



UNIVERSITÄT BAYREUTH

Abteilung Mikrometeorologie

Klimawanderweg

auf der Landesgartenschau in Bamberg 2012

von

Thomas Foken

Bayceer
Bayreuther Zentrum für
Ökologie und Umweltforschung

26. APRIL - 7. OKTOBER
BAMBERG 2012
LANDESGARTENSCHAU



Arbeitsergebnisse

Nr. 50

Bayreuth, April 2012

Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, Print, ISSN 1614-8916
Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, Internet, ISSN 1614-8924
http://opus.ub.uni-bayreuth.de/schriftenreihen_ebene2.php?sr_id=4&la=de

Eigenverlag: Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie
Vervielfältigung: Druckerei der Universität Bayreuth
Herausgeber: Prof. Dr. Thomas Foken

Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie
D-95440 Bayreuth

Die Verantwortung über den Inhalt liegt beim Autor.

Klimawanderweg

auf der Landesgartenschau in Bamberg 2012

von

Thomas Foken

Inhalt

1. Einleitung	4
2. Entstehung des Lokalklimas	6
3. Der Klimawanderweg	13
4. Der erweiterte Klimawanderweg zur Altstadt	32
Weiterführende Literatur	34
Quellen	34

1. Einleitung

Klima ist heute in aller Munde. Der Begriff hat die Stammtische erreicht und es ist so einfach für oder gegen die Klimaerwärmung zu sein oder etwas für oder nicht für den Schutz des Klimasystems zu tun. Nur wenige kennen das Klimasystem in all seiner Kompliziertheit und gerade die Zweifler am Klimawandel beleuchten nur kleine Teile und glauben dadurch schon alles erkannt zu haben. Für viele bleibt Klima etwas sehr Abstraktes – zum Wetter kann man schon eher etwas sagen. Und doch passiert Klima bereits vor der eigenen Haustür – oder im Sprachgebrauch der Landesgartenschau – im eigenen Garten. Klima zum Anfassen soll der Klimawanderweg auf der Landesgartenschau vermitteln, dabei aber nicht den Blick für das Klima der Erde völlig ausblenden, aber vielleicht durch Verstehen im Kleinen das große Menschheitsproblem besser wahrnehmen zu können.

Dem Klimawanderweg kann man sich auf verschiedene Weise nähern. Man besucht im Erba-Gelände einfach die 14 Schautafeln, wobei die Reihenfolge sogar unwichtig ist. Damit ist vieles schon verständlich, soweit man das in wenigen Worten sagen kann. Wer mehr erfahren will, besucht eine angebotene Führung oder vereinbart eine solche für eine kleine Gruppe von Interessenten. Auf einem etwa einstündigen Rundweg kann man dann viel Wissenswertes hören. Für den Individualisten oder den ganz Neugierigen ist diese kleine Broschüre gemacht. Sie versucht Hintergrundwissen zu vermitteln und die doch recht einfachen Erklärungen auf den Schautafeln wissenschaftlich zu verstehen. Dies ist nicht nur für den Gärtner von Nutzen, der seinen Garten möglichst optimal an die Lebensbedingungen der Pflanzen anpassen will. Das Heft ist aber auch für den Geographie- und Physiklehrer geschrieben, der Anregungen erhalten soll, wie man Naturbeobachtungen zu Wetter- und Klima den Schülern nachhaltig beibringen kann. Wenn es dann auch noch der Stadtplaner oder gar Politiker liest, dann ist uns allen geholfen und mancher Schaden kann vermieden werden.

Aber was ist nun Klima und vor allem was ist Klimaänderung. Der sehr warme Dezember 2011 und Januar 2012 sind kein Anzeichen der Klimaerwärmung. Auch die eisige erste Februarhälfte hat nichts mit einer Klimaabkühlung zu tun. Schon etwas mehr mag man an Klimaerwärmung glauben, wenn man sich das letzte Jahr ansieht, in dem nur der Februar und Juli etwas zu kühl waren. In weiten Teilen Deutschlands war sogar nur der Juli zu kühl und 2011 war das fünftwärmste Jahr seit 1881 (in den Jahren davor war es aber auch sehr kühl, nur feh-

len die umfassenden Wetteraufzeichnungen). Leider ist unser Klimagedächtnis sehr schlecht. Die kühlen Sommertage sind uns mehr in Erinnerung geblieben als die warmen und sonnenscheinreichen Frühjahrs- und Herbstwochen. Das macht es für uns schwierig über Klima zu reden, denn es ist etwas Langfristiges und die Experten betrachten immer Zeiträume von 30 Jahren und vergleichen solche, damit kurzzeitiges Wettergeschehen zu keinen Fehlschlüssen führt. Die Älteren unter uns haben eine Chance. Wenn sie an kalte Wintertage in der Kindheit zurück denken, sind diese immer auch Tage mit Schnee, der kalte Februar 2012 brachte mit 1-3 cm für Bamberg nicht einmal den Kindern einen Rodelspaß. Der Atlantik ist heute einfach zu warm und Regenwolken bringen im Flachland meist nur Regen und nur im Gebirge Schnee, dort oft sogar viel, denn wärmere Wolken bringen eben auch mehr Wasser mit. Wir kommen hier und da auf den Klimawandel zurück bei unserem Klimastreifzug durch die Landesgartenschau. Vorerst steht die Frage, was kann man davon auf einem Klimawanderweg überhaupt sichtbar machen.

Wir betrachten auf der Landesgartenschau das lokale Klima, nicht das Klima von Bamberg, sondern das Klima in vielen kleinen Ecken auf der Landesgartenschau und in der Stadt Bamberg, an Stellen, die sich von anderen unterscheiden und immer wieder typische Verhältnisse zeigen. Lufttemperatur- und Luftfeuchte sind meist gar nicht so einheitlich wie wir glauben. Es gibt zwar an einem normalen Tag in der üblichen Messhöhe von 2 m Höhe kaum Temperaturunterschiede in Bamberg. Würde man aber etwas näher am Boden messen, wo in unseren Gärten die Pflanzen wachsen oder unter einem Blätterdach oder an einem Wasserlauf, dann können doch beachtliche Unterschiede auftreten. Und diese sind so typisch, dass man diese immer wieder findet und von einem lokalem oder Kleinklima spricht. Diesem wollen wir auf der Landesgartenschau nachspüren. Das sich so etwas ausbilden kann ist ein kompliziertes Wechselspiel von Strahlung, Erwärmung, Verdunstung und Wind – leider sehr komplex miteinander verknüpft, so dass man wie beim Klimasystem nicht immer ganz einfache Erklärungen hat, wie das auf den Schautafeln versucht wurde. Das zweite Kapitel ist deshalb nicht ganz leicht zu verstehen, denn es wird versucht, das komplizierte Wechselspiel erkennbar zu machen.

2. Entstehung des Lokalklimas

Grundvoraussetzung für die Entstehung des Klimas überhaupt ist die Energie, die die Erde von der Sonne durch Strahlung empfängt. Durch die Neigung der Erdachse um ca. 23° gegenüber der Bahnebene der Erde um die Sonne (Ekliptik) entsteht zumindest in den mittleren Breiten das typische Jahreszeitenklima (Abbildung 1) mit hohen Sonnenständen und starker Sonneneinstrahlung im Sommer und niedrigen Sonnenständen im Winter. Die Exponierung zur Sonne kann auch durch geneigte Flächen verändert werden, was beim Lokalklima eine besondere Rolle spielt.

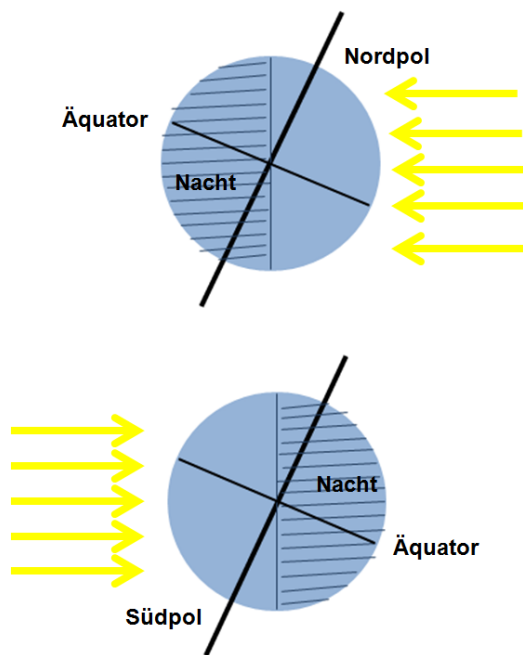


Abbildung 1: Position der Erde zur Sonne am (Nord-)Sommeranfang (oben) und am (Nord-)Winteranfang (unten)

Ein Großteil der Strahlungsenergie der Sonne wird im sichtbaren Licht ausgesandt auf Grund der hohen Temperatur der Sonne von ca. 6000 K. Daneben gibt es Anteile im ultravioletten und infraroten Licht. Hochenergetische ultraviolette Strahlungen mit sehr kleinen Wellenlängen werden glücklicherweise durch die Ozonschicht von der Erde ferngehalten, ansonsten würde hohe Krebsgefahr bestehen. Die Erde erreichen Strahlen mit Wellenlängen von $0,29$ bis $5 \mu\text{m}$, die als solare oder extraterrestrische kurzwellige Strahlung bezeichnet werden.

Jeder Körper hat die Eigenschaft Strahlung in Abhängigkeit von seiner Oberflächentemperatur in einem bestimmten Wellenlängenbereich auszustrahlen. Das gilt auch für die Erde und alles, was sich auf ihr befindet. Bei den typischen

Temperaturen ergibt sich dann eine terrestrische langwellige Strahlung in einem Wellenlängenbereich von ca. 3 bis 100 μm . Diese ist wahrscheinlich Wenigen bewusst und doch ist sie maßgeblich für unser Wärmeempfinden und auch das Lokalklima verantwortlich.

Die kurzwellige Sonnenstrahlung (Globalstrahlung) erreicht nur zu etwa 50 % die Erdoberfläche. Der Rest wird in Wolken absorbiert oder an diesen und an der Erdoberfläche reflektiert (Reflexstrahlung). Die trotz Wolken noch an die Erdoberfläche gelangende Strahlung wird als Himmelsstrahlung bezeichnet. Die an der Erdoberfläche absorbierte Strahlung wärmt die Unterlage auf, wobei Wasser und feuchte Oberflächen durch die hohe Wärmekapazität besonders viel Energie speichern können. Andere Oberflächen wie u. a. Sand werden zwar deutlich heißer, doch ist die Wärmekapazität und Wärmeleitung gering, so dass schon eine geringe Strahlungsmenge ausreicht, um die dünne Oberflächenschicht kräftig aufzuheizen. Ein Teil der kurzwelligen Strahlung wird auch reflektiert, und zwar um so mehr, je heller die Oberfläche ist, so dass bei frisch gefallenem Schnee fast 100 % erreicht werden, Sandflächen liegen bei 30-40% und Wasser ist mit deutlich unter 10 % am geringsten. Die meisten pflanzlichen Oberflächen liegen bei etwa 15-20 %. Das Verhältnis aus reflektierter und einfallender kurzwelliger Strahlung wird als Albedo bezeichnet und in der Regel in Prozent angegeben. An der Obergrenze der Atmosphäre erreichen uns im Sommer im Tagesmittel fast 500 W m^{-2} ($1 \text{ W m}^{-2} = 1 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) kurzwellige Strahlung, im Winter nur 100 W m^{-2} . Am Boden sind es durch Lufttrübung und Absorption durch Wolken im Mittel nur ca. 50 % davon.

Während kurzwellige Strahlung (abgesehen von der Ozonschicht in 20 km Höhe) nicht zur Erwärmung der Luft beiträgt, ist dies bei der langwelligen Strahlung nicht der Fall. Ihre Wellenlängen können von nicht symmetrischen Molekülen wie die des Wasserdampfes, des Kohlendioxids, des Methans, des Lachgases, des troposphärischen Ozons u.a., den sogenannten Treibhausgasen, absorbiert werden. Die Gase erwärmen sich dabei geringfügig. Sie werden durch ihre Eigentemperatur selbst wieder zu einem langwelligen Strahler, der in alle Richtungen strahlt. Während die langwellige Strahlung, die von unten kommt, als atmosphärische Ausstrahlung bezeichnet wird, wird die nach unten gerichtete langwellige Strahlung als Gegenstrahlung bezeichnet. Die natürlich in der Atmosphäre vorhandenen Treibhausgase führen dazu, dass die Erde um 33 Grad wärmer ist, als sie es ohne Treibhausgase wäre. Der natürliche Treibhauseffekt ist also Grundvoraussetzung dafür, dass auf der Erde in äquatorfernen Gebieten überhaupt Leben vorhanden ist. Verantwortlich ist die von den Gasmolekülen

wieder zur Erde zurückemittierte langwellige Strahlung. Der durch anthropogene Treibhausgase (durch menschliche Aktivitäten erzeugte Treibhausgase) verursachte Treibhauseffekt von gegenwärtig 1 bis 2 Grad ist demgegenüber relativ gering, aber eben groß genug, um deutliche Effekte im Klimasystem wie Gletscherschmelze, Polareisschmelze, Meeresspiegelanstieg, extreme Wetterlagen u.a. hervorzurufen.

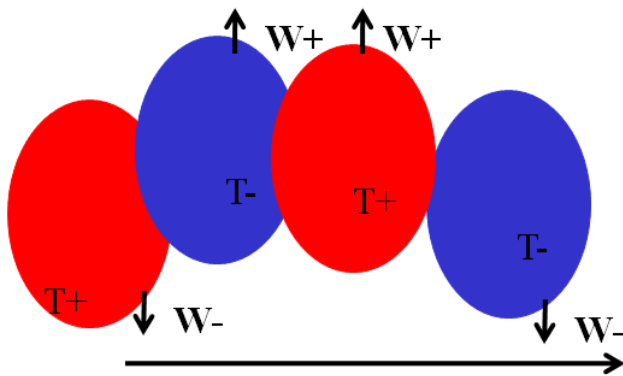


Abbildung 2: Schematische Darstellung warmer (T+) und kalter (T-) Turbulenzelemente. Durch die Verbindung mit einer aufwärtsgerichteten vertikalen Windkomponente (W+) oder einer abwärtsgerichteten vertikalen Windkomponente (W-) entsteht im turbulenten Windfeld der fühlbare Wärmestrom

Die Konzentration an Treibhausgasen reicht aber nicht aus, um die tägliche Erwärmung der Luft nach Sonnenaufgang hervorzurufen. Dieser Erwärmungsprozess erfolgt durch den sogenannten fühlbaren Wärmestrom. Die durch die kurzwellige Strahlung erwärmte Unterlage überträgt ihre Wärme im untersten Millimeter zuerst von Molekül zu Molekül (molekulare Leitung) aber schon unmittelbar darüber zu Luftkörpern, wobei die kleinsten eine Größe von Zentimetern haben. Diese Luftkörper werden als Turbulenzelemente oder turbulente Wirbel bezeichnet. Kleinere Wirbel vereinigen sich zu größeren, in größeren sind aber weiterhin auch kleinere vorhanden. Die Wirbel können sich relativ schnell bewegen und machen den „turbulenten“ Austausch deutlich effektiver als die molekulare Leitung unmittelbar über der Unterlage. In Kopfhöhe sind mehrere Dezimeter bereits die typische Größe und mit zunehmender Höhe werden die Wirbel immer größer. Die größten sind dann Hoch- und Tiefdruckgebiete. Für die Auf- und Abwärtsbewegung ist im Wesentlichen die Dichte des jeweiligen Luftkörpers verantwortlich und die vertikale Windgeschwindigkeit, die das tur-

bulente, d.h. das sich unregelmäßig und schnell verändernde, Windfeld auf den jeweiligen Wirbel ausübt. Dieser in Abbildung 2 schematisch skizzierte Auf- und Abwärtsfluss wird als fühlbarer Wärmestrom bezeichnet, der im Tagesgang für die Erwärmung der Luft bis zu mehreren 100 m Höhe verantwortlich ist.

Ähnlich verhält es sich mit der Verdunstung, das heißt dem Wasserdampffluss. Auch hier wird über Boden und Blättern im ersten Millimeter der Wasserdampf durch molekulare Diffusion transportiert. Darüber bilden sich Turbulenzelemente mit mehr oder weniger Gehalt an Wasserdampf, d. h. sie sind leichter oder schwerer als ihre Umgebung (Anmerkung: Feuchte Luft ist bei gleicher Temperatur leichter als trockene, da Wasserdampf das geringere Molekulargewicht von 18 g mol^{-1} gegenüber trockener Luft von 29 g mol^{-1} hat). Auch hier wird der Transport zusammen mit der Vertikalkomponente des Windes sehr effektiv. Die Verdunstung wird auch als latenter Wärmestrom bezeichnet, da für den Übergang von Wasser in Wasserdampf viel Energie gebraucht wird, die erst bei der Kondensation des Wasserdampfes in der Wolke wieder frei wird. Wasserdampf übt somit einen latenten Energietransport aus. Völlig analog verhält es sich bei Transport von anderen Gasen und Stoffen in der Atmosphäre.

Damit ist nun das energetische Bild der Atmosphäre komplett. Die einfallende kurzwellige Strahlung der Sonne liefert im jährlichen Mittel über die gesamte Erde 342 W m^{-2} . Nicht alles kommt bis zur Erdoberfläche. Ein Teil wird reflektiert, ein anderer durch Dunst und Wolken absorbiert. Sowohl die Erdoberfläche als auch Treibhausgase, Wolken und Dunst geben entsprechend ihrer Temperatur langwellige Strahlung ab. Schaut man sich die Bilanz aller Strahlungsströme an der Erdoberfläche an, so erhält die Erdoberfläche etwa 100 W m^{-2} mehr Strahlungsenergie als sie wieder abgibt. Diese 100 W m^{-2} werden durch die turbulenten Flüsse des fühlbaren und latenten Wärmestroms in die Erdatmosphäre wieder abgegeben und damit wird der Kreislauf geschlossen (Abbildung 3). Die Aufteilung dieser 100 W m^{-2} in fühlbaren und latenten Wärmestrom ist je nach Klimazone sehr unterschiedlich. In Wüsten und ariden Zonen überwiegt der fühlbare Wärmestrom. In unseren Breiten ist in der Regel der latente Wärmestrom etwa doppelt so groß wie der fühlbare. Aber auch die Unterlagen beeinflussen das Verhältnis aus fühlbarem und latentem Wärmestrom, welches Bowen-Verhältnis genannt wird. Und wie beeinflussen die zusätzlichen anthropogenen Treibhausgase diesen Kreislauf?

Da die Gasmoleküle die von unten nach oben gerichtete langwellige Strahlung (Ausstrahlung) absorbieren und anschließend wieder Strahlung entsprechend

ihrer Temperatur in alle Richtungen emittieren, verringert sich der langwellige Strahlungsfluss nach oben und die Stratosphäre kühlt sich ab, während die nach unten gerichtete Gegenstrahlung eine zusätzliche Erwärmung in der Troposphäre ermöglicht. Da beide Sphären wenig gekoppelt sind, kommt es zu keinem Ausgleich.

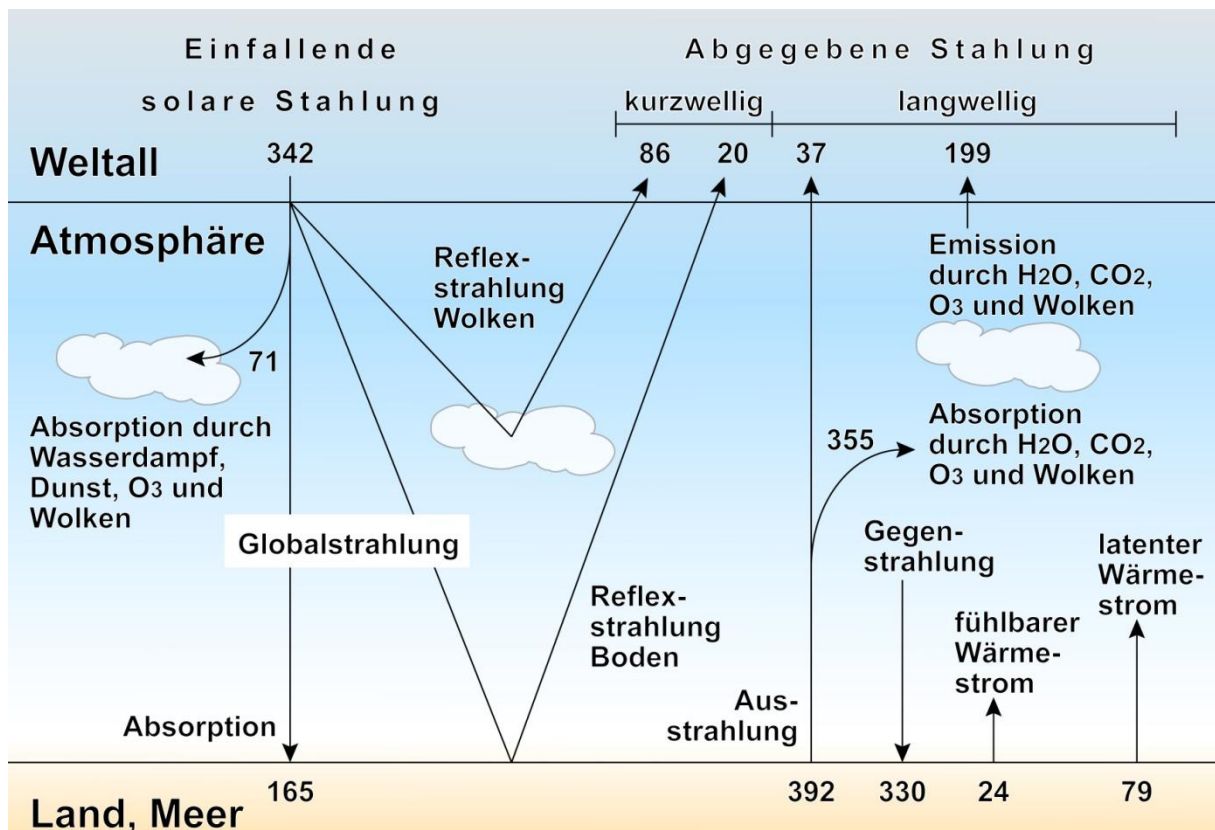


Abbildung 3: Kreislauf der Strahlungs- und Energieflüsse in der Atmosphäre (Zahlenangaben in W m^{-2})

Bevor dies nun auf das Lokalklima übertragen werden soll, zuerst ein praktisches Beispiel aus der Wohnung. Heizkörper sind optimal an der kältesten Stelle (unter dem Fenster) angebracht. Die erwärmte Luft steigt in turbulenten Wirbeln auf, während die sich abkühlenden Wirbel dann wieder zu Boden sinken und aus Kontinuitätsgründen Richtung Heizung strömen. Das ganze System kann man effektiver machen, in dem man den Heizkörper noch belüftet. Es ist also das klassische Beispiel des fühlbaren Wärmestroms, der die Wohnung erwärmt. Eine bauliche Fehlkonstruktion wäre ein großer Fensterstock oder eine verkleidete Heizung, die das senkrechte Aufsteigen der Turbulenzwirbel verhindert. Sind

jedoch die Fenster nicht mehrfach verglast, so empfinden wir den Raum trotz hoher Zimmertemperaturen als kalt. Ursache ist hier die langwellige Strahlung. Unser Körper gibt je nach Bekleidung eine langwellige Strahlung ab, die einer Temperatur von ca. 25-32 °C entspricht. Die kalte Fensterscheibe strahlt mit einer deutlich niedrigeren Temperatur. Es besteht also zwischen uns und dem Fenster eine große Differenz in den langwelligen Strahlungsströmen, die wir als unangenehm kalt empfinden. Ähnlich verhält es sich, wenn man nach einem heißen Sommertag in die (noch) kalte Wohnung kommt. Auch wenn die Temperatur eigentlich normal ist, sind alle Flächen doch merklich kühler als der aufgeheizte Körper und das Kälteempfinden tritt ein. Dem kann man problemlos abhelfen, wenn man einen Heizkörper auf etwas über 20 °C erwärmt. Wenn die Wärme mit Solarenergie erzeugt ist, ist es nicht einmal Energieverschwendung. Beim Lokalklima sieht es ähnlich aus und die Parallelen werden sehr schnell erkennbar.

Lokales Klima kann immer dann markant in Erscheinung treten, wenn insbesondere die Strahlungs- und Energieflüsse bei bestimmten Wetterlagen oder in bestimmten Zeitabschnitten kleinräumig beachtliche Unterschiede zeigen. Dabei zeigen die Global- und Himmelsstrahlung, sieht man von kurzzeitigen Unterschieden in der Bewölkung ab, kaum lokalklimatologische Unterschiede. Ausnahmen gibt es bei lokalen Zirkulationssystemen mit Wolkenbildung im Gebirge und an der Küste. Windgeschwindigkeit und Windrichtung sind zwar großräumig bestimmt und damit der Antrieb für die turbulenten Flüsse, sie können jedoch durch die Topographie und Hindernisse im Anströmbereich insbesondere bei niedrigen Windgeschwindigkeiten lokal größere Abweichungen zeigen. Die Temperatur und die Luftfeuchte zeigen in einheitlicher Luftmasse und gleicher Höhenlage in der Regel kaum markante Unterschiede. Ausgenommen sind Strahlungsnächte mit stärkerer Abkühlung durch langwellige Ausstrahlung. Hierbei können insbesondere in Bodennähe und bei den Minima räumlich beachtliche Unterschiede auftreten. Ähnlich verhält es sich mit der Bilanz aus allen Strahlungsströmen, die in Abhängigkeit von Albedo und Oberflächenfeuchte kleinräumig sehr variabel sein kann. Lokalklimatologisch relevante Einflüsse sind in Tabelle 1 zusammengestellt, wobei auch gezeigt wird, unter welchen Umständen kaum Unterschiede auftreten.

Tabelle 1: Lokalklimatisch relevante Größen

Meteorologische Größe	Umfang und Ursachen lokalklimatischer Unterschiede	Kaum mikroklimatische Unterschiede
Global und Himmelsstrahlung	kaum vorhanden	bei Horizontfreiheit, keine klimabedingten Wolken
Strahlungsbilanz	z.T. erheblich wegen Albedo und Oberflächentemperaturunterschieden	bei Horizontfreiheit und einheitlicher Unterlage
Windgeschwindigkeit und Windrichtung	z.T. erheblich im gegliederten Gelände und bei Hindernissen	große freie Anströmung über einheitlicher Unterlage ohne Hindernisse
Temperatur (allgemein) und Luftfeuchte	meist gering	offener Standort
Temperaturminimum, Temperatur in Bodennähe, Temperatur oberer Bodenschichten	z.T. erheblich, besonders in Tal-lagen und Mulden (auch kleinsträumig)	offener Standort
Niederschlag	z.T. erheblich	

3. Der Klimawanderweg

Der Klimawanderweg beginnt am alten Schleusenwärterhäuschen, also unweit des Eingangs. Die Bezeichnungen der 14 Informationstafeln sind in Tabelle 2 angegeben und die ungefähren Standorte in Abbildung 4. Das folgende Kapitel enthält neben den Inhalten der Tafeln fachlich weiterführende Erklärungen, die auf den im Kapitel 2 gegebenen Grundlagen aufbauen.

Tabelle 2: Die Tafeln des Klimawanderweges auf der Landesgartenschau 2012 in Bamberg

Nummer	Inhalt
1	Infotafel zum Klimawanderweg und zum Klima
2	Auswirkungen des Klimawandels
3	Steingartenklima
4	Strahlungsklima
5	Kleingartenklima
6	Heckenklima
7	Frostgefährdung
8	Parkklima
9	Stadtklima
10	Waldklima
11	Gewächshausklima
12	Seenklima
13	Klima offener Landschaften
14	Muldenklima



Abbildung 4: Standorte der Tafeln des Klimawanderweges auf der Landesgartenschau 2012 in Bamberg

3.1 Informationstafel zum Klimawanderweg

Die erste Tafel am alten Schleusenwärterhaus fasst das in der Einleitung schon gesagte zusammen (Originaltexte der Tafeln sind eingerahmt):

Der Klimawanderweg soll den Besuchern das Problem Klima und Klimawandel und die Bedeutung von Lokalklimaten für Flora und Fauna näher bringen. Dabei wird an 14 Stationen innerhalb des Geländes der Landesgartenschau gezeigt, dass Klima nicht etwas Abstraktes ist sondern Einflüsse auf den unmittelbaren menschlichen Lebensraum hat. Häufig sind kleinräumige lokalklimatische Unterschiede recht beachtlich, doch werden auch diese durch die immer stärker fortschreitende Erderwärmung beeinflusst. Der Weg soll aber auch dem Garteninteressierten zeigen, wie Lokalklimate bei entsprechender Gartengestaltung für die Pflanzungen optimale Umgebungsbedingungen schaffen können. Die Einbeziehung von lokalen Klimaten, wie sie in Siedlungsgebieten und ihrer Umgebung anzutreffen sind, soll auch den Blick für die Stadt- und Landschaftsgestaltung erweitern und helfen für den Erhalt der Umwelt wirksame Argumente zu liefern.

3.2 Auswirkungen des Klimawandels

Der Klimawandel vollzieht sich für das menschliche Empfinden sehr langsam und wird in unseren Breiten eher noch als angenehm empfunden. Für Tiere und insbesondere Pflanzen geht er aber rasant schnell von statten. Sie können nicht so schnell ihre Siedlungs- und Verbreitungsgebiete wechseln, wie sich Temperatur und Niederschlag ändern. Lokalklimatische Phänomene sind aber auch eine Chance zum Überleben, denn kleinräumige Unterschiede können manchmal stärker ausgeprägt sein, als die Änderung durch den Klimawandel. Lokalklima kann also ein Überleben kleiner Populationen in unserer Landschaft durchaus ermöglichen, das Landschaftsbild wird sich aber verändern und die Biodiversität ist gefährdet.

Dies soll aber nicht heißen, dass Lokalklima die Rettung vor dem Aussterben von Pflanzen und Tieren sein kann. Für Tiere sind die betroffenen Flächen in der Regel zu klein und für Pflanzen ist dies häufig auch nur eine Frist bis zu einem späteren Aussterben. Überlebende Populationen sind auch auf räumlich sehr enge Gebiete begrenzt.

Die Feststellung kann aber für den Menschen recht interessant sein. Der heiße Sommer 2003 mit über 40.000 Hitzetoten in Europa hat gezeigt, dass die Erderwärmung heiße und trockene Perioden mit sich bringt und diese für den Menschen insbesondere in Ballungsgebieten ein hohes Risikopotential beinhalten. Ein Aufenthalt in etwas kühleren Gegenden kann das Überleben bedeuten. Dies bedeutet aber für die Anlage von Kur- und Gesundheitseinrichtungen, dass jene Orte bevorzugt sind, die durch Ihre Lage bzw. durch die individuelle Lage der Kureinrichtungen in Hitzeperioden noch angenehm kühl sind. Man wird in den nächsten Jahren eine Umkehrung des Trends feststellen können, weg von warmen und sonnigen Kurorten (zumindest im Sommer) und hin zu kühleren und gut durchlüfteten Orten. Im Fichtelgebirge können beispielsweise Orte wie Bischofsgrün und Weißenstadt Gewinner sein.

3.3 Steingartenklima

Im Steingarten werden gleich mehrere Klimaphänomene ausgenutzt, um ein besonders warmes und trockenes Klima zu erzeugen. Die Steine dienen dabei als Wärmespeicher, da sie sich bei Sonneneinstrahlung stark erwärmen und in der Nacht lange die Wärme speichern und somit eine zu starke Auskühlung verhindern. Eine geneigte Anlage unterstützt diese Prozesse noch. Der Steingarten soll nach Süden bis Südwesten offen sein, um volle Sonneneinstrahlung zu ermöglichen aber auch Schutz gegen kalte Winterwinde aus Nordosten bieten. Ganz windgeschützt sollte er nicht sein, damit ausreichend Wasser verdunsten kann und der Steingarten sein trocken-warmes Lokalklima erhält.

Der Steingarten ist ein sehr schönes Beispiel, wie lokales Klima optimal ausgenutzt werden kann, um Wärme und Trockenheit liebenden Pflanzen auch in unseren Breiten optimale Lebensbedingungen zu geben. Dabei kommt den Steinen in Form einer kleinen Wand eine besondere Bedeutung zu. Diese sollte möglichst ganztägig von der Sonne beschienen werden. Die Steine speichern so viel Energie, dass sie tags wie nachts als langwelliger Strahler dienen. Am Tag ist dies vielleicht nur in den Übergangsjahreszeiten von Bedeutung – aber in der Nacht von erheblichem Nutzen. Die Abkühlung des Steingartenbeetes durch langwellige Ausstrahlung findet nur in einem Halbraum zur offenen Seite statt, während in der den Steinen zugewandten Richtung die langwellige Strahlungsbilanz nahezu ausgeglichen ist. Diese Reduktion der Abkühlung durch Ausstrahlung bei gleichzeitig vorhandener Wärmequelle kann zu einigen Grad höheren bodennahen Temperaturen führen. Entgegen den Erwartungen in einem warmen Steingarten sind fühlbarer Wärmestrom und Verdunstung sogar relativ niedrig, da die Steine das Windfeld abschirmen und somit die Voraussetzung für turbulente Energieflüsse. Dieser Windschutz ist gegen kalte Nordostwinde im Winter sicher sinnvoll, im Sommer sollte aber eine ausreichende Belüftung gewährleistet sein, damit das lokale Klima auch trocken ist, denn Wärme ohne Wind schafft noch keine ausreichende Verdunstung.

Die Nutzung von Steinwällen zur Veränderung des lokalen Klimas ist den Menschen seit alters her bekannt. Abbildung 5 zeigt Steinwälle auf Lanzarote. Diese schützen gegen den Nordostpassat, nicht weil er zu kühl ist, sondern weil er eine zu hohe Verdunstung in dieser wasserarmen Gegend verursachen würde. Außerdem bietet er der Pflanze durch die Steine noch ausreichend Wärme analog dem Steingarten.



Abbildung 5: Aprikosenbaum auf Lanzarote geschützt vor zu starker Verdunstung infolge des Nordostpassats durch einen nach Südwesten geöffneten Steinwall.

3.4 Strahlungsklima

Auf geneigte und nach Süden ausgerichtete Flächen scheint in unseren Breiten die Sonne zeitweise sogar senkrecht, so dass sehr viel Wärme an Pflanzen und Boden übertragen wird. Daher werden derartige Standorte für wärmeliebende Pflanzen – wie in Franken für den Wein – besonders bevorzugt. In der Nacht können diese Flächen durch ihre offene Lage stark auskühlen. Hier ist es wichtig, dass die oberhalb der Anpflanzungen entstehende Kaltluft gut in die Täler abfließen kann und Standorte im Tal nicht mit frostgefährdeten Pflanzen bestückt werden. Wichtig ist aber auch ein Schutz vor kalten Winden aus Nordwest bis Ost, so dass Südhänge an geschützten Talhängen besonders bevorzugte Standorte sind.

Die Intensität der einfallenden kurzwelligigen Strahlung ist immer dann besonders groß, wenn die Lichtstrahlen senkrecht auf eine Fläche fallen. Abbildung 6 zeigt, dass ein gleiches Strahlenbündel bei senkrechtem Einfall eine deutlich kleinere Fläche bestrahlt als das gleiche Bündel bei schrägem Einfall. Die Flächen mit senkrechtem Einfall, wie beispielsweise die Pyramidenseiten auf der Landesgartenschau, bekommen also mehr Energie ab und können sich stärker erwärmen. Diese Tatsache wird bei der Aufstellung von Solaranlagen genutzt. Der Aufstellungswinkel hängt von der geographischen Breite und der Sonnenhöhe in Jahreszeiten ab, in denen ein besonders hohes Energiepotential erwartet wird. Aufwendigere Anlagen drehen die Kollektoren immer so in die Sonne, dass ständig nur ein senkrechter Einfall der Strahlen vorhanden ist.

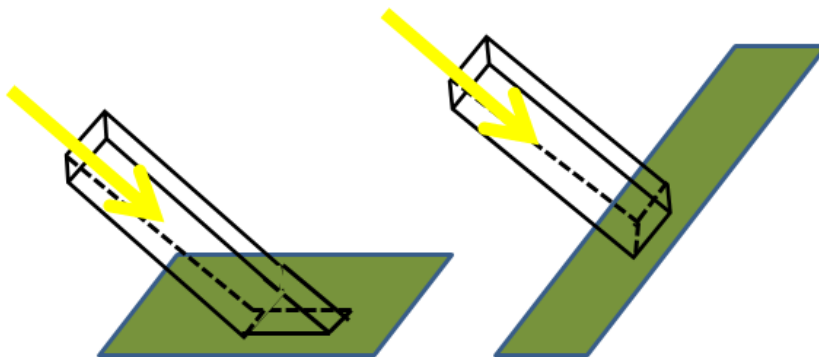


Abbildung 6: Schematische Darstellung von senkrechtem (rechts) und schrägem (links) Einfall der Sonnenstrahlen auf eine Fläche.

Eine optimale Ausnutzung des Strahlungsklimas erfolgt in Franken an den Weinbergen. Hier werden Südhänge mit maximaler Strahlungsausbeute bevorzugt (Abbildung 7). Der neu errichtete Weinberg am Michelsberg ist ein Beispiel dafür (siehe Abschnitt 4). In wärmeren Gegenden Deutschlands, wie in Rheinhessen, kann man Wein auch auf ebenen Feldern anbauen, was im Bamberger Raum unmöglich ist; immerhin gehört das fränkische Anbaugebiet neben den noch nördlicher gelegenen Gebieten an Elbe und Saale-Unstrut eher zu den kühleren deutschen Anbaugebieten. Hangige Weinberge haben weiterhin den großen Vorteil, dass Kaltluft gut abfließen kann. Man darf die Pflanzungen nur nicht bis an den tiefen Talboden ausdehnen und muss durch Wege und Mauern verhindern, dass Kaltluft von höher gelegenen Flächen oder aus Büschen und Wäldern auf den Kuppen in den Weinberg fließen kann. Die historischen Weinberge bei Steinbach vor den Toren Bamberg haben eine fischgrätenartige Struktur, die ein gutes Abfließen und Sammeln der Kaltluft ermöglicht.



Abbildung 7: Fränkische Weinbaulandschaft bei Zeil-Ziegelanger

3.5 Kleingartenklima

Bei der Anlage einer Laube mit Terrasse im Kleingarten sollte man sich vorab überlegen, ob man lieber in der Morgensonne frühstücken möchte oder eher lange Sommerabende noch bei Sonnenschein genießen will. Danach sollte die Terrasse eher nach Südosten oder Südwesten ausgerichtet werden. Beim Dach der Laube sollte man an ein Süddach denken, um die Sonnenenergie nutzen zu können. Windschutz durch Hecken von Nordwest bis Nordost ist für ein angenehmes Gartenklima ebenfalls günstig. Bäume als Schattenspendler sind wichtig, sollten aber nicht im Süden stehen und den ganzen Garten beschatten. Beim Hausbau gilt dies ebenso, wobei hier der Sichtschutz ggf. noch stärker beachtet werden sollte.

Die Gestaltung eines Kleingartens ist oft durch Vorschriften eingeschränkt. Dies betrifft sowohl den Standort der Laube als auch Anpflanzungen wie Bäume und Hecken. Wichtig ist, dass man dennoch an einige wichtige Fragen bei der Gar-

tengestaltung denkt. Der Garten sollte ausreichend kurzwellige Strahlung von der Sonne erhalten, ohne dass schattige Stellen völlig vermieden werden. An den stärker von der Sonne beschienenen Flächen wird man in der Regel wärme-liebende Pflanzen anbauen. Oft sind diese dann aber auch frostgefährdet – da relativ offen. Hecken, Büsche und Sträucher in angemessenem Abstand können in der Nacht die zu große Wärmeabstrahlung durch langwellige Strahlung vermindern und unterstützen eine ausgeglichene langwellige Strahlungsbilanz zwischen ihnen und den Anpflanzungen. Sinnvoll ist es, den Garten durch Hecken oder Büsche vor von außerhalb einfließender Kaltluft speziell an hangigen Lagen oder bei großen offenen Flächen in der unmittelbaren Nähe, zu schützen. Trotz allem Schutz vor Frost und Wunsch nach Schatten sollte man auf eine angemessene Durchlüftung achten. Dies ermöglicht nicht nur den Luftaustausch, sondern unterstützt die Verdunstung, denn gerade in Busch- oder Heckennähe ist diese durch die fehlende Luftbewegung gering und es kann z. B bei lehmigen Böden zur Vernässung führen. Der Windschutz ist auf alle Fälle sinnvoll von Nordwest über Nord bis Ost, um vor kalten Winden im Winter zu schützen.

3.6 Heckenklima

Hecken stellen nicht nur einen Sicht- und Windschutz her. In windstillen Nächten kann sich die Luft in unmittelbarer Heckennähe nicht so stark abkühlen wie auf freien Flächen. Grund ist die Wärmestrahlung der Hecke, die zumindest von einer Seite eine stärkere Auskühlung verhindert und damit die Frostgefährdung mindert. Durch die geringen Windgeschwindigkeiten in Heckennähe wird auch die Verdunstung reduziert. Damit ist es in Heckennähe in der Regel feuchter, insbesondere an der Schattenseite mit dem Nachteil einer stärkeren Moosbildung. Hecken in der Landschaft haben durch ihre Minderung der Windgeschwindigkeit einen positiven Einfluss auf die Vermeidung von Bodenerosion und stärkerer Austrocknung.

Zu Hecken ist schon manches gesagt, was nochmals zusammengefasst werden kann (siehe auch Abschnitt 3.13): Sie bieten einen guten Windschutz, sollten Flächen aber nicht zu eng umschließen, um ausreichend Durchlüftung und Verdunstung zuzulassen. Sie sind ein wirksamer Schutz gegen zu große nächtliche Abkühlung. Da ihre Temperatur etwa der der Unterlage entspricht, ist zwischen Anpflanzungen und der Hecke immer eine ausgeglichene langwellige Strahlungsbilanz. Für Anpflanzungen ist meist nur die heckenabgewandte Seite offen und kann sich durch langwellige Ausstrahlung abkühlen. In der Summe beider

Effekte ist es in Heckennähe etwas wärmer in der Nacht und die Frostgefährdung ist gemindert.

3.7 Frostgefährdung

Große freie Flächen sind in klaren windstillen Nächten – speziell im Frühling – besonders stark frostgefährdet. Ursache ist die ungehinderte Wärmeabstrahlung des Bodens. Hier kühlt sich die Luft stärker ab als unter Bäumen oder in bebauten Gebieten. Kann noch Kaltluft von benachbarten Hängen einfließen, wird der Effekt zusätzlich verstärkt. Besonders hoch ist die Nachfrostgefahr, wenn trockene Kaltluft aus dem hohen Norden eingeströmt ist (Eisheilige). Da hilft kaum ein Schutz. Empfindliche Kulturen kann man kurz vor Frostbeginn mit Wasser einsprühen, dann gefriert erst der Wasserfilm, bevor Blüten und Blätter erfrieren können. Leider sind die Eisheiligen nicht durch den Klimawandel abgeschwächt.

Die Frostgefahr (insbesondere die Gefahr von Spätfrösten) ist immer die Kombination einer speziellen Wetterlage mit einer lokalklimatologischen Verstärkung. An der Rückseite eines nach Osten abziehenden Tiefdruckgebietes bei gleichzeitig hohem Luftdruck über England kann von Norden sehr kalte und durch den direkten Weg über Skandinavien meist auch trockene Luft einfließen. Diese kommt in dem sich nach Osten ausdehnenden Hochdruckkeil zur Ruhe, d.h. Windgeschwindigkeit und Wolken nehmen ab. In dieser sehr kalten, trockenen und sauberen Luft ist die langwellige Gegenstrahlung des Himmels sehr gering und würde Temperaturen von -50 bis -60 °C entsprechen, also deutlich kälter als die bodennahen Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt. Die langwellige Ausstrahlung am Boden ist somit sehr groß und die Luft kann sich zum Teil erheblich abkühlen. Insbesondere offene und tief gelegene Flächen sind hier sehr frostgefährdet.

Generelle Maßnahmen gegen Spätfröste sind in den anderen Kapiteln durch geeignete Anpflanzungen schon erörtert worden. Wenn das Ereignis aber sehr stark ist oder man beispielsweise Streuobstwiesen nicht effektiv schützen kann, dann hilft in den Abend- und Nachtstunden vor dem erwarteten Frostereignis das Einsprühen von Blüten und empfindlichen Pflanzen mit Wasser. Damit Wasser gefrieren kann, muss ihm Energie durch Abkühlung entzogen werden. Dieser Prozess, bei der die Temperatur nicht unter 0 °C fällt, kann einige Zeit dauern und reicht oft schon, um die stärkste Auskühlung zu verhindern. Effek-

tiv, aber bei den Nachbarn sicher nicht beliebt, ist das Erzeugen von Rauch. In der nächtlichen stabilen Luftschichtung (am Boden kälter als in der Höhe) fehlt jeglicher turbulenter Austausch, d.h. die Luft hat eine geschichtete blätterteig-ähnliche Struktur. Der Rauch würde in einer Schicht über den Büschen sich anreichern und sich an der Obergrenze abkühlen. Dort treten nun die niedrigsten Temperaturen auf und unterhalb des Rauches wird die Bilanz der langwelligen Strahlung durch die Temperatur des Rauches und der Unterlage bestimmt. Da diese weitgehend ausgeglichen ist, kommt es zu keiner weiteren Abkühlung am Boden. In Niederungen kann man in derartigen Nächten dieses Phänomen am Nebel beobachten. Zuerst bildet sich dieser an der kältesten Stelle unmittelbar am Boden. Es dauert nicht lange und der Nebel hebt sich und bildet dünne Schichten, die oben weiter abkühlen, darunter aber eine weitere Abkühlung verhindern.

3.8 Parkklima

Ein Park soll zwei Funktionen haben, er soll kühle Luft an die umgebenden Stadtgebiete abgeben und an heißen Tagen angenehme Temperaturen aufweisen. Dazu müssen Parks relativ groß sein (Ausdehnung in alle Richtungen mindestens 500 m und keine Bebauungen) und viele offene Flächen besitzen, die sich in der Nacht abkühlen und dann Kaltluftspenden an die angrenzenden Stadtgebiete abgeben können. In trockenen Perioden muss allerdings gewährleistet sein, dass Parks bewässert werden können, denn feuchte Flächen bleiben kühl, während sich trockene stark erhitzen. Daneben sollten Baumgruppen ausreichend Schatten spenden. Der Typ des Englischen Gartens kommt diesem idealen Parkklima am nächsten.

Kleine Parks in Häuserlücken und an Straßen- oder Flussrändern sind im Stadtbild sehr beliebt und als Schattenspenden an heißen Sommertagen auch willkommen. Oft ist ihre nächtliche Auskühlung nicht groß genug, um die Maxima der Lufttemperatur am Tage deutlich zu mindern. Flächen, die auch als Kaltluftspender für umliegende Gebiete dienen können, müssen sich mindestens 500 m in alle Richtungen erstrecken, um genügend Luft in der Nacht produzieren zu können, die dann auch in die Umgebung abfließen kann. Besonders gut ist es, wenn die Parklandschaft genügend offene Stellen hat, die sich stärker abkühlen als die Baumgruppen (Englischer Garten). Im Bamberg entspricht der Hain weitgehend diesem Idealbild. Das Erba-Gelände der Landesgartenschau zusam-

men mit dem angrenzenden Main-Donau-Kanal kann auch eine derartige Funktion für den Stadtteil Gaustadt entwickeln.

Wichtig ist es aber, dass in Parks das Bowen-Verhältnis immer deutlich unter Eins bleibt, d.h. die Verdunstung muss größer als der fühlbare Wärmestrom sein. Dies bedeutet, dass größere offene Flächen, die notwendig sind für das Parkklima, aber durch die bessere Durchlüftung auch stärker austrocknen, immer feucht bleiben müssen, was durch den Einbau von Bewässerungsanlagen bei der Parkanlage berücksichtigt werden sollte. Anderenfalls überwiegt der fühlbare Wärmestrom und die Luft erwärmt sich deutlich und Parks können dann unangenehm heiß werden. Die zu starke Austrocknung kann dann sogar noch die Erosion von Boden unterstützen.

3.9 Stadtklima

Das Stadtklima wird durch den Klimawandel am ehesten ungünstig beeinflusst. Städte heizen sich durch die hohe Wärmekapazität von Steinen und Gebäuden besonders stark auf, wobei auch die Nacht durch die nur langsame Wärmeabgabe deutlich milder als im Umland ist. In Hitzeperioden beginnt die tägliche Erwärmung somit auf einem höheren Niveau als in der Umgebung, womit am Tage sehr hohe Temperaturen auftreten können. Um dem entgegen wirken zu können, sollten größere Parks angelegt werden und Kaltluftabflüsse aus der Umgebung ungehindert in die Stadt gelangen können. Bamberg hat mit dem Regnitztal und dem Hain sowie mit teilweise nicht zugebauten Kaltluftschneisen von den Hügeln recht gute Bedingungen.

Städte sind im Zeitalter der Klimaerwärmung die größten Sorgenkinder. Die hohe Verbauungsdichte und die Vielzahl versiegelter Flächen führen zu einer erheblichen Wärmespeicherung am Tag. Bowen-Verhältnisse deutlich über Eins verursachen große fühlbare Wärmeströme und erhöhen die Erwärmung der Luft. An heißen Sommertagen ist dies für die Bevölkerung sehr belastend. Auch wenn die Abendstunden in einer Stadt noch angenehm warm sein können, so sind es gerade diese hohen Nachttemperaturen, die dann bei der täglichen Erwärmung diese von einem höheren Niveau starten lassen als im Umland, so dass Städte deutlich wärmer sein können.

Es ist in Zeiten des Klimawandels eine vordringliche Aufgabe von Städteplanern, eine stärkere nächtliche Auskühlung durch die Anlage größerer zusammenhängender Parklandschaften und die Ermöglichung einer Frischluftzufuhr

aus dem Umland zu gewährleisten. Gerade auf diesem Gebiet ist in vielen deutschen Städten in den letzten Jahren gesündigt worden. Bamberg hat u.a. mit der Waldwiese in Gaustadt (siehe Abschnitt 4) eine Möglichkeit der Frischluftzufuhr. Es ist aber ständig darauf zu achten, dass diese Kaltluft auch ungehindert in das Zielgebiet abfließen kann und derartige Kaltlufttrassen nicht durch Verkehrswege zerschnitten werden. Der Kaltluftstrom würde sonst die Abgase in die zu schützenden Gebiete transportieren und der ganze Effekt wäre kontraproduktiv. Auch wenn wir heute Luftverschmutzung nicht mehr sehen und riechen können, so ist die Luft in Innenstädten und an Verkehrswegen häufig über das zulässige Maß mit Stickstoffoxiden und Feinpartikeln angereichert, so dass ein Austausch mit Frischluft weiterhin angeraten ist.

3.10 Waldklima

Wald hat nicht nur durch sein Wasserspeichervermögen und die hohe Aufnahme von Kohlendioxid eine wichtige Rolle im Klimasystem. Gerade das Waldklima empfinden wir als besonders angenehm an heißen Sommertagen. Die Luft erwärmt sich nur im oberen Kronenbereich und kann kaum in den Wald eindringen, da unter den Bäumen die kühlere und schwerere Luft aus den Morgenstunden nicht verdrängt wird und ein angenehmes Temperaturniveau schafft. In der Nacht kühlt sich auch zuerst der obere Kronenbereich ab. Diese schwerere kühlere Luft sinkt aber bis in den Stammraum ab. Trotzdem empfinden wir es noch als angenehm mild, da die Bäume im Gegensatz zur offenen Landschaft die Wärmeabstrahlung vom Boden verhindern.

Wald ist eher untypisch im Erba-Gelände, doch ist Bamberg von Wäldern eingeschlossen und sie sind das Ziel vieler Wanderfreunde, nicht zuletzt wegen des angenehmen Waldklimas. Am Tag erwärmt sich vor allem der Kronenraum. Diese warme und leichte Luft kann nur in sehr geringem Maße in den Stammraum absinken, meist nur im Zusammenhang mit kleinen Windböen. Somit bleibt es im Stammraum und auf Waldwegen angenehm kühl, meist einige Grad gegenüber dem Waldrand, also ideale Bedingungen an heißen Sommertagen (Abbildung 8). In der Nacht findet die Abkühlung durch langwellige Ausstrahlung auch im Kronenraum statt. Diese kühle und schwerere Luft sinkt nun aber in den Stammraum und mit nur geringer Verzögerung gleichen sich die Temperaturen an, so dass weitgehende Isothermie im Wald herrscht. Dennoch empfinden wir in der Nacht den Wald gegenüber dem Waldrand als angenehm warm. Ursache ist die langwellige Strahlungsbilanz im Wald. Da Waldboden und Kro-

nenraum nahezu die gleiche Temperatur haben, findet keine zusätzliche Abkühlung statt und auch die langwellige Strahlungsbilanz gegenüber unserer Körperoberflächentemperatur ist gering, so dass wir keinen Abkühlungseffekt verspüren. Die nahezu vorhandene Windstille unterstützt dieses Empfinden.

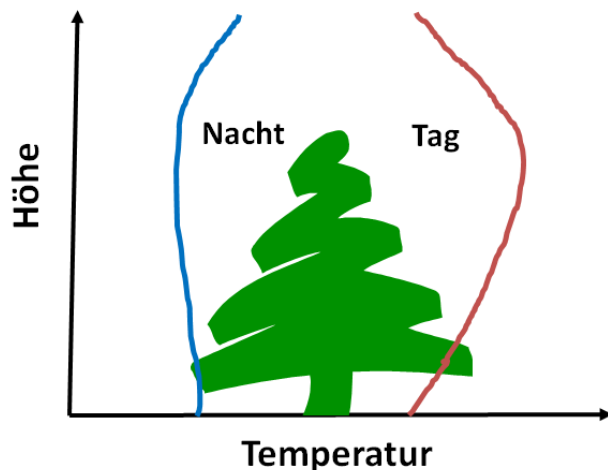


Abbildung 8: Temperaturverlauf in und über dem Wald am Tag und in der Nacht.

Wald ist ein natürlicher Speicher von Kohlendioxid, indem er mehr aufnimmt als er durch die Zersetzung u.a. von abgestorbener Biomasse wieder frei setzt. Der Schutz der Wälder ist somit gleichzeitig Klimaschutz und ein hoher Waldanteil in einer Region ist ein effektiver Beitrag zum Erhalt des Erdklimas. Bei der Waldnutzung ist zu beachten, dass diese durch Ausdünnung von bis zu einem Drittel der Bäume und Wiederaufforstung geschehen sollte. Nur so bleibt die Speicherwirkung des Waldes erhalten, denn bei einem Kahlschlag würde erst einmal 10-20 Jahre der Kohlenstoff aus dem Boden und Bruchholz freigesetzt. Beim Waldumbau durch Ausdünnung wird das freigesetzte Kohlendioxid gleich wieder assimiliert. Es tritt also ein Recycling ein.

Demgegenüber sind Ackerkulturen und intensiv genutzte Wiesen in der Regel Kohlendioxidquellen. Nur extensiv genutzte Wiesen in den Höhenlagen unserer Mittelgebirge mit nur 1-2 Mahden pro Jahr können auch Kohlendioxid speichern.

3.11 Gewächshausklima

Das Gewächshausklima zeigt uns im Kleinen, wie der Klimawandel funktioniert. Sonnenstrahlung durchdringt das Glas oder die Atmosphäre weitgehend ungeschwächt. Im Gewächshaus wird diese Strahlung absorbiert und dann als nicht sichtbare infrarote Wärmestrahlung abgegeben. Diese kann ebenso wenig das Glas durchdringen wie eine Atmosphäre mit Treibhausgasen und wird wieder zurück emittiert. Wie es im Treibhaus unerträglich heiß werden kann, so wärmt sich durch den Klimawandel auch die Erde zunehmend auf. Beim Gewächshaus kann man durch außen angebrachte Jalousien den Einfall von Sonnenstrahlung reduzieren, beim Erdklima muss man die Emission von Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan mindern.

Das Gewächshausklima ist ein Lehrbeispiel für die Wechselwirkung zwischen kurzwelliger solarer und langwelliger terrestrischer Strahlung. Dabei wird in besonderer Weise die Eigenschaft von Glas ausgenutzt, dass nur kurzwellige Strahlung mit Wellenlängen kleiner $3 \mu\text{m}$ hindurch lässt, während es für langwellige Strahlung undurchlässig ist. Somit gelangt Sonnenstrahlung in das Gewächshaus und wärmt die Oberfläche des Bodens und der Pflanzen auf. Durch den einsetzenden fühlbaren Wärmestrom nimmt die Temperatur im Innern des Gewächshauses rasch zu. Natürlich entsteht auch langwellige Strahlung, doch diese kann nicht entweichen und das Gewächshaus abkühlen. Sobald das Glasdach die gleiche Temperatur hat wie der Boden, ist eine ausgeglichene langwellige Strahlungsbilanz vorhanden. Durch die weitere Erwärmung des Bodens trägt auch die langwellige Strahlung zur Gesamterwärmung bei. Man kann die Temperatur in einem Gewächshaus nur durch Lüftung oder Verhinderung der Sonneneinstrahlung beispielsweise durch von außen (!) angebrachte Bastmatten mindern.

In der Nacht kann sich das Gewächshaus nicht weiter abkühlen als die Temperatur des Gewächshausdaches, da eine direkte Abstrahlung langwelliger Strahlung in die Atmosphäre nicht möglich ist. Das Gewächshausdach kann sich natürlich von außen durch langwellige Abstrahlung abkühlen. Wie stark sich der Effekt auch auf das Innere des Gewächshauses auswirken kann, hängt von der Isolationswirkung des Daches ab. Da in der Nacht das Dach die kälteste Stelle im Gewächshaus ist und die Luft am Tag bei den hohen Temperaturen viel Wasserdampf aufnehmen konnte, kommt es am Dach zur Kondensation von Wasserdampf. Häufig sind Maßnahmen notwendig, damit das Kondenswasser nicht bevorzugt an einzelnen Stellen auf die Pflanzen tropfen kann.

Foliendächer schränken nicht die langwellige Strahlung ein. Sie sind also kein echtes Gewächshaus. Durch die stärkere Erwärmung am Tag und eine etwas abgeschwächte Abkühlung in der Nacht eignen sie sich jedoch auch für frühe Kulturen im Frühjahr. Beim Spargel reicht es sogar aus, wenn man den Boden unmittelbar mit meist dunkler und dicker Folie belegt.

Der natürliche und anthropogene Treibhauseffekt (s. Abschnitt 2) funktioniert völlig analog. Die Funktion des Glasdaches übernehmen hier die Treibhausgase, die das Austreten von langwelliger Strahlung aus der Erdatmosphäre reduzieren und somit zur zusätzlichen Erwärmung der Troposphäre beitragen.

3.12 Seenklima

Wasser kann Wärme besonders gut und lange speichern. Daher ist es im Herbst und im frühen Winter aber auch an kühlen Sommermorgen in Wassernähe besonders mild. Es dauert aber auch lange, bis sich Wasser erwärmt hat. Gerade im Frühjahr ist es somit in Wassernähe deutlich kühler. Dieser Effekt ist umso stärker ausgeprägt, je größer die Wasserfläche ist. Bei kleinen Teichen wirkt sich dies nur in unmittelbarer Nähe aus. Eindrucksvoll ist jedoch ein als Seerauch bezeichnetes Phänomen, wenn kühle Luft über noch warme Seen streicht. Unterscheiden sich Wasser- und Lufttemperatur um etwa 10 Grad, steigt warme und feuchte Luft auf, wobei in der kalten Luft der Wasserdampf kondensiert und rauchartigen Nebel bildet.

Die Wärmekapazität von Wasser ist besonders hoch. Es dauert daher sehr lange bis es sich erwärmt, gibt aber die Wärme z.B. durch langwellige Strahlung auch nur langsam ab. Somit sind Wasserflächen im Frühjahr noch lange kühl im Herbst und Frühwinter dagegen noch länger warm. Dieser Effekt ist umso stärker, je größer die Wasserfläche ist. Das hat unmittelbare Wirkung auf das Lokalklima in Nähe der Wasserflächen mit kühleren Temperaturen im Frühjahr und am Tag und höheren Temperaturen im Herbst und in der Nacht. Durch den hohen Wasserdampfgehalt der Luft und das zeitige Einsetzen von Kondensation und Taufall sind Flächen nahe von Gewässern etwas weniger frostgefährdet. Diese Besonderheit ist bei Anpflanzungen zu beachten. Im Frühjahr wärmeliebende Pflanzen sollten möglichst nicht an Gewässern stehen, jedoch Pflanzen, die noch lange in den Herbst hinein blühen sollen.

Ist im Herbst und im Frühjahr nach einigen sonnenscheinreichen Tagen das Wasser in den Morgenstunden mehr als 10 Grad wärmer als die darüber strei-

chende kältere Luft, dann lösen sich von der erwärmten Wasseroberfläche warme turbulente Wirbel ab, wobei in der darüber liegenden kalten Luftschicht der Wasserdampf rasch kondensiert und sich rauchartiger Nebel (Seerauch) ausbildet (Abbildung 9). Seerauch reicht nur wenige Meter hoch. Das Phänomen kann an kleinen Teichen aber auch an der Regnitz und am Main-Donau-Kanal beobachtet werden. Über dem Meer können darin kleine Schiffe völlig verschwinden, die dann von größeren nicht mehr gesehen werden.

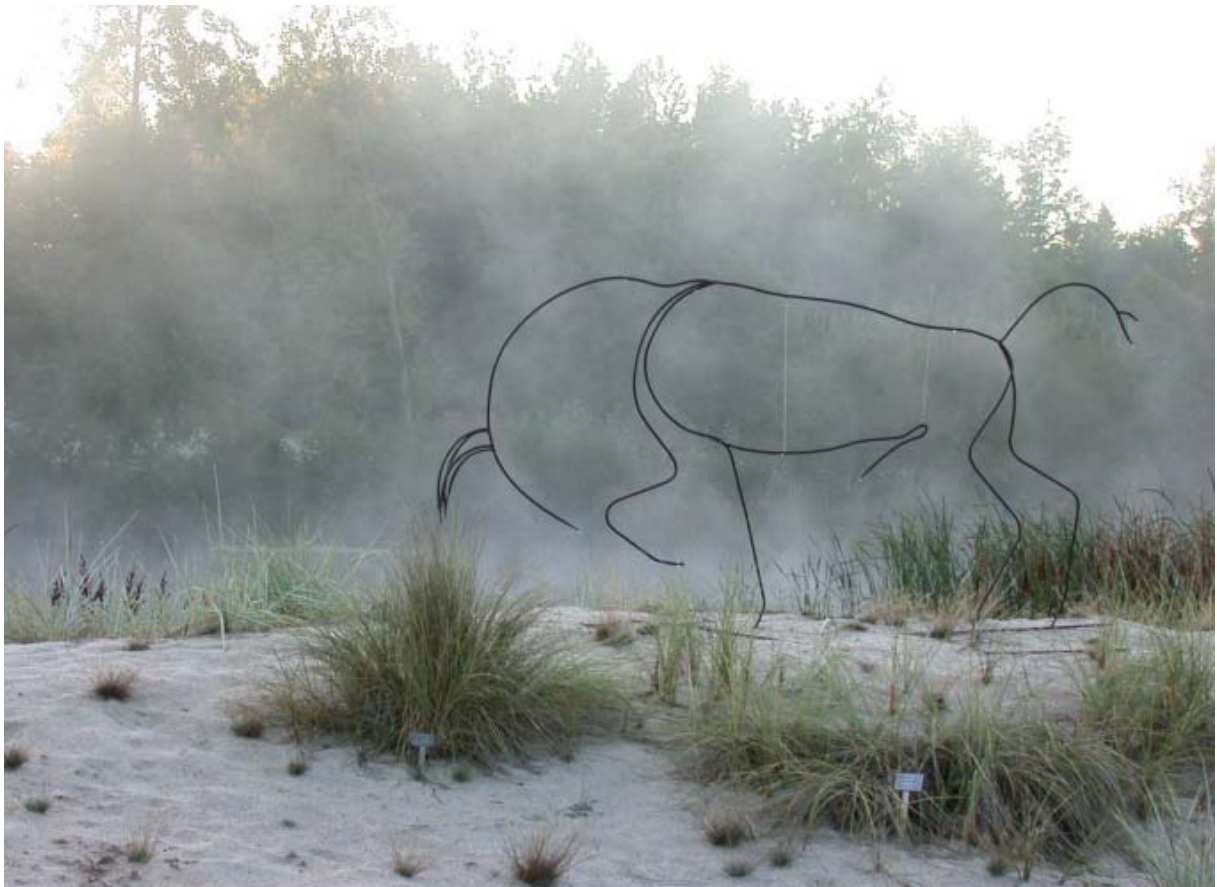


Abbildung 9: Seerauch über einem kleinen Teich im Ökologisch-Botanischen Garten der Universität Bayreuth

3.13 Klima offener Landschaften

Offene Landschaften sind meist nur mit wenigen Bäumen und Sträuchern besetzt. Wiesen und Felder prägen diese Landschaften. Sind keine Windschutzstreifen vorhanden, kann der Wind nahezu ungehindert wehen. Zusammen mit der hohen Sonneneinstrahlung kann die Verdunstung besonders groß werden, den Boden austrocknen und bei fehlender Pflanzendecke durch Winderosion weggetragen. In tieferen Lagen ist die Frostgefährdung und Nebelbildung besonders hoch. Derartige Landschaften erlangen eine große Bedeutung bei der Erzeugung regenerativer Energien: höhere Hochebenen und Erhöhungen für Windenergie und landschaftlich wenig nutzbare Lagen für Solarparks.

In offenen Landschaften erleben wir die volle Dynamik von kurzweiliger Einstrahlung und langweiliger Ausstrahlung. Sie sind daher eher kühler am Tag und in der Nacht als geschützte Stellen in der Nähe von Bäumen und Büschen. Hinzu kommt, dass der Wind nahezu ungehindert über diese Landschaften wehen kann. Man empfindet dadurch noch eine zusätzliche Abkühlung (Windchill). Die gute Durchmischung der Luft fördert die Verdunstung. Ist nicht genügend Wasser vorhanden, kann es leicht zur Austrocknung kommen und insbesondere bei leichten Böden zur Erosion. Diesen unangenehmen Effekt kennen die Menschen seit alters her. In Norddeutschland und insbesondere in England sind Windschutzstreifen durch Büsche und Steinwälle landschaftsprägend. Diese haben typische Abstände in Hauptwindrichtung von ca. 100 m. Dies ist genau der Abstand, den das Windfeld angehoben wird, bevor es wieder in voller Stärke den Boden erreicht (Abbildung 10).

Offene Landschaften eignen sich besonders gut zur Gewinnung regenerativer Energien. Liegen diese Flächen höher, so sind sie ideal für die Windenergienutzung, denn weder Baumgruppen noch Gebäude heben das Windfeld an, so dass die volle Windstärke ausgenutzt werden kann. Leider fehlen diese Flächen weitgehend in der Bamberger Umgebung, so dass bei der Windenergienutzung sehr sorgfältig darauf geachtet werden muss, damit sich nicht kleine Waldstücke und Erhebungen negativ auf die Energieausbeute auswirken.

Insbesondere bei weniger fruchtbaren Böden eignen sich diese Landschaften auch zur Solarenergiegewinnung, da sie auch bei niedrigen Sonnenständen keine Abschattungseffekte haben. Im Bamberger Raum kommt noch ein lokaler Effekt hinzu. Im Lee des Steigerwaldes ist es besonders wolkenarm und sonnenscheinreicher als in übrigen Gebieten. Bevorzugt ist das Gebiet östlich der Autobahn

bis nach Scheßlitz und Litzendorf, bevor sich an der Albtrauf wieder Wolken bilden können.



Abbildung 10: Windschutzwälle aus Steinen und Büschen in der offenen Landschaft in Südwestengland (Cornwall)

3.14 Muldenklima

Mulden haben kein erstrebenswertes Lokalklima und die Nutzung als Kinderspielplatz ist nicht sehr optimal. In Mulden sammelt sich die Kaltluft, so dass sie am frühen Abend bereits kühl sind und am Morgen länger bis zur Erwärmung brauchen. Die Sonneneinstrahlung erreicht die Mulde erst bei hohen Sonnenständen – im Winter oft gar nicht. Mulden bieten zwar einen Windschutz, doch die schwache Luftbewegung führt auch zu einer geringeren Verdunstung. Zusammen mit dem in Mulden oft angesammelten Regenwasser sind sie somit ausgesprochen feucht. Nur an sehr heißen Tagen mit hoher Sonneneinstrahlung und wenig Luftbewegung ist es in Mulden warm, meist dann sogar unangenehm warm.

So mancher wird Mulden mit den Attributen kühl und feucht verbinden. Man vermeidet diese Stellen eigentlich, und dennoch werden diese scheinbar unnützen Flächen immer wieder genutzt, wobei Kinderspielplätze sicher zu den ungeeignetsten Möglichkeiten zählen. Warum nicht ein Feuchtbiotop? Die Ursachen für diese schlechte Bewertung ist vielfältig: Insbesondere im Winterhalbjahr kommt wenig Sonne in die z.T. tief eingeschnittenen Mulden und Bachtäler. Durch den fehlenden Wind wird zudem die Verdunstung reduziert und es bleibt in der Mulde immer relativ feucht, zumal sich auch von den Seiten abfließendes Regenwasser noch sammeln kann. Jeder Energieüberschuss aus der Strahlung wird jedoch für die Verdunstung benötigt bevor der fühlbare Wärmestrom die Luft erwärmen könnte. Ein bescheidener Vorteil ist es, dass in der Nacht die langwellige Strahlung von den Muldenhängen ein stärkeres Auskühlen verhindert, wenn nicht Kaltluft ungehindert in die Mulde fließen kann. Und dennoch brauchen Mulden unsere Aufmerksamkeit; eine sinnvolle Gestaltung kann davor schützen, dass sie zur Müllkippe verkommen.

4. Der erweiterte Klimawanderweg zur Altstadt

Wer noch nicht genug hat an Lokalklima und auch noch etwas die bergige Seite von Bamberg kennen lernen will, der sollte nicht gedankenlos einen der angebotenen Wege Richtung Altstadt wählen. Der erweiterte Klimawanderweg (ohne Auszeichnungen) ist mit Sicherheit ein Erlebnis (Abbildung 11).



Abbildung 11: Stationen des erweiterten Klimawanderweges bis zum Michelsberg.

Der Weg beginnt unweit des Eingangs zur Landesgartenschau an der Kreuzung Schweinfurter Straße / Regensburger Ring. Sie folgen dem Fußweg neben der Caspersmeyerstraße. Der geht schnell in einen **Hohlweg** über. Insbesondere an Sommerabenden ist es dort noch recht warm. Die Auskühlung durch langwellige Ausstrahlung ist gering, da nahezu von allen Seiten die Böschung und Büsche den Weg umschließen. Kommt man dann nach wenigen 100 m auf der Höhe aus

dem Hohlweg wird es schon merklich kühler. Der Hohlweg ist aber auch zu eng, um als effektive Kaltluftabflussschneise geeignet zu sein.

In Höhe des REWE-Marktes überquert man die Straße und Richtung Süden das ökologische Wohngebiet **Cherbonhof** (Rattlerstraße). Ab dem Kindergarten folgt man immer dem Bamberger Weg, der im Norden entlang einer großen **Waldwiese** unterhalb des Michelsberger Waldes führt. Dies ist das effektivste Kaltluftquellgebiet der Stadt Bamberg. Nicht nur die große freie Wiese kann sich durch langwellige Ausstrahlung sehr gut abkühlen. Gleiches gilt auch für die Baumkronen. Die entstehende Kaltluft sinkt in den Stammraum und durch die Hanglage gelangt sie auf die Wiese. Nicht alle Abflusstrassen sind wünschenswert frei, damit die Luft auch gut Richtung Stadt abfließen kann. Die wabernde Kaltluftmasse (man stelle sich große Luftballons vor) wird häufig schon an Baumgruppen und Häusern aufgehalten und muss schon eine größere Mächtigkeit erreichen, um diese zu überwinden. Diese Frischluftzufuhr ist gerade an heißen Sommertagen, die durch Klimawandel noch verstärkt sein können, von hoher Wichtigkeit, denn die tägliche Erwärmung durch den fühlbaren Wärmestrom beginnt dann auf einem niedrigeren Temperaturniveau und die Maxima können reduziert werden. Heute hört man kaum noch das Argument des Ersetzens der staub- und schmutzbeladenen städtischen Luft. Dabei ist es heute genauso wichtig, denn die Luft nahe den Verkehrswegen ist mit Stickoxiden und Feinstaub belastet, obwohl man diese nicht minder gefährliche Belastung heute nicht mehr sieht. Den tiefsten Punkt erreichen wir am **Ottobrunnen**.

Nun steigen wir wieder bergan zum „Michelsberg“, durchqueren die Klosteranlage, genießen den schönen Blick auf Bamberg und finden an der Südseite den zur Landesgartenschau wieder neu angelegten **Weinberg** und die historische **Orangerie**. Die Erbauer des Klosters wussten lokalklimatologisch sehr genau, wo der beste Platz an der ganzen Klosteranlage für die Orangerie ist, und der Weinberg ist ein optimal gelegener Südhang in Bamberg, von denen es nicht so viele gibt. Umsonst beginnt das fränkische Weinanbaugebiet nicht erst vor den Toren der Stadt in Unterhaid, obwohl die Regnitz-Niederung bei Bamberg das wärmste Gebiet Oberfrankens ist. Am Tage fällt auf dem Weinberg die Sonne nahezu senkrecht auf den Hang ein, dies besonders im Frühjahr und Herbst, wenn schon bzw. noch viel Wärme benötigt wird. Begrenzungsmauern schützen den Weinberg vor von oben einfließender Kaltluft, während nach unten Kaltluft gut abfließen kann. Von hier sind es nun nur noch wenige Minuten über den Benediktinerweg zum Domberg oder in die Altstadt.

Weiterführende Literatur:

Beierkunlein, C.; Foken, T.: Klimawandel in Bayern. Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten, Bayreuther Forum Ökologie No. 113, 501 S., 2008

Bendix, J.: Geländeklimatologie, Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 282 S., 2004.

Foken, T.: Das Klima von Bayreuth, Status quo und Aufgaben für die Stadtplanung, Standort - Zeitschrift für Angewandte Geographie, 31, 150-152, 2007

Foken, T.: Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, Springer, Berlin, Heidelberg, 2. Aufl., 326 S., 2006.

Foken, T.; Lüers, J.; Lauerer, M.; Aas, G.: Im Ökologisch-Botanischen Garten: Dem Klima auf der Spur, 28 S., 2004

Häckel, H.: Meteorologie, 7. Aufl., Ulmer, Stuttgart, 448 S., 2012.

Häckel, H.: Wetter & Klimaphänomene, Ulmer, Stuttgart, 333 S., 2007

Quellen:

Tabelle 2: Foken, T.: Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, Springer, Berlin, Heidelberg, 2. Aufl., 326 S., 2006

Abbildung 3: Königliches Niederländisches Meteorologisches Institut (KNMI), übersetzt und modifiziert

Abbildung 4: Kartengrundlage Landesgartenschau Bamberg 2012

Abbildung 9: Foken, T.; Lüers, J.; Lauerer, M.; Aas, G.: Im Ökologisch-Botanischen Garten: Dem Klima auf der Spur, 28 S., 2004

Abbildung 11: Kartengrundlage Landesgartenschau Bamberg 2012

Volumes in the series ,University of Bayreuth, Department of Micrometeorology, Arbeitsergebnisse'

Nr	Author(s)	Title	Year
01	Foken	Der Bayreuther Turbulenzknecht	01/1999
02	Foken	Methode zur Bestimmung der trockenen Deposition von Bor	02/1999
03	Liu	Error analysis of the modified Bowen ratio method	02/1999
04	Foken et al.	Nachfrostdgefährdung des ÖBG	03/1999
05	Hierteis	Dokumentation des Experimentes Dlouhá Louka	03/1999
06	Mangold	Dokumentation des Experimentes am Standort Weidenbrunnen, Juli/August 1998	07/1999
07	Heinz et al.	Strukturanalyse der atmosphärischen Turbulenz mittels Wavelet-Verfahren zur Bestimmung von Austauschprozessen über dem antarktischen Schelfeis	07/1999
08	Foken	Comparison of the sonic anemometer Young Model 81000 during VOITEX-99	10/1999
09	Foken et al.	Lufthygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales, Zwischenbericht 1999	11/1999
10	Sodemann	Stationsdatenbank zum BStMLU-Projekt Lufthygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales	03/2000
11	Neuner	Dokumentation zur Erstellung der meteorologischen Eingabedaten für das Modell BEKLIMA	10/2000
12	Foken et al.	Dokumentation des Experimentes VOITEX-99	10/2000
13	Bruckmeier et al.	Documentation of the experiment EBEX-2000, July 20 to August 24, 2000	01/2001
14	Foken et al.	Lufthygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales	02/2001
15	Göckede	Die Verwendung des Footprint-Modells nach Schmid (1997) zur stabilitätsabhängigen Bestimmung der Rauigkeitslänge	03/2001
16	Neuner	Berechnung der Evaporation im ÖBG (Universität Bayreuth) mit dem SVAT-Modell BEKLIMA	05/2001
17	Sodemann	Dokumentation der Software zur Bearbeitung der FINTUREX-Daten	08/2002
18	Göckede et al.	Dokumentation des Experiments STINHO-1	08/2002
19	Göckede et al.	Dokumentation des Experiments STINHO-2	12/2002
20	Göckede et al	Characterisation of a complex measuring site for flux measurements	12/2002
21	Liebenthal	Strahlungsmessgerätevergleich während des Experiments STINHO-1	01/2003
22	Mauder et al.	Dokumentation des Experiments EVA_GRIPS	03/2003

23	Mauder et al.	Dokumentation des Experimentes LITFASS-2003, Dokumentation des Experimentes GRASATEM-2003	12/2003
24	Thomas et al.	Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment	05/2004
25	Göckede et al.	Qualitätsbegutachtung komplexer mikrometeorologischer Messstationen im Rahmen des VERTIKO-Projekts	11/2004
26	Mauder & Foken	Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2	12/2004
27	Herold et al.	The OP-2 open path infrared gas analyser for CO ₂ and H ₂ O	01/2005
28	Ruppert	ATEM software for atmospheric turbulent exchange measurements using eddy covariance and relaxed eddy accumulation systems and Bayreuth whole-air REA system setup	04/2005
29	Foken (Ed.)	Klimatologische und mikrometeorologische Forschungen im Rahmen des Bayreuther Institutes für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK), 1989-2004	06/2005
30	Siebeke & Serafimovich	Ultraschallanemometer-Überprüfung im Windkanal der TU Dresden 2007	04/2007
31	Lüers & Bareiss	The Arctic Turbulence Experiment 2006 PART 1: Technical documentation of the ARCTEX 2006 campaign, May, 2nd to May, 20th 2006	07/2007
32	Lüers & Bareiss	The Arctic Turbulence Experiment 2006 PART 2: Visualization of near surface measurements during the ARCTEX 2006 campaign, May, 2nd to May, 20th 2006	07/2007
33	Bareiss & Lüers	The Arctic Turbulence Experiment 2006 PART 3: Aerological measurements during the ARCTEX 2006 campaign, May, 2nd to May, 20th 2006	07/2007
34	Metzger & Foken et al.	COPS experiment, Convective and orographically induced precipitation study, 01 June 2007 – 31 August 2007, Documentation	09/2007
35	Staudt & Foken	Documentation of reference data for the experimental areas of the Bayreuth Centre for Ecology and Environmental Research (BayCEER) at the Waldstein site	11/2007
36	Serafimovich et al.	ExchanGE processes in mountainous Regions (EGER) - Documentation of the Intensive Observation Period (IOP1), September, 6th to October, 7th 2007	01/2008
37	Serafimovich et al.	ExchanGE processes in mountainous Regions (EGER) - Documentation of the Intensive Observation Period (IOP2), June, 1st to July, 15th 2008	10/2008
38	Siebicke	Footprint synthesis for the FLUXNET site Waldstein/Weidenbrunnen (DE-Bay) during the EGER experiment.	12/2008
39	Lüers & Foken	Jahresbericht 2008 zum Förderprojekt 01879 - Untersuchung der Veränderung der Konzentration von Luftbeimengungen und Treibhausgasen im hohen Fichtelgebirge 2007 – 2013	01/2009
40	Lüers & Foken (Eds.)	Proceedings of the International Conference of "Atmospheric Transport and Chemistry in Forest Ecosystems" Castle of Thurnau, Germany, Oct 5 to Oct 8, 2009	10/2009
41	Biermann et al.	Mesoscale circulations and energy and gas exchange over the Tibetan Plateau – Documentation of the micrometeorological experiment, Nam Tso, Tibet, 25 June 2009 – 08 August 2009	12/2009
42	Foken & Falke	Documentation and Instruction Manual for the Krypton Hygrometer Calibration Instrument	01/2010 Update: 12/2011

43	Lüers & Foken	Jahresbericht 2009 zum Förderprojekt 01879 - Untersuchung der Veränderung der Konzentration von Luftbeimengungen und Treibhausgasen im hohen Fichtelgebirge 2007 – 2013	07/2010
44	Biermann et al.	Tibet Plateau Atmosphere-Ecology-Glaciology Cluster Joint <i>Kobresia</i> Ecosystem Experiment: Documentation of the first Intensive Observation Period (IOP 1) summer 2010 in Kema, Tibet	01/2011
45	Zhao et al.	Complex TERRain and ECOlogical Heterogeneity (TERRECO);WP 1-02: Spatial assessment of atmosphere-ecosystem exchanges via micrometeorological measurements, footprint modeling and mesoscale simulations ; Documentation of the Observation Period May 12 th to Nov. 8 th , 2010, Haean, South Korea	03/2011
46	Mauder & Foken	Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3	05/2011
47	Serafimovich et al.	ExchanGE processes in mountainous Regions (EGER)- Documentation of the Intensive Observation Period (IOP3) June, 13 th to July, 26 th 2011	11/2011
48	Hübner et al.	Documentation and Instruction Manual for the Horizontal Mobile Measuring System (HMMS)	12/2011
49	Lüers et al.	The Arctic Turbulence Experiment 2009 - additional laser Scintillometer measurement campaign 2009 at the Bayelva catchment on Svalbard: Technical documentation and visualization of the near surface measurements during the ARCTEX-2009 campaign, August, 10 th to August, 20 th 2009	02/2012
50	Foken	Klimawanderweg auf der Landesgartenschau in Bamberg 2012	04/2012