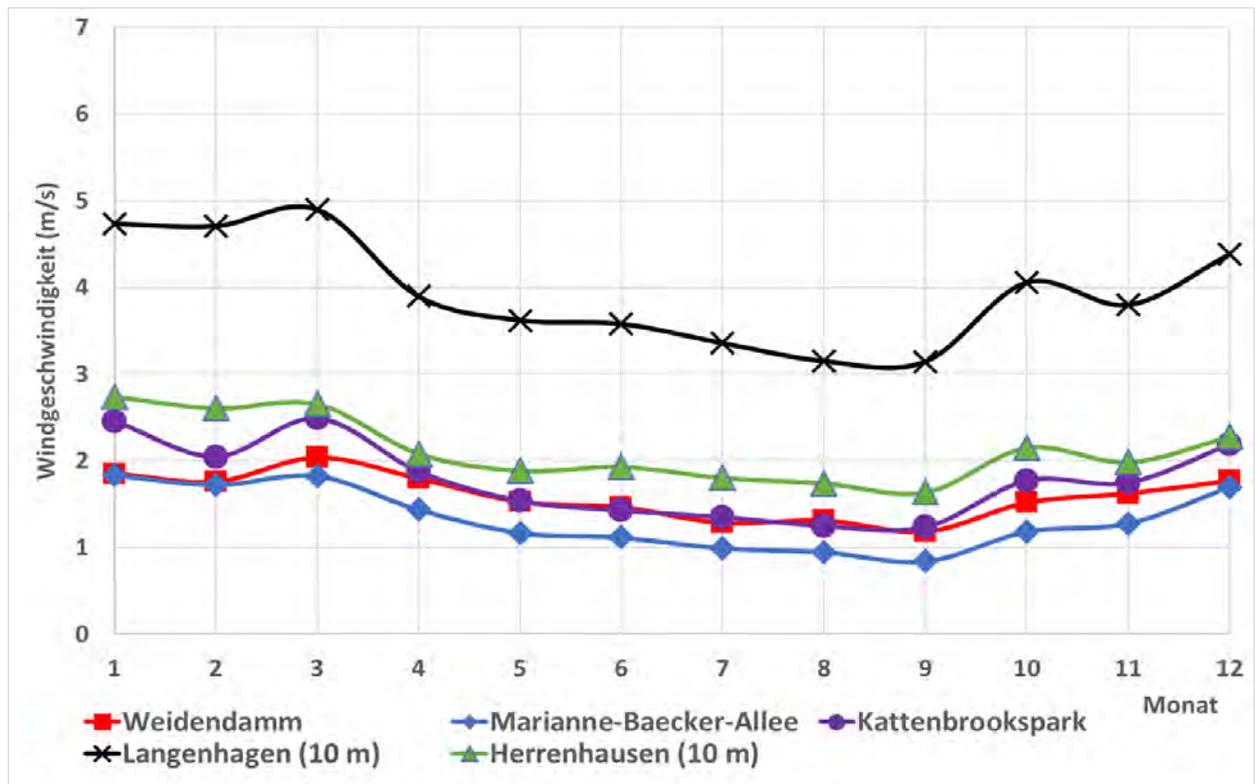


Abb. 5.26: Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit (m/s) an den Stationen in Hannover. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

Die folgenden Abbildungen 5.27 bis 5.32 zeigen die Stärkewindrosen aller Stationen im Untersuchungszeitraum Juni 2017 bis Dezember 2020.

Die Station Langenhagen weist das primäre Maximum bei den Windrichtungen West und Westsüdwest auf, das sekundäre Maximum bei der Windrichtung Ost, auch die Richtung Süd kommt häufig vor. Das Minimum wird von Nord bis Nordost beobachtet, siehe Abbildung 5.27. Der Vergleich mit der langjährigen Windrose (siehe Kapitel 4.5) zeigt, dass im Untersuchungszeitraum das Windregime dem langjährigen Mittel entsprach.

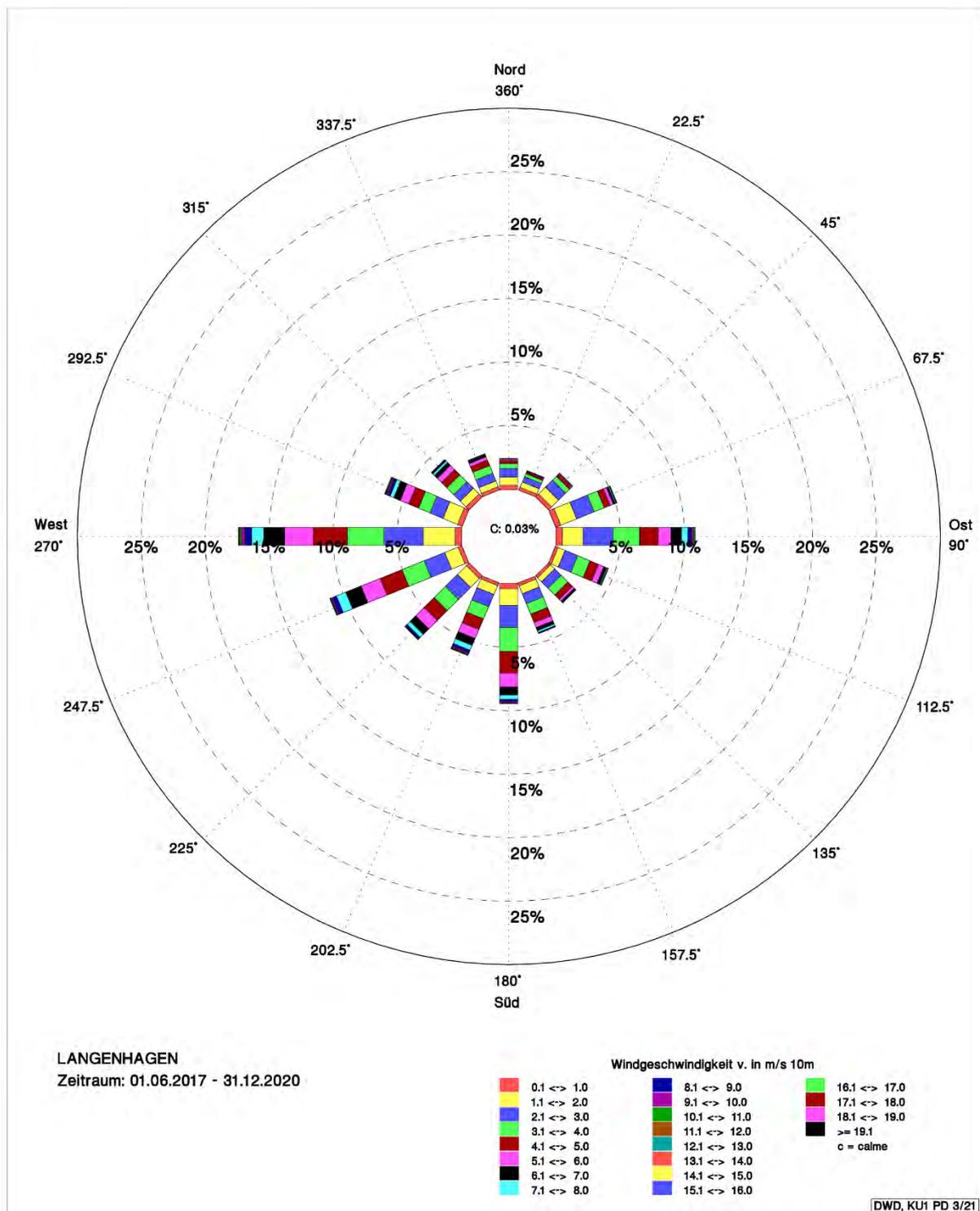


Abb. 5.27: Stärkewindrose von Hannover-Langenhagen (Häufigkeitsverteilung der Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung). Messhöhe: 10 m über Grund, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

An der Umlandstation Langenhagen kommen Windgeschwindigkeiten von mehr als 3 m/s häufig vor (mit einer Häufigkeit von 60 %). Höhere Windgeschwindigkeiten von über 5 m/s machen noch 27 % aller Fälle aus. Das primäre Windrichtungsmaximum liegt bei West und Westsüdwest, das sekundäre Maximum bei Ost. Aber auch südliche Winde weisen eine Häufigkeit von knapp unter 10 % auf.

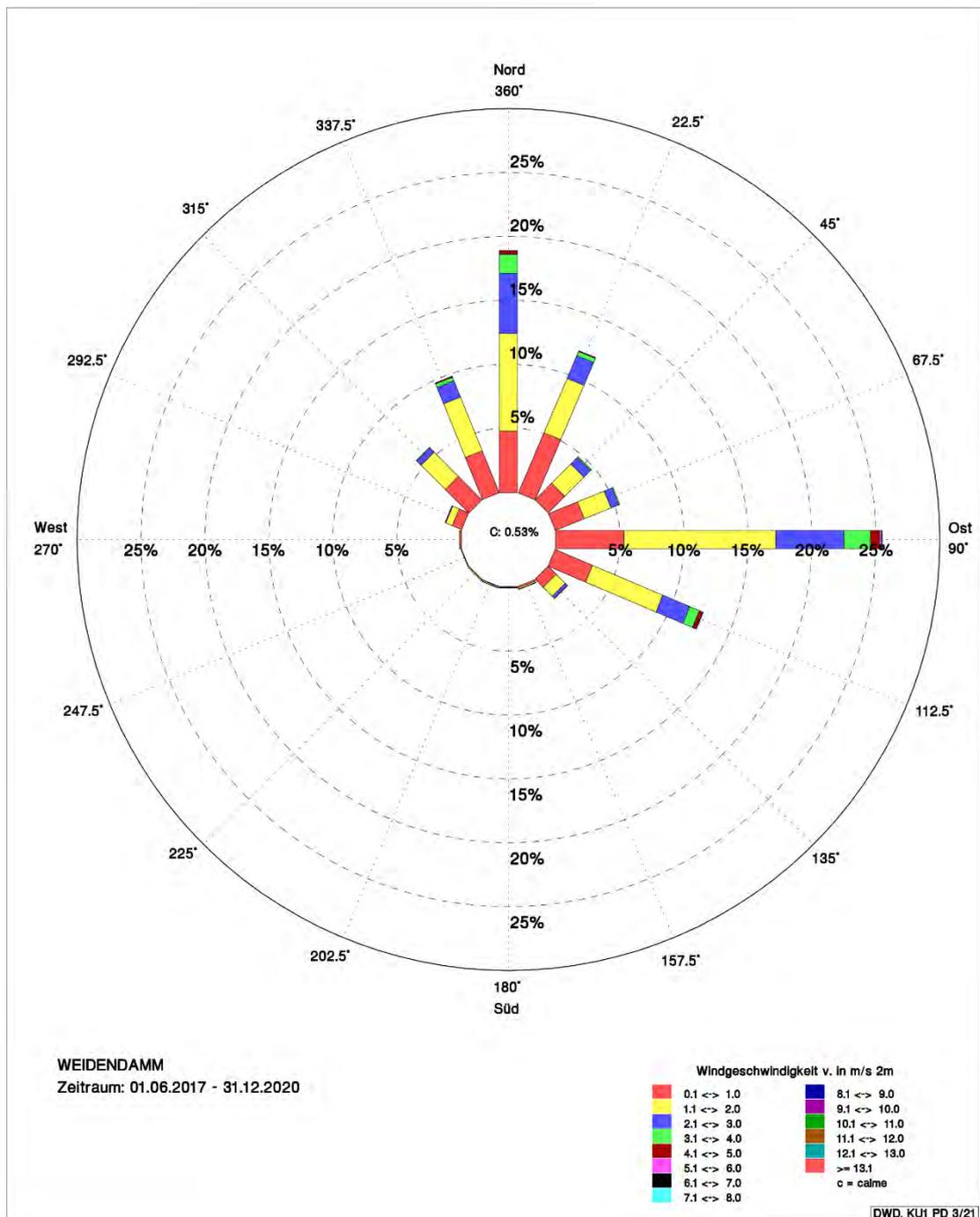


Abb. 5.28: Stärkewindrose der Station Weidendamm. Messhöhe: 2 m über Grund, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

An der Stadtstation Weidendamm befindet sich das primäre Windrichtungsmaximum bei Ost und Ost-südost, das sekundäre Maximum bei Nordnordwest bis Nordnordost. Das ausgedehnte Minimum umfasst die Richtungen Südsüdost bis Westnordwest. Windgeschwindigkeiten von mehr als 3 m/s sind recht selten (ca. 6,5 % Häufigkeit). Höhere Windgeschwindigkeiten von über 5 m/s machen nur 0,2 % aller Fälle aus, sie kommen aus östlichen und nördlichen Richtungen. An dieser Station bildet sich das städtische Umfeld deutlich ab: durch Straßenzüge mit mehrstöckiger Zeilenbebauung, langgestreckten Gewerbebauten und zwei Hochhäuser in der unmittelbaren Umgebung wird das Windfeld stark modifiziert und kanalisiert.

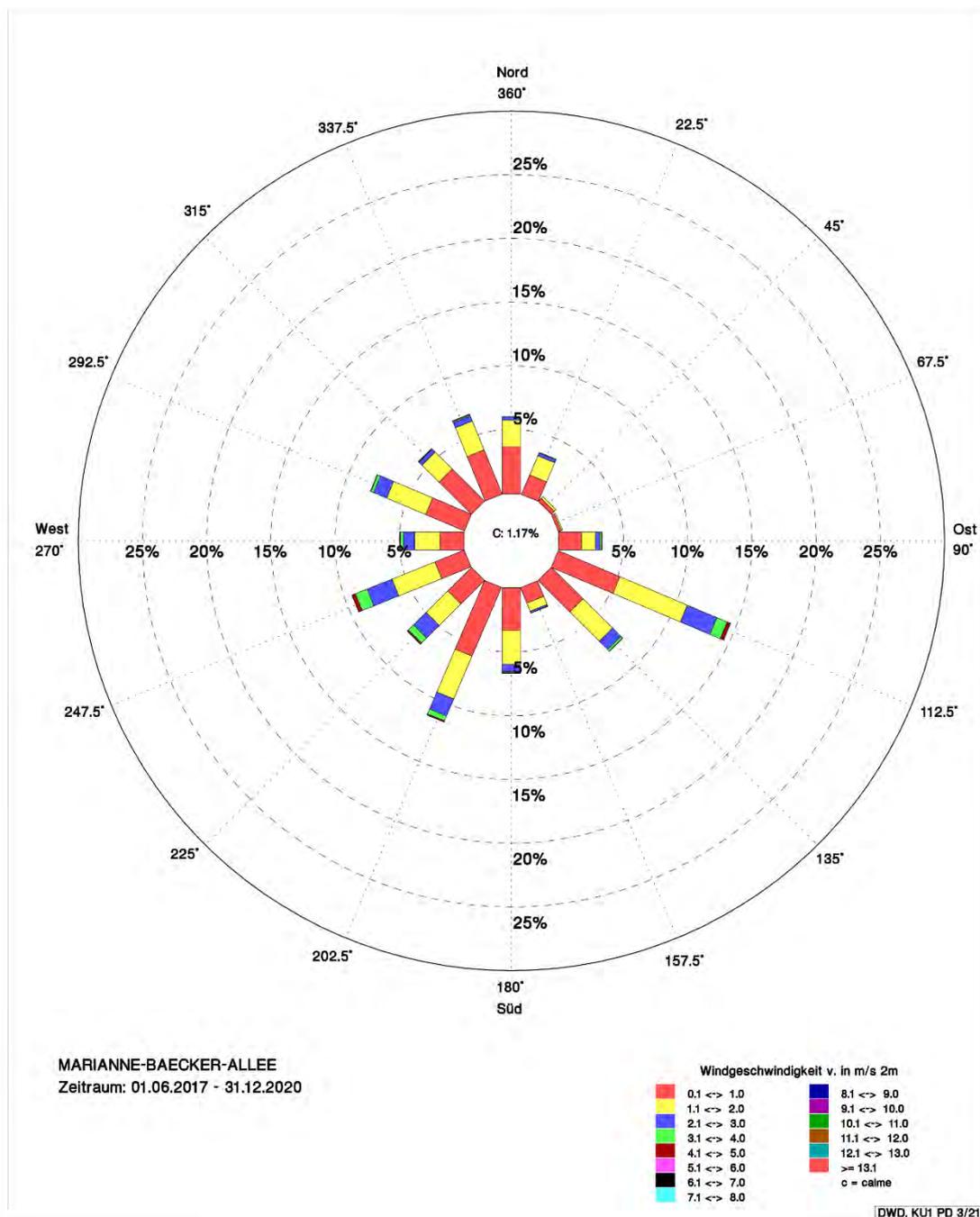


Abb. 5.29: Stärkewindrose der Station Marianne-Baecker-Allee. Messhöhe: 2 m über Grund, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

An der Stadtstation Marianne-Baecker-Allee kommt der Wind am häufigsten aus Ostsudost, Südsüdwest und Westsudwest. Das Minimum zeigt sich bei Nordost bis Ostnordost. Auch an dieser Station sind Windgeschwindigkeiten von über 3 m/s recht selten (ca. 4,7 % Häufigkeit). Höhere Windgeschwindigkeiten von über 5 m/s machen nur knapp 0,1 % aller Fälle aus, diese werden meist aus den Richtungen Ostsudost, Südwest und Westsudwest registriert. Das Umfeld ist durch überwiegend flache Gewerbebauten, großflächige und versiegelte Parkplätze und ein Hochhaus (nordöstlich der Station) geprägt.

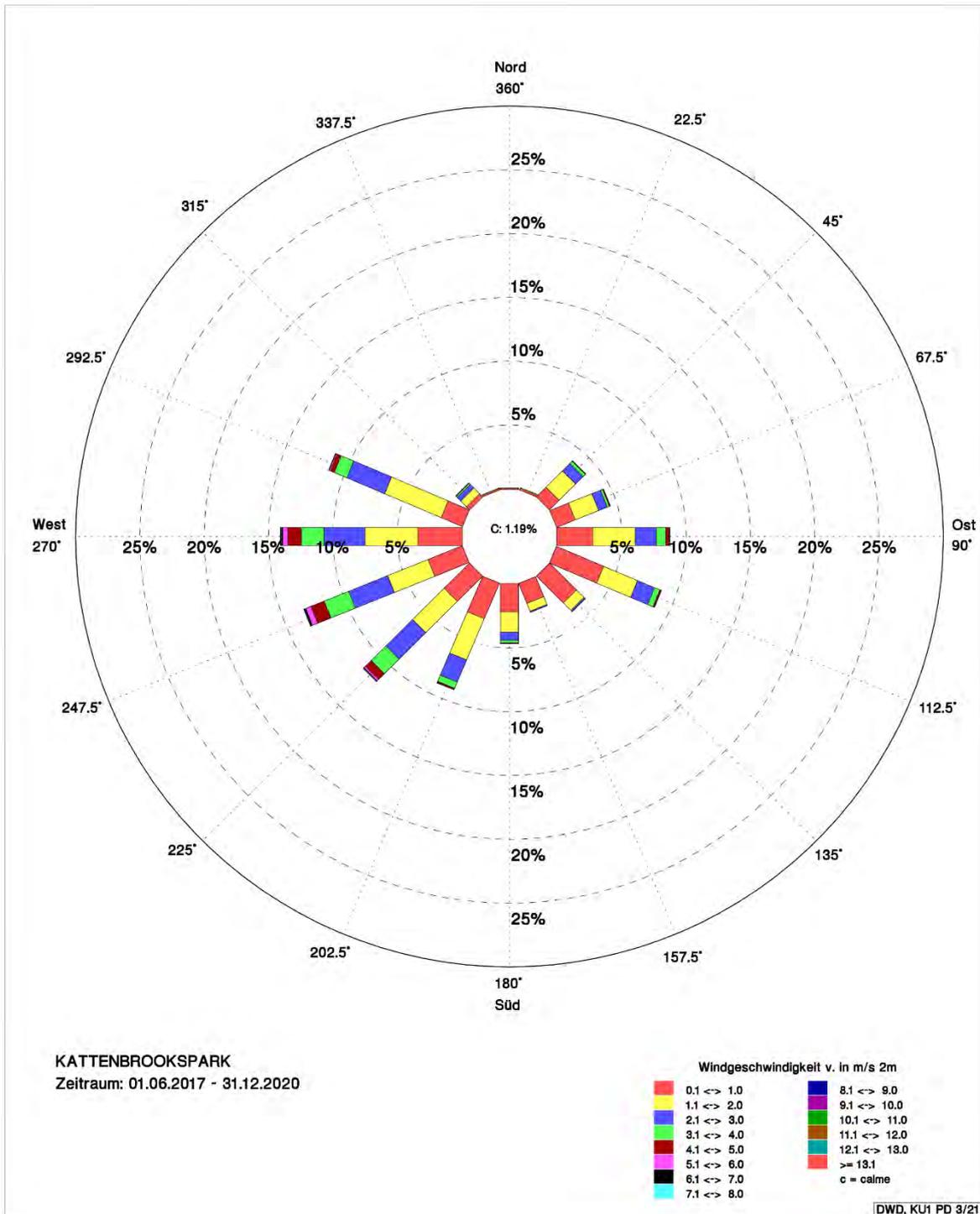


Abb. 5.30: Stärkewindrose der Station Kattenbrookspark. Messhöhe: 2 m über Grund, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

An der Umlandstation Kattenbrookspark zeigt sich ein weit aufgefächertes primäres Maximum bei Südwest bis Westnordwest, ein sekundäres Maximum bei Ost bis Ostsüdost. Am seltensten kommt der Wind aus Nordwest bis Nordnordost. An dieser Messstelle kommen Windgeschwindigkeiten von über 3 m/s mit einer Häufigkeit von 13 % vor. Höhere Windgeschwindigkeiten von über 5 m/s machen hier ca. 1 % aller Fälle aus, diese sind meist mit den Richtungen West und Westsüdwest gekoppelt.

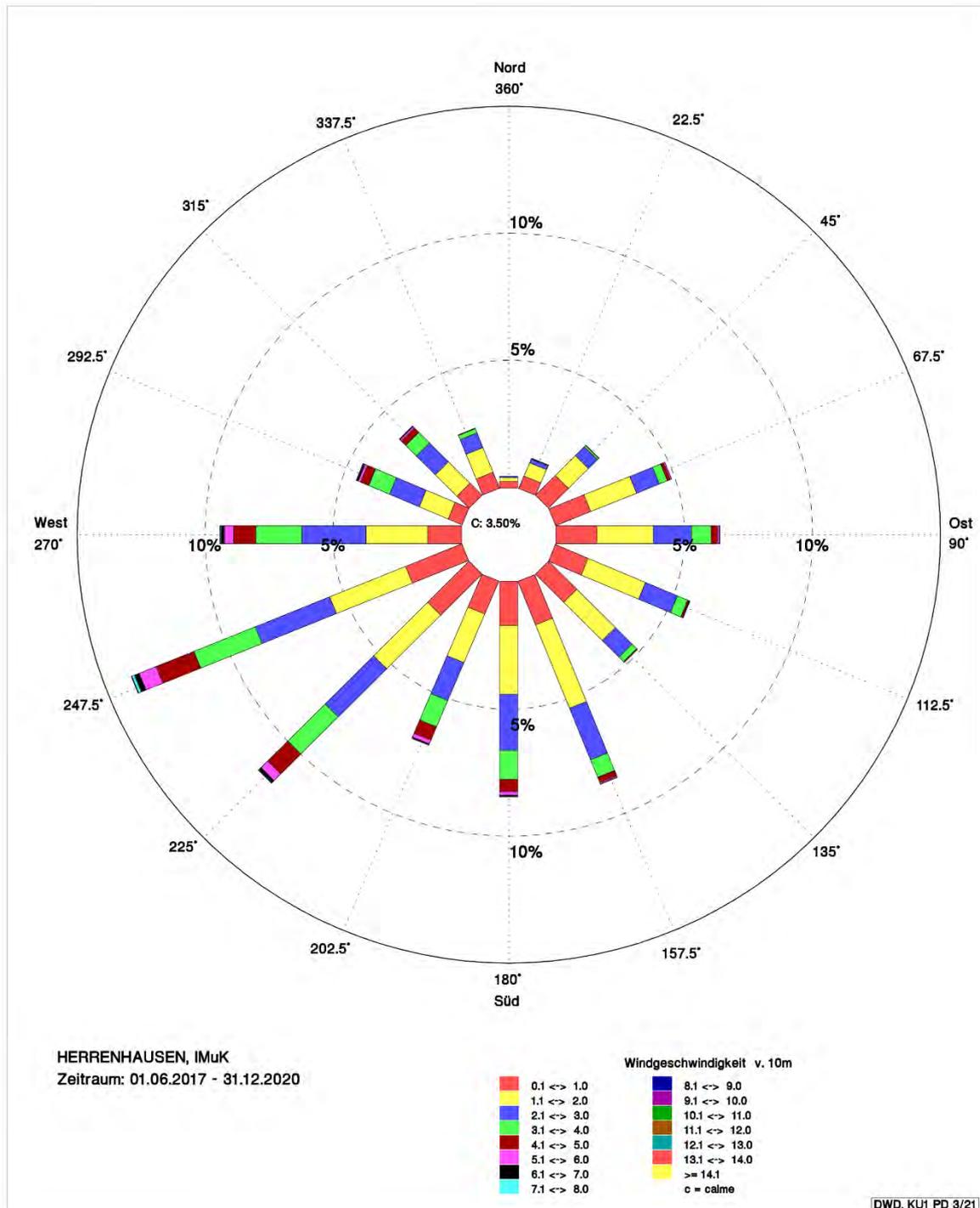


Abb. 5.31: Stärkewindrose der Station Herrenhausen. Messhöhe: 10 m über Grund, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

An der Station Herrenhausen liegt das primäre Maximum bei Südwest bis West, das sekundäre Maximum bei Südsüdost bis Süd. Das Minimum wird bei Nord bis Nordnordost beobachtet. Aufgrund der Messhöhe (10 m) sind die gemessenen Windgeschwindigkeiten etwas höher als bei den temporären Stationen im Stadtgebiet. Werte über 3 m/s weisen eine Häufigkeit von 21 % auf, über 5 m/s kommen in 2,5 % aller Fälle vor. Die höchsten Windgeschwindigkeiten kamen aus Richtung Westsüdwest.

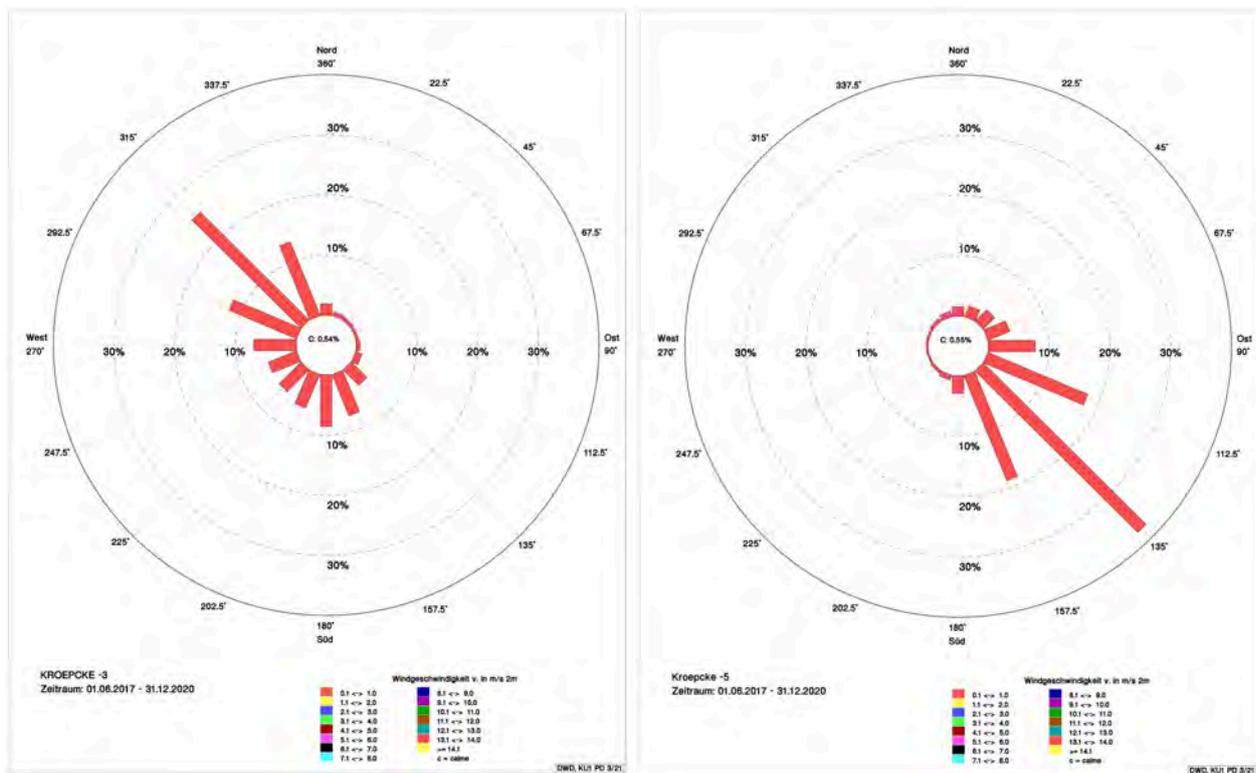


Abb. 5.32: Stärkewindrosen an den Tunnelstationen Kröpcke, links: Ebene-3, rechts: Ebene-5. Messhöhe: 2 m über Grund, Datenbasis: 10-Minuten-Mittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

An den beiden Tunnelstationen wird die Verteilung der Windrichtungen durch die Tunnelausrichtung bestimmt, als Hauptwindrichtungen ergeben sich Nordwest in der Ebene-3 bzw. Südost in der Ebene-5. Die Windgeschwindigkeiten im Tunnelbereich werden im Wesentlichen durch die Vorbeifahrt der Züge moduliert. Die Messungen sind in Tabelle 5.12 zusammengefasst.

Tab. 5.12: Windgeschwindigkeiten an den beiden Tunnelstationen Kröpcke-3 und -5. Mittelwerte und Maximum pro Parameter, dazu Häufigkeit des Auftretens bezogen auf die Schwellenwerte 3 und 6 m/s. Datenbasis: 10-Minuten-Werte, Zeitraum: 06.2017-12.2020.

| | Kröpcke-3 Mittelwind (10 Min) | Kröpcke-3 Maxwind (10 Min) | Kröpcke-5 Mittelwind (10 Min) | Kröpcke-5 Maxwind (10 Min) |
|-------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Maximum | 0,8 m/s | 6,4 m/s | 0,7 m/s | 5,5 m/s |
| Mittelwert | 0,4 m/s | 3,5 m/s | 0,4 m/s | 2,7 m/s |
| ≤ 3 m/s | 100,0 % | 14,9 % | 100,0 % | 61,9 % |
| ≤ 6 m/s | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % |
| > 6 m/s | 0,0 % | 0,0 % | 0,0 % | 0,0 % |

Von beiden Stationen liegen Windgeschwindigkeiten sowohl als 10-Minuten-Mittelwerte als auch als Windspitzen im jeweiligen 10-Minuten-Intervall vor. Die Auswertung der 10-Minuten-Mittelwerte ergab an beiden Stationen einen Wert von 0,4 m/s. Die höchsten Mittelwerte waren 0,8 (K-3) bzw. 0,7 m/s (K-5). In 88 % (K-3) bzw. 82 % (K-5) lagen die Mittelwinde $\leq 0,5$ m/s. Es zeigte sich ein leichter Tagesgang in den Werten: tagsüber lagen die Mittelwinde bei 0,5 m/s in beiden Ebenen, nachts bei 0,3 m/s.

Durch die Vorbeifahrt der Straßenbahnen wurden an den Messtellen kurze Windspitzen registriert: bis zu 6,4 m/s (Kröpcke-3) bzw. 5,5 m/s (Kröpcke-5). Im Mittel lagen die Windspitzen in der Ebene-3 bei 3,5 m/s, in der Ebene-5 bei 2,7 m/s. Auch hier wurden tagsüber höhere Werte beobachtet: um 3,9 (K-3) bzw. um 3,1 m/s (K-5). Nachts waren es < 3 m/s (K-3) bzw. < 2 m/s (K-5).

6 Studie mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3

Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (3-dimensionales, mikroskaliges, urbanes Klimamodell) des Deutschen Wetterdienstes wurde speziell zur Untersuchung stadtklimatologischer und geländeklimatologischer Fragestellungen entwickelt. Für die vorliegende Untersuchung wurde die MUKLIMO_3-Version mit umfassender Thermodynamik eingesetzt (SIEVERS, 2016). Das Modell berechnet basierend auf den Prinzipien der Massenerhaltung, Energieerhaltung und Impulserhaltung auf einem dreidimensionalen Rechengitter den Tagesgang des Windes, der Temperatur und der Feuchtigkeit in der Atmosphäre und im Erdboden sowie den Tagesgang der solaren und thermischen Strahlung und vieler weiterer relevanter Parameter.

Die räumliche Auflösung des Modells liegt in der Regel zwischen wenigen Metern und wenigen hundert Metern. Die Rechengitterweiten können im Modellgebiet horizontal und vertikal variiert werden, wobei typischerweise in Bodennähe und in dem im Mittelpunkt der Untersuchung stehenden Teil des Modellgebiets die höchste Auflösung gewählt wird. Die für Modellsimulationen benötigten Anfangs- und Randwerte für das Modellgebiet (d.h. auch die für die Region typischen, von der Stadt unbeeinflussten Werte) werden durch eine automatisch zusätzlich ablaufende eindimensionale MUKLIMO_3 Simulation mit einer für das Umland repräsentativen Landnutzung bestimmt. Der mit diesem 1-dimensionalen Modell berechnete Tagesgang repräsentiert gleichzeitig die für die Region typischen und von der Stadt unbeeinflussten Verhältnisse. Die Simulationen mit MUKLIMO_3 werden meist für Zeiträume zwischen mehreren Stunden und einigen Tagen durchgeführt. Da die Modellphysik von MUKLIMO_3 keine Wolken- und Niederschlagsbildung enthält, kann das Modell zwar einen vorgegebenen, konstanten Wolkenbedeckungsgrad berücksichtigen, aber nur für niederschlagsfreie Situationen eingesetzt werden.

Neben den meteorologischen Eingangsgrößen aus dem 1-dimensionalen Modell benötigt das 3-dimensionale Modell für jede Gitterzelle die Geländehöhe und Informationen zur Art der Landnutzung. Die Konfigurationsmöglichkeiten der Landnutzung sind vor allem hinsichtlich der vielfältigen städtischen Bebauungsstrukturen in einer Großstadt eine wesentliche Stärke des Stadtklimamodells MUKLIMO_3. Da bei horizontalen Gitterweiten von 100 m Einzelgebäude nicht mehr explizit simuliert werden können, wird eine Parametrisierung der Gebäudeeffekte genutzt. Die Parametrisierung unaufgelöster Bebauung beruht dabei im Einklang mit GROSS (1989) auf der Ähnlichkeit der Luftströmung zwischen Gebäuden mit der Strömung eines Gases oder einer Flüssigkeit in einem porösen Medium. Außer der Strömungsverdrängung durch das Bauvolumen werden im Modell durch geeignete Ansätze auch die bremsende Wirkung der Gebäudeoberflächen sowie die Turbulenzerzeugung durch Strömungsabriss an den Gebäudekanten berücksichtigt. Auch die mit Höhe und Dichte der Bebauung zunehmende Verlagerung des Strahlungsumsatzes vom Boden zu den Wänden und Dächern der Gebäude bzw. zu den Baumkronen wird beachtet. Straßen können über eine Erhöhung des Versiegelungsgrades der betroffenen Modellgitterzellen berücksichtigt werden.

Das Modell MUKLIMO_3 ermöglicht somit die detaillierte Simulation von Wechselwirkungen zwischen städtischer Bebauung, Boden, Vegetation und Atmosphäre.

Für die Beschreibung der Struktur der städtischen Bebauung werden folgende statistische Parameter verwendet:

- mittlerer Gebäudegrundflächenanteil, mittlere Gebäudehöhe
- mittlerer Wandflächenindex
- mittlerer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden (siehe Tab. 6.1)

Zur Ableitung der von MUKLIMO_3 benötigten Landnutzungsklassen (Abb. 6.1) wurde der Urban Atlas 2012 des Copernicus Land Monitoring Service verwendet (CLMS, Urban Atlas — Copernicus Land Monitoring Service). Abb. 6.1 zeigt die räumliche Verteilung der Urban Atlas Landnutzungsklassen für das den Teil des Modellgebietes mit äquidistanter Gitterweite. Während einige von MUKLIMO_3 benötigten physikalischen Parameter der Landnutzungen nur als Klassenmittelwerte über eine Landnutzungstabelle vorgebar waren, konnten mit einem von HEENE et al. (2018) entwickelten Verfahren der Versiegelungsanteil und der Baumbestandsanteil auf Basis der Copernicus High Resolution Layer „Imperviousness“ (Versiegelungsgrad) und „Forests“ (Wald) (Copernicus Land Monitoring Service - High Resolution Layers - Imperviousness - European Environment Agency (europa.eu)) sowie auf Basis der LOD1 3d-Gebäudemodelldaten des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) die Gebäudehöhe, der Gebäudegrundflächenanteil und der Wandflächenindex für das genannte Gebiet modelliert und in Form von Rasterdaten vorgegeben werden. Tabelle 6.1 enthält eine Auflistung der über das Gesamtmodellgebiet gemittelten physikalischen Parameter der Landnutzungsklassen mit Bebauung. Wie erwähnt variieren innerhalb der Landnutzungsklassen die Parameter Gebäudegrundflächenanteil, Gebäudehöhe, Versiegelungsgrad des Flächenanteils zwischen den Gebäuden, Wandflächenindex sowie der Baumbedeckungsgrad.

Das Vegetationsmodell besteht aus drei vertikalen Schichten. Die oberste der drei Schichten beschreibt den Kronenraum der Bäume mit Hilfe der mittleren Baumhöhe, der Blattflächendichte im Kronenbereich und des Grundflächenanteils des Baumbewuchses. Für die den Stammraum beschreibende mittlere Vegetationsschicht wird die Blattflächendichte deutlich herabgesetzt. Die unterste, d.h. die bodennächste Vegetationsschicht ist charakterisiert durch deren Höhe, den Bodenbedeckungsgrad durch die Vegetation und den entsprechenden Blattflächenindex. Bäume und Pflanzenblätter haben im Vegetationsmodell drei wichtige Funktionen: Sie wirken als Hindernisse für die Luftströmung und sind Quellen und Senken für die Strahlung und den Wasserdampf. Die langwellige (thermische) und kurzwellige (solare) Strahlung wird oberhalb der Bebauung separat berechnet. Für die langwellige Strahlungsbilanz werden Parametrisierungen mit einem zusätzlichen Ansatz zur Berücksichtigung des Wolkenbedeckungsgrads verwendet. Für alle Gitterzellen mit Bebauung wird, in Abhängigkeit von der Gebäudedichte, die kurzwellige Strahlung von Wänden und Dächern reflektiert und absorbiert.

Zusätzlich werden Emission und Absorption der langwelligen Strahlung durch die Gebäude berechnet. Weitere und detailliertere Informationen zum Modell MUKLIMO_3 gibt es bei SIEVERS (2016), NOPPEL (2017) und auf www.dwd.de/waermeinsel.

Das Modellgebiet für MUKLIMO_3 sollte horizontal möglichst die doppelte Ausdehnung der Stadt haben, um die Simulation von städtischen Wärmeinselzirkulationen (sog. Flurwinde) adäquat zu ermöglichen. Die horizontale Rechengitterauflösung kann konstant oder variabel gewählt werden. Vertikal sollte die Auflösung in Bodennähe möglichst hoch gewählt werden, kann aber zur Reduktion der Anzahl der Rechengitterzellen mit zunehmender Höhe schrittweise reduziert werden. Aus numerischen Gründen kann das Modellgebiet noch von einem aus mehreren Gitterzellen bestehenden Streifen umsäumt werden. Die in diesem Übergangsbereich berechneten Werte werden generell nicht dargestellt oder ausgewertet. Neben den Daten der Bebauungsstrukturen bzw. Landnutzungsklassen müssen zusätzlich die Daten der Geländehöhe für das gesamte Modellgitter zur Verfügung stehen.

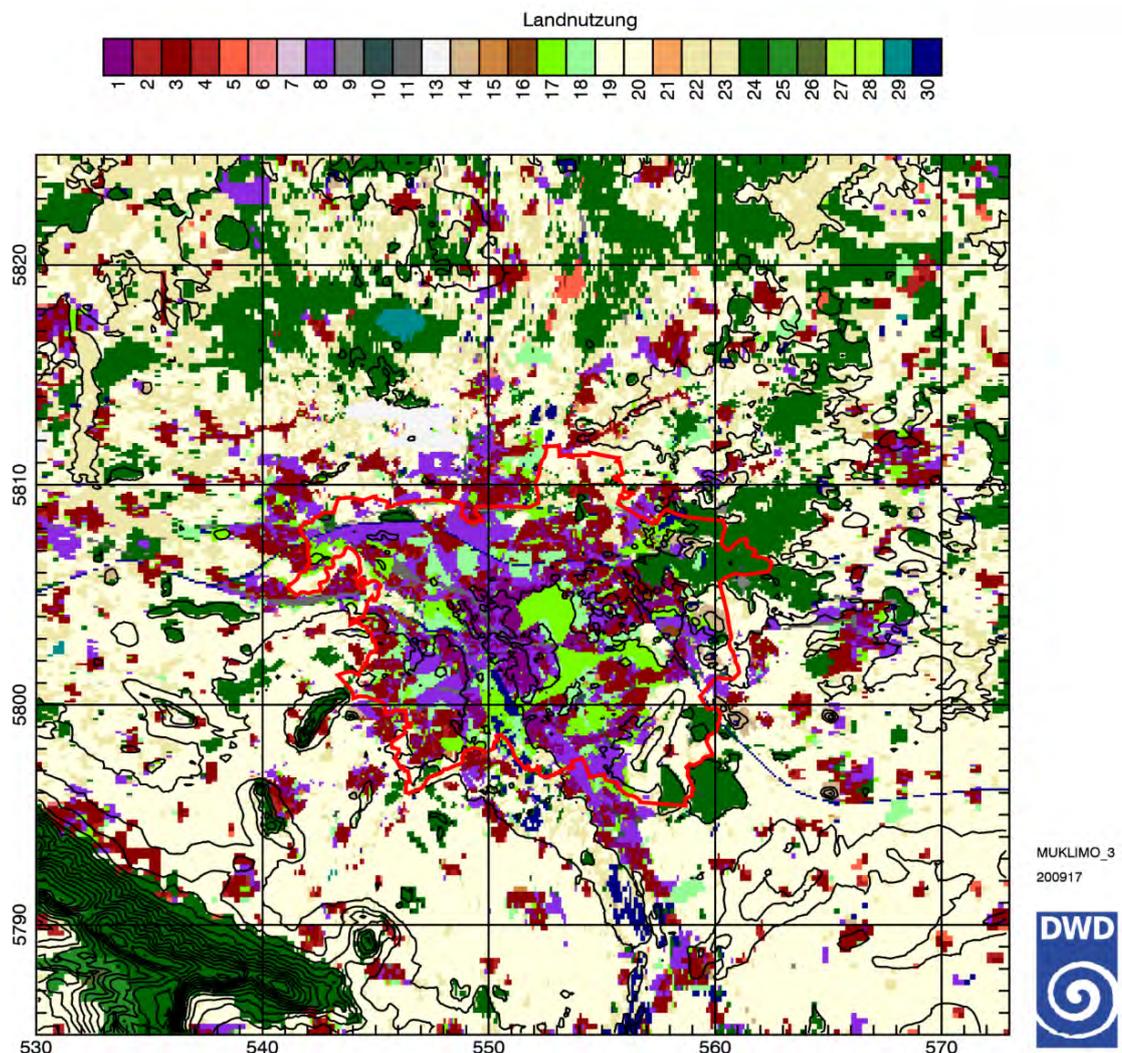


Abb. 6.1: Landnutzungsklassen im Stadtgebiet und der Umgebung von Hannover.

In dieser Studie ist das Stadtgebiet von Hannover über eine Fläche von 23,2 km x 20,2 km mit einer Auflösung von 100 m simuliert worden, umgebend von einem Gürtel mit größeren Gitterweiten, die rasch von 120 auf 250 m ansteigen. Insgesamt erstreckt sich hier das Simulationsgebiet über eine Fläche von 43 km x 40 km. Das dreidimensionale Modell rechnet mit 35 vertikalen Schichten. Die untersten 18 Schichten haben einen Abstand von 10 m. Darüber steigt der Abstand langsam bis auf 200 m an. Das 3D-Modellgebiet ist damit 665 m hoch. Das 1D-Modell hat 52 vertikale Schichten und ist 2650 m hoch. Damit sind es 314 x 284 x 35, also insgesamt 3.121.160 Gitterzellen.

Für die benötigten Geländehöhendaten wurden Daten des BKG (DGM 25) verwendet. Grundlage für die Modellierung der Landnutzung bzw. Bebauung waren, wie oben erwähnt, die Copernicus Land Monitoring Service LOD1-Daten des BKG. Die Landnutzung im zentralen, äquidistanten Simulationsbereich zeigt Abbildung 6.1. Einige statistische Parameter der verwendeten Bebauungsklassen 1 bis 16 sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Die in der Tabelle nicht aufgeführten Klassen 17 bis 30 enthalten keine Bebauung, sondern beschreiben Grünflächen mit unterschiedlich hohem und dichtem Bewuchs (z.B. Ackerland, Weideland, Grünflächen, Wälder, Freizeitanlagen, Feuchtgebiete etc.) und Wasserflächen.

Tab. 6.1: Die Landnutzungsklassen mit Bebauung mit einigen statistischen Parametern.

| Nr | Bezeichnung | Anzahl | Flächenanteil | Höhe (m) | Wandflächen- | Versiegelung | Bodenbedeckung | Urban Atlas, |
|----|-----------------------------|--------------|---------------|----------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| | | Gitterzellen | der Gebäude | Gebäude | index | zw. Gebäuden | durch Bewuchs | CLC (ID) |
| 1 | sehr dichte Bebauung | 3496 | 0,26 | 11,12 | 2,70 | 0,77 | 0,79 | 11100 |
| 2 | mitteldichte Bebauung | 85 | 0,08 | 7,41 | 2,66 | 0,31 | 0,81 | 112 |
| 3 | dichte Bebauung | 12718 | 0,18 | 8,10 | 2,55 | 0,57 | 0,86 | 11210 |
| 4 | Bebauung mäßiger Dichte | 2408 | 0,12 | 7,53 | 2,55 | 0,35 | 0,88 | 11220 |
| 5 | Bebauung mittlerer Dichte | 691 | 0,08 | 6,81 | 2,56 | 0,14 | 0,95 | 11230 |
| 6 | lockere Bebauung | 136 | 0,13 | 7,00 | 2,53 | 0,31 | 0,76 | 11240 |
| 7 | vereinzelte Gebäude | 152 | 0,06 | 7,05 | 2,30 | 0,07 | 0,87 | 11300 |
| 8 | Industrie, Gewerbe, Militär | 8880 | 0,23 | 9,24 | 1,41 | 0,64 | 0,78 | 12100 |
| 9 | Fernstraßen | 356 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,82 | 12210 |
| 10 | Straßen | 516 | 0,04 | 10,46 | 2,75 | 0,50 | 0,90 | 12220 |
| 11 | Schienen | 509 | 0,06 | 8,68 | 2,10 | 0,72 | 0,78 | 12230 |
| 13 | Flughafen | 713 | 0,04 | 10,45 | 1,33 | 0,30 | 0,71 | 12400 |
| 14 | Tagebau, Halde | 920 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,20 | 13100 |
| 15 | Industriegelände | 203 | 0,13 | 7,22 | 2,25 | 0,29 | 0,20 | 13300 |
| 16 | Industrie-Brachflächen | 293 | 0,06 | 7,99 | 2,10 | 0,25 | 0,20 | 13400 |

6.1 Das Temperaturfeld

Die hier beschriebenen, beispielhaften Ergebnisse basieren auf der MUKLIMO_3-Simulation eines idealisierten, heißen und wolkenlosen Sommertages mit einer schwachen großräumigen Anströmung von 0,8 m/s aus Westsüdwest (WSW). Unter diesen Umständen können sich lokale Modifikationen des Wind- und Temperaturfeldes besonders gut ausbilden. Der Sonnenstand entspricht dem eines 27. Juli, die 25-stündige dreidimensionale Simulation startet um 9 MESZ.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Lufttemperatur in 5 m über Grund im Bereich Hannover um 16 Uhr, 23 Uhr bzw. 04 Uhr MESZ. Die Einteilung der 12-teiligen

Temperaturskala wurde für jede Stunde jeweils aktuell bestimmt durch das simulierte Minimum und Maximum. Damit entspricht dunkelrot immer der höchsten, dunkelblau der niedrigsten Temperaturklasse, die tatsächlichen Werte sind der jeweiligen Skala zu entnehmen.

Abbildung 6.2 zeigt das simulierte Temperaturfeld um 16 Uhr MESZ. Etwa zu dieser Zeit erreicht die Lufttemperatur verbreitet ihr Tagesmaximum, die simulierten Werte liegen zwischen 30,0 und 36,1 °C. Sehr hohe Temperaturen über 35 °C sind in den inneren Stadtbereichen zu sehen, die niedrigen Temperaturen um 30 °C zeigen sich über den größeren Gewässern Maschsee und Altwarmbüchener See.

In Gebieten mit hoher Bebauungsdichte ist die Temperatur aufgrund der durch die Gebäude beeinflussten Energieumsetzungen (höhere Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, verminderte Verdunstung etc.) deutlich höher als in Gebieten ohne oder mit lockerer Bebauung. Der Maximalwert von knapp über 36 °C wird in den zentralen Stadtbereichen Südstadt, Calenberger Neustadt, Mitte, Nordstadt und List, aber auch in Stöcken erreicht. Wegen der sehr geringen Anströmgeschwindigkeit dominieren die lokalen über die regionalen Einflüsse. Die Windgeschwindigkeit ist insgesamt sehr gering, Kanalisierungen zeigen sich nicht.

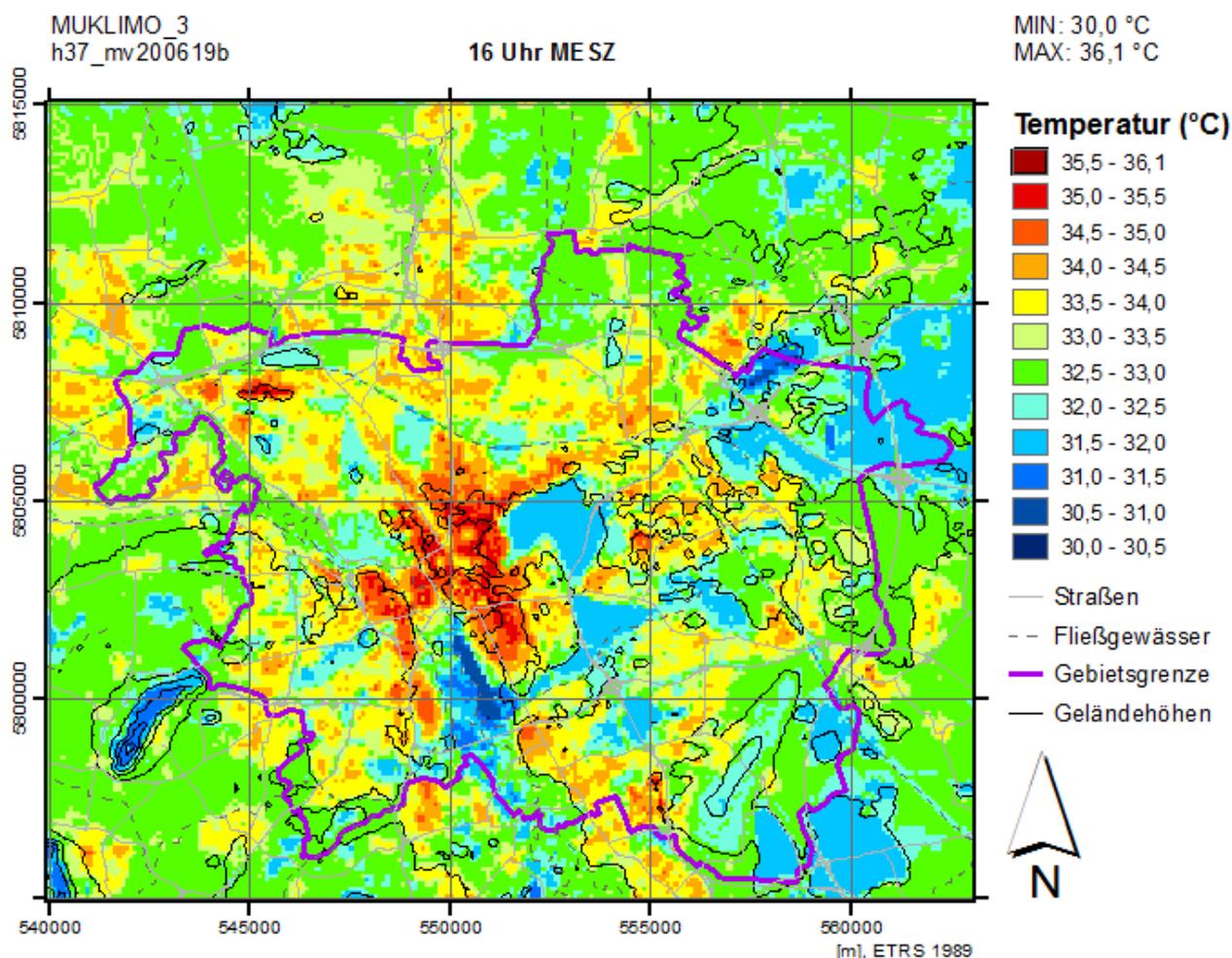


Abb. 6.2: Lufttemperatur in 5 m über Grund um 16 Uhr MESZ für einen heißen, trockenen, windschwachen Tag mit Anströmung aus WSW. Die hellgrauen Linien geben die Hauptverkehrsstraßen wieder, die Stadtgrenze von Hannover ist lila markiert.

Von einer Anströmung aus WSW ist in 5 m über Grund nichts mehr zu erkennen. In den Stadtbereichen mit dichter Bebauung, aber auch im Wald, kommt der Wind fast ganz zum Erliegen.

Die Abbildung 6.2 zeigt, dass es am Nachmittag um 16 Uhr am kühlgsten ist in ausgedehnten Waldgebieten (z. B. Eilenriede, Tiergarten, Misburger Wald, Gaim, Bockmerholz, Benther Berg) und in unmittelbarer Nähe größerer Wasserflächen (Maschsee mit Ricklinger Teichen, Altwarmbüchener See). Dabei spielt die vorgegebene Wassertemperatur von 23,5 °C eine wichtige Rolle. Im Wald bleibt es vor allem aufgrund der Schattenwirkung des Kronendaches relativ kühl. Bemerkenswert ist allerdings, dass zu diesem Zeitpunkt selbst in den kühlgsten Gebieten die Temperaturen zwischen 30 und 32 °C liegen.

Zum Abend hin kühlt sich die stark erwärmte Luft allmählich wieder ab. Um 23 Uhr MESZ, damit also knapp zwei Stunden nach Sonnenuntergang, liegt die Lufttemperatur in 5 m Höhe nur noch zwischen 22,1 und 32,1 °C, siehe Abbildung 6.3. Die Abkühlung erfolgt hauptsächlich aufgrund des Wärmeverlustes der Oberflächen durch langwellige Ausstrahlung. Dieser Energieverlust wird teilweise dadurch ausgeglichen, dass der darüber liegenden Luft Wärme entzogen wird. War am Tag der sogenannte fühlbare Wärmestrom noch von der Oberfläche nach oben

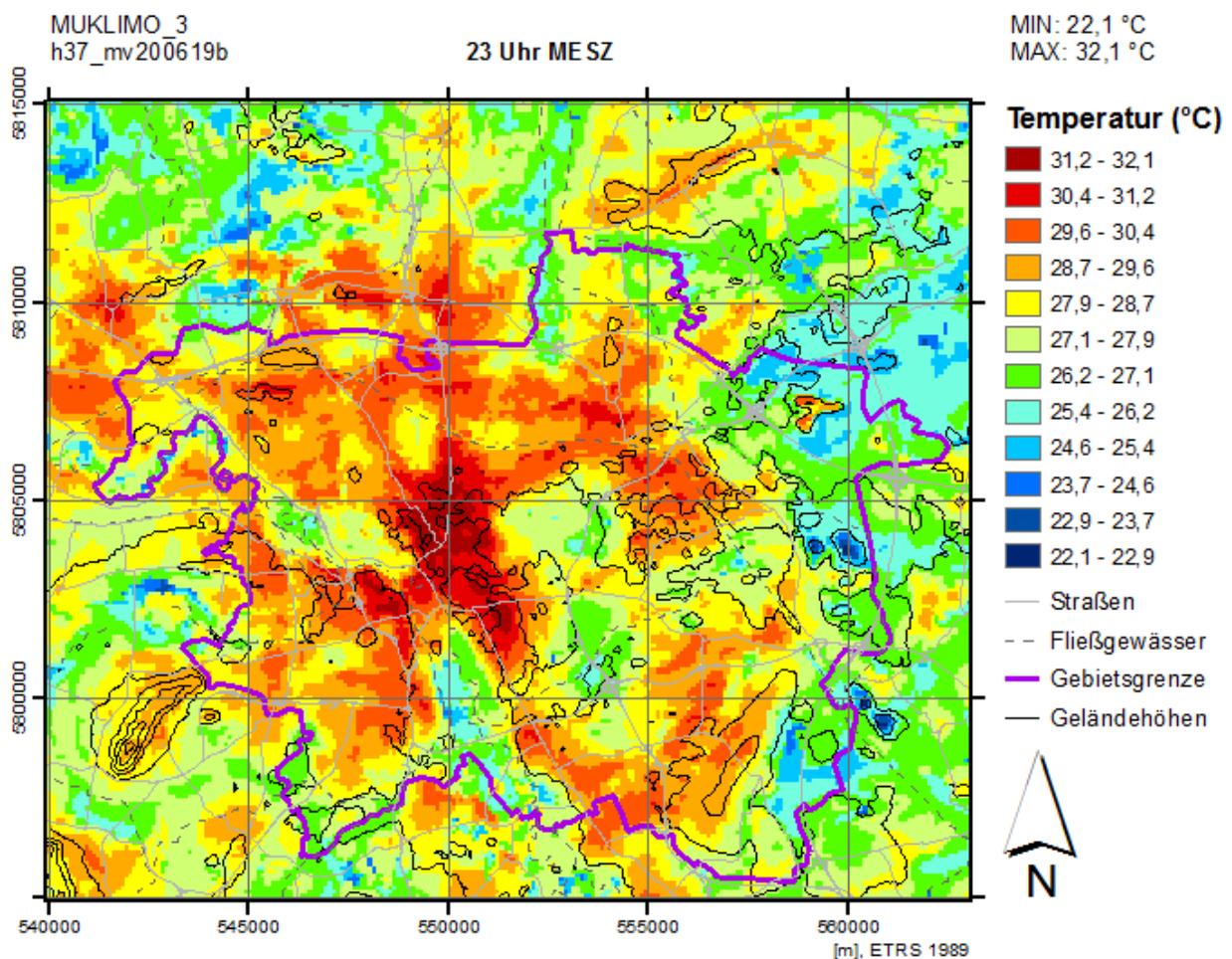


Abb. 6.3: Lufttemperatur in 5 m über Grund um 23 Uhr MESZ für einen heißen, trockenen, windschwachen Tag mit Anströmung aus WSW. Die hellgrauen Linien geben die Hauptverkehrsstraßen wieder, die Stadtgrenze von Hannover ist lila markiert.

gerichtet, so kehrt er in der Nacht sein Vorzeichen um und die Luft wird von den Oberflächen her abgekühlt. Die Abschirmung durch Baumkronen vermindert im Stammraum der Wälder die langwellige Ausstrahlung, am Waldboden bleibt es also länger warm. In konkav (z. B. Kuppen) bzw. konvex (z. B. Mulden) geformtem Gelände spielen weitere Effekte eine Rolle, die dazu führen, dass sich Mulden schneller abkühlen als Kuppen.

Gebäude speichern die bei Tag aufgenommene Wärme und können sie bei Nacht wieder abgeben. Stehen die Häuser dicht beieinander, wird außerdem im Straßenraum, ähnlich wie im Wald, die Nettoabstrahlung langwelliger Strahlung vermindert. Zusätzlich zu den durch diese Prozesse stark variierenden Abkühlungsraten bestimmt um 23 MESZ auch die bei Einsetzen der Abkühlung sehr unterschiedliche Ausgangstemperatur die Temperaturverteilung noch relativ stark. Sehr hohe Temperaturen von über 30 °C herrschen immer noch in den dicht bebauten Gebieten, zum Beispiel in der Innenstadt und den Stadtquartieren, aber auch in den verdichteten Bereichen und versiegelten Arealen (z. B. Messegelände, Bornum, Linden-Mitte, Stöcken). Auf unbewaldeten Freiflächen (Wiesen, Moor, Ackerflächen) hat die Abkühlung schon eingesetzt und es ist dort mittlerweile relativ kühl (z.B. Ricklinger Wiesen, südliche Eilenriede, Grünflächen südlich Anderten, Altwarmbüchener Moor). Die niedrigsten Temperaturen stellen sich dort ein, wo sich

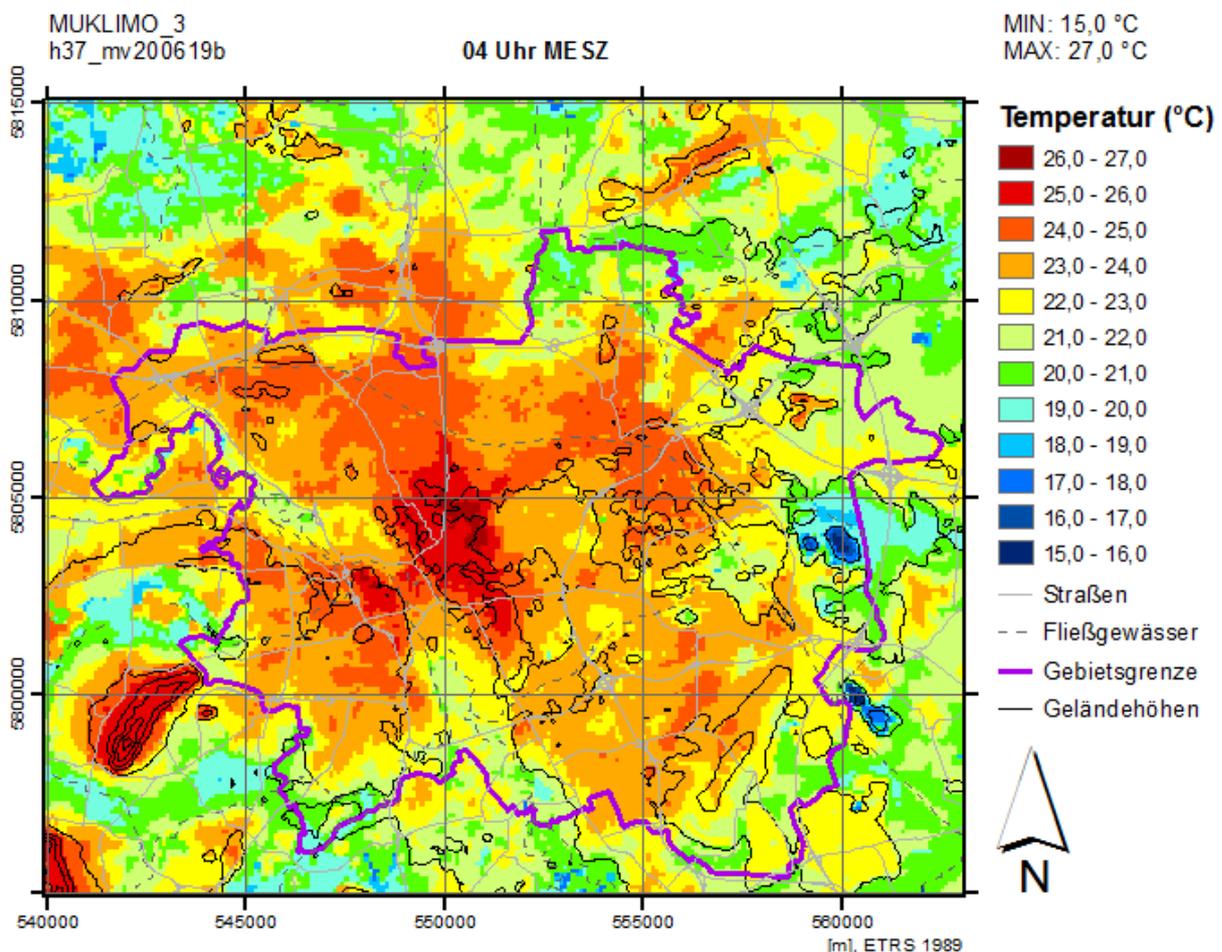


Abb. 6.4: Lufttemperatur in 5 m über Grund um 04 Uhr MESZ für einen heißen, trockenen, windschwachen Tag mit Anströmung aus WSW. Die hellgrauen Linien geben die Hauptverkehrsstraßen wieder, die Stadtgrenze von Hannover ist lila markiert.

- der Geländeneigung folgend - die abgekühlte Luft aus der Umgebung in Senken und Mulden sammelt und nicht abfließen kann, so z.B. in den Tagebaumulden in Misburg und Höver.

Die nächtliche Abkühlung hat sich bis 4 Uhr MESZ (Abb. 6.4), knapp zwei Stunden vor Sonnenaufgang, weiter fortgesetzt. Die Temperaturen im Stadtgebiet von Hannover und der Umgebung liegen nun zwischen 15,0 und 27,0 °C. Weite Bereiche der Stadt weisen Temperaturen über 23 °C auf, lediglich in einigen Randgebieten ist es kühler. Am wärmsten ist es - mit Werten über 25 °C - weiterhin in den inneren Stadtbereichen Mitte, Südstadt, Calenberger Neustadt und Linden, aber auch auf dem Bentherr Berg. Das ist ein interessantes Phänomen bewaldeter Bergkuppen. Mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 werden die Lufttemperaturen für eine Höhe von 5 m über Grund berechnet. Diese Höhe befindet sich in der Regel im Kronenbereich des Waldes, wo die Luft verzögert abkühlt. Über einer unbewaldeten Bergkuppe würden sich niedrigere Temperaturen einstellen.

In den frühen Morgenstunden gehören auch die größeren Wasserflächen zu den warmen Bereichen im Stadtgebiet, denn das Wasser kühlt nachts kaum ab, sondern wirkt vielmehr wie eine Warmwasserheizung auf die unmittelbare Umgebung. Nur in sehr kleinen Arealen ist es unter 20 °C abgekühlt (z.B. in Teilen von Isernhagen, in Misburg-Ost, in Döhren, südlich von Wettbergen). Die mit Abstand kühleren Bereiche finden sich im Südosten. Dort gibt es größere Tagebaumulden, in denen sich die kalte Luft sammelt.

6.2 Vergleich der Tagesgänge der Temperatur

Die Güte der MUKLIMO_3-Simulationen der Temperatur kann punktuell anhand der Messdaten unserer Stationen überprüft werden. Dabei sind jedoch einige Besonderheiten zu beachten.

- Das Modell berechnet die Parameter jeweils für feste Gitterpunkte. Da die Standorte der Stationen nicht mit den Modellgitterpunkten übereinstimmen, wurden jeweils die zwei bis drei nächstliegenden Gitterpunkte für den Vergleich ausgewählt.
- Ein realer heißer Tag, der an einer Station gemessen wird, entspricht nicht in allen Facetten dem typischen MUKLIMO-Sommertag. Die Bewölkungs- und Windverhältnisse sind in der Realität dynamisch und können sich im Tagesverlauf ändern, je nach Wetterlage.
- Die Temperaturmessungen erfolgen in einer Höhe von 2 m über Grund, MUKLIMO simuliert die Temperatur in 5 m über Grund.

Für die Standorte der Stationen Langenhagen (Flughafen) und Weidendamm (H-Nord) wurden jeweils zwei nächstliegende MUKLIMO-Gitterpunkte ausgewählt (Flughafen, Punkt 1 und Punkt 2; H-Nord, Punkt 1 und Punkt 2). Für die Standorte der Stationen Marianne-Baecker-Allee (H-Linden) und Kattenbrookspark (H-Kronsberg) wurden jeweils drei nächstliegende MUKLIMO-Gitterpunkte ausgewählt. An allen ausgewählten Gitterpunkten lagen die simulierten Höchsttemperaturen nahe 33 °C und die Tiefsttemperaturen nahe 20 °C.

Aus der mehrjährigen Messreihe an unseren Stationen sind neun Termine ausgewählt worden, an denen die Höchsttemperatur an allen Stationen 32 °C erreicht oder überschritten hatte und alle Stationen einen nahezu ungestörten Temperatur-Tagesgang aufwiesen. Zudem sollten die Termine zeitlich in der Nähe des Modelltages 25. Juli liegen, damit die Strahlungsverhältnisse vergleichbar sind.

Die folgenden Abbildungen 6.5 bis 6.8 zeigen für die Stationen Weidendamm, Marianne-Baecker-Allee, Langenhagen und Kattenbrookspark simulierte und gemessene Tagesgänge der Temperatur im Vergleich. Die mit MUKLIMO_3 simulierten Temperaturen liegen für jeweils 2 bis 3 nächstgelegene Gitterpunkte vor. Für die vier Stationen werden jeweils die gemessenen Temperatur-Tagesgänge für neun Termine dargestellt: 25./26.07.2018, 26./27.07.2018, 03./04.08.2018, 23./24.07.2019, 24./25.07.2019, 25./26.07.2019, 08./09.08.2020, 11./12.08.2020, 12./13.08.2020.

Die Diagramme zeigen eine recht gute Übereinstimmung im Tagesgang der Temperatur zwischen den Messungen und den Simulationen mit dem Modell. An den Messreihen ist der Einfluss des aktuellen Wetters auf den Temperaturgang erkennbar, z. B. durch vorbeiziehende Wolken: die Graphen zeigen Dellen. Insgesamt scheint MUKLIMO das Temperaturminimum etwas später zu erreichen, als die Messungen zeigen. Auch beim Maximum ist eine leichte Verschiebung erkennbar.

Hier zeigt sich, dass es nicht trivial ist, das „echte“ Wetter an einem speziellen Ort mit einem Modell zu beschreiben, selbst wenn man sich - wie hier geschehen - auf ganz spezielle Wetterlagen beschränkt. Selbst autochthone Hochdrucklagen zeigen eine gewisse Variabilität, wie man an unseren Messreihen sehen kann. Andererseits ist es nur mit einem detaillierten Stadtklimamodell wie MUKLIMO möglich, einen Überblick über die Temperaturverteilung in einem städtischen Quartier zu erhalten. Auch der Einfluss von sich ändernden Umgebungsbedingungen auf das lokale Temperatur- und Feuchtefeld, etwa durch Bebauung, Versiegelung, Rückbau oder andere städtebauliche Maßnahmen, kann nur durch ein Stadtklimamodell vorab quantifiziert werden.

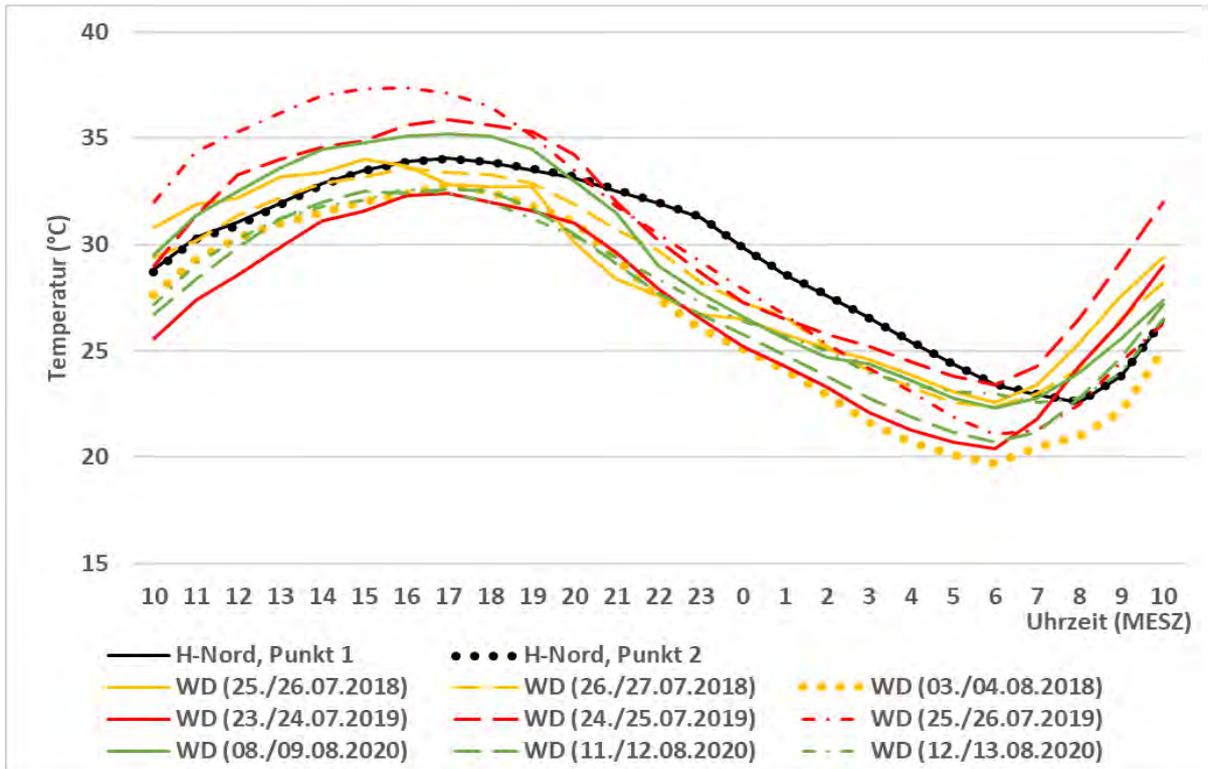


Abb. 6.5: Tagesgänge der Temperatur. Schwarze Grafen: MUKLIMO-Simulationen (H-Nord, Punkt 1, Punkt 2). Bunte Grafen: Messreihen an der Station Weidendam (WD) für 9 Termine.

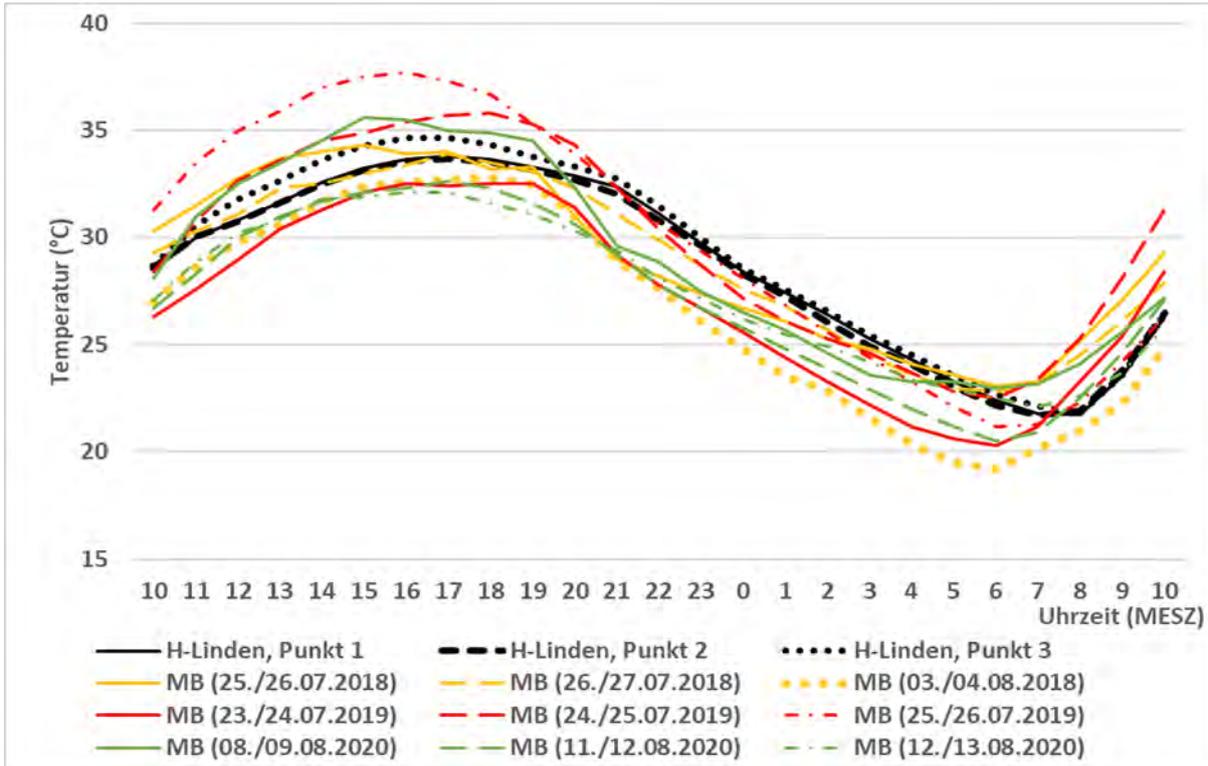


Abb. 6.6: Tagesgänge der Temperatur. Schwarze Grafen: MUKLIMO-Simulationen (H-Linden, Punkt 1, Punkt 2, Punkt 3). Bunte Grafen: Messreihen an der Station Marianne-Baecker-Allee (MB) für 9 Termine.

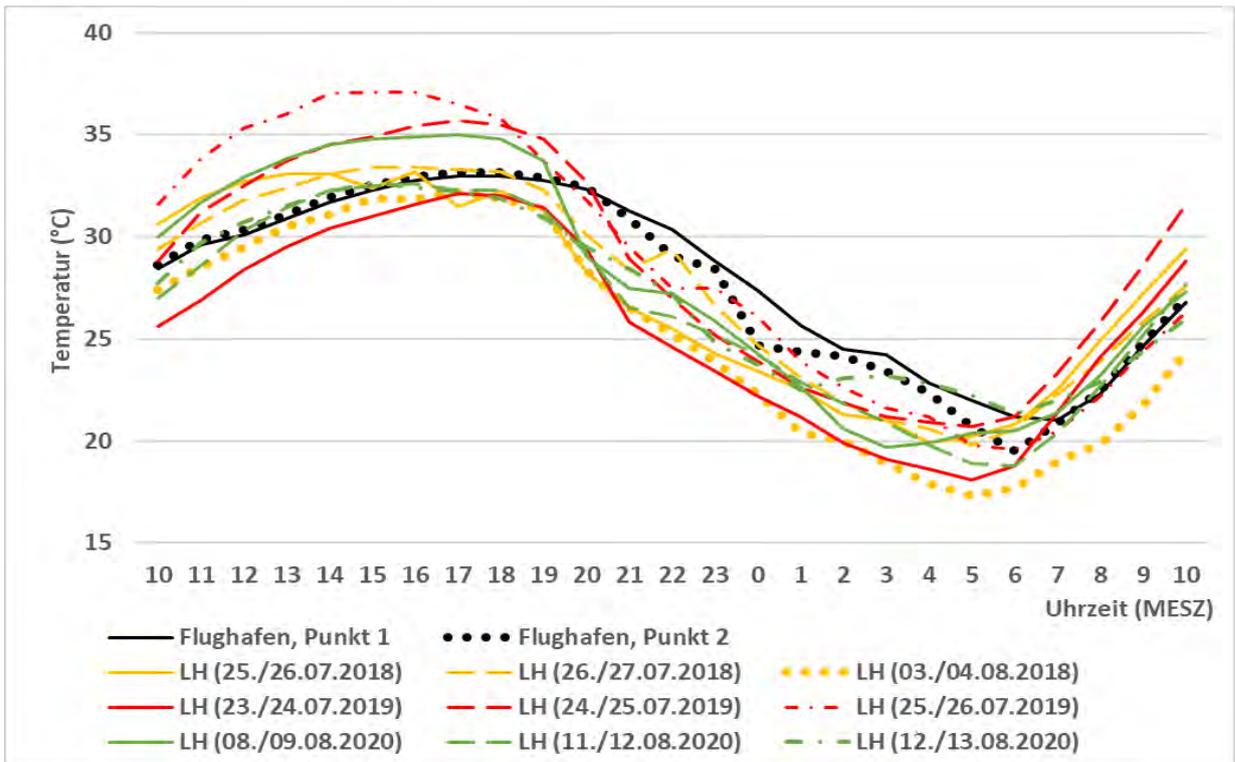


Abb. 6.7: Tagesgänge der Temperatur. Schwarze Grafen: MUKLIMO-Simulationen (Flughafen, Punkt 1, Punkt 2). Bunte Grafen: Messreihen an der Station Langenhagen (LH) für 9 Termine.

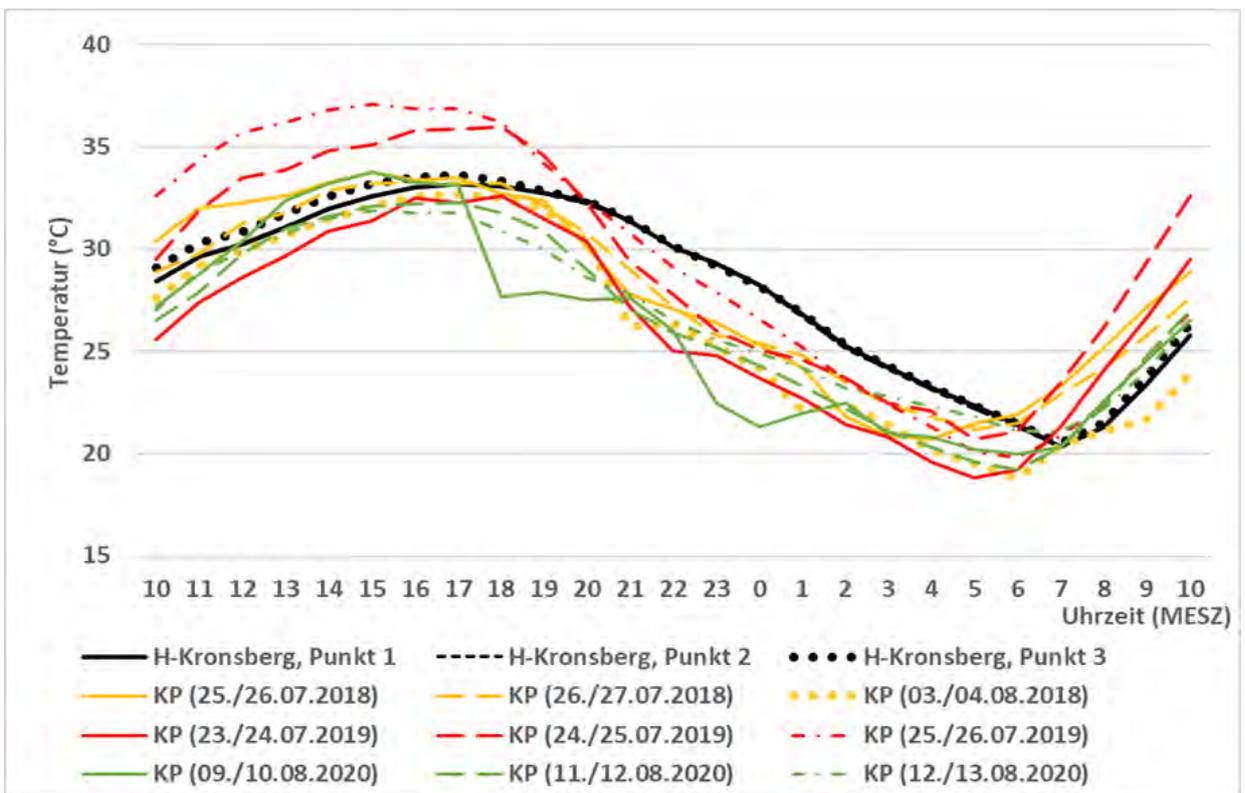


Abb. 6.8: Tagesgänge der Temperatur. Schwarze Grafen: MUKLIMO-Simulationen (H-Kronsberg, Punkt 1, Punkt 2, Punkt 3). Bunte Grafen: Messreihen an der Station Kattenbrookspark (KP) für 9 Termine.

7 Die Profilmessfahrten

Im Rahmen des Stadtklimaprojektes Hannover wurden die meteorologischen Messungen an den temporären festen Stationen ergänzt durch mobile Messungen, die mit einem unserer Messfahrzeuge durchgeführt wurden. Meteorologische Messungen an Stationen sind immer Punktmessungen, die in der Regel nur für die unmittelbare Umgebung repräsentativ sind. Insbesondere urbane Gebiete sind aber sehr unterschiedlich geprägt, z.B. durch Bebauung, Versiegelungsgrad, Oberflächeneigenschaften, Vegetation, Freiflächen und Gewässer und weisen dadurch sehr verschiedene Mikroklimata auf. Die räumliche Variabilität der meteorologischen Größen Lufttemperatur, relativer Feuchte und Windgeschwindigkeit ist innerhalb städtischer Strukturen sehr groß.

Mit Hilfe von mobilen Messungen ist es möglich, die Bereiche mit unterschiedlichen thermischen Bedingungen im Stadtgebiet besser zu erfassen. Ebenso können stadtklimatisch wertvolle Gebiete wie z. B. Freiflächen und Grüngürtel, die für die Aufrechterhaltung der Kalt- bzw. Frischluftzufuhr in das innere Stadtgebiet sorgen, identifiziert werden.

Die Messfahrten werden idealerweise in einer hochsommerlichen Schönwetterperiode durchgeführt. Denn insbesondere Tage mit hoher Einstrahlung und austauscharmen Bedingungen begünstigen die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel und können örtlich zu sehr hohen thermischen Belastungen führen. Während der Messfahrten werden die Lufttemperatur in zwei Höhen (0,7 m und 2,0 m über Grund) sowie die Luftfeuchtigkeit in 2,0 m über Grund kontinuierlich gemessen. Das Messfahrzeug ist mit langsamer Fahrt (ca. 10 - 30 km/h) auf einer vorab festgelegten Route unterwegs. Die Fahrten werden an zwei bis drei Folgetagen jeweils zu ganz bestimmten Zeiten durchgeführt: frühmorgens kurz vor Sonnenaufgang, am frühen Nachmittag kurz nach Sonnenhöchststand und am Abend nach Sonnenuntergang. Die Messwerte stehen entlang der gesamten Messstrecke alle 10 m zur Verfügung.

Die Route wird unter Berücksichtigung folgender Aspekte festgelegt:

- Erfassung möglichst großer Klimavariationen innerhalb des Stadtgebietes
- Durchfahren unterschiedlicher städtischer Strukturen
- Dauer der einzelnen Messfahrten möglichst nicht länger als 60 Minuten
- Befahrbarkeit der Strecke rund um die Uhr
- Passieren der temporären Messstationen

Da die Stadt Hannover eine große räumliche Ausdehnung aufweist, sind die Profilmessfahrten auf zwei Routen durchgeführt worden. Diese wurden immer in der gleichen Reihenfolge nacheinander befahren und führten direkt an den temporären Stationen Weidendamm und Marianne-Baecker-Allee, sowie relativ nah an der Station Kattenbrookspark vorbei, siehe Abbildung 7.1.

7.1 Messfahrten auf zwei Routen

Die immer zuerst befahrene Nordroute führte über ca. 18 km vom Startpunkt Rathaus durch den Maschpark, die Calenberger Neustadt, Linden (Passieren der Station Marianne-Baecker-Allee), Nordstadt (Passieren der Station Weidendamm), Oststadt und Mitte zurück zum Rathaus. Auf dieser Route ist auch die Lage der Haltestelle Kröpcke mit den beiden Tunnelstationen markiert. Die Fahrtzeiten auf der Nordroute betragen zwischen 41 und 66 Minuten, die Startzeiten waren 03:00 Uhr, 15:00 Uhr und 21:30 Uhr MESZ. Tabelle 7.1 gibt die Wegstreckenbeschreibung der Nordroute an.

Die Südroute wurde immer direkt im Anschluss befahren und führte vom Startpunkt Rathaus über knapp 19 km durch die Südstadt, Bult, Eilenriede, Bemerode, Kronsberg (Vorbeifahrt: Station Kattenbrookspark), Seelhorst, Döhren, am Maschsee entlang und - nach einem kurzen Abstecher durch die südliche Südstadt - zurück zum Rathaus. Die Fahrtzeiten auf dieser Route betragen zwischen 45 und 63 Minuten, die Startzeiten waren ca. 04:00 Uhr, 16:30 Uhr und 22.30 Uhr MESZ. Tabelle 7.2 gibt die Wegstreckenbeschreibung der Südroute an.

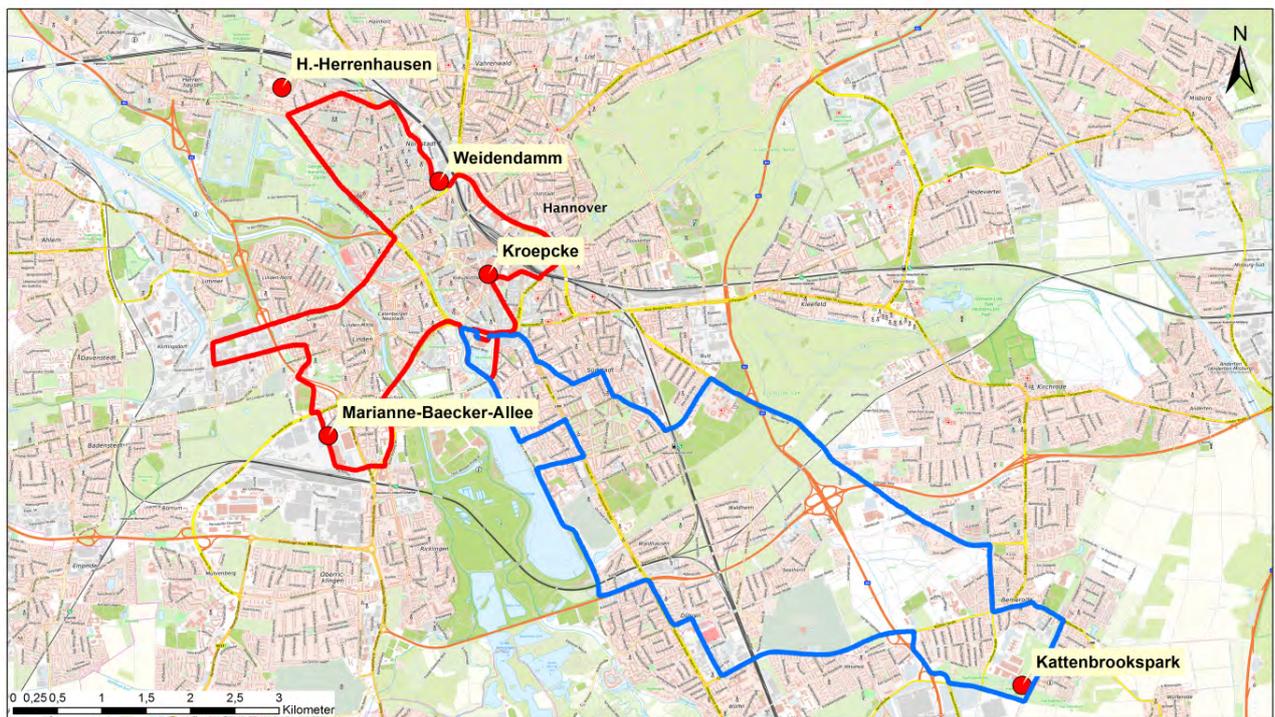


Abb. 7.1: Die Routen der Messfahrten in Hannover und die Lage der temporären Stationen Weidendamm, Kröpcke, Marianne-Baecker-Allee und Kattenbrookspark sowie der Station Herrenhausen. Nordroute: rot, Südroute: blau. Station Langenhagen liegt nördlich des Bildausschnittes.

Tab. 7.1: Marker, Wegstrecke und Ortsbeschreibungen auf der Nordroute.

| Marker | Wegstrecke (in m) | Ortsbeschreibung |
|-----------|-------------------|---|
| A = Start | 0 | Tramplatz, Rathaus |
| B | 223 | Ampel, Friedrichswal/ Willy-Brandt-Allee |
| C | 1580 | Culemannstraße/ Leinebrücke, Friederikenplatz |
| D | 2567 | Lavesallee, Ihmebrücke |
| E | 3707 | Fischerhof, Brücke über Göttinger Straße, B6 |
| F | 4567 | Station "Marianne-Bäcker-Allee" |
| G | 4833 | Ampel, Marianne-Bäcker-Allee/ Bornumer Straße |
| H | 5494 | Am Spielfelde/ Brücke über B6 |
| I | 6179 | Davenstedter Straße, unter Brücke B6 |
| J | 6911 | Ampel, Davenstedter Straße/ Am Lindener Hafen |
| K | 7820 | Fössestraße, Brücke unter B6 |
| L | 8950 | Spinnereistraße, Ihmebrücke |
| M | 9350 | Königsworther Straße, Leinebrücke |
| N | 9642 | Ampel, Königsworther Straße/ Nienburger Straße |
| O | 11530 | Ampel, Nienburger Straße/ Herrenhäuser Kirchweg |
| P | 13938 | Station "Weidendamm" |
| Q | 15096 | Raschplatzhochstraße, Brückenmitte |
| R | 15799 | Ampel, Berliner Allee/ Schiffgraben |
| S | 16294 | Ampel, Lavestraße/ Theaterstraße |
| T | 16692 | Ständerhausstraße/ Georgstraße (Kroepcke) |
| U | 17970 | Tramplatz, Rathaus |

Tab. 7.2: Marker, Wegstrecke und Ortsbeschreibungen auf der Südroute.

| Marker | Wegstrecke (in m) | Ortsbeschreibung |
|-----------|-------------------|---|
| A = Start | 0 | Tramplatz, Rathaus |
| B | 440 | Ampel Friedrichswal/ Hildburghäuser Straße |
| C | 1690 | Ampel, Krausenstraße/ Sallstraße; Nazarethkirche |
| D | 2834 | Bahnbrücke Lindemannallee |
| E | 3567 | Ampel, Lindemannallee/ Bischofsholer Damm |
| F | 4239 | Brücke über Messeschnellweg |
| G | 5818 | Brücke über Südschnellweg |
| H | 7368 | Bremeroder Straße/ Emslandstraße |
| I | 7660 | Wülferodaer Straße/ Emslandstraße |
| J | 8518 | Laatzener Straße / Emmy-Noether-Allee |
| K | 8859 | Ampel, Auffahrt Emmy-Noether-Allee/ Messeschnellweg |
| L | 9635 | Ampel, Gartenburgstraße |
| M | 11410 | Gartenburgstraße, Brücke über Bahngleise |
| N | 13300 | Hildesheimer Straße/ Willmerstraße, Brückenmitte |
| O | 13725 | Ampel, Willmerstraße/ Schützenallee |
| P | 15375 | Ampel, Rudolf-v.-Bennigsen-Ufer/ Altenbekener Damm |
| Q | 15891 | Ampel, Altenbekener Damm/ Hildesheimer Straße |
| R | 16350 | Ampel, Hildesheimer Straße/ Geibelstraße |
| S | 16880 | Ampel, Geibelstraße/ Rudolf-v.-Bennigsen-Ufer |
| T | 17600 | Mitte Kreuzung Kurt-Schwitters-Platz/ Arthur-Menge-Ufer |
| U | 18310 | Ampel, Culemannstraße/ Friedrichswal |
| V | 18585 | Tramplatz, Rathaus |

Während der Laufzeit des Projektes konnten drei Messkampagnen in den Sommern 2018 bis 2020 stattfinden, allesamt bei ungestörten sommerlichen Hochdrucklagen mit Höchsttemperaturen zwischen 28 und 38 °C. Während der drei Messkampagnen wurden jeweils sechs (2018, 2019) bzw. vier (2020) Messfahrten auf beiden Routen durchgeführt. Damit gibt es Ergebnisse von jeweils sechs Frühmorgenfahrten, fünf Nachmittagsfahrten, fünf Abendfahrten auf der Nordroute sowie auf der Südroute, insgesamt waren es 32 Messfahrten. Die Fahrten konnten störungsfrei durchgeführt werden. Lediglich die Abend-Messfahrt am 24.07.2019 auf der Südroute musste in zwei Abschnitten von der Sollstrecke abweichen: sie führte sowohl in Bemerode als auch in der Südstadt aufgrund von Straßensperrungen über leicht veränderte Strecken.

Die hier dargestellten Messergebnisse stellen nicht die Originalmesswerte dar, sondern die Daten wurden nachträglich auf die jeweilige Fahrt normiert. Dieses Verfahren wird angewandt, da sich während einer Messfahrt die Temperatur schon aufgrund des Tagesgangs ändert. Die Änderung ist umso größer, je länger die Messfahrt dauert. Diesem Temperaturshift wird mit der Normierung begegnet. Die entlang der Messstrecke zu beobachtenden Unterschiede in den gemessenen Temperaturen, die in diesem Kapitel dargestellt werden, sind also nicht durch den Tagesgang der Temperatur bedingt.

Die Normierung wurde wie folgt vorgenommen: Aus den beiden Temperaturmessungen am Startpunkt und am Zielpunkt der Messfahrt werden Differenz und Mittelwert gebildet. Der Mittelwert wird dem räumlichen Mittelpunkt der Strecke zugeordnet: hier erfolgt keine Korrektur der gemessenen Werte. In Richtung Start

und in Richtung Ende der Messfahrt wird für jeden Rasterpunkt (hier: 10 m) eine lineare Korrektur an die Messwerte angebracht. Der Korrekturwert ist am Start und am Ziel am größten, dort beträgt er $0,5 \cdot (T(\text{Start}) - T(\text{Ziel}))$. In Richtung Mittelpunkt der Messstrecke wird der Korrekturwert immer kleiner, am Mittelpunkt beträgt er Null.

Mobile Messungen geben lediglich die Temperaturen und relative Luftfeuchte während der Messfahrt wieder. Es handelt sich also nicht um kontinuierliche Messungen, wie an den temporären Stationen, sondern um Punktmessungen entlang einer Fahrstrecke. Aber dadurch, dass beide Routen während der drei Messkampagnen mehrfach, und zwar an mehreren Tagen und zu immer gleichen Tageszeiten, befahren wurden, ergibt sich dennoch ein aufschlussreiches räumliches und zeitliches Bild der Verteilung der Lufttemperaturen in der Stadt während hochsommerlicher Bedingungen.

Die Ergebnisse der Messfahrten werden in Form von Karten, Diagrammen und Tabellen dargestellt. Beispielhaft werden hier Diagramme und Kartendarstellungen für drei Messfahrten am 23./24.07.2019 gezeigt und erläutert.

Besonders anschaulich sind Kartendarstellungen, in denen entlang der Messstrecke die gemessenen Temperaturen (2 m) als farbige Linien auf einem Kartenuntergrund dargestellt werden, siehe Abbildungen 7.3 bis 7.8. Hier symbolisiert die Farbe Grün mittlere Temperaturverhältnisse, Blau steht für kühlere Streckenabschnitte. Die Farben Gelb und Rot zeigen wärmere Abschnitte an. Bei dieser Art der Darstellung lassen sich den durchfahrenen Stadtbereichen direkt die gemessenen Temperaturen zuordnen.

Ebenfalls einen hohen Informationswert haben Differenzendiagramme, die über die gesamte Strecke die positiven (dargestellt in rot) und negativen (dargestellt in blau) Abweichungen vom Mittelwert der Temperatur der Messfahrt darstellen, siehe Abbildungen 7.9 und 7.10. Mithilfe der Wegemarker (Tab. 7.1 und 7.2) lassen sich Streckenabschnitte identifizieren, die wärmer bzw. kälter als der Mittelwert der Messfahrt sind.

7.2 Temperaturverhältnisse während der Messfahrten

Eine Übersicht über die Wetterbedingungen an der Wetterstation Hannover-Langenhagen an den Tagen mit Messfahrten gibt Tabelle 7.3. An fast allen Messfahrttagen lagen die Höchsttemperaturen über 30 °C, die Tagesmitteltemperaturen über 24 °C, die Sonnenscheindauer über 14 Stunden. An allen Messtagen herrschten ungestörte hochsommerlichen Wetterbedingungen.

Die mobilen Temperaturmessungen wurden mit den zeitgleichen Messungen der Station Langenhagen in Beziehung gesetzt. Die Differenzen der Mitteltemperaturen zeigen an, ob es auf der Messstrecke insgesamt wärmer oder kühler war als an der Umlandstation. Für alle 32 Messfahrten gibt Tabelle 7.4 an, wie groß die Abweichung zwischen den Temperaturen der Messfahrten und der Referenzstation

Tab. 7.3: Ausgewählte Wetterdaten der Wetterstation Hannover-Langenhagen während der Tage mit Messfahrten.

| Datum | Temperatur | | | Sonnenschein- dauer | Windgeschwindigkeit | | Rel.Feuchte |
|------------|------------|-------------|---------|------------------------|---------------------|---------|-------------|
| | Minimum | Tagesmittel | Maximum | | Tagesmittel | Maximum | |
| | (°C) | (°C) | (°C) | (h) | (m/s) | (m/s) | (%) |
| 03.07.2018 | 9,2 | 19,9 | 28,0 | 14,2 | 2,1 | 8,4 | 49,9 |
| 04.07.2018 | 9,1 | 21,5 | 30,4 | 14,0 | 2,2 | 9,8 | 54,4 |
| 23.07.2019 | 15,3 | 24,7 | 32,9 | 14,7 | 1,7 | 6,7 | 58,3 |
| 24.07.2019 | 17,7 | 27,7 | 36,1 | 14,6 | 2,9 | 10,8 | 46,9 |
| 25.07.2019 | 20,3 | 29,3 | 37,9 | 12,2 | 3,4 | 8,7 | 39,7 |
| 06.08.2020 | 14,7 | 24,2 | 31,8 | 14,0 | 2,2 | 8,7 | 43,3 |
| 07.08.2020 | 14,9 | 24,8 | 32,2 | 13,9 | 2,3 | 8,7 | 49,7 |

Tab. 7.4: Differenz zwischen den Mitteltemperaturen der Messfahrten und den zeitgleich in Hannover-Langenhagen gemessenen Lufttemperaturen, angegeben in K.

| Datum | Nordroute | | | Südroute | | |
|------------|------------|------------|-------|------------|------------|-------|
| | Frühmorgen | Nachmittag | Abend | Frühmorgen | Nachmittag | Abend |
| 03.07.2018 | 4,3 | -0,2 | 2,6 | 2,4 | -0,5 | 2,3 |
| 04.07.2018 | 3,9 | 0,2 | 3,2 | 3,6 | -0,1 | 1,8 |
| 23.07.2019 | - | 0,0 | 2,5 | - | -0,1 | 1,0 |
| 24.07.2019 | 2,5 | -0,2 | 2,4 | 1,0 | -0,1 | 1,4 |
| 25.07.2019 | 3,2 | - | - | 1,2 | - | - |
| 06.08.2020 | 0,9 | -0,7 | 1,7 | 0,4 | -0,7 | -0,1 |
| 07.08.2020 | 1,7 | - | - | 0,3 | - | - |

Langenhagen ist, jeweils bezogen auf den gleichen Zeitraum. Auf der Nordroute war es während Abendtouren zwischen 1,7 und 3,2 K wärmer, während der Frühmorgentouren +0,9 bis +4,3 K. Auf der Südroute war es während der Frühmorgentouren im Mittel 0,3 bis 3,6 K wärmer als am Flughafen, bei den Abendmessungen wurden Abweichungen bis zu +2,3 K registriert. Während der Nachmittagsfahrten lagen die Abweichungen auf beiden Routen meist nahe Null, vereinzelt wurden bis zu -0,7 K gemessen.

In Tabelle 7.5 ist für die Zeiten der Messfahrten angegeben, wie hoch die Temperaturabweichungen zwischen den Stationen und der Referenzstation waren. Die Mitteltemperaturen an den Stationen Weidendamm und Marianne-Baecker-Allee lagen während der Frühmorgen- und Abendfahrten meist 2 - 5 K, während der Nachmittagsmessungen meist 0,3 - 1,3 K über den Werten von Langenhagen. Die Station Kattenbrookspark ist ebenfalls eine Umlandstation, die Abweichungen zu Langenhagen waren meist geringer als ± 1 K, gelegentlich war es dort sogar kälter als am Flughafen.

Tab. 7.5: Differenz der Mitteltemperaturen zwischen den Stationen (WD, MB, KP) und Hannover-Langenhagen, jeweils bezogen auf den Zeitraum der Messfahrten, angegeben in K.

| Datum | Weidendamm (NR) | | | Marianne-Baecker-Allee(NR) | | | Kattenbrookspark (SR) | | |
|------------|-----------------|--------|-------|----------------------------|--------|-------|-----------------------|--------|-------|
| | Früh | Nachm. | Abend | Früh | Nachm. | Abend | Früh | Nachm. | Abend |
| 03.07.2018 | 5,1 | 0,3 | 2,6 | 4,0 | 1,1 | 2,8 | -0,9 | 0,2 | 1,7 |
| 04.07.2018 | 4,2 | 0,4 | 3,4 | 3,7 | 1,3 | 3,3 | 0,5 | 0,1 | 0,0 |
| 23.07.2019 | - | 0,8 | 3,6 | - | 1,0 | 3,2 | - | 0,8 | 1,3 |
| 24.07.2019 | 2,8 | 0,3 | 3,1 | 2,8 | -0,1 | 3,2 | 0,7 | 0,6 | 0,8 |
| 25.07.2019 | 3,9 | - | - | 3,3 | - | - | 0,6 | - | - |
| 06.08.2020 | 1,9 | -0,1 | 2,6 | 0,5 | 0,5 | 2,5 | -0,2 | -0,5 | -1,9 |
| 07.08.2020 | 2,7 | - | - | 2,1 | - | - | -1,3 | - | - |

7.3 Messkampagne im Juli 2019

Am Beispiel der vom 23. - 25.07.2019 durchgeführten Messkampagne werden hier einige Ergebnisse gezeigt, siehe Tabelle 7.6 und 7.7. Für jede der 2x6 Messfahrten sind die Mitteltemperaturen (T_m), die Minimum- (T_n) und Maximumtemperaturen (T_x), sowie die Temperaturspanne ($T_x - T_n$) angegeben, jeweils für die beiden Messhöhen 2,0 m und 0,7 m. Die mittlere relative Feuchte (rF_m) in 2 m Höhe ist ebenfalls ausgewiesen.

Die Messkampagne im Juli 2019 fand während einer deutschlandweiten Hitzewelle statt, während der an zahlreichen Stationen des Deutschen Wetterdienstes im Westen und Südwesten Deutschlands die 40 °C-Schwelle an mehreren Tagen überschritten wurde.

Die Mitteltemperaturen der vier Nachmittagsmessfahrten lagen zwischen 31,7 und 35,5 °C, die der Abendmessungen zwischen 25,5 und 31,0 °C. Während der Frühmorgenfahrten wurden Mitteltemperaturen zwischen 19,6 und 24,4 °C gemessen, die niedrigsten Temperaturen lagen bei drei der vier Messfahrten bei 20,0 bis 22,4 °C. Während dieser Fahrten waren also auf der gesamten befahrenen Strecke die meteorologischen Bedingungen einer Tropennacht gegeben, auch in den relativ kühlestn Stadtbereichen!

Die Spanne zwischen der höchsten (T_x) und der niedrigsten (T_n) Temperatur, die während der jeweiligen Messfahrten registriert wurden, betrug auf den Frühfahrten 2,4 bis 3,8 Kelvin. Die Nachmittagsfahrten wiesen Spannen von 3,6 bis 4,9 K, die Abendfahrten von 3,3 bis 4,8 K auf (bezogen auf die in 2 m Höhe gemessenen Temperaturen). Diese recht großen Temperaturspannen zeigen, dass sowohl auf der Nordroute als auch auf der Südroute sehr unterschiedliche Lokalklimate durchfahren worden sind. Dieses ist auch anhand der Differenzendiagramme gut zu erkennen, die später erläutert werden.

Die in 0,7 m Höhe gemessenen Temperaturen sind meist etwas höher als die 2 m-Temperaturen. Wahrscheinlich modifiziert in dieser Messhöhe der Straßenbelag die

Tab. 7.6: Ergebnisse der sechs Messfahrten vom 23.-25.07.2019 auf der Nordroute.

| Nordroute | 23.07.2019 | | | | 24.07.2019 | | | | | | 25.07.2019 | |
|-----------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|
| | Nachmittag | | Abend | | Frühmorgen | | Nachmittag | | Abend | | Frühmorgen | |
| | 2,0 m | 0,7 m | 2,0 m | 0,7 m | 2,0 m | 0,7 m | 2,0 m | 0,7 m | 2,0 m | 0,7 m | 2,0 m | 0,7 m |
| T m (°C) | 31,7 | 32,4 | 28,2 | 28,3 | 21,6 | 21,7 | 35,1 | 35,8 | 31,0 | 31,0 | 24,4 | 24,4 |
| T x (°C) | 33,8 | 35,4 | 30,2 | 30,0 | 22,7 | 23,3 | 38,0 | 38,9 | 32,4 | 33,0 | 25,1 | 25,4 |
| T n (°C) | 30,2 | 30,2 | 26,1 | 26,2 | 20,0 | 20,1 | 33,1 | 33,6 | 29,1 | 29,2 | 22,7 | 22,7 |
| Tx-Tn (K) | 3,6 | 5,2 | 4,1 | 3,8 | 2,7 | 3,2 | 4,9 | 5,3 | 3,3 | 3,8 | 2,4 | 2,7 |
| rF m (%) | 30,2 | | 38,4 | | 63,3 | | 25,5 | | 37,2 | | 49,4 | |

Tab. 7.7: Ergebnisse der sechs Messfahrten vom 23.-25.07.2019 auf der Südroute.

| Südroute | 23.07.2019 | | | | 24.07.2019 | | | | | | 25.07.2019 | |
|-----------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|
| | Nachmittag | | Abend | | Frühmorgen | | Nachmittag | | Abend | | Frühmorgen | |
| | 2,0 m | 0,7 m | 2,0 m | 0,7 m | 2,0 m | 0,7 m | 2,0 m | 0,7 m | 2,0 m | 0,7 m | 2,0 m | 0,7 m |
| T m (°C) | 32,1 | 32,7 | 25,2 | 25,1 | 19,6 | 19,7 | 35,5 | 36,1 | 28,1 | 28,1 | 22,3 | 22,3 |
| T x (°C) | 34,7 | 34,9 | 27,5 | 27,6 | 21,3 | 21,6 | 37,7 | 38,2 | 29,9 | 31,3 | 23,6 | 23,9 |
| T n (°C) | 30,7 | 31,1 | 22,7 | 22,8 | 17,5 | 17,6 | 34,1 | 34,4 | 25,4 | 25,5 | 20,5 | 20,2 |
| Tx-Tn (K) | 4,0 | 3,8 | 4,8 | 4,8 | 3,8 | 4,0 | 3,6 | 3,8 | 4,5 | 5,8 | 3,1 | 3,7 |
| rF m (%) | 29,0 | | 54,8 | | 71,0 | | 25,2 | | 44,0 | | 56,9 | |

Werte, was sich insbesondere bei längeren Ampelstopps zeigt. Asphalt als Straßenbelag kann sich an sonnigen Sommertagen sehr stark aufheizen und gibt die gespeicherte Wärme nach Sonnenuntergang allmählich wieder ab. Die relative Feuchte war auf den Nachmittagsfahrten am geringsten mit 25 - 30 %, auf den Frühmorgenfahrten am höchsten mit 50 - 70 %.

In Abbildung 7.2 sind die während der Messkampagne zeitgleich gemessenen Mitteltemperaturen dargestellt. Hier ist der Temperaturtagesgang an der Station Hannover-Langenhagen im Zeitraum 23.07. / 12 UTC bis 25.07.2019 / 12 UTC als durchgehender hellblauer Graph gezeigt. Die Zeiträume der Messfahrten sind oben im Diagramm mit 1 bis 6 markiert. Für jede Messfahrt auf den Routen (Nordroute: NR; Südroute: SR) sind die Mitteltemperaturen der Messfahrten, der Station Langenhagen sowie der temporären Stationen Weidendamm, Marianne-Baecker-Allee und Kattenbrookspark als farbige Balken eingezeichnet.

Das Diagramm zeigt deutlich, dass die Temperaturunterschiede zur Referenzstation Hannover-Langenhagen während der Nachmittagsmessungen (Zeitraum 1 bzw. 4) auf beiden Routen nur gering sind. Besonders markant sind die hohen positiven Abweichungen auf der Nordroute während der Frühmorgen- und Abendfahrten: zu diesen Zeiten war es innerstädtisch nicht nur örtlich, sondern auch über längere Strecken deutlich milder als am Stadtrand. Die Abweichungen zur Umlandtemperatur betragen 2,5 bis 3,2 K während der Frühmorgenfahrten (Zeitraum 3 bzw. 6); während der Abendfahrten (Zeitraum 2 bzw. 5) lagen sie bei 2,5 K.

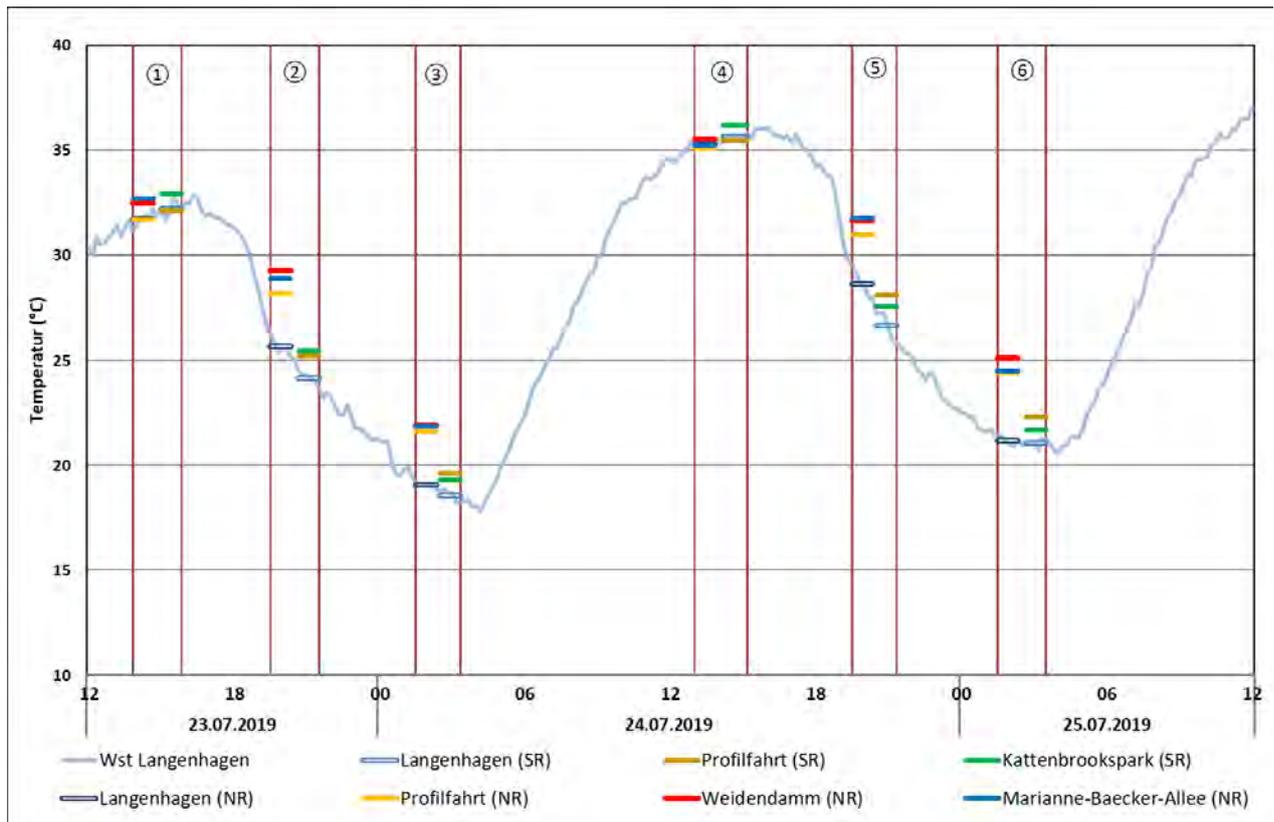


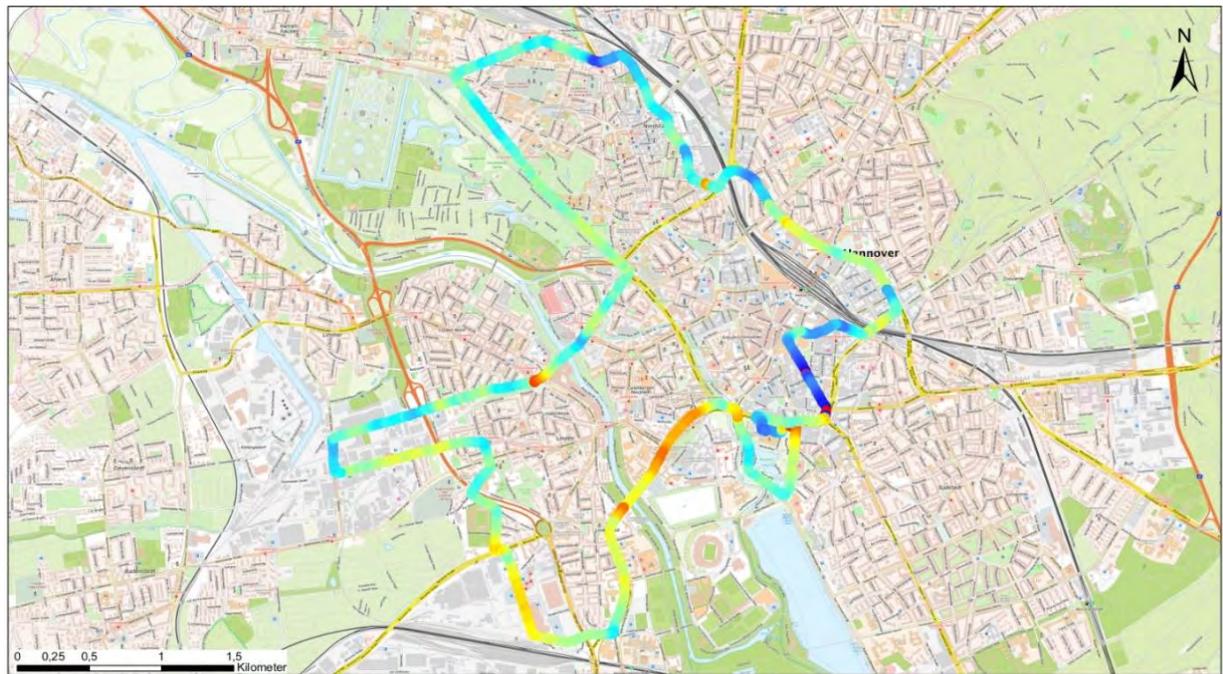
Abb. 7.2: Tagesgang der Lufttemperatur in Hannover-Langenhagen, 23.07. / 12 UTC - 25.07.2019 / 12 UTC. Zeiträume der Messfahrten (1 - 6); farbige Balken: Mitteltemperaturen der Messfahrten (Nord- und Südroute) und an den temporären Stationen (Kattenbrookspark, Weidendamm, M-Baecker-Allee).

Auf der Südroute fielen die Abweichungen etwas geringer aus; diese Route führt über längere Strecken entlang von ausgedehnten Grünflächen (Eilenriede, Kattenbrookspark, Seelhorster Friedhof, Stadtfriedhof Engesohde). Die Temperaturen waren im Mittel um 1,2 K höher als in Langenhagen, sowohl in der Frühe als auch am Abend.

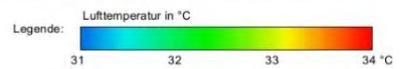
7.4 Kartendarstellungen der Messfahrten 2019

In den folgenden Kartendarstellungen sind die während der Fahrt gemessenen Temperaturen der Messhöhe 2 m farblich umgesetzt. Die befahrenen Strecken sind als farbige Linien zu erkennen, dabei entsprechen die Farben den Temperaturen. Es gilt immer blau = kälteste gemessene Temperatur, rot = höchste gemessene Temperatur während der Messfahrt. Die Temperaturskala ist in jeder Abbildung eine andere, da sie an den jeweils gemessenen Temperaturbereich angepasst ist. Die jeweilige Skala ist unter der Karte eingezeichnet. Bei dieser Art der Darstellung sind relativ warme und relativ kalte Fahrtabschnitte gut zu erkennen.

Die Abbildung 7.3 zeigt die Nachmittagsfahrt am 23.07.2019 auf der Nordroute, die gemessenen Temperaturen lagen zwischen 30,2 und 33,8 °C, der Mittelwert der Fahrt betrug 31,7 °C. Abbildung 7.4 zeigt die Nachmittagsfahrt auf der Südroute, die gemessenen Temperaturen lagen zwischen 30,7 und 34,7 °C, der Mittelwert der



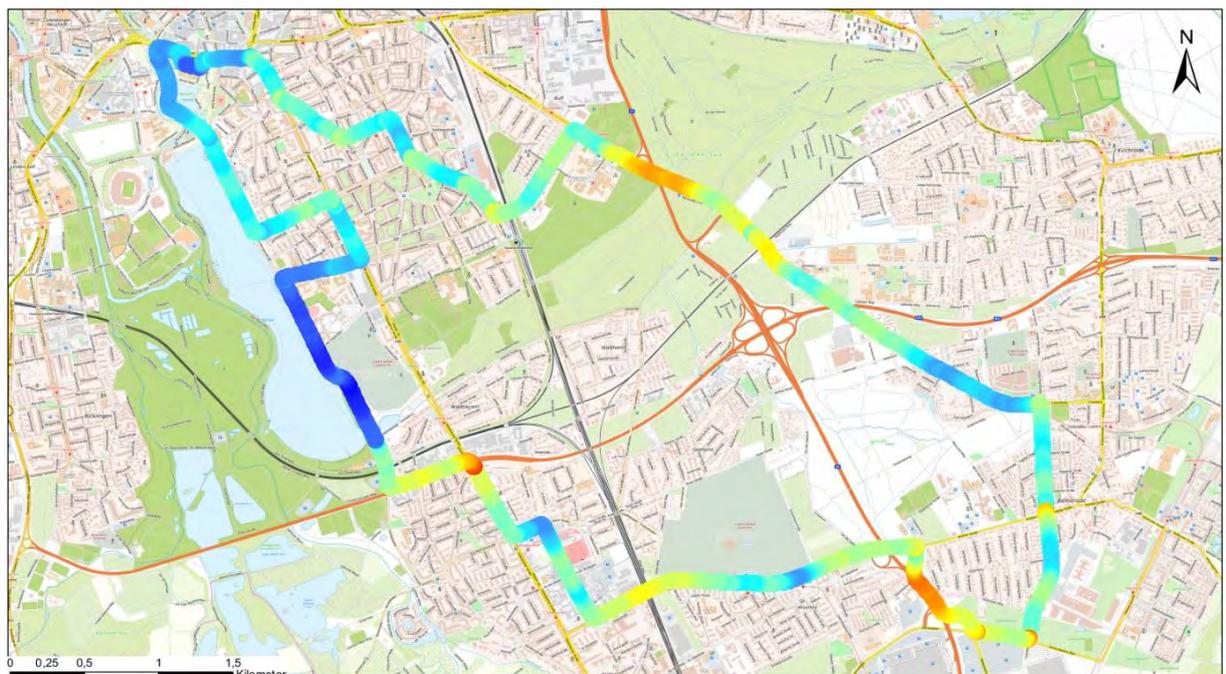
Bezugsmaßstab: 1:30.000



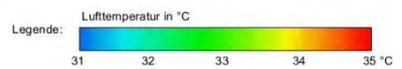
Profilmessfahrt Hannover-Nord, 23.07.2019, 13:48 - 14:41 UTC

© DWD/ KU1PD/MME/sb
 © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2017 http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open.pdf

Abb. 7.3: Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Nordroute am 23.07.2019, nachmittags.



Bezugsmaßstab: 1:30.000



Profilmessfahrt Hannover-Süd, 23.07.2019, 14:57 - 15:50 UTC

© DWD/ KU1PD/MME/sb
 © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2017 http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open.pdf

Abb. 7.4: Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Südroute am 23.07.2019, nachmittags.

Fahrt betrug 32,1 °C. Auf beiden Routen erfolgt ein relativ rascher Wechsel zwischen wärmeren und kühleren Streckenabschnitten. Auf der Nordroute zeigen sich die kühlen Bereiche bei der Fahrt durch die Nordstadt und Mitte. Hier wirkt die hohe und dichte Bebauung als Schattenspender. Am wärmsten ist es in der Calenberger Neustadt, im Gewerbegebiet Linden-Süd und in der Spinnereistraße, kurz vor der Ihmebrücke. Auf der Südroute liegen die kühlestes Abschnitte entlang des südlichen Maschsee und im Maschpark. Die wärmsten Bereiche finden sich entlang der Schnellstraßen und Zubringer.

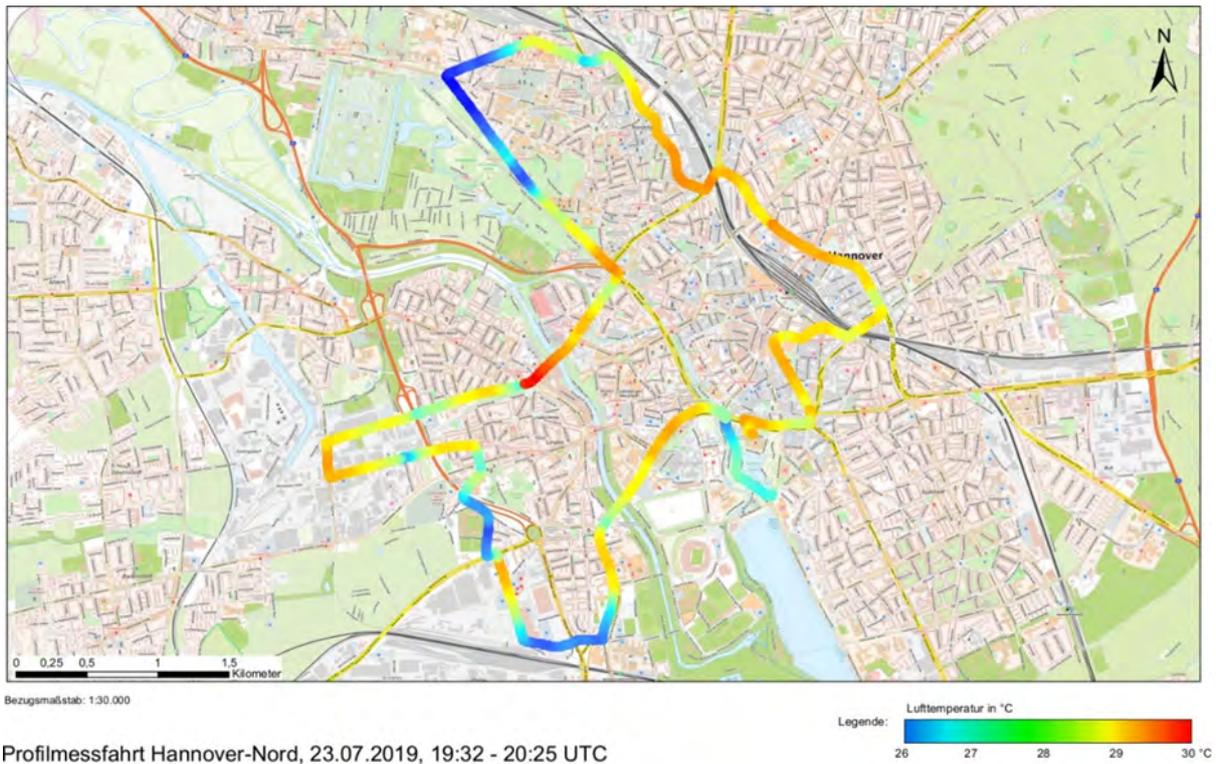
Auf den nächsten Seiten werden jeweils zwei aufeinander folgende Messfahrten auf einer Seite dargestellt, und zwar jeweils die Abend- und Frühmorgenmessfahrten auf der Nordroute (Abb. 7.5 und 7.6) und auf der Südroute (Abb. 7.7 und 7.8). Die Abend- und die Frühmorgenfahrt liegen jeweils nur wenige Stunden auseinander und die Abbildungen zeigen, dass die nächtliche Abkühlung im Stadtgebiet sehr unterschiedlich abläuft.

Auf der Nordroute wurden abends Temperaturen zwischen 26,1 und 30,2 °C gemessen, der Mittelwert der Fahrt betrug 28,2 °C, siehe Abbildung 7.5. Warme Streckenabschnitte gab es in der Calenberger Neustadt, in Linder Hafen, Spinnereistraße bis Königsworther Platz, und ab Nordstadt entlang der Bahntrasse über Oststadt bis zum Fahrtende. Kühle Bereiche waren: Maschpark, Teile von Linden (Fischerhof, Stadion) sowie Nienburger Straße mit Herrenhäuser Kirchweg.

Frühmorgens war es entlang der Nordroute abgekühlt auf 20,0 bis 22,7 °C, der Mittelwert der Fahrt betrug 21,6 °C, siehe Abbildung 7.6. Die wärmsten Bereiche waren jetzt Linden-Mitte (ab Stadion bis Königsworther Straße) sowie Mitte (Berliner Allee bis Rathaus). Die kühlestes Abschnitte waren jetzt Maschpark, Ritter-Brüning-Straße bis Fischerhof. Die Nienburger Straße gehört nicht mehr zu den kühlestes Abschnitten.

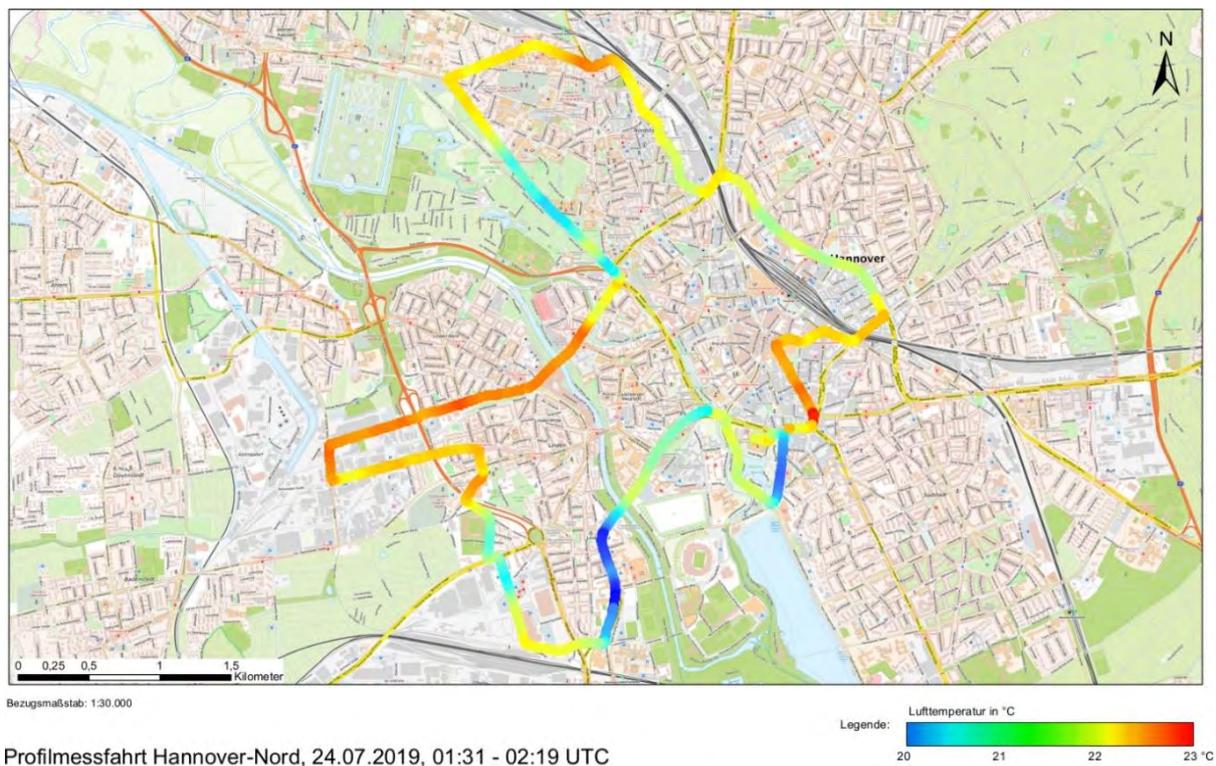
Auf der Südroute wurden abends Temperaturen zwischen 22,7 und 27,5 °C gemessen, der Mittelwert der Fahrt betrug 25,2 °C, siehe Abbildung 7.7. Die wärmsten Bereiche waren in Mitte und der Südstadt - auch am nordöstlichen Ufer des Maschsees - sowie Willmerstraße (Döhren). Die kühlestes Abschnitte fanden sich zwischen Bult und Bemerode, entlang des Seelhorster Friedhofs und am südöstlichen Ufer des Maschsees.

Bei der Frühmorgenmessfahrt auf der Südroute war es abgekühlt auf 17,5 bis 21,3 °C, der Mittelwert der Fahrt betrug 19,6 °C, siehe Abbildung 7.8. Die wärmsten und kühlestes Bereiche sind im Wesentlichen gleichgeblieben.



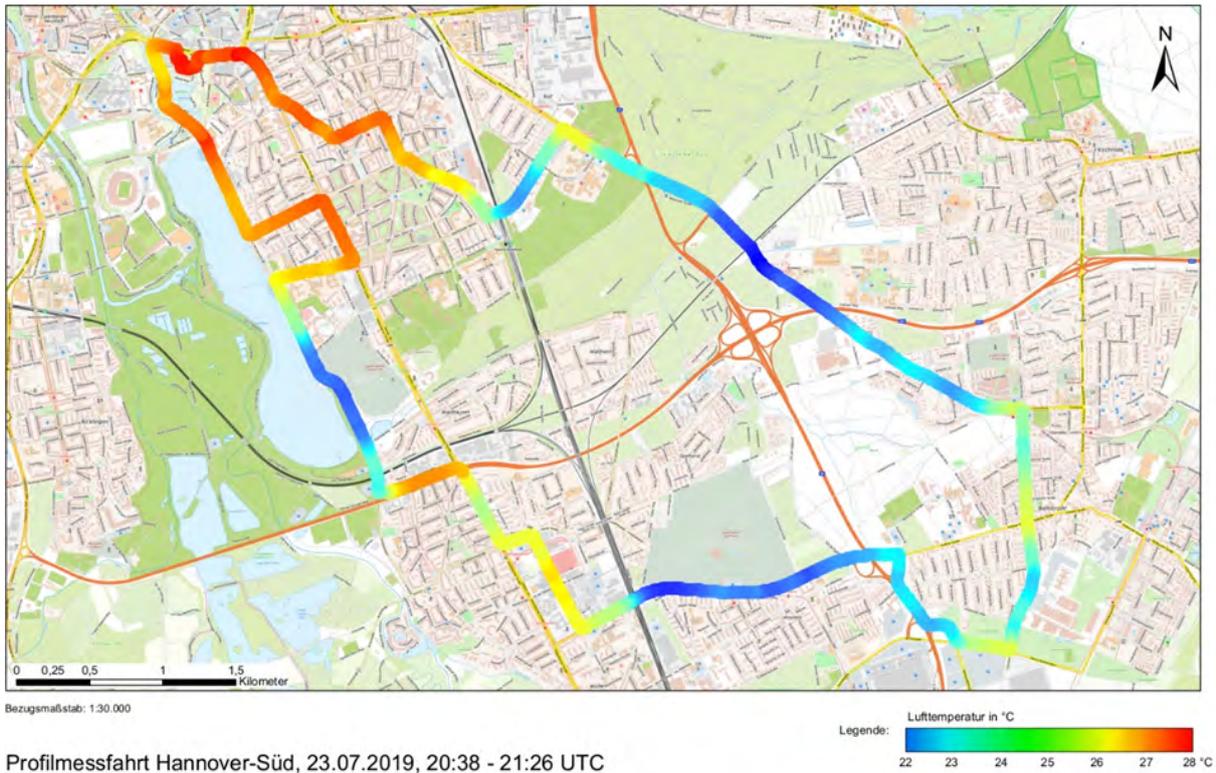
Profilmessfahrt Hannover-Nord, 23.07.2019, 19:32 - 20:25 UTC

Abb. 7.5: Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Nordroute am 23.07.2019, abends.



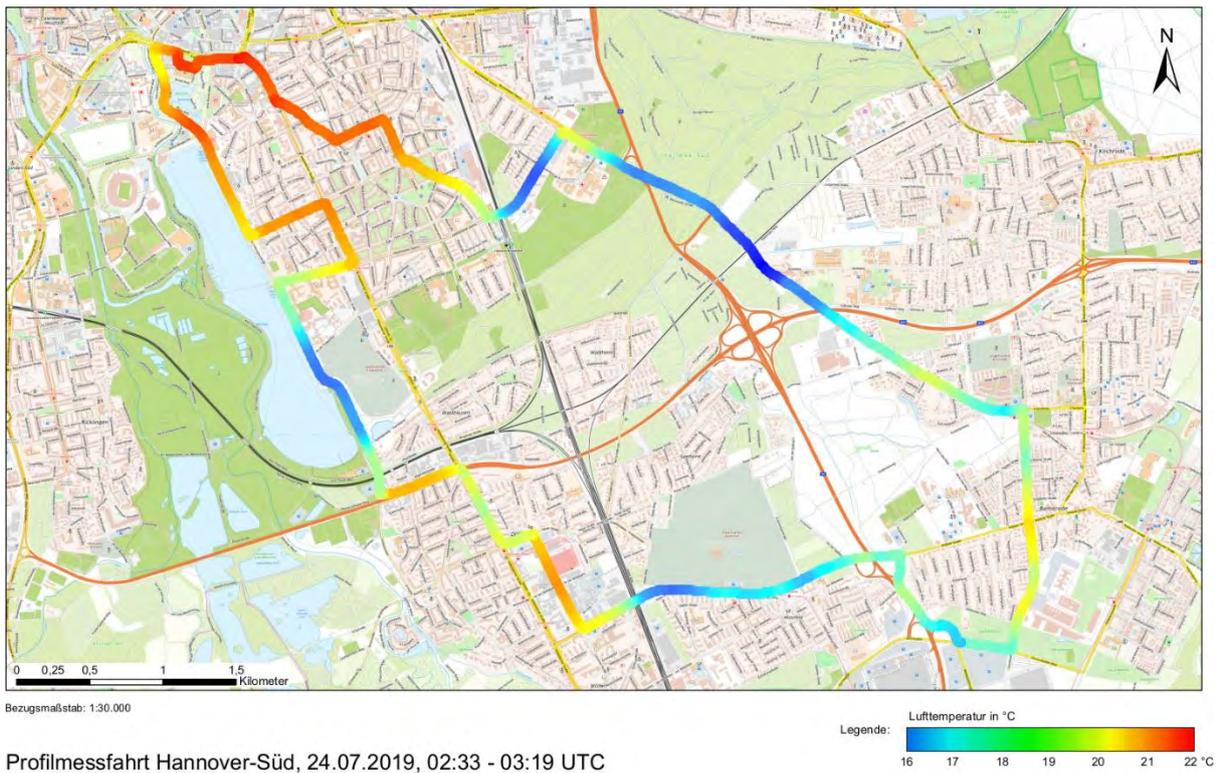
Profilmessfahrt Hannover-Nord, 24.07.2019, 01:31 - 02:19 UTC

Abb. 7.6: Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Nordroute am 24.07.2019, frühmorgens.



Profilmessfahrt Hannover-Süd, 23.07.2019, 20:38 - 21:26 UTC

Abb. 7.7: Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Südroute, abends.



Profilmessfahrt Hannover-Süd, 24.07.2019, 02:33 - 03:19 UTC

Abb. 7.8: Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Südroute am 24.07.2019, frühmorgens.

7.5 Differenzendiagramme einiger Messfahrten 2019

Mithilfe von Differenzendiagrammen können für die Messstrecke positive (dargestellt in rot) und negative (dargestellt in blau) Temperaturabweichungen dargestellt werden. Die Bezugstemperatur ist in diesem Fall jeweils der Mittelwert der Messfahrt. Warme und kalte Streckenabschnitte sind schnell zu identifizieren, die geografische Zuordnung erfolgt anhand der Wegemarker, die unter den Diagrammen angegeben sind. In den Abbildungen 7.9 und 7.10 sind immer drei aufeinander folgende Fahrten dargestellt: eine Nachmittagsfahrt, die zugehörige Abendfahrt und die anschließende Frühmorgensfahrt. Angegeben sind jeweils die Fahrtzeiten und die Mitteltemperatur während der Fahrt. Im unteren Teil des Diagramms findet sich das Höhenprofil der Messstrecke, die Lage der Wegemarker entlang der Strecke und die zugehörigen Ortsbeschreibungen (Tab. 7.1 und 7.2). Damit lassen sich Streckenabschnitte einfach identifizieren.

Die Messfahrten zeigen auf beiden Routen wiederkehrende Muster in den Temperaturabweichungen entlang der Strecke, besonders während der Abend- und Frühmorgensfahrten, wie sie auch schon in den Kartendarstellungen aufgefallen sind.

Die Nachmittagsfahrten am 23.07.2019 weisen auf beiden Routen rasche Wechsel von warmen und kühlen Streckenabschnitten auf, die Abweichungen – bezogen auf den Mittelwert der Temperatur der Messfahrt – liegen meist deutlich unter 1 K. Lediglich bei längeren Ampelstopps gibt es kurze warme Spitzen. Tagsüber ist die bodennahe Luftschicht turbulent durchmischt, auch und besonders während sommerlicher Hochdrucklagen. Die Durchmischung verhindert die Ausbildung größerer lokaler Wärme- oder Kälteinseln.

Die Abendfahrten und die Frühmorgensfahrten zeigen auf beiden Routen die größten Abweichungen. Zudem erstrecken sich die positiven bzw. negativen Abweichungen über längere Streckenabschnitte. Nach Sonnenuntergang lässt die turbulente Durchmischung rasch nach, die unteren Luftschichten stabilisieren sich. Dadurch können sich lokale Einflüsse ausprägen: Gebäude und versiegelte Flächen geben Wärme ab, ebenso die Wasserflächen. Grünflächen, insbesondere baumfreie Wiesen, können ungehindert ausstrahlen und dort beginnt die nächtliche Kaltluftproduktion.

Besonderheiten auf der Nordroute:

Nachmittags ist es vom Friedrikenplatz bis zum Lindener Stadion (Marker C bis H), Spinnereistraße bis Königsworther Platz (Marker L bis N) und in der Oststadt (Marker Q bis R) meist wärmer als der Mittelwert der Fahrt. Kühle Abschnitte sind Nienburger Straße und Nordstadt (Marker N bis Q). Während der Abend- und Frühmorgensfahrten ist es vom Start bis Linden-Süd (Marker A bis H) meist kühler, ebenso an der Nienburger Straße (Marker N bis O). Ausgesprochen warm ist es in Linden-Mitte bis Königsworther Platz (Marker I bis N) und bei der Fahrt durch die Nordstadt, Oststadt und Mitte (Marker O bis U).

Besonderheiten auf der Südroute:

Während der Nachmittagsfahrten ist es vom Startpunkt Rathaus durch die Südstadt bis zum Bahndamm (Marker A bis D) etwas kühler als der Mittelwert. Immer sehr warm ist es auf dem Bischofsholer Damm/Bemeroder Straße (Marker E bis G) und auf dem Messeschnellweg (Marker K bis L) sowie auf dem Weg durch Döhren bis zum Südenende des Maschsees (Marker M bis O). Entlang des Maschsees ist es kühl,

sowohl am südlichen Teil (Marker O bis P) als auch am nördlichen Teil (Marker S bis T) und entlang des Maschparks bis zum Rathaus (Marker T bis V). Die Abweichungen vom Mittelwert der jeweiligen Messfahrt betragen meist deutlich weniger als 1 K, vereinzelt wurden örtlich bis zu 2 K gemessen. Während der Abend- und Frühmorgenmessfahrten zeigen sich ausgedehnte und sehr warme Bereiche zu Beginn (Südstadt bis zum Bahndamm, Marker A bis D) und auf dem letzten Drittel der Fahrt: in Döhren (Marker M bis O) sowie in der Südstadt, am nördlichen Maschseeufer, im Maschpark bis zum Rathaus (Marker Q bis V). Die sehr warmen Streckenabschnitte weisen Abweichungen vom Mittelwert der Fahrt zwischen 1 und 2 K auf, örtlich wurden bis zu 3 K gemessen. Der lange Streckenabschnitt östlich der Bahnlinie, also durch Bult, die Eilenriede, Seelhorst, Bemeroode, Kronsberg (Marker D bis M) ist durch ausgedehnte, örtlich sehr kalte Bereiche gekennzeichnet. Die kältesten Abschnitte finden sich entlang der Grünflächen Eilenriede, Kattenbrookspark sowie Seelhorster Friedhof. Die Abweichungen zu den Mittelwerten der jeweiligen Fahrten betragen dort 2 bis 2,8 K (Eilenriede, Seelhorster Friedhof).

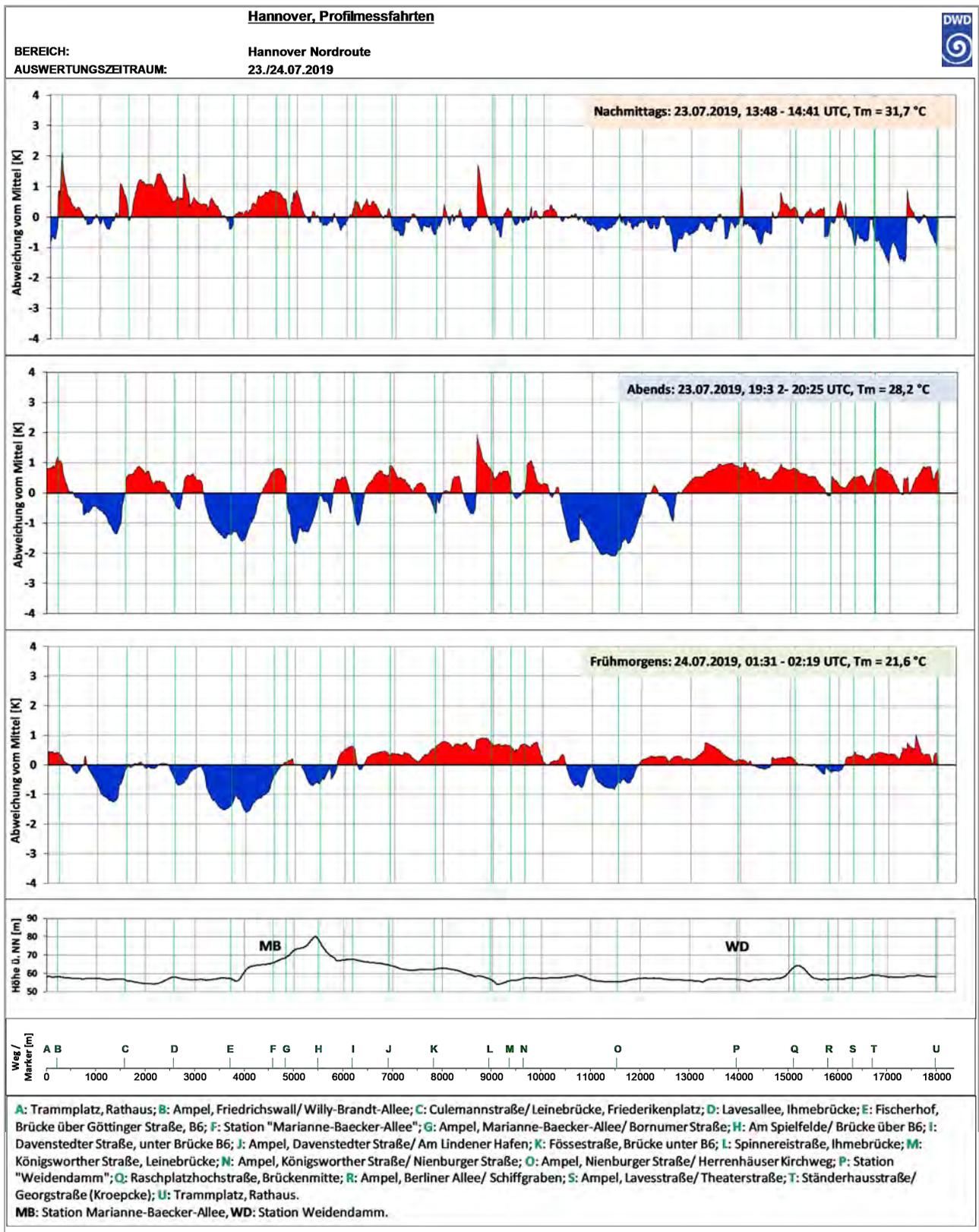


Abb. 7.9: Abweichungen der Temperatur (2 m) von der Mitteltemperatur der Messfahrt, Nordroute, 23./24.07.2019, 3 Messfahrten in Folge. Rote Flächen: positive Abweichungen, blaue Flächen: negative Abweichungen; unten: Höhenprofil, Wegemarker und Beschreibung der Wegstrecke.

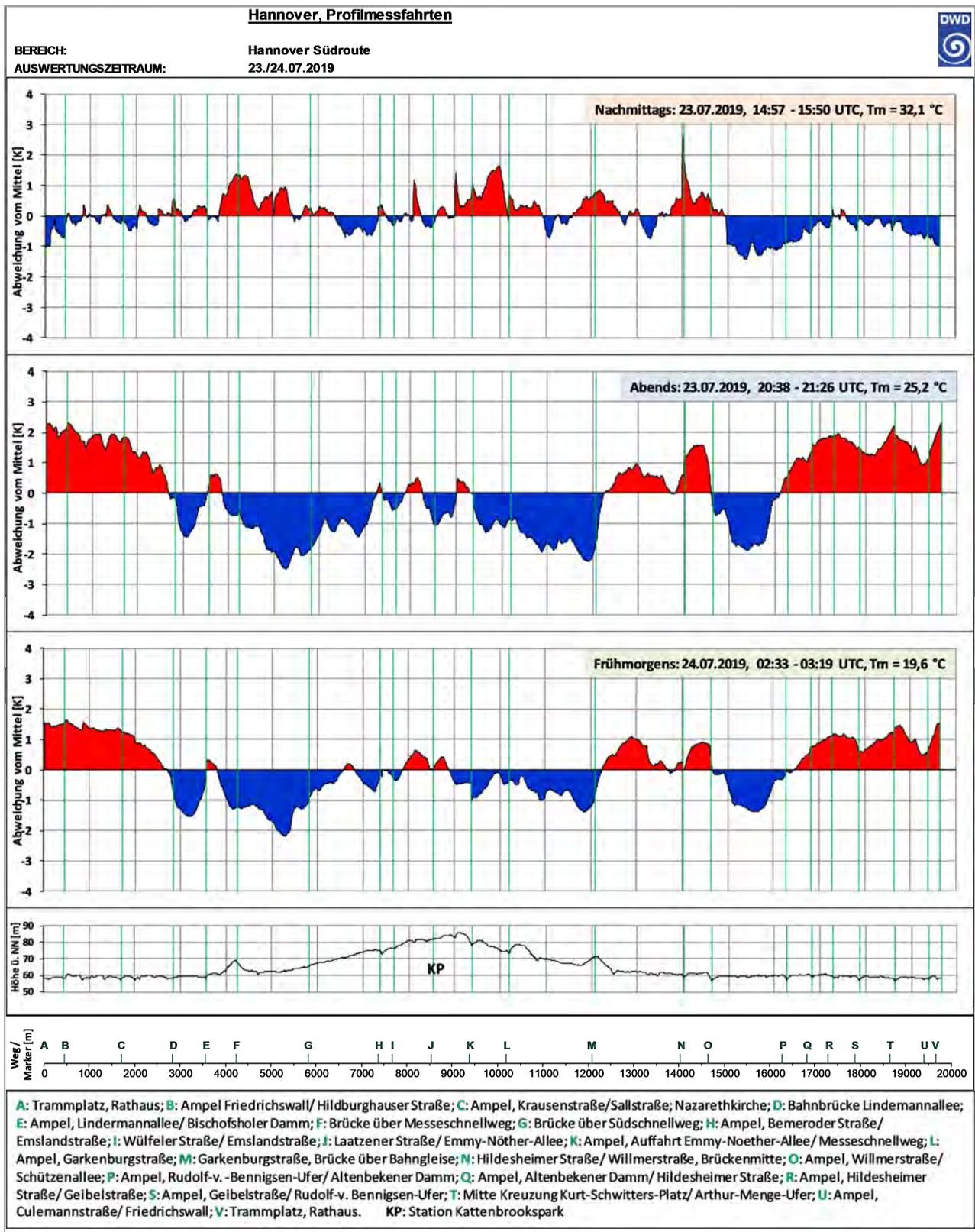


Abb. 7.10: Abweichungen der Temperatur (2 m) von der Mitteltemperatur der Messfahrt, Südroute, 23./24.07.2019, 3 Messfahrten in Folge. Rote Flächen: positive Abweichungen, blaue Flächen: negative Abweichungen; unten: Höhenprofil, Wegemarker und Beschreibung der Wegstrecke.

8 Die Straßenbahnmessungen

Im Rahmen des Stadtklimaprojektes wurden drei Straßenbahnwagen mit Messsensorik (Temperatur, Luftfeuchte) und einem GPS-Tracker ausgestattet (siehe Abb. 8.1). Da die Wagen in beide Richtungen fahren können, wurde die Messtechnik jeweils an beiden Enden der drei Straßenbahnen oberhalb der Fahrerkabine installiert. In einer der Trams wurden auch Innenraummessungen durchgeführt.



Abb. 8.1: Messsensorik an einer Tram in Hannover.

Der Datenlogger wurde so programmiert, dass stets nur diejenigen Messfühler aktiv waren, die in Fahrtrichtung vorne lagen. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass eine „Abluftfahne“ der Heizung während der kalten Jahreszeit nicht erfasst wurde. Alle Messdaten und Metadaten (Koordinaten, Uhrzeit, Informationen zur Fahrtrichtung und Aktivität der Sensoren) wurden minütlich übermittelt. Bei Tunnelstrecken erfolgte die Datenübermittlung nachträglich, unmittelbar nach Ausfahrt aus dem Tunnel. Die Messfrequenz betrug ein Hertz, sowohl bei den Außen- als auch den Innenraummessungen. Die Rohdaten wurden über eine Routine in eine Datenbank gespeist und dabei einer Prüfung und Korrektur unterzogen. Es erfolgte eine automatisierte formale Korrektur der Sekundärdaten. Zum Beispiel wurden die Datensätze um zwei Spalten mit den geografischen Koordinaten (WGS84) ergänzt. Erst danach wurden die korrigierten Datensätze mit denen der Wetterstation Kattenbrookspark verschnitten. Die Wetterstationsdaten mussten hierfür vorab von 10-Minuten-Werten auf Sekundenwerte extrapoliert werden. Danach wurden die Differenzen zwischen den Tramdaten und Wetterstationsdaten gebildet (Anomaliewerte).

Die Trams fuhren nicht auf einer festen Linienstrecke, sondern wurden auf dem gesamten Streckennetz in Hannover eingesetzt. Dadurch wurde eine ausgedehnte räumliche Erfassung meteorologischer Daten ermöglicht. Für dieses Projekt wurden von dem insgesamt 122 km langen Streckennetz mehrere stadtklimatisch interessante Streckenabschnitte ausgewählt. In Absprache mit den Projektpartnern wurden insgesamt 20 spezifische Quadranten definiert, die unterschiedliche, aber für die Stadt typische städtebauliche Prägungen aufweisen. Lage und Größe dieser Quadranten wurden anhand detaillierter Stadtkarten festgelegt. Abbildung 8.2 zeigt die ausgewählten Streckenabschnitte auf einem Stadtplan, dabei sind die

unterschiedlichen städtischen Prägungen farblich markiert von rot (Zentrum, Industrie, Gewerbe) bis grün (Grünflächen). In Tabelle 8.1 sind die Streckenabschnitte mit Straßennamen und weiteren Informationen zusammengefasst.

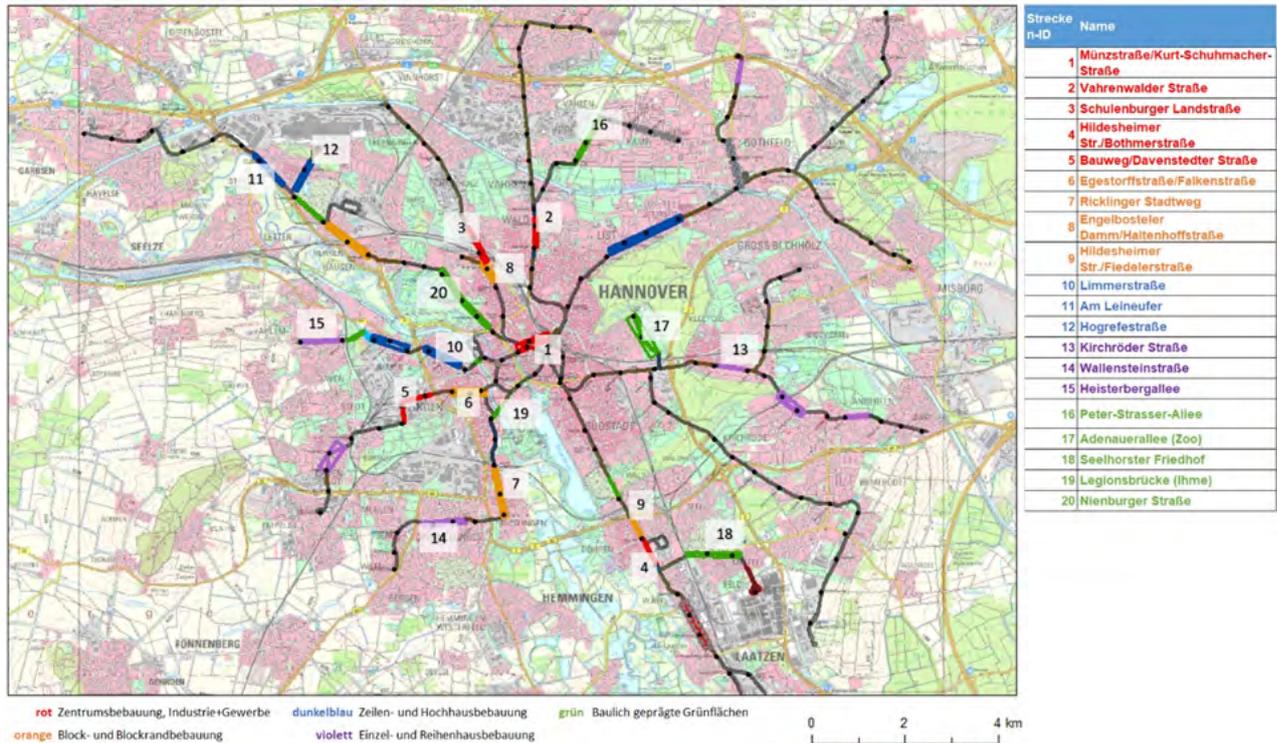


Abb. 8.2: Stadtplan und Tabelle mit den 20 ausgewählten Streckenabschnitten. Farbliche Markierung anhand der baulichen Prägung. Karte: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, © 2022.

Bei der Festlegung der Streckenabschnitte stand vor allem die bauliche Prägung eines Abschnittes im Vordergrund. Es wurden 5 Kategorien unterschieden:

- Zentrumsbebauung, Industrie und Gewerbe (rot, 5 Abschnitte)
- Block- und Blockrandbebauung (orange, 4 Abschnitte)
- Zeilen- und Hochhausbebauung (blau, 3 Abschnitte)
- Einzel- und Reihenhausbebauung (violett, 3 Abschnitte)
- Baulich geprägte Grünflächen (grün, 5 Abschnitte)

Insgesamt wurden auf den 20 ausgewählten Streckenabschnitten innerhalb der dreieinhalbjährigen Projektdauer (Juli 2017 - Dezember 2020) 16.842.537 Einzelmessungen (Sekundenmessungen) aufgezeichnet. Die Einzelmessungen wurden stundenweise gemittelt, sobald für diese Stunde wenigstens 30 Einzelmessungen zur Verfügung standen. Damit ergaben sich insgesamt 87.600 Messstunden. Dabei ist zu erwähnen, dass erst ab einer Geschwindigkeit von 2,5 km/h Messwerte erfasst wurden. Damit wurden Wartezeiten an Ampelkreuzungen, an Haltestellen oder im Stau sowie Aufenthalte im Depot oder Fahrpausen nicht in die Auswertung einbezogen.

Für die Auswertung sind nicht die an den Trams gemessenen Temperaturwerte im Original verwendet worden, sondern es wurden Differenzen zwischen den Tramdaten und den Daten einer ausgewählten Wetterstation (Referenzstation) gebildet. Damit ist unmittelbar zu erkennen, ob es auf einem Streckenabschnitt wärmer oder kälter ist als im Umland. Solche räumlichen Anomaliewerte wurden bereits für die Beschreibung des städtischen Wärmeinseleffekts (UHI) benutzt, siehe Kapitel 4.5. Als Referenz für die hier gezeigten Auswertungen dienten die Messungen der Station Kattenbrookspark.

Tab. 8.1: Übersicht der Streckenabschnitte in Hannover mit Strecken-ID, Straßennamen, Bebauungsstruktur und Anzahl der verfügbaren Messstunden innerhalb des Streckenabschnittes. Die grau hinterlegten Strecken weisen weniger als 1.000 Messstunden auf.

| Strecken-ID | Name | Bebauungsart | Anz. Verfügbarer Messstunden |
|-------------|-------------------------------------|---|------------------------------|
| 1 | Münzstraße/Kurt-Schuhmacher-Straße | Innenstadtbebauung (Hochhäuser, Gewerbe) | 1788 |
| 2 | Vahrenwalder Straße | Gewerbe und Blockbau | 10845 |
| 3 | Schulenburg Landstraße | Gewerbe und Blockbau | 155 |
| 4 | Hildesheimer Str./Bothmerstraße | Block- Zeilenbebauung, etwas Gewerbe | 12359 |
| 5 | Bauweg/Davenstedter Straße | Gewerbe (eher flach) | 9845 |
| 6 | Egestorffstraße/Falkenstraße | Blockbebauung (eng, hoch) | 11184 |
| 7 | Ricklinger Stadtweg | Blockbebauung (eher weit, eher flach) | 2562 |
| 8 | Engelbosteler Damm/Haltenhoffstraße | Blockbebauung | 2531 |
| 9 | Hildesheimer Str./Fiedelerstraße | Block- und Zeilenbebauung | 12107 |
| 10 | Limmerstraße | Blockbebauung (eng, hoch) | 371 |
| 11 | Am Leineufer | Grünfläche, wenig Zeilenbebauung | 32 |
| 12 | Hogrefestraße | Zeilenbebauung im Grünen | 1540 |
| 13 | Kirchröder Straße | Einzel-Reihenhäuser | 2008 |
| 14 | Wallensteinstraße | Einzelhäuser und Zeilenbebauung | 2435 |
| 15 | Heisterbergallee | Einzelhäuser und Zeilenbebauung | 350 |
| 16 | Peter-Strasser-Allee | bebaute Grünfläche (Einzelhäuser, Gärten) | 8917 |
| 17 | Adenauerallee (Zoo) | Zoo, Sportplätze, Einzelhäuser | 2383 |
| 18 | Seelhorster Friedhof | großer Friedhof, Zeilenbebauung | 3366 |
| 19 | Legionsbrücke (Ihme) | Brücke über Fluss (Ihme) | 2885 |
| 20 | Nienburger Straße | Park, etwas Bebauung | 2357 |

8.1 Verfügbarkeit der Daten

In Tabelle 8.1 sind die in diesem Abschnitt betrachteten Streckenabschnitte (oder Quadranten) aufgeführt. Jedem Streckenabschnitt wurde eine ID-Nummer (1 bis 20) zugeordnet. Der Einfachheit halber werden die Streckenabschnitte im Folgenden nur mit ihrer ID bezeichnet. Die Bebauungsart beschreibt grob die baulichen Eigenschaften innerhalb des Streckenabschnitts. Sie reichen von rein gewerblich genutzten Bereichen über Wohngebiete bis hin zu wenig bebauten Grünflächen. Die Streckabschnitte sind unterschiedlich häufig befahren worden. Die verfügbaren Messstunden jedes Streckenabschnittes, die sich während des Messzeitraumes (Juli 2017 bis Dezember 2020) ergeben haben, sind in der letzten Spalte von Tab. 8.1 aufgeführt. Die Anzahl der verfügbaren Messstunden ist in Abbildung 8.3 für jeden Streckenabschnitt und Monat in Form eines Blasendiagramms dargestellt. Die Blasengröße ist dabei das Maß für die Anzahl der verfügbaren Messstunden und wird in der Legende am rechten Rand beschrieben.

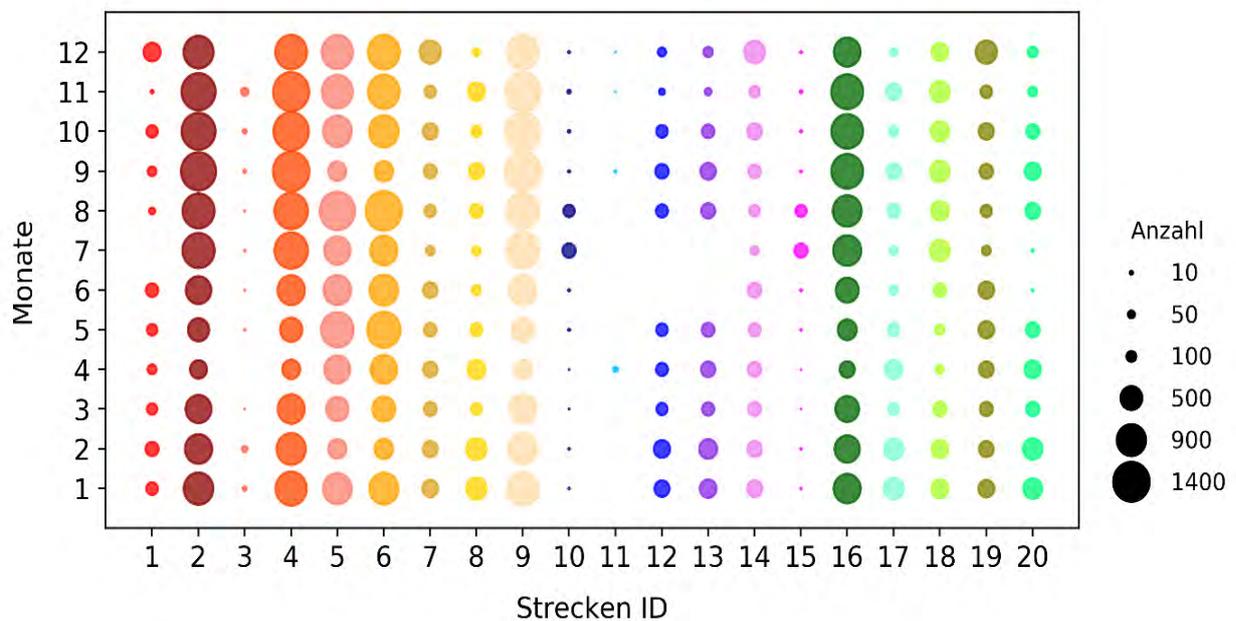


Abb. 8.3: Anzahl der verfügbaren Messstunden pro Streckenabschnitt und Monat. Die Größe der Blase steht für die Anzahl der Messstunden (siehe Legende rechts). Die Farben sind in Anlehnung an die Bebauungsart gewählt (siehe Tab. 8.1).

Sowohl in Abbildung 8.3 als auch in Tabelle 8.1 wird deutlich, dass die einzelnen Streckenabschnitte unterschiedlich stark von den mit Messinstrumenten ausgerüsteten Straßenbahnen befahren wurden. Die Abschnitte 3, 10, 11 und 15 weisen weniger als 1.000 Messstunden auf und sind damit nicht für eine Auswertung geeignet. Einige Streckenabschnitte wurden im Messzeitraum in einzelnen Monaten kaum oder gar nicht befahren, wodurch in diesen Monaten wenige bis keine Daten gesammelt werden konnten (z.B. 12, 13 und 20). Am häufigsten befahren wurden die Streckenabschnitte 2, 4, 6 und 9. Mit jeweils über 10.000 verfügbaren Messstunden ist hier die höchste statistische Signifikanz gegeben.

8.2 Auswertung der räumlichen Temperaturanomalien zwischen den Streckenabschnitten und der Referenzstation Kattenbrookspark

Im Folgenden werden unterschiedliche Auswertungen zu den räumlichen Temperatur-Anomaliewerten zwischen den einzelnen Streckenabschnitten und der Referenzstation Kattenbrookspark gezeigt. Dabei stehen vor allem die Unterschiede zwischen den einzelnen Streckenabschnitten im Vordergrund. Es stellt sich die Frage, ob und wie die unterschiedlichen baulichen Umgebungen der Streckenabschnitte die lokalen thermischen Gegebenheiten beeinflussen und welche anderen Faktoren eine Rolle spielen könnten, wie z.B. die Jahreszeit oder die vorherrschende Windrichtung. In den folgenden Abbildungen werden die Streckenabschnitte mit farbigen Symbolen repräsentiert. Für eine bessere Orientierung wurden die Farbtöne so gewählt, dass sie die Bebauungsart der jeweiligen Strecke widerspiegeln, z.B. stehen rote Farbtöne für stark versiegelte städtische Bebauung, grüne Farbtöne für aufgelockerte Bebauung mit wenig versiegelten Flächen. Bei den Blasendiagrammen (Abb. 8.5 und 8.6) steht die Größe der Blasen für die Anzahl der verfügbaren Messstunden und wird in der unteren rechten Legende beschrieben.

8.3 Allgemeine Auswertungen

In Tabelle 8.2 sind einige Daten der Trammessungen zusammengefasst. Die Streckenabschnitte 3, 10, 11, und 15 sind in der Tabelle nicht aufgeführt, da für diese Abschnitte zu wenige Daten vorlagen. Die Streckenabschnitte sind nach dem Mittelwert der Temperaturanomalie sortiert, von hoch zu niedrig. Der Streckenabschnitt 8 im nördlichen Zentrum der Stadt ist mit einem Mittelwert von 1,88 K der wärmste der 16 Streckenabschnitte. Der Streckenabschnitt 18 im Süden der Stadt, zeigt einen über 1 K niedrigeren Mittelwert und ist damit der kälteste

Tab. 8.2: Zusammenfassung der Temperaturanomaliewerte der ausgewählten Streckenabschnitte (ohne die Abschnitte 3, 10, 11 und 15), sortiert nach dem Gesamtmittelwert.

| ID | Mittelwert | Standard- Abweichung | absolutes Maximum | absolutes Minimum |
|----|------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| 8 | 1.9 | 1.1 | 7.3 | -1.5 |
| 20 | 1.5 | 1.4 | 6.9 | -3.4 |
| 2 | 1.4 | 1.0 | 6.9 | -4.4 |
| 9 | 1.1 | 0.8 | 5.6 | -1.9 |
| 17 | 1.1 | 0.7 | 4.1 | -4.1 |
| 19 | 1.1 | 1.2 | 7.5 | -3.4 |
| 4 | 1.0 | 0.7 | 5.3 | -1.8 |
| 14 | 1.0 | 0.7 | 5 | -1.7 |
| 13 | 1.0 | 0.7 | 4.6 | -2.2 |
| 6 | 1.0 | 0.9 | 6.1 | -5.2 |
| 1 | 0.9 | 0.7 | 4.7 | -0.8 |
| 12 | 0.9 | 0.8 | 4.5 | -3.1 |
| 16 | 0.8 | 0.8 | 5.1 | -6.1 |
| 7 | 0.8 | 0.7 | 5.5 | -2.1 |
| 5 | 0.8 | 0.8 | 5.3 | -5.9 |
| 18 | 0.7 | 0.6 | 4 | -2.4 |

Streckenabschnitt. Betrachtet man die Rangfolge der Streckenabschnitte fällt auf, dass die Bebauungsart (gekennzeichnet durch die Schriftfarbe) keine wesentliche Rolle für eine hohe oder niedrige Temperaturanomalie spielt. Der zweitwärmste Streckenabschnitt (20) führt entlang einer ausgedehnten Grünanlage und dennoch sind die Temperaturanomalien hoch. Bereits bei den Auswertungen mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (Kapitel 6) fiel auf, dass der Stadtteil Nordstadt, indem sich die Streckenabschnitte 8, 20 und 2 befinden, besonders stark überwärmt ist. Streckenabschnitt 20, welcher sich am Rande des stark städtisch bebauten Gebietes befindet, scheint von diesem Effekt noch maßgeblich beeinflusst zu werden. Strecke 20 zeigt aber auch eine recht hohe Anzahl an niedrigen Anomalien, die Bandbreite der Anomaliewerte auf dieser Strecke ist also relativ groß.

Um die Bandbreite der Temperaturanomalien zu verdeutlichen, sind in Tabelle 8.2 neben dem Mittelwert und der Standardabweichung auch der absolute maximale und der absolute minimale Wert der Temperaturanomalien angegeben. Die Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert der Temperaturanomalien liegt zwischen 5 und 11 K. Bei allen Strecken liegt die kleinste Temperaturanomalie im negativen Bereich. Eine negative Anomalie bedeutet, dass der Streckenabschnitt niedrigere Werte aufwies als die Referenzstation Kattenbrookspark. Die größte negative Anomalie ist bei Strecke 16 aufgetreten, mit -6,1 K. Die höchste positive Temperaturanomalie zeigte Strecke 19 mit 7,5 K.

Abbildung 8.4 zeigt, wie hoch der Anteil bestimmter Temperaturanomalien auf den jeweiligen Streckenabschnitten gewesen ist. Die Sortierung von links nach rechts folgt der Sortierung aus Tabelle 8.2. Man sieht, dass bei den meisten

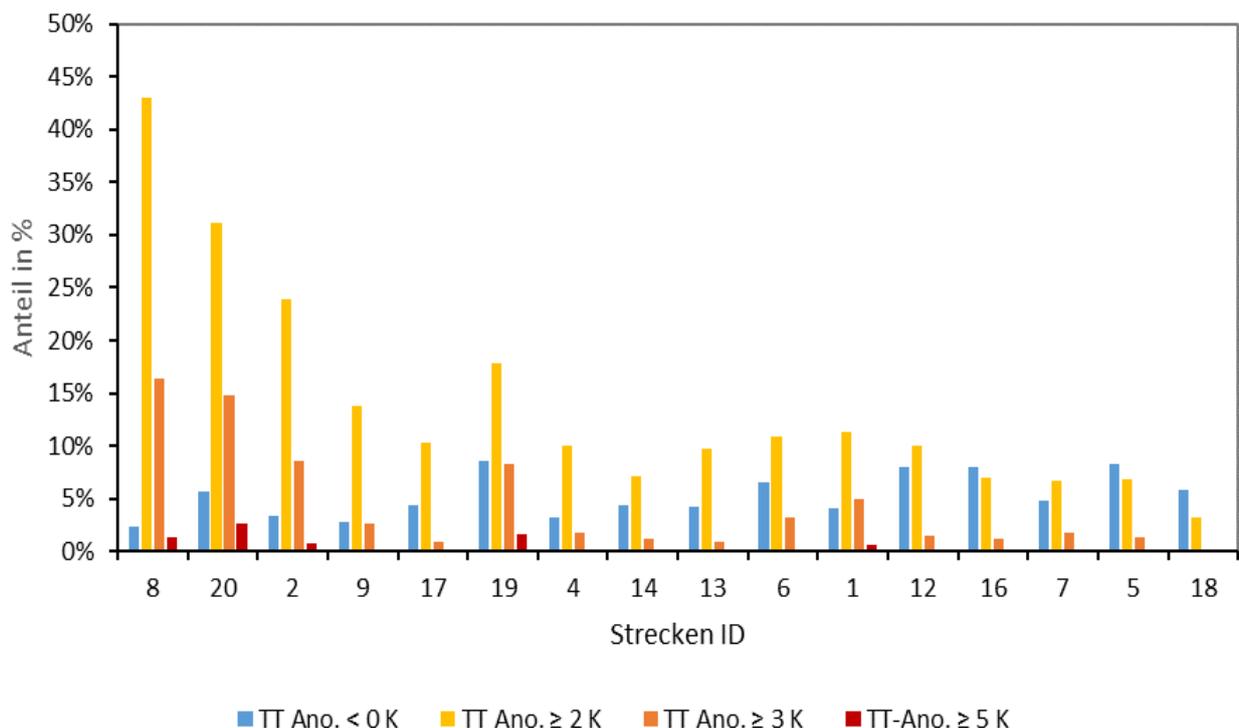


Abb. 8.4: Häufigkeit bestimmter Temperaturanomalien (siehe Legende) der ausgewählten Streckenabschnitte (ohne die Abschnitte 3, 10, 11 und 15). Zeitraum: 7.2017-12.2020.

Streckenabschnitten der Anteil der negativen Anomalien (< 0 K, blauer Balken) sehr gering ausfällt. Die Strecke mit den meisten negativen Anomalien ist Strecke 19 mit 8,5 %, die wenigsten negativen Anomalien hat Strecke 8 mit nur 2,3 %. Werte über 5 K kommen sehr selten vor, mit etwa 2,5 % zeigte Strecke 20 am häufigsten eine solch hohe Überwärmung. Temperaturanomalien von über 2 und 3 K kommen besonders häufig bei Strecke 8, 20 und 2 vor, welche auch insgesamt die wärmsten Streckenabschnitte darstellen. Strecke 20 und Strecke 19 fallen insbesondere dadurch auf, dass sie sowohl sehr geringe als auch sehr hohe Anomaliewerte zeigen.

8.4 Jahrgang der räumlichen Temperaturanomalie

Abbildung 8.5 zeigt die Mittelwerte der räumlichen Temperaturanomalien für jeden Streckenabschnitt (farbige Punkte) und jeden Monat. Dargestellt sind Mittelwerte, die aus mindestens 50 Messstunden ermittelt wurden. Ein Jahrgang innerhalb der Temperaturanomalien ist im Allgemeinen nicht zu erkennen. Eine Ausnahme bildete die Strecke 8, welche in den Wintermonaten deutlich höhere Anomaliewerte zeigte als in den Sommermonaten.

Im Gesamtmittel (in Abb. 8.5 dargestellt als graue Linie) zeigt sich der Februar als der Monat mit der größten Überwärmung (1,16 K), dicht gefolgt vom Monat November (1,15 K). Der Monat mit der geringsten mittleren Anomalie ist der August mit 0,9 K. Insgesamt zeigten aber alle Streckenabschnitte in jedem Monat im Mittel eine positive Abweichung von der Referenzstation, welche im Gesamtmittel über alle Monate und Streckenabschnitte bei etwa 1 K lag. Die Stadt ist also im Mittel das gesamte Jahr über im Vergleich zum Umland überwärmt.

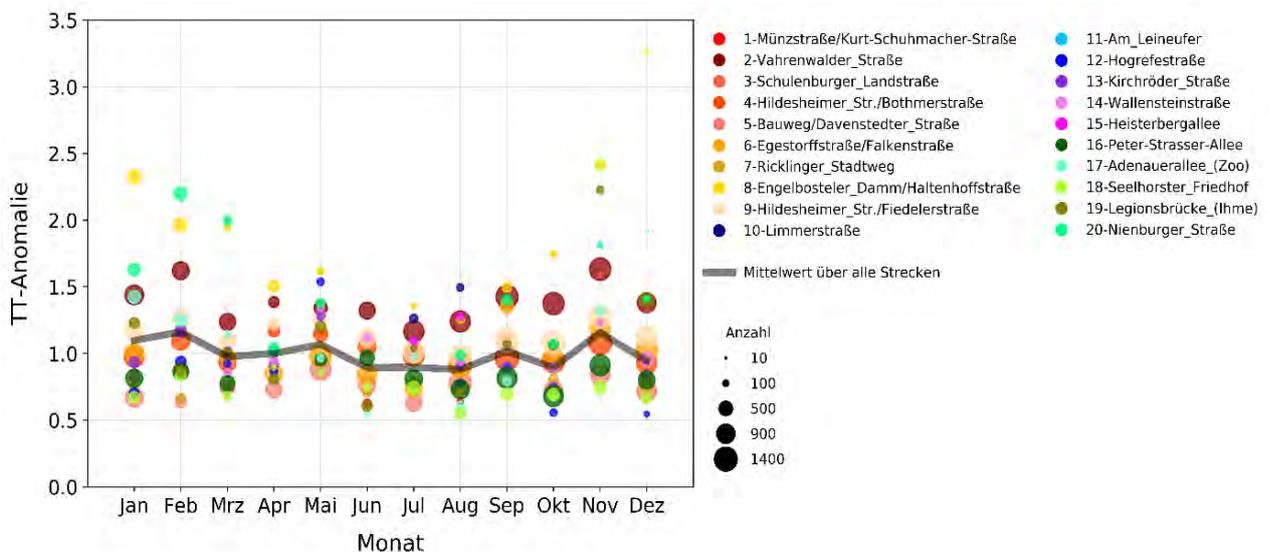


Abb. 8.5: Jahrgang der Temperaturanomalien aller Streckenabschnitte in Hannover. Die Blasengröße steht für die Anzahl der verfügbaren Messstunden im jeweiligen Monat für den jeweiligen Streckenabschnitt. Die graue Linie zeigt den Mittelwert über alle Strecken für jeden Monat. Dargestellt sind Mittelwerte, für die mindestens 50 Messstunden zur Verfügung standen.

8.5 Tagesgang der räumlichen Temperaturanomalie

In Abbildung 8.6 sind die Mittelwerte der räumlichen Temperaturanomalien für jeden Streckenabschnitt (farbige Punkte) und jede Stunde dargestellt. Dargestellt sind Mittelwerte, die aus mindestens 10 Messtunden ermittelt wurden. Da die Straßenbahnen nachts seltener fahren, ist die Anzahl der verfügbaren Messtunden in den Nachtstunden deutlich geringer als in den Tagstunden. Einige Streckenabschnitte sind dadurch gar nicht oder mit einer nur sehr geringen statistischen Signifikanz abgebildet. Es lässt sich aber dennoch ein leichter Tagesgang erkennen. In den Nachtstunden sind die Anomaliewerte etwas höher als am Tag. Dabei gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen den Sommermonaten (Juni, Juli, August) und den Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar), welche in den unteren beiden Diagrammen von Abbildung 8.6 dargestellt sind. Im Winter ist ein Tagesgang kaum zu erkennen. In den Sommermonaten ist der Tagesgang hingegen stark ausgeprägt. Im Mittel liegt der Temperaturanomalieunterschied zwischen Tag und Nacht im Sommer bei etwa 1 K. Allerdings gibt es starke Unterschiede zwischen den einzelnen Streckenabschnitten. Strecke 2 (Vahrenwalder Straße, städtische Bebauung) zeigt beispielsweise einen sehr ausgeprägten Tagesgang. In den Sommermonaten liegt die höchste

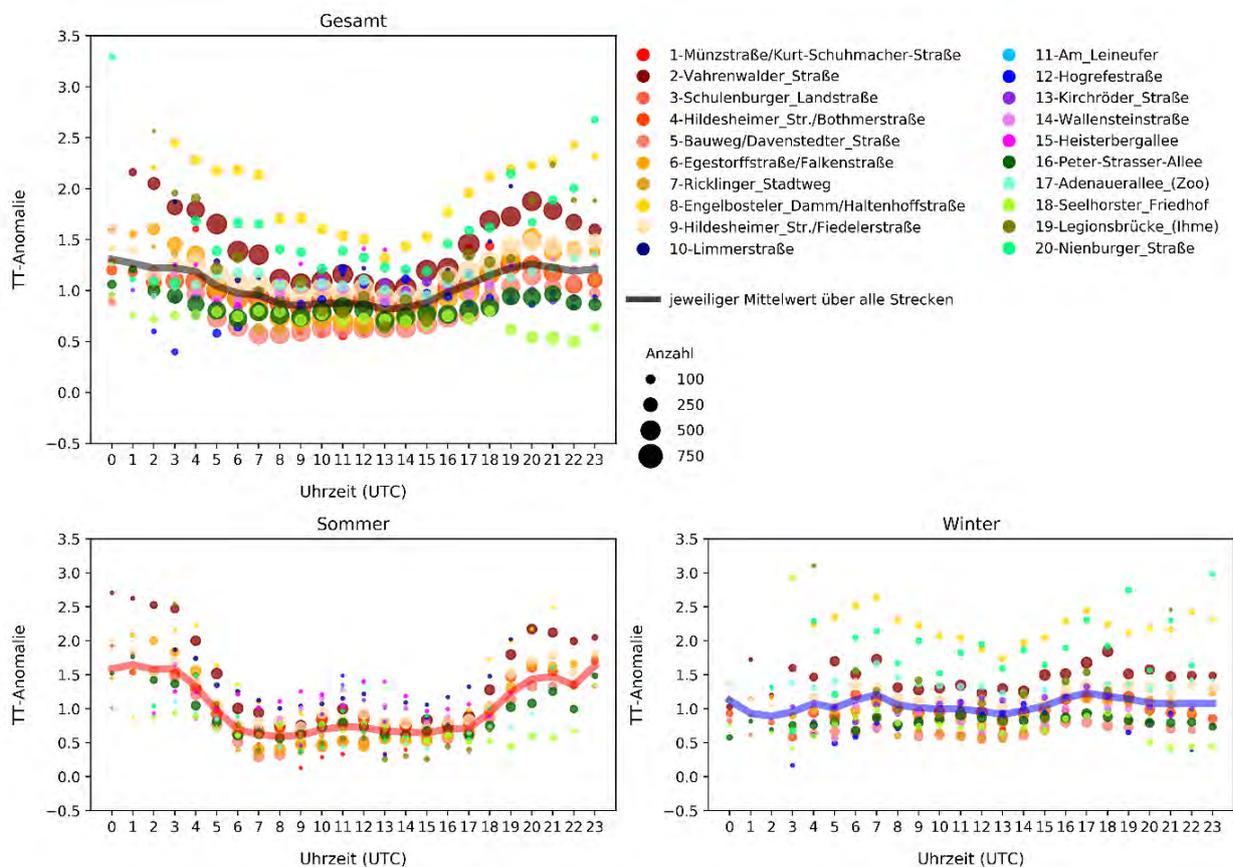


Abb. 8.6: Tagesgang der Temperaturanomalien aller Streckenabschnitte. Die Zahl auf der X-Achse steht jeweils für die nachfolgende Stunde (also 0 bedeutet von 0:00 bis 0:59 UTC usw.). Die Blasengröße steht für die Anzahl der verfügbaren Messtunden in der jeweiligen Stunde für den jeweiligen Streckenabschnitt. Die graue Linie zeigt den Mittelwert über alle Strecken. Die rote und blaue Linie zeigen jeweils den Mittelwert für die Sommer- (Juni, Juli, August) bzw. Wintermonate (Dezember, Januar, Februar). Dargestellt sind Mittelwerte, für die mindestens 10 Messtunden zur Verfügung standen.

Temperaturanomalie bei 2,7 K (0:00 bis 0:59 UTC) und die niedrigste Temperaturanomalie bei 0,7 K (13:00 bis 13:59 UTC). Strecke 18 zeigt hingegen kaum einen Tagesgang. Hier liegt die höchste Temperaturanomalie bei 0,9 K (3:00 bis 3:59 UTC) und die niedrigste Temperaturanomalie bei 0,5 K (19:00 bis 19:59 UTC). Tendenziell zeigten stärker überwärmte Gebiete einen deutlicheren Tagesgang der Temperaturanomalie als weniger stark überwärmte Gebiete. Bei Strecke 8 und Strecke 20 fallen die deutlich höheren Temperaturanomalien im Winter auf. Im nächsten Kapitel wird noch einmal konkret auf die Abhängigkeit der Anomalien von der Lufttemperatur eingegangen.

8.6 Abhängigkeit der Temperaturanomalie von der Lufttemperatur

Die Abhängigkeit der Anomaliewerte von der Lufttemperatur ist in Abbildung 8.7 beispielhaft für einen stark und einen weniger stark überwärmten Streckenabschnitt (8 und 18 gezeigt). Die Lufttemperatur stammt von der Station Kattenbrookspark. Die Grafik zeigt deutlich, dass eine Abhängigkeit der Temperaturanomalie von der Lufttemperatur für den Streckenabschnitt 8 vorhanden ist. Hohe Anomaliewerte (größer als 3 K) sind nur aufgetreten, wenn die Lufttemperatur kleiner als 20 °C gewesen ist. Streckenabschnitt 18 hingegen zeigt keine Abhängigkeit von der Lufttemperatur. Dieser Effekt ist vor allem für die sogenannten Tropennächte (die nächtliche Lufttemperatur sinkt nicht unter 20 °C) von Interesse. Wenn im Umland die Lufttemperatur nachts leicht unter 20 °C fällt und somit keine Tropennacht herrscht, liegt die Temperatur in den von städtischer Bebauung beeinflussten Gebieten um einige Kelvin höher, was unter Umständen eine Tropennacht zur Folge hat. Auch in der kalten Jahreszeit kann dieser Effekt eine Rolle spielen. Liegt die Lufttemperatur unter 0 °C, zeigt Streckenabschnitt 8 meist eine um mindestens 2 K

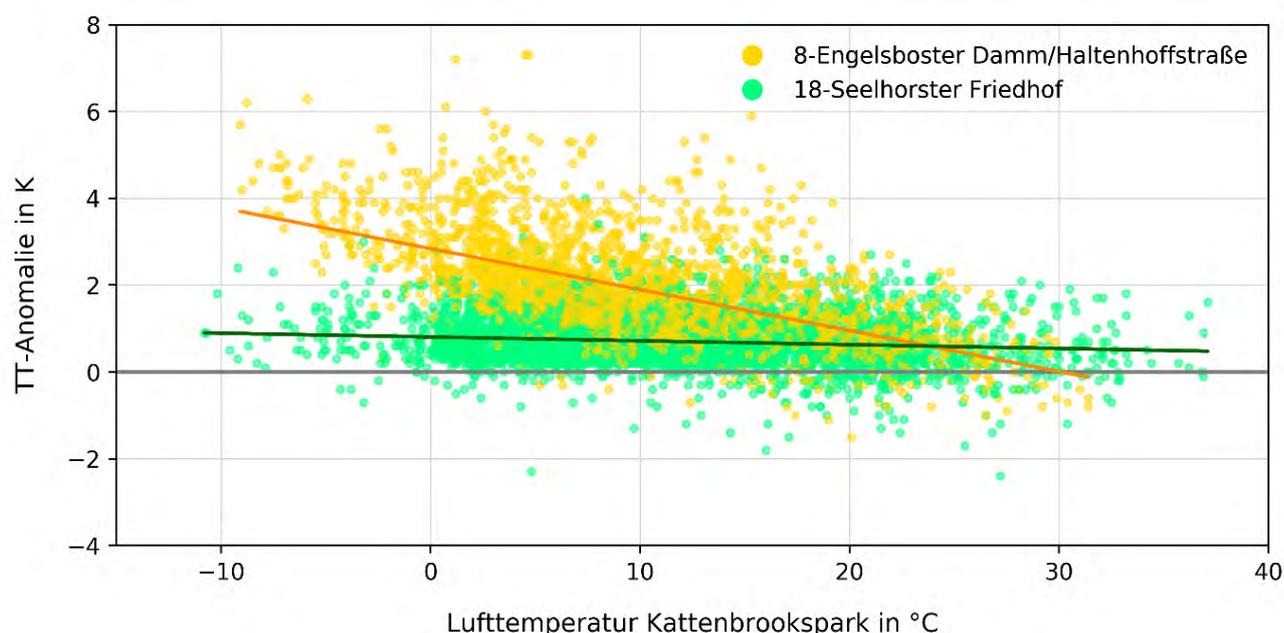


Abb. 8.7: Temperaturanomalie in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (gemessen in Kattenbrookspark) für die Streckenabschnitte 8 (gelb) und 18 (grün). Die durchgezogenen Linien beschreiben die Trendlinien für den jeweiligen Streckenabschnitt.

erhöhte Temperatur. Bei winterlichen Glättelagen mit Lufttemperaturen im leicht negativen Bereich könnte dieses Stadtgebiet von den leicht höheren Temperaturen profitieren. Gebiete die weniger stark von städtischer Bebauung beeinflusst werden, wie beispielsweise Strecke 18, zeigen diese Effekte nicht.

8.7 Abhängigkeit der Temperaturanomalie von der Windrichtung

Im Folgenden wird untersucht, in wie weit die vorherrschende Windrichtung die Stärke der Überwärmung beeinflusst. Für die Windrichtung (gemessen in 10 m Höhe) wurden die Daten der Station Hannover-Langenhagen verwendet. Für die Untersuchung wurden sogenannte Temperaturanomalie-Windrichtungsrosen erstellt. Diese zeigen, mit welcher Häufigkeit eine Temperaturanomalie bei einer bestimmten vorherrschenden Windrichtung vorkommt. Die Windrosen sind in 30°-Sektoren unterteilt. Die Stärke der Temperaturanomalie wird über eine Farbstufenskala abgebildet. Hellorange symbolisiert negative Temperaturanomalien, dunkelrot besonders hohe Temperaturanomalien. Die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Windrichtungen und die damit einhergehenden Temperaturanomalien werden in Prozent je Windrichtungssektor angegeben. Exemplarisch werden in Abbildung 8.8 die Temperaturanomalie-Windrichtungsrosen für die Streckenabschnitte 8, 19, 20 und 5 gezeigt. Vor allem die Abschnitte 8, 19 und 20 fielen durch ihre hohe Anzahl an Temperaturanomaliewerten größer gleich 5 K auf (siehe Abb. 8.4).

Strecke 19 und Strecke 20 liegen in einem Bereich mit geringem Versiegelungsgrad und man würde eine weniger starke Überwärmung erwarten. Die Temperaturanomalie-Windrichtungsrose für Strecke 20 zeigt, dass besonders hohe Temperaturanomalien vorrangig während östlicher Windrichtungen auftraten. Wie bereits oben erwähnt, liegt östlich des Streckenabschnitts 20 das stark bebaute Gebiet der Nordstadt, welches auch bei den MUKLIMO-Auswertungen (Kapitel 6) als besonders überwärmtes Gebiet auffiel. Der Einfluss der Nordstadt auf die Grünanlage, indem sich Strecke 20 befindet (östlicher Rand des Georgengarten), ist also bei östlichen Windrichtungen zu spüren. Strecke 20 zeigt auch eine hohe Anzahl an negativen Anomalien. Diese kommen vorrangig bei westlichen bzw. südwestlichen Windrichtungen vor. In westlicher Richtung liegt der bereits erwähnte Georgengarten.

Streckenabschnitt 8 liegt mitten in der Nordstadt und zeigt die im Mittel stärkste Überwärmung aller Streckenabschnitte. Die Temperaturanomalie-Windrichtungsrose für Strecke 8 zeigt bei den hohen Anomaliewerten keine deutliche Abhängigkeit von der Windrichtung. Die niedrigen Anomaliewerte treten besonders bei westlichen und südwestlichen Windrichtungen auf.

Streckenabschnitt 19 befindet sich in der Calenberger Neustadt. Er führt über eine Brücke über den Fluss Ihme. Nicht weit in südöstlicher Richtung liegt der Maschsee. Hohe Anomaliewerte treten hier bei Windrichtungen aus Ostsüdost bis Westsüdwest am häufigsten auf. Hier könnten die Wasserflächen (Maschsee und Ihme) eine Rolle spielen, diese wirken bei bestimmten Temperaturverhältnissen (wenn die Luft

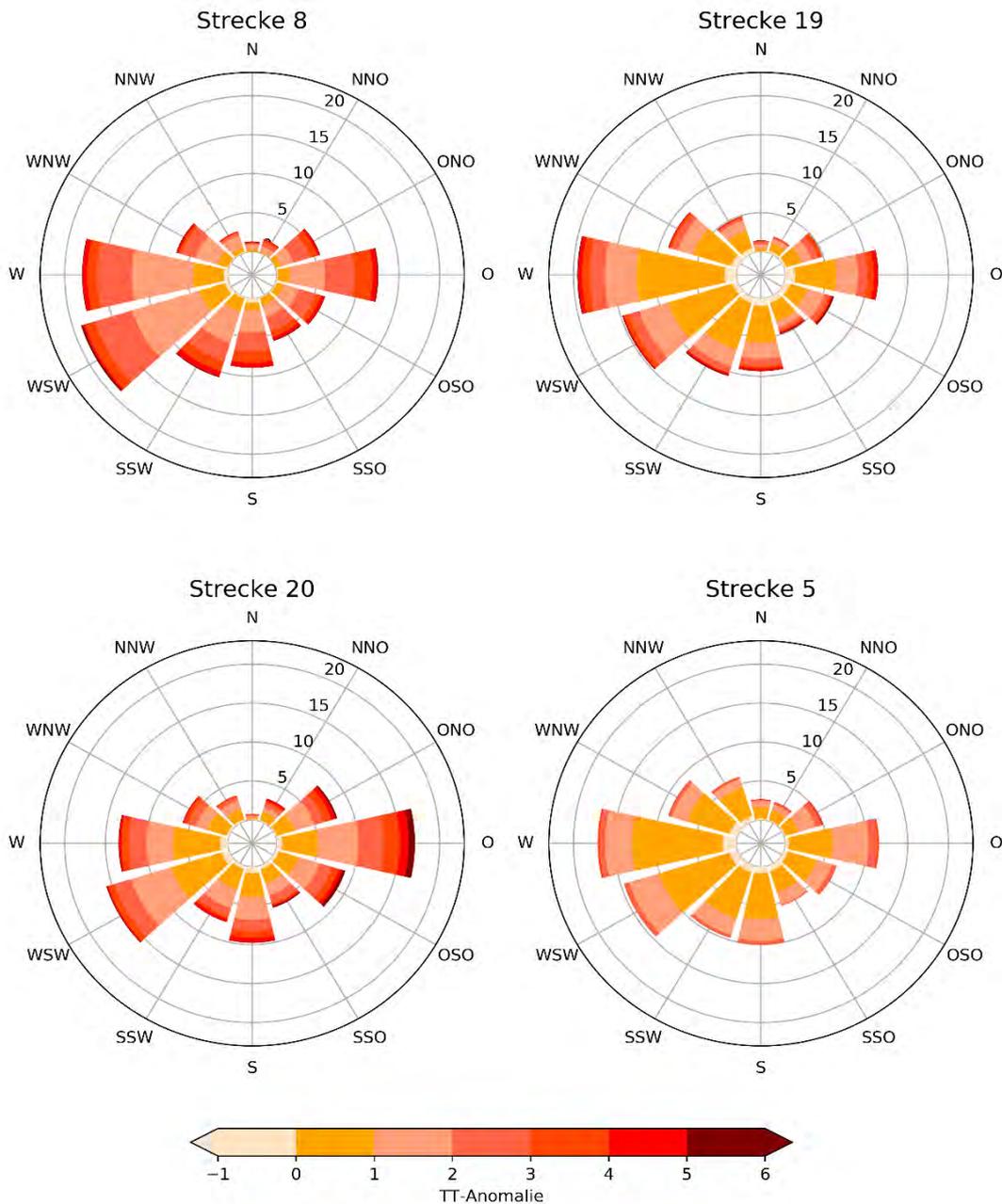


Abb. 8.8: Temperaturanomalie-Windrichtungsrosen, für die Streckenabschnitte 8 (oben links), 19 (oben rechts), 20 (unten links) und 5 (unten rechts).

deutlich kälter ist als das Wasser) wie eine Warmwasserheizung. Strecke 19 zeigt im Vergleich zu den anderen Streckenabschnitten den höchsten Anteil an negativen Temperaturanomalien. Diese kommen bei Winden aus Ost sowie West am häufigsten vor.

Streckenabschnitt 5 liegt in einem kleinräumigen, aber stark versiegelten gewerblich genutzten Gebiet in Linden. Trotz des hohen Versiegelungsgrades gehört dieser Streckenabschnitt zu den am wenigsten überwärmten Abschnitten (siehe Tab. 8.2). Südlich und westlich des Streckenabschnitts befinden sich große Flächen mit Kleingartenanlagen und lockerer Bebauung mit viel Grünfläche. Östlich beginnt der Stadtkern mit starker Bebauung. Die Temperaturanomalie-Windrichtungsrose für

Streckenabschnitt 5 zeigt, dass bei Winden aus westlichen und südlichen Richtungen die Temperaturanomalien eher geringer ausfallen, auch negative Anomalien kommen vorrangig bei Winden aus diesen Richtungen vor. Höhere Anomaliewerte zeigen sich häufig bei Winden aus östlichen Richtungen.

Diese vier Beispiele zeigen, dass nicht nur die baulichen Eigenschaften an der Strecke selbst die Überwärmung beeinflussen, sondern vor allem auch die Verhältnisse in der näheren Umgebung und die vorherrschende Windrichtung.

8.8 Auswertungen der Temperatur- und relative Feuchtemessungen im Innen- und Außenbereich der Klimatram

Für das Projekt wurden bei einer Tram neben den Sensoren für die Außenmessungen auch im Fahrgastinnenraum Sensoren für Temperatur und relative Feuchte angebracht. Die Messungen der sogenannten „Klimatram“ fanden von Juli 2017 bis September 2020 statt. Abbildung 8.9 zeigt die Gegenüberstellung der im Fahrgastinnenraum mit den außen an der Klimatram durchgeführten Temperatur- (links) und relative Feuchtemessungen (rechts) für den gesamten Messzeitraum. Die Sommermonate Juni, Juli und August sowie die Wintermonate Dezember, Januar und Februar sind farblich hervorgehoben (rot bzw. blau). Man sieht, dass die Temperatur im Fahrgastinnenraum fast immer höher ist als die Außentemperatur. Bei der Feuchte verhält es sich genau anders herum: Hier sind die Werte im Fahrgastinnenraum fast immer niedriger als außen. Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen Sommer und Winter zu erkennen. Im Winter sind die Temperaturen im Fahrgastinnenraum durch die Heizung deutlich höher als außen. Das Heizen hat auch einen Einfluss auf die relative Feuchte, welche im Winter noch etwas niedriger ausfällt. Bei der relativen Feuchte kann man zudem beobachten, dass bei höheren

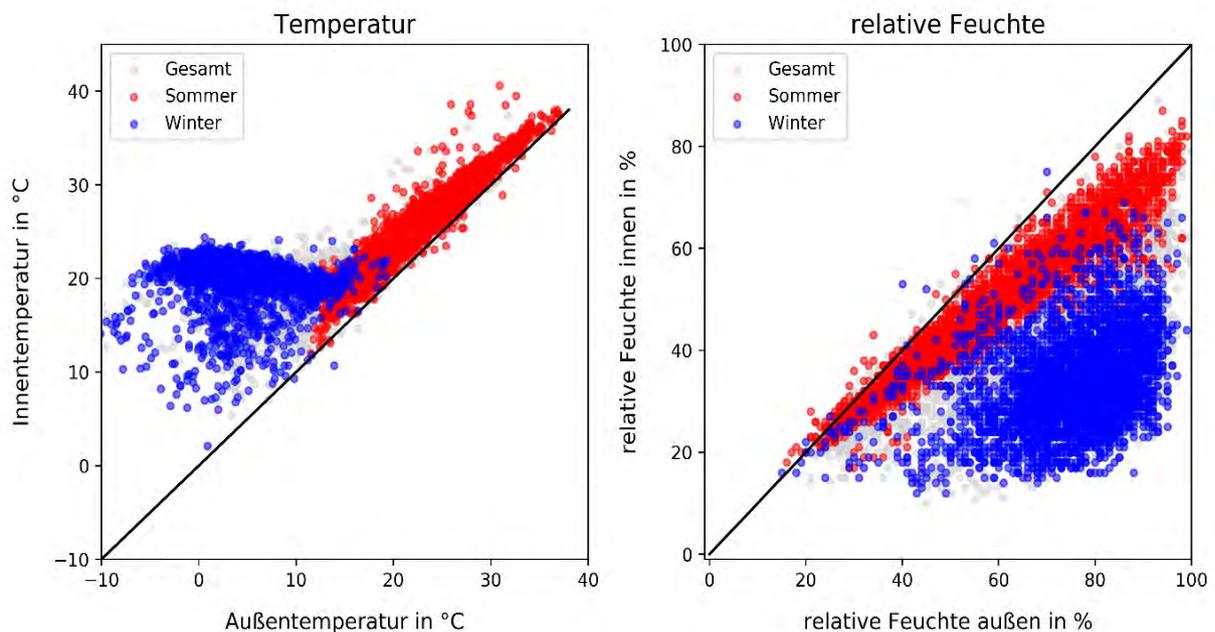


Abb. 8.9: Vergleich der Tram Innenraumtemperatur bzw. -feuchte mit der an der Tram gemessenen Außentemperatur bzw. -feuchte. Sommer: Juni, Juli, August; Winter: Dezember, Januar, Februar.

relativen Feuchten der Unterschied zwischen Fahrgastinnenraum und außen zunimmt.

Abbildung 8.10 zeigt den mittleren Tagesgang der an und in der Klimatram gemessenen Parameter. Es fällt vor allem der Unterschied zwischen den Sommer- und Wintermonaten auf. Im Sommer folgen beide Parameter im Fahrgastinnenraum dem jeweiligen Tagesgang der Außenwerte. Die Temperatur im Fahrgastinnenraum ist tagsüber etwa um 4 K höher, die relative Feuchte ist in den Nachtstunden etwa 20 %, am Tag etwa 10 % trockener als außen. Im Winter liegt die Temperatur im Fahrgastinnenraum im Mittel ganztägig konstant bei etwa 20 °C, nur in den frühen Morgenstunden ist es etwas kühler. Die relative Feuchte im Fahrgastinnenraum liegt im Mittel ganztägig bei etwa 30 %.

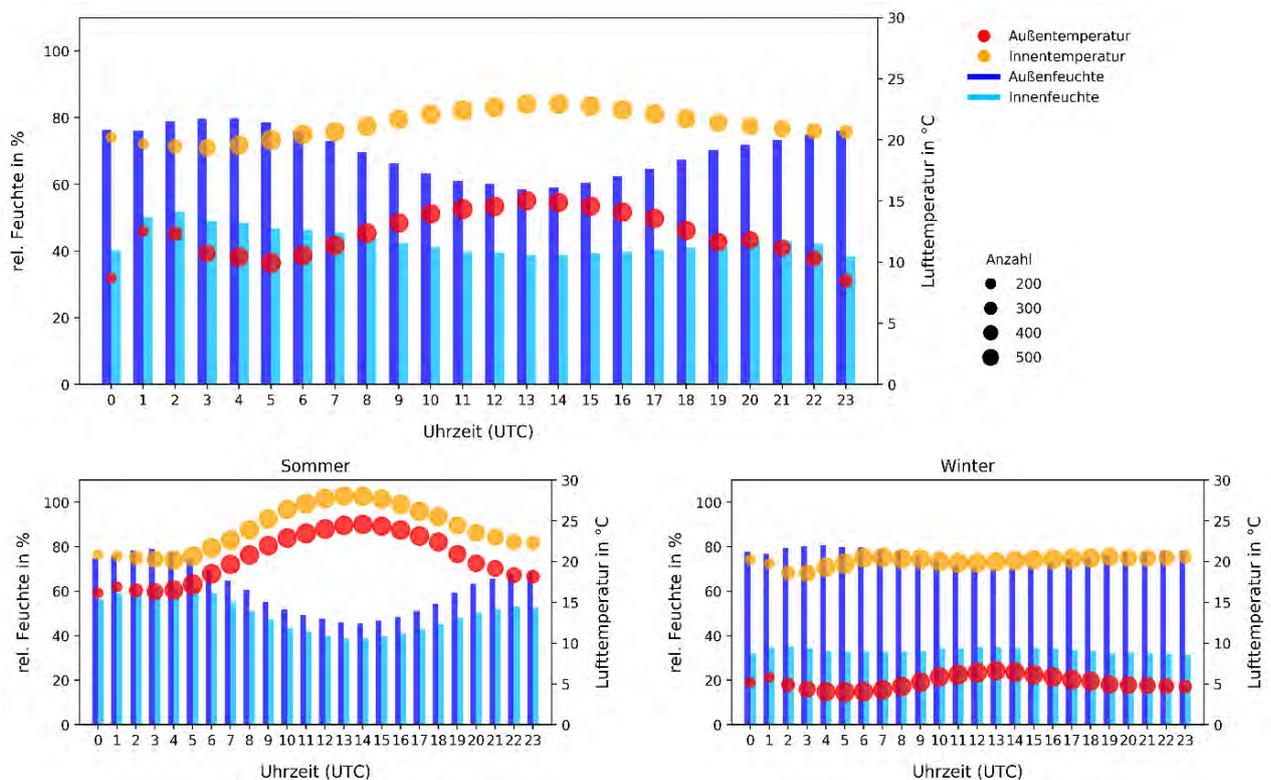


Abb. 8.10: Tagesgänge der Innen- und Außenmessungen (Feuchte: linke Achse, Temperatur: rechte Achse) für das gesamte Jahr sowie für die Sommermonate (Juni, Juli, August) und die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar). Die Zahl auf der X-Achse steht jeweils für die nachfolgende Stunde (also 0 bedeutet von 0:00 bis 0:59 UTC usw.). Die Blasengröße steht für die Anzahl der verfügbaren Messstunden in der jeweiligen Stunde.

8.9 Zusammenfassung der Ergebnisse der Tram-Messungen

Mit Hilfe der Straßenbahnmessungen konnte der städtische Wärmeinseleffekt für Hannover flächendeckend und für verschiedene städtische Bebauungstypen untersucht werden. Insgesamt konnte mit den Messungen gezeigt werden, dass der städtische Wärmeinseleffekt im Stadtgebiet Hannover nicht überall gleich stark ausgeprägt ist. Entscheidend sind neben den baulichen Eigenschaften, auch die Verhältnisse in der näheren Umgebung und die vorherrschende Windrichtung. Stark überwärmte Gebiete zeigten zudem eine Abhängigkeit von der Lufttemperatur. Bei hohen Lufttemperaturen sind die Temperaturanomalien tendenziell niedriger als bei geringeren Lufttemperaturen. Dies macht sich auch beim Tagesgang bemerkbar, nachts sind die Anomalien höher als am Tag. Insgesamt zeigten sich aber auf allen ausgewählten Streckenabschnitten in 95 % der Fälle positive Anomalien. Die mittleren Temperaturanomalien lagen zwischen 1,9 K (Engelbosteler Damm/Haltenhoffstraße) und 0,7 K (Seelhorster Friedhof).

Bei den Innenraum - Messungen zeigte sich, dass die Temperatur im Fahrgastinnenraum in den Sommermonaten der Außentemperatur folgt, im Mittel aber den ganzen Tag etwa um 4 K höher ist. Im Winter sorgt die Heizung für eine stabile Temperatur von 20 °C, aber auch für deutlich trockenere Verhältnisse im Fahrgastinnenraum.

Danksagung

Zum guten Gelingen des Stadtklimaprojektes Hannover haben viele Menschen beigetragen. Das soll an dieser Stelle gewürdigt werden!

- Frau Bank und Herr Schmidt vom Fachbereich Umwelt und Stadtgrün der Stadt Hannover haben im Vorfeld und während des Projektes immer ein offenes Ohr für unsere Wünsche und Bedarfe gehabt, uns in allen Belangen begleitet und tatkräftig unterstützt. Die jährlich vorgestellten Zwischenergebnisse wurden mit großem Interesse zur Kenntnis genommen und diskutiert.
- Von vor dem Anfang bis nach dem Ende der Messkampagne haben die Kolleginnen und Kollegen der Meteorologischen Messeinheit (MME) des DWD ihr Können unter Beweis gestellt: bei der Planung und dem Aufbau der temporären Stationen, bei der Dokumentation, der Überwachung des Datenflusses, der Behebung von Ausfällen, der regelmäßigen Wartung und schlussendlich beim Rückbau. Improvisationstalent war gefordert bei der Ausrüstung der Straßenbahnen mit Messgeräten und dem nötigen Drumherum, und eine gute Zusammenarbeit mit den Techniker*innen und Mitarbeiter*innen der ÜSTRA. Gleich dreimal hat die MME Profilmesskampagnen mit einem unserer Messfahrzeuge durchgeführt, insgesamt waren es 32 Messfahrten durch Hannover. Bei jeder der drei Kampagnen herrschte allerbestes Sommerwetter. Insbesondere die Nachmittagsfahrten bei über 30 °C waren sicher schweißtreibend!
- Ein ganz großes Dankeschön geht an die ÜSTRA, die es erlaubt hat, dass drei Trams mit unseren Messgeräten ausgerüstet werden konnten. Die ÜSTRA-Mitarbeiter*innen haben unsere Techniker*innen immer bereitwillig unterstützt und es zugelassen, dass an ihren Straßenbahnen vorübergehende Veränderungen vorgenommen wurden.
- Im Regionalen Klimabüro Potsdam wurden die Tramdaten von Petra Tanner gesammelt und in einer Datenbank gehütet. Dr. Frank Kreienkamp hat die Tramdaten so komfortabel aufbereitet, dass wir sie ohne weiteres verarbeiten konnten.
- Dr. Heike Schau-Noppel vom Zentralen Klimabüro in Offenbach hat die Studie mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 durchgeführt und stand für alle Fragen rund um MUKLIMO_3 zur Verfügung.
- Viele Kolleginnen und Kollegen des Regionalen Klimabüro Hamburg haben bei der Aufbereitung der Daten tatkräftig mitgewirkt. Sie haben Auswerteprogramme entwickelt, Tabellen und Grafiken erstellt und standen neuen Ideen, Wünschen und Anforderungen immer positiv gegenüber.

Literaturverzeichnis

- GROSS, G., 1989: Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Contributions to atmospheric physics* **62**, 57-72.
- HEENE, V, KOSSMANN, M., FUCHS, P., 2018: Copernicus-Daten für Stadtklimasimulationen. In: EHLERT, I. und SCHWEITZER, C. (Hrsg.) Copernicus für das Umweltmonitoring - Eine Einführung, 38-42.
- NOPPEL, H., 2017: Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **249**, Offenbach am Main, 104 S.
- SIEVERS, U., 2016: Das kleinräumige Strömungsmodell MUKLIMO_3. Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **248**, Offenbach am Main, 151 S.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|----|
| Abb. 2.1 | Lage der Stadt Hannover..... | 10 |
| Abb. 3.1 | Lage der Messstationen im Stadtgebiet. | 13 |
| Abb. 4.1 | Jahresmitteltemperaturen in Hannover-Langenhagen im Zeitraum 1946-2020 (blauer Graph). Zusätzlich sind die vieljährigen Mittelwerte für die Zeiträume 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (lila) dargestellt..... | 14 |
| Abb. 4.2 | Jahresgang der monatlichen mittleren Tageshöchsttemperaturen, Tagesmitteltemperaturen und mittleren Tagestiefsttemperaturen in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (lila). | 15 |
| Abb. 4.3 | Normalverteilung der Tagesmaxima der Temperatur für die Zeiträume 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (lila). Die Tab. oben links gibt die Temperaturwerte der Maxima der zweigipfligen Häufigkeitsverteilungen für die beiden Zeiträume an..... | 17 |
| Abb. 4.4 | Differenzen der monatlichen Anzahlen der Ereignistage der Temperatur in Hannover-Langenhagen zwischen den Referenzzeiträumen 1991-2020 und 1961-1990. | 20 |
| Abb. 4.5 | Mitteltemperaturen pro Jahr sowie im Sommer (Juni, Juli, August) als farbige Graphen. Jährliche Anzahl der Hitzetage ($T_x \geq 30 \text{ °C}$) als rote Balken Station: Hannover-Langenhagen, Zeitraum: 1951-2020..... | 21 |
| Abb. 4.6 | Temperaturwindrose für Hannover-Langenhagen. Alle Werte (schwarzer Graph) sowie für die Temperaturklassen $T \geq 15 \text{ °C}$ / $\geq 20 \text{ °C}$ / $\geq 25 \text{ °C}$. Datenbasis: Stundenwerte 0 bis 23 UTC (1991-2020)..... | 25 |
| Abb. 4.7 | Temperaturwindrose der Station Hannover-Langenhagen tagsüber, für die Temperaturklassen wie vor: $T (\geq 15 \text{ °C}, \geq 20 \text{ °C}, \geq 25 \text{ °C})$; Datenbasis: Stundenwerte, Zeitraum: 6 bis 17 UTC (1991-2020). | 26 |
| Abb. 4.8 | Temperaturwindrose der Station Hannover-Langenhagen in der Nacht, für die Temperaturklassen wie vor: $T (\geq 15 \text{ °C}, \geq 20 \text{ °C}, \geq 25 \text{ °C})$; Datenbasis: Stundenwerte, Zeitraum: 18 bis 5 UTC (1991-2020). | 27 |
| Abb. 4.9 | Jahresgang der Tageshöchsttemperatur 2017 in Hannover-Langenhagen. Schwarze Linie: Mittelwerte 1981-2010; rote bzw. blaue Markierung: Differenz Tageswert - Mittelwert (1981-2010). | 28 |
| Abb. 4.10 | Jahresgang der Tageshöchsttemperatur 2018 in Hannover-Langenhagen. Schwarze Linie: Mittelwerte 1981-2010; rote bzw. blaue Markierung: Differenz Tageswert - Mittelwert (1981-2010). | 28 |
| Abb. 4.11 | Jahresgang der Tageshöchsttemperatur 2019 in Hannover-Langenhagen. Schwarze Linie: Mittelwerte 1981-2010; rote bzw. blaue Markierung: Differenz Tageswert - Mittelwert (1981-2010). | 29 |
| Abb. 4.12 | Jahresgang der Tageshöchsttemperatur 2020 in Hannover-Langenhagen. Schwarze Linie: Mittelwerte 1981-2010; rote bzw. blaue Markierung: Differenz Tageswert - Mittelwert (1981-2010). | 29 |
| Abb. 4.13 | Jahressummen der Niederschlagshöhe (l/m^2) in Hannover-Langenhagen im Zeitraum 1946 bis 2020..... | 30 |
| Abb. 4.14 | Monatliche Niederschlagssummen (l/m^2) in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020..... | 31 |
| Abb. 4.15 | Andauern von trockenen Tagen (Tagessummen des Niederschlags $< 0,1 \text{ l/m}^2$) in Hannover-Langenhagen ab einer Andauerzeit von 7 Tagen für den Messzeitraum 1946 bis 2020..... | 35 |
| Abb. 4.16 | Jahressummen der Sonnenscheindauer in Hannover-Langenhagen; Zeitraum: 1951-2020. Blaue Linie: Mittelwert 1991-2020 (1595 Std), rote gestrichelte Linie: linearer Trend..... | 36 |
| Abb. 4.17 | Jahresgang der mittleren täglichen Sonnenscheindauer in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020. Gestrichelte graue Linie: Jahresgang der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer. | 38 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Abb. 4.18 | Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit (m/s) in Hannover-Langenhagen. Zeitraum: 1991-2020..... | 39 |
| Abb. 4.19 | Jahreszeitenwindrose von Hannover-Langenhagen (Häufigkeitsverteilung der Stundenwerte der Windrichtung in Abhängigkeit von der Jahreszeit), Zeitraum: 1991-2020. | 41 |
| Abb. 4.20 | Stärkewindrose von Hannover-Langenhagen (Häufigkeitsverteilung der Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung). Zeitraum: 1991-2020. | 42 |
| Abb. 4.21 | Anzahl der Sturmtage (Windspitzen mit 8 Bft oder mehr) pro Jahr in Hannover-Langenhagen (1954 - 2020)..... | 43 |
| Abb. 4.22 | Monatliche Anzahl der Sturmtage (Tagesmaximum $\geq 17,2$ m/s, Bft 8) in Hannover-Langenhagen; Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020. | 44 |
| Abb. 5.1 | Station Weidendamm (WD)..... | 45 |
| Abb. 5.2 | Station Marianne-Baecker-Allee (MB) | 45 |
| Abb. 5.3 | Station Kattenbrookspark (KP) | 45 |
| Abb. 5.4 | Messstation in der Haltestelle Kröpcke, Ebene -3 (K-3). | 46 |
| Abb. 5.5 | Messstation in der Haltestelle Kröpcke, Ebene -5 (K-5). | 46 |
| Abb. 5.6 | Messfeld der DWD Wetterstation Hannover-Langenhagen (LH). | 47 |
| Abb. 5.7 | Station Herrenhausen (HE), betrieben vom Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover (IMUK). | 47 |
| Abb. 5.8 | Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an der Station Langenhagen für jedes Jahr der Messkampagne (06.2017-12.2020) und im Vergleich mit den Referenzperioden 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (schwarz)..... | 50 |
| Abb. 5.9 | Monatsmittelwerte des Minimums (links) und des Maximums (rechts) der Lufttemperatur an der Station Langenhagen während der Messkampagne (06.2017-12.2020) im Vergleich mit den Referenzperioden 1961-1990 (■) und 1991-2020 (■)..... | 50 |
| Abb. 5.10 | Zeitreihen der mittleren monatlichen Maximum- (Tx) und Minimumtemperaturen (Tn) an den Stationen im Zeitraum 06.2017-12.2020..... | 51 |
| Abb. 5.11 | Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an den unterirdischen Stationen Kröpcke -3 und Kröpcke -5 (Zeitraum: 06.2017-12.2020), im Vergleich mit den Temperaturwerten der Station Langenhagen für die Referenzperioden 1961-1990 (grün) und 1991-2020 (schwarz)..... | 52 |
| Abb. 5.12 | Tagesminimum (offene Karos) und Tagesmaximum der Temperatur (gefüllte Karos) an den Tunnelstationen K-3 und K-5. Zeitraum: 01.06.-31.08.2019. | 53 |
| Abb. 5.13 | Tageshöchsttemperaturen an den Tunnelstationen und Weidendamm im Vergleich. Zeitraum: 01.06.-31.08.2019. | 54 |
| Abb. 5.14 | Mittlerer Tagesgang der Temperaturdifferenz zwischen den Tunnelstationen Kröpcke-3 und -5 und den oberirdischen Stationen Langenhagen und Weidendamm. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 6.2017-12.2020. | 55 |
| Abb. 5.15 | Mittlerer Jahresgang der Temperaturdifferenz zwischen den Tunnelstationen (Kröpcke-3 und Kröpcke -5) und den oberirdischen Stationen Langenhagen bzw. Weidendamm. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 6.2017-12.2020. | 55 |
| Abb. 5.16 | Tagesgänge der Lufttemperatur an den Stationen in Hannover. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 60 |
| Abb. 5.17 | Tagesgänge der Lufttemperatur pro Jahreszeit und im Jahr an den Stationen in Hannover (durchgezogene Linien) und jeweils im Vergleich mit Langenhagen (gestrichelte Linien), Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 60 |
| Abb. 5.18 | Tagesgang des UHI in den Jahreszeiten und im Jahr an den Stationen Weidendamm (links) und Marianne-Baecker-Allee (rechts). Datenbasis: Stundenmittelwerte der Temperatur, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 62 |
| Abb. 5.19 | Isoplethen des UHI an den Stationen Weidendamm (links) und Marianne-Baecker-Allee (rechts). Datenbasis: Stundenmittelwerte der Temperatur, Zeitraum: 06.2017-12.2020. | 63 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Abb. 5.20 | Tagesgang (links) und Isoplethen (rechts) des UHI, Station Herrenhausen. Datenbasis: Stundenmittelwerte der Temperatur, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 63 |
| Abb. 5.21 | Monatsmittelwerte des UHI an den Stationen Weidendamm, Marianne-Baecker-Allee, Herrenhausen. Datenbasis: Stundenmittelwerte der Temperatur, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 64 |
| Abb. 5.22 | Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit an den Stationen in Hannover. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 65 |
| Abb. 5.23 | Tagesgang der relativen Luftfeuchtigkeit in den Jahreszeiten und im Jahr an den Stationen Weidendamm (links) und Marianne-Baecker-Allee (rechts). Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum 06.2017-12.2020..... | 66 |
| Abb. 5.24 | Tagesgang der relativen Luftfeuchtigkeit in den Jahreszeiten und im Jahr an den Stationen Kattenbrookspark (links) und Herrenhausen (rechts). Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum 06.2017-12.2020..... | 66 |
| Abb. 5.25 | Tagesgang der Windgeschwindigkeit (m/s) in den Jahreszeiten und im Jahr an den Stationen Langenhagen (links, Messhöhe: 10 m) und Weidendamm (rechts, Messhöhe: 2 m). Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum 06.2017-12.2020..... | 68 |
| Abb. 5.26 | Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit (m/s) an den Stationen in Hannover. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 69 |
| Abb. 5.27 | Stärkewindrose von Hannover-Langenhagen (Häufigkeitsverteilung der Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung). Messhöhe: 10 m über Grund, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 70 |
| Abb. 5.28 | Stärkewindrose der Station Weidendamm. Messhöhe: 2 m über Grund, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 71 |
| Abb. 5.29 | Stärkewindrose der Station Marianne-Baecker-Allee. Messhöhe: 2 m über Grund, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 72 |
| Abb. 5.30 | Stärkewindrose der Station Kattenbrookspark. Messhöhe: 2 m über Grund, Zeitraum: 06.2017-12-2020..... | 73 |
| Abb. 5.31 | Stärkewindrose der Station Herrenhausen. Messhöhe: 10 m über Grund, Zeitraum: 06.2017-12-2020..... | 74 |
| Abb. 5.32 | Stärkewindrosen an den Tunnelstationen Kröpcke, links: Ebene -3, rechts: Ebene-5. Messhöhe: 2 m über Grund, Datenbasis: 10-Minuten-Mittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020..... | 75 |
| Abb. 6.1 | Landnutzungsklassen im Stadtgebiet und der Umgebung von Hannover..... | 79 |
| Abb. 6.2 | Lufttemperatur in 5 m über Grund um 16 Uhr MESZ für einen heißen, trockenen, windschwachen Tag mit Anströmung aus WSW. Die hellgrauen Linien geben die Hauptverkehrsstraßen wieder, die Stadtgrenze von Hannover ist lila markiert..... | 81 |
| Abb. 6.3 | Lufttemperatur in 5 m über Grund um 23 Uhr MESZ für einen heißen, trockenen, windschwachen Tag mit Anströmung aus WSW. Die hellgrauen Linien geben die Hauptverkehrsstraßen wieder, die Stadtgrenze von Hannover ist lila markiert..... | 82 |
| Abb. 6.4 | Lufttemperatur in 5 m über Grund um 04 Uhr MESZ für einen heißen, trockenen, windschwachen Tag mit Anströmung aus WSW. Die hellgrauen Linien geben die Hauptverkehrsstraßen wieder, die Stadtgrenze von Hannover ist lila markiert..... | 83 |
| Abb. 6.5 | Tagesgänge der Temperatur. Schwarze Grafen: MUKLIMO-Simulationen (H-Nord, Punkt 1, Punkt 2). Bunte Grafen: Messreihen an der Station Weidendamm (WD) für 9 Termine..... | 86 |
| Abb. 6.6 | Tagesgänge der Temperatur. Schwarze Grafen: MUKLIMO-Simulationen (H-Linden, Punkt 1, Punkt 2, Punkt 3). Bunte Grafen: Messreihen an der Station Marianne-Baecker-Allee (MB) für 9 Termine..... | 86 |
| Abb. 6.7 | Tagesgänge der Temperatur. Schwarze Grafen: MUKLIMO-Simulationen (Flughafen, Punkt 1, Punkt 2). Bunte Grafen: Messreihen an der Station Langenhagen (LH) für 9 Termine..... | 87 |
| Abb. 6.8 | Tagesgänge der Temperatur. Schwarze Grafen: MUKLIMO-Simulationen (H-Kronsberg, Punkt 1, Punkt 2, Punkt 3). Bunte Grafen: Messreihen an der Station Kattenbrookspark (KP) für 9 Termine..... | 87 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Abb. 7.1 | Die Routen der Messfahrten in Hannover und die Lage der temporären Stationen Weidendamm, Kröpcke, Marianne-Baecker-Allee und Kattenbrookspark sowie der Station Herrenhausen. | 89 |
| Abb. 7.2 | Tagesgang der Lufttemperatur in Hannover-Langenhagen, 23.07. / 12 UTC - 25.07.2019 / 12 UTC. | 95 |
| Abb. 7.3 | Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Nordroute am 23.07.2019, nachmittags. | 96 |
| Abb. 7.4 | Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Südroute am 23.07.2019, nachmittags. | 96 |
| Abb. 7.5 | Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Nordroute am 23.07.2019, abends. | 98 |
| Abb. 7.6 | Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Nordroute am 24.07.2019, frühmorgens. | 98 |
| Abb. 7.7 | Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Südroute, abends. | 99 |
| Abb. 7.8 | Lufttemperaturmessungen (2 m) auf der Südroute am 24.07.2019, frühmorgens. | 99 |
| Abb. 7.9 | Abweichungen der Temperatur (2 m) von der Mitteltemperatur der Messfahrt, Nordroute, 23./24.07.2019, 3 Messfahrten in Folge. | 102 |
| Abb. 7.10 | Abweichungen der Temperatur (2 m) von der Mitteltemperatur der Messfahrt, Südroute, 23./24.07.2019, 3 Messfahrten in Folge. | 103 |
| Abb. 8.1 | Messsensorik an einer Tram in Hannover. | 104 |
| Abb. 8.2 | Stadtplan und Tabelle mit den 20 ausgewählten Streckenabschnitten. | 105 |
| Abb. 8.3 | Anzahl der verfügbaren Messstunden pro Streckenabschnitt und Monat. | 107 |
| Abb. 8.4 | Häufigkeit bestimmter Temperaturanomalien der ausgewählten Streckenabschnitte (ohne die Abschnitte 3, 10, 11 und 15). Zeitraum: 7.2017-12.2020. | 109 |
| Abb. 8.5 | Jahresgang der Temperaturanomalien aller Streckenabschnitte in Hannover. | 110 |
| Abb. 8.6 | Tagesgang der Temperaturanomalien aller Streckenabschnitte. | 111 |
| Abb. 8.7 | Temperaturanomalie in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (gemessen in Kattenbrookspark) für die Streckenabschnitte 8 (gelb) und 18 (grün). | 112 |
| Abb. 8.8 | Temperaturanomalie-Windrichtungsrosen, für die Streckenabschnitte 8 (oben links), 19 (oben rechts), 20 (unten links) und 5 (unten rechts). | 114 |
| Abb. 8.9 | Vergleich der Tram Innenraumtemperatur bzw. -feuchte mit der an der Tram gemessenen Außentemperatur bzw. -feuchte. Sommer: Juni, Juli, August; Winter: Dezember, Januar, Februar. | 115 |
| Abb. 8.10 | Tagesgänge der Innen- und Außenmessungen für das gesamte Jahr sowie für die Sommermonate (Juni, Juli, August) und die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar). | 116 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----------|---|----|
| Tab. 4.1 | Monatswerte der Lufttemperatur (°C) in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020. Absolute Extremwerte aus dem Zeitraum 1946-2020. | 16 |
| Tab. 4.2 | Mittlere Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (°C) in Hannover-Langenhagen für die Jahreszeiten (Frühling = März, April, Mai; Sommer = Juni, Juli, August; Herbst = September, Oktober, November; Winter = Dezember, Januar, Februar) und die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020..... | 17 |
| Tab. 4.3 | Ereignistage der Lufttemperatur pro Monat in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990 (grün), 1971-2000 (hellblau), 1981-2010 (dunkelblau) und 1991-2020 (lila). Hinweis: 0,0 = mittlere Anzahl kleiner als 0,05 Tage/Monat. | 19 |
| Tab. 4.4 | Häufigkeit des Auftretens (Anzahl) mehrtägiger Hitzeperioden in Hannover-Langenhagen für drei Schwellenwerte der Tageshöchsttemperatur T_x ($\geq 25 / \geq 28 / \geq 30$ °C); Bezugszeiträume: 1946-2020; 1991-2020. „- „ kein Ereignis; Blaue Markierung: Beispiel fünftägige Andauer..... | 22 |
| Tab. 4.5 | Wiederkehrzeiten (Jahre) mehrtägiger Hitzeperioden in Hannover-Langenhagen für drei Schwellenwerte der Tageshöchsttemperatur T_x ($\geq 25 / \geq 28 / \geq 30$ °C); Bezugszeiträume: 1946-2020; 1991-2020. „- „ kein Ereignis; Blaue Markierung: siehe obige Tab. 4.4. | 22 |
| Tab. 4.6 | Häufigkeit des Auftretens (Anzahl) mehrtägiger Hitzeperioden in Hannover-Langenhagen bei nachträglich um 1 bis 4 K angehobenen Höchsttemperaturen. Grau unterlegt: tatsächliche Häufigkeiten (1946-2020), siehe Tab. 4.5..... | 24 |
| Tab. 4.7 | Mittlere monatliche Niederschlagssummen (l/m^2) in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020..... | 31 |
| Tab. 4.8 | Anzahl der Tage mit bestimmten Niederschlagssummen in Hannover-Langenhagen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020. | 32 |
| Tab. 4.9 | Häufigkeit von Perioden mit wenig Niederschlag innerhalb des gesamten Messzeitraums (1946-2020) und in den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2020. Hier werden drei Intensitätsstufen unterschieden: Tage mit wenig Niederschlag ($< 5 l/m^2$), trockene Tage ($< 1 l/m^2$) und niederschlagsfreie Tage ($< 0,1 l/m^2$). Die letzte Spalte zeigt jeweils die Anzahl der Perioden mit Andauern von mindestens 7 Tagen..... | 34 |
| Tab. 4.10 | Die 10 sonnenscheinreichsten Jahre in Hannover-Langenhagen (1951-2020). | 36 |
| Tab. 4.11 | Mittelwerte der Sonnenstunden pro Monat (jeweils obere Zeile) und pro Tag (jeweils untere Zeile) sowie die höchsten und niedrigsten Monats- bzw. Jahressummen in Hannover-Langenhagen. Mittelwerte berechnet für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020. | 37 |
| Tab. 4.12 | Windrichtungsverteilung in Hannover-Langenhagen (1991-2020); Richtungsangaben für 30°-Sektoren, Prozentangaben: Häufigkeit, bezogen auf die Stunden pro Jahr. | 40 |
| Tab. 4.13 | Mittlere Anzahl der Tage pro Monat und Jahr mit Windspitzen (Böen) $\geq 6, 8$ und 10 Bft in Hannover-Langenhagen; Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020. | 44 |
| Tab. 5.1 | Monats- und Jahresmittelwerte des Tagesmaximums, der Tagesmitteltemperatur und des Tagesminimums sowie die Extremwerte an den Stationen (Zeitraum: 06.2017-12.2020). | 48 |
| Tab. 5.2 | Mittlere Monats- und Jahreswerte der Temperaturspanne (Maximum - Minimum) an den Stationen, angegeben in K. | 49 |
| Tab. 5.3 | Jährliche Anzahlen der Kenntage der Temperatur an den Stationen in Hannover. 2017* = Zeitraum 01.06.-31.12.2017. | 56 |
| Tab. 5.4 | Anzahl der Hitzetage ($T_x \geq 30$ °C) an den Stationen in Hannover und Häufigkeit des Auftretens mehrtägiger Hitzeperioden („-„ kein Ereignis) im Zeitraum 06.2017-12.2020. | 57 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tab. 5.5 | Anzahl der Sommertage ($T_x \geq 25 \text{ C}$) an den Stationen in Hannover und Häufigkeit des Auftretens mehr-tägiger Hitzeperioden („-“, kein Ereignis) im Zeitraum 06.2017-12.2020. | 58 |
| Tab. 5.6 | Jährliche Anzahlen der Biergartentage und Sommerabende an den Stationen in Hannover; 2017* = Zeitraum 01.06.-31.12.2017. | 58 |
| Tab. 5.7 | Anzahl der Frosttage ($T_n < 0 \text{ °C}$) an den Stationen in Hannover und Häufigkeit des Auftretens mehrtägiger Frostperioden („-“, kein Ereignis) im Zeitraum 06.2017-12.2020. | 59 |
| Tab. 5.8 | Anzahl der Eistage ($T_x < 0 \text{ °C}$) an den Stationen in Hannover und Häufigkeit des Auftretens mehrtägiger Frostperioden („ - „, kein Ereignis) im Zeitraum 06.2017-12.2020. | 59 |
| Tab. 5.9 | Minimum, Mittelwert und Maximum des UHI an den drei Stationen und Häufigkeit des Auftretens (angegeben in %) negativer bzw. positiver UHI-Werte für verschiedene Klassen. Umlandstation: Langenhagen. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum: 06.2017-12.2020. | 61 |
| Tab. 5.10 | Mittelwert und höchster Stundenmittelwert der Windgeschwindigkeit an den Stationen in Hannover. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum 06.2017-12.2020. | 67 |
| Tab. 5.11 | Häufigkeit des Auftretens bestimmter Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit an den Stationen in Hannover. Datenbasis: Stundenmittelwerte, Zeitraum 06.2017-12.2020. | 67 |
| Tab. 5.12 | Windgeschwindigkeiten an den beiden Tunnelstationen Kröpcke-3 und -5. Mittelwerte und Maximum pro Parameter, dazu Häufigkeit des Auftretens bezogen auf die Schwellenwerte 3 und 6 m/s. Datenbasis: 10-Minuten-Werte, Zeitraum: 06.2017-12.2020. | 75 |
| Tab. 6.1 | Die Landnutzungsklassen mit Bebauung mit einigen statistischen Parametern. | 80 |
| Tab. 7.1 | Marker, Wegstrecke und Ortsbeschreibungen auf der Nordroute. | 90 |
| Tab. 7.2 | Marker, Wegstrecke und Ortsbeschreibungen auf der Südroute. | 90 |
| Tab. 7.3 | Ausgewählte Wetterdaten der Wetterstation Hannover-Langenhagen während der Tage mit Messfahrten. | 92 |
| Tab. 7.4 | Differenz zwischen den Mitteltemperaturen der Messfahrten und den zeitgleich in Hannover-Langenhagen gemessenen Lufttemperaturen, angegeben in K. | 92 |
| Tab. 7.5 | Differenz der Mitteltemperaturen zwischen den Stationen (WD, MB, KP) und Hannover-Langenhagen, jeweils bezogen auf den Zeitraum der Messfahrten, angegeben in K. | 93 |
| Tab. 7.6 | Ergebnisse der sechs Messfahrten vom 23.-25.07.2019 auf der Nordroute. | 94 |
| Tab. 7.7 | Ergebnisse der sechs Messfahrten vom 23.-25.07.2019 auf der Südroute. | 94 |
| Tab. 8.1 | Übersicht der Streckenabschnitte in Hannover mit Strecken-ID, Strecken-Name, Bebauungsstruktur und Anzahl der verfügbaren Messstunden innerhalb des Streckenabschnittes. Die grau hinterlegten Strecken weisen weniger als 1.000 Messstunden auf. | 106 |
| Tab. 8.2 | Zusammenfassung der Temperaturanomaliewerte der ausgewählten Streckenabschnitte (ohne die Abschnitte 3, 10, 11 und 15), sortiert nach dem Gesamtmittelwert. | 108 |

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

Nr. 255 O. Roll, G. Halbig und S. Buchholz:

Messungen und Computersimulationen für eine klimaangepasste Stadtplanung – Klimawirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen in der Stadt Bonn

Nr. 254 S. Krähenmann, A. Walter und L. Klippel:

Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Downscaling und multivariate Bias-Adjustierung – Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes entwickelte Verfahren zum Postprocessing von Klimamodelldaten

Nr. 253 L. Hannak und S. Brinckmann:

Parallelmessungen an deutschen Klimareferenzstationen – Schlussfolgerungen im Hinblick auf Homogenität und Messunsicherheiten

Nr. 252 G. Mühlbacher, M. Koßmann, K. Sedlmeier und K. Winderlich:

Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes („Alpines Pumpen“) in München

Nr. 251 T. Winterrath, C. Brendel, M. Hafer, T. Junghänel, A. Klameth, E. Walawender, E. Weigl und A. Becker: Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie

Nr. 250 C. Hinz:

Optische Erscheinungen und andere ungewöhnliche Wetterphänomene auf der Wetterwarte Fichtelberg

Nr. 249 H. Noppel:

Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz: Abschlussbericht zum Arbeitspaket 3 des Projekts KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz – Stadtklima in der kommunalen Praxis

Nr. 248 U. Sievers:

Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3. Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen

Nr. 247 K. Trusilova und W. Riecke:

Klimauntersuchung für die Metropolregion Hamburg zur Entwicklung verschiedener meteorologischer Parameter bis zum Jahr 2050

Nr. 246 S. Hänsel, A. Schucknecht, F. Böttcher, C. Bernhofer und J. Matschullat:

Niederschlagsveränderungen in Sachsen von 1901 bis 2100 – Starkniederschlags- und Trockenheitstrends

Nr. 245 P. Winkler:

Untersuchung zu historischen und neuzeitlichen Dampfdruckmessungen am Observatorium Hohenpeißenberg

Nr. 244 C. Brendel, E. Brisson, F. Heyner, E. Weigl und B. Ahrens:

Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Thüringen

Nr. 243 K. Hoffmann, W. Bivour, B. Früh, M. Koßmann und P.-H. Voß:

Klimauntersuchungen in Jena für die Anpassung an den Klimawandel und seine erwarteten Folgen – ein Ergebnisbericht

Nr. 242 C. Stein und G. Maliltz:

Das Hochwasser an Elbe und Donau im Juni 2013: Wetterentwicklung und Warnmanagement des DWD: Hydrometeorologische Rahmenbedingungen

Nr. 241 A. Hoff, C. Drüe und H.-R. Sonnabend:

Messphysik und Datenverarbeitung der Verkehrsflugzeuge als meteorologische Sensorträger





Deutscher Wetterdienst

Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes
Bildungszentrum
Am DFS-Campus 4
63225 Langen

Über www.dwd.de gelangen Sie
auch zu unseren Auftritten in:

