

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie

Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel

Band: 52 (2011)

Heft: 1

Artikel: Verbesserung des Stadtklimas durch Dachbegrünung?

Autor: Parlow, Eberhard / Kleiber, Thomas / Vogt, Roland

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088230>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Verbesserung des Stadtklimas durch Dachbegrünung?

Eberhard Parlow, Thomas Kleiber und Roland Vogt

Zusammenfassung

Das Stadtklima wird durch den Menschen direkt modifiziert und unterscheidet sich von dem des nicht bebauten, meist ruralen Umlandes. Stadtklima und Planung sind seit Jahrzehnten eng verknüpft und in vielen Städten werden stadtplanerische Massnahmen, wie z. B. die Begrünung von Dächern, ergriffen, um dadurch das urbane Klima positiv zu beeinflussen. In diesem Beitrag wird der Frage nachgegangen, ob ein begrüntes Dach zumindest im lokalen Kontext insgesamt kühlend auf das städtische Klima wirkt und ob dieser Effekt quantitativ nachweisbar ist. Dazu wurden die Strahlungs- und Energieflüsse eines begrünten und eines mit Kies bedeckten Flachdaches in der Innenstadt von Basel bestimmt und miteinander verglichen.

1 Einleitung

Die Begrünung von Flachdächern hat in den letzten Jahren in zahlreichen Städten an Bedeutung gewonnen oder steht in vielen Fällen auf der politischen Agenda der Stadtplanung. Ursprünglich stand die Idee dahinter, einen Teil der verdrängten Natur wieder in die Stadt zurückzubringen (Brenneisen 2003). Da die begrünten Dachflächen meist nicht bewässert werden und nur eine relativ dünne Substratschicht aufweisen, stellen sie ideale Standorte für wärme- und trockenheitsliebende und teilweise seltene Pflanzen und Insekten dar (Brenneisen 2003; Krupka 1992). Eine für die Bewohner des Hauses positive Auswirkung der Dachbegrünung ist ihre isolierende Wirkung, welche besonders im Sommer für ein angenehmeres Raumklima im Gebäude beitragen kann (Bornkamm et al. 1988).

Ein erhoffter zusätzlicher Aspekt ist die mögliche Verbesserung des Stadtklimas durch die begrünten Dächer, der dem “städtischen Wärmeinseleffekt” entgegenwirken soll. Besonders in den Nächten ist die Lufttemperatur in den Städten gegenüber dem Umland deutlich erhöht und kann im Sommer zu einer grossen Belastung für die städtische Bevölkerung werden. Im Hitzesommer 2003 nahmen in der Schweiz die Todesfälle in Basel und Genf am stärksten zu, was Grize et al. (2005; 2006) auf die besonders hohen Nachttemperaturen in diesen Städten zurückführen.

Adresse der Autoren: Prof. Dr. Eberhard Parlow, Dr. Roland Vogt, Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, Klingelbergstrasse 27, CH-4056 Basel; E-Mail: eberhard.parlow@unibas.ch, roland.vogt@unibas.ch
M.Sc. Thomas Kleiber, SF Meteo, Postfach, CH-8052 Zürich

2 Strahlungs- und Wärmehaushalt einer Stadt

Das Klima einer Stadt unterscheidet sich auf viele Arten von ihrer ruralen Umgebung. Am auffälligsten ist oft die Belastung der Luft durch Schadstoffe. Eine andere wichtige und ebenso prägnante Veränderung ist die Erhöhung der mittleren Lufttemperatur. Zum ersten Mal wissenschaftlich beschrieben wurde dieses Phänomen vor zweihundert Jahren in London (*Howard 1833*). Howard stellte fest, dass es im Zentrum von London markant wärmer war als ausserhalb der Stadt, wobei er einen Tagesgang dieser Differenz feststellte. In der Nacht war der Unterschied mit 3.7 K sehr ausgeprägt, tagsüber war dagegen die Stadt sogar um 0.3 K kühler. Diese Erkenntnis löste verschiedene Arbeiten über das Stadtklima aus. Erst viel später jedoch, im Jahr 1958, erhielt das Phänomen der erhöhten städtischen Mitteltemperatur einen Namen. *Manley (1958)* nannte es “urban heat island” resp. die “städtische Wärmeinsel”, im Folgenden UHI genannt.

Auch wenn jede Siedlung Besonderheiten bezüglich ihres lokalen Klimas aufweist, so gibt es doch klare Tendenzen: Die UHI kann zwar bereits bei kleinen Siedlungen festgestellt werden, sie intensiviert sich jedoch mit zunehmender Siedlungsgröße und ist häufig im Stadtzentrum am stärksten ausgeprägt (*Eriksen 1976; Oke 1982; Parlow 1998; Landsberg 1981; Bornkamm et al. 1988*). Austauscharme Strahlungswetterlagen, bei der die lokale Besonderheit der Stadtoberfläche am stärksten zum Tragen kommt, unterstützen die Ausbildung der UHI (*Oke 1982*). Auch die geographische Breite spielt eine Rolle. In tropischen und subtropischen Städten ist die UHI weniger ausgeprägt als in höheren Breiten (*Landsberg 1981*). Weiter hängt sie von der Jahreszeit, den vorhandenen Flurwinden und der Verteilung der Vegetation in der Stadt ab (*Kuttler 1985; Kuttler 1993; Peterson 2003*).

Für die Untersuchung, ob eine Dachbegrünung einen positiven Effekt auf das Stadtklima aufweist, muss man die Energiebilanz verschiedener Dachoberflächen mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften analysieren. Die Energiebilanz setzt sich aus zwei Hauptkomponenten zusammen: a) dem lokalen Strahlungshaushalt und b) den vertikalen Wärmeflüssen zwischen der Atmosphäre und der Oberfläche. Die für die Oberfläche gültige Strahlungsenergie setzt sich somit aus folgenden Strahlungsflüssen zusammen:

$$R_n = R_{sd} + R_{ld} - R_{su} - R_{lu}$$

mit: R_n Strahlungsbilanz,
 R_{sd} Globalstrahlung,
 R_{ld} Atmosphärische Gegenstrahlung,
 R_{su} Kurzwellige Reflexstrahlung und
 R_{lu} Terrestrische Emission.

Die Strahlungsbilanz als Summe der kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse kann positiv (meist am Tage) oder negativ (meist in der Nacht) sein und regelt dadurch direkt den lokalen Wärmehaushalt. Die Oberfläche als unendlich dünne Schicht besitzt keine Masse und weist daher keine Wärmekapazität auf. Der durch R_n beschriebene Energieeintrag tagsüber resp. Energieverlust während der Nacht an der Oberfläche muss deshalb vollständig durch andere Energieflüsse ausgeglichen werden. Die wichtigsten Energieflüsse sind der fühlbare (sensible) Wärmestrom Q_H , der latente Wärmestrom Q_L und der Bodenwärmestrom Q_S , die sich durch folgende Formel beschreiben lassen:

$$R_n + Q_H + Q_L + Q_S = 0$$

Bei Q_H und Q_L erfolgt der Energietransport, abgesehen von einer extrem dünnen Schicht unmittelbar über der Oberfläche, über Luftwirbel. Deshalb werden Q_H und Q_L auch als "turbulente Wärmeströme" bezeichnet. Das Verhältnis Q_H zu Q_L hängt von der Bodenfeuchtigkeit und der Wasserleitfähigkeit des Bodens, bei vegetationsbestandenen Flächen vor allem von der Art der Vegetation und ihrer Wasserversorgung ab. Dies spielt bei der Analyse begrünter Dächer eine besondere Rolle, da bei der Bepflanzung meist auf besonders angepasste Pflanzen zurückgegriffen wird.

Ein grosser Unterschied zwischen Stadt und Land findet sich bei der Aufteilung der Strahlungsbilanz R_n in die drei Wärmeströme Q_L , Q_H und Q_S . Die oft stark versiegelte Oberfläche führt in der Stadt zu einer deutlich kleineren Verdunstung Q_L als in einer ruralen Umgebung. Demgegenüber ist der Bodenwärmestrom Q_S in der Stadt massiv gegenüber dem Umland erhöht. Die höhere städtische Oberflächentemperatur (Parlow 1998; Rigo & Parlow 2007) bewirkt einen starken Temperaturgradienten in den Strassenuntergrund und von der Aussenseite der Gebäude zu ihrem Inneren. Zusammen mit der im Vergleich zu einem bewachsenen Untergrund besseren Wärmeleitfähigkeit dieser Materialien entsteht so ein im Gegensatz zum Umland erhöhter Bodenwärmestrom Q_S (Oke 1987). Dadurch steht den beiden turbulenten Wärmeströmen weniger Energie zur Verfügung.

Der Bodenwärmestrom Q_S nimmt im Gegensatz zur ruralen Umgebung in der Stadt ähnliche Werte an wie die turbulenten Wärmeströme. Während einer Messkampagne im Sommer 2002 fanden Christen (2005) und Christen & Vogt (2004) am Vormittag an den städtischen Standorten ungefähr gleich grosse Werte von Q_S wie Q_H . Die im Vergleich zum Umland nicht höheren Tagestemperaturen bei ungefähr identischer Strahlungsbilanz weisen ebenfalls darauf hin, dass das geringere Q_L in den Städten tagsüber mit dem grösseren Wärmespeicherstrom Q_S kompensiert werden konnte. Christen (2005) fand für die Stadt Basel tagsüber die Aufteilung der Strahlungsbilanz R_n gemäss Tab. 1.

Tab. 1 Prozentuale Aufteilung der Strahlungsbilanz in die Wärmeflüsse für urbane und rurale Standorte in Basel.

	Urban	Rural
Fühlbarer Wärmestrom Q_H	45 %	25 %
Latenter Wärmestrom Q_L	25 %	60 %
Bodenwärmestrom Q_S	35 %	15 %

Für die massiv erhöhten Nachttemperaturen im Sommer in der Stadt gegenüber dem Umland trägt der viel grössere Bodenwärmestrom Q_S zu einem erheblichen Teil bei (Kuttler 1985). Am Tage wird im Bodenwärmestrom sehr viel Energie gespeichert, die während der Nacht massgeblich zur Kompensation der negativen Strahlungsbilanz herangezogen wird, oftmals diese sogar überkompensiert, so dass sogar noch etwas Energie zur Aufrechterhaltung eines geringen fühlbaren Wärmestroms auch während der Nachtstunden übrig bleibt (Parlow 2007).

3 Methodik

Dächer zu begrünen ist eine altbekannte Massnahme beim Häuserbau. Bereits aus der Antike ist sie aus dem Mittelmeerraum für Athen und Rom überliefert (*Ahrendt 2007*). Indem die Dächer in eigentliche Gärten umgewandelt wurden, dienten sie unter anderem als Ersatz für die überbauten Grünflächen. Einen anderen Zweck erfüllen die Grasdächer, welche in Ländern wie Island oder Norwegen zum Teil bis heute zum traditionellen Hausbau gehören: Im dort herrschenden, kalten und rauen Klima dient die Erd- und Torfschicht mit dem darauf wachsenden Gras als isolierende Schicht für das sich darunter befindende Haus. In Mitteleuropa war die Dachbegrünung dagegen lange kaum bekannt. Seit den 70er-Jahren des letzten Jahrhunderts erfreut sie sich jedoch besonders in städtischen Gebieten einer wachsenden Beliebtheit. Gründe dafür waren zuerst gestalterische Überlegungen. Später wurden auch die positiven ökologischen und ökonomischen Komponenten der Dachbegrünung erkannt (*Brenneisen 2003; Köhler 1990; Köhler 1997*). Aus diesem Grund besteht zum Beispiel in der Stadt Basel die Vorschrift, dass neu errichtete Flachdächer begrünt werden müssen.

Ein wichtiger Aspekt der Dachbegrünung ist die damit verbundene potentielle Verbesserung des Stadtklimas. Unbegrünte Dächer trocknen nach einem Niederschlagsereignis rasch wieder ab. Die aus der Strahlungsbilanz zur Verfügung stehende Energie wird so fast nur zur Erwärmung der Bausubstanz oder der Luft verwendet. Auf begrünten Dächern dagegen wird ein Teil des Niederschlages vom Substrat zurückgehalten. Es ist deshalb zu erwarten, dass auf solchen Dächern durch die erhöhte Verdunstung Q_L der fühlbare Wärmestrom Q_H verringert wird.

Für den messtechnischen Versuch waren folgende Kriterien bei der Auswahl der Dachflächen wichtig:

1. Das begrünte Dach sollte in unmittelbarer Nähe zu einem konventionellen Flachdach mit Kiesoberfläche sein, um möglichst gleiche Strahlungs- und Windverhältnisse auf beiden Dachflächen zu haben.
2. Auf den beiden Dachflächen sollte die Horizonteinschränkung gering sein, um möglichst wenig Schattenwurf auf die Versuchsflächen zu haben.
3. Rund um die Uhr sollte ein einfacher Zugang zum Dach gewährleistet sein, um einen reibungsfreien Versuchsaufbau und Unterhalt während den Messungen zu ermöglichen.

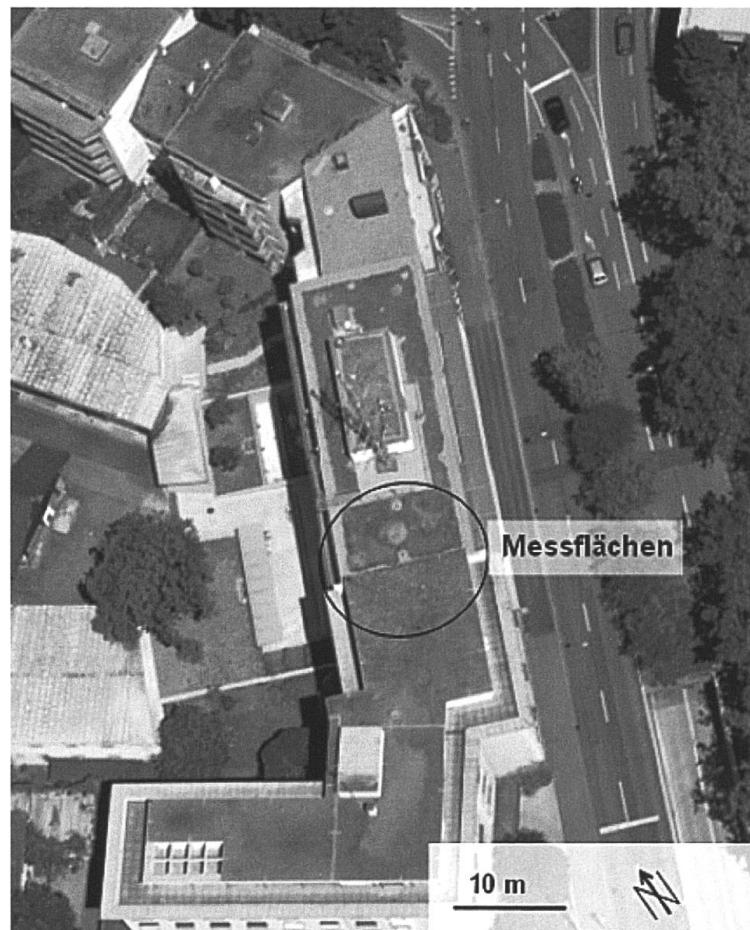
Diese drei Kriterien erfüllte das Gebäude des Instituts für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung der Universität Basel. Das Dach dieses Gebäudes an der Klingelbergstrasse 27 wurde nach seiner Erstellung im Jahr 2002 für Forschungsexperimente begrünt. Südlich schliesst sich ein Gebäude mit einem Kiesdach an, das nur 1.3 m höher als die begrünte Dachfläche ist und sich somit ideal als Referenzfläche eignet. Beide Gebäude gehören mit einer Dachhöhe von ca. 20 Meter zu den höchsten in ihrer Umgebung. Ein weiterer Vorteil dieses Standortes war der ebenfalls auf dem Dach stehende 18 Meter hohe meteorologische Messturm, an dem kontinuierlich wichtige Klimaelemente wie Strahlung, Lufttemperatur und Wind gemessen wurden (Abb. 1).

Der einzige Nachteil des Standortes war die verhältnismässig kleine Dachfläche und ein einstöckiger Aufbau im Norden der Messflächen. Damit bestand die Gefahr, dass das Windfeld kleinräumig grosse Variabilität aufweisen würde, was sich aber als vernachlässigbar herausstellte.

Ziel der Arbeit war es, von jeder der vier Versuchsflächen (Abb. 2) die Strahlungsbilanz R_n und die Energiebilanz mit den drei Wärmestromen Q_H , Q_L und Q_S zu bestimmen. Die Komponenten der Strahlungsbilanz wurden mit Ausnahme der Fläche KI direkt gemessen. Bei KI wurde die langwellige Emission aus der Oberflächentemperatur berechnet. Für die Werte der Oberflächentemperatur wurden dabei entweder die Daten einer Thermalbildkamera verwendet oder sie wur-

Abb. 1 Luftaufnahme der Messflächen und ihrer Umgebung.

Foto: Roland Vogt



den aus den Werten der Bodentemperatursensoren berechnet. Von den Wärmeflüssen konnte nur der Bodenwärmestrom Q_s direkt bestimmt werden. Zur Bestimmung von Q_L wurden auf den Flächen zwei unterschiedliche Methoden angewandt, um die Unsicherheiten bei den Messungen zu minimieren, die aus der Kleinräumigkeit des Versuchsaufbaus resultieren. Einerseits wurden zwei sehr kleine Psychrometer pro Versuchsfläche in unterschiedlicher Höhe aufgestellt. Mit den gemessenen Feuchte- und Temperaturgradienten kann mittels der Bowen-Verhältnis-Methode Q_H und Q_L bestimmt werden (Oke 1987). Das Bowen-Verhältnis β ist das Verhältnis des sensiblen zum latenten Wärmestrom (Q_H/Q_L) und kann mittels vertikaler Temperatur- und Feuchtemessung ermittelt werden. Eine Schwäche dieser Methode war das möglicherweise sehr inhomogene Windfeld und die extrem kleinen Quellflächen. Die kleinen Quellflächen zwangen zu sehr geringen Höhen dieser Psychrometer von 0 und 10 cm. Daher wurde eine zweite Methode mit Minilysimetern angewandt. Durch Wägen der Minilysimeter in bestimmten Zeitintervallen kann, nach Abzug des gefallenen Niederschlages, die Verdunstung resp. Q_L berechnet werden. Der Nachteil der Minilysimeter-Methode besteht in der größeren zeitlichen Auflösung. Zusätzlich zu den Strahlungs- und Energieflüssen wurden auch die Bodentemperaturen an verschiedenen Stellen gemessen.

Die Messgrößen Niederschlag, Wind, kurz- und langwellige Einstrahlung sowie Lufttemperatur standen von den Dauermessungen am Messturm auf dem Hausdach als 10 Minuten-Werte zu Verfügung. Abgesehen vom Niederschlag wurden diese Werte 18 m über der begrünten Dachfläche resp. 38 m über Strassenniveau gemessen. Damit kann eine kleinräumige Beeinflussung dieser Parameter durch die Dachfläche weitgehend ausgeschlossen werden. Für weitere Details zur Methodik und zusätzlichen Ergebnissen wird auf Kleiber (2008) verwiesen.

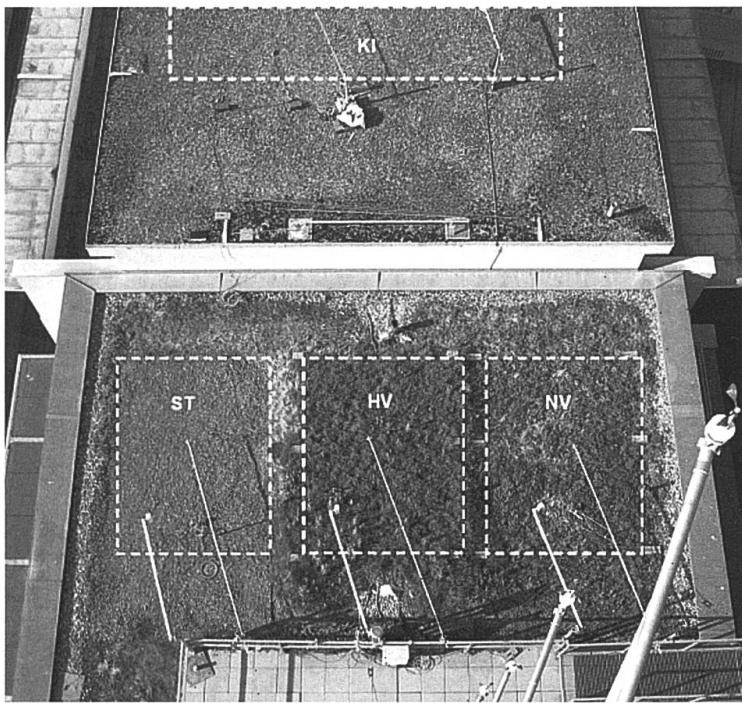


Abb. 2 Blick vom Messsturm auf die Dachflächen mit der Bezeichnung der Messflächen (KI = Kiesdach, ST = Substrat unbewachsen, HV = Hohe Vegetation [Felsnelken, ca. 20 cm hoch], NV = Niedrige Vegetation [Mauerpfeffer, ca. 2–6 cm hoch]).

4 Ergebnisse

Im vorliegenden Artikel wird besonders auf die Zeitspanne zwischen dem 18. Juli und dem 28. Juli 2006 (DOY, 'Day of Year' 199–209) eingegangen. Während dieser Zeit waren die synoptischen Bedingungen von aussergewöhnlich sonnigem Wetter mit hohen Temperaturen und sehr hoher Trockenheit gekennzeichnet (Abb. 3). Diese lang anhaltende warme und trockene Witterung mit Tageshöchsttemperaturen zwischen 30 und 35 °C war der Auslöser für ein Experiment, mit dem untersucht werden sollte, wie sich die Wärmeflüsse der verschiedenen Dachflächen unter sehr ähnlichen Witterungsverhältnissen verhalten, nachdem das Substrat künstlich bewässert wurde und dann die Austrocknungsphase beginnt. Am 16. und 17. Juli 2006 wurden daher die verschiedenen Dachflächen intensiv bewässert, bis das jeweilige Substrat weitgehend wassergesättigt war.

In Abb. 4 sind die Veränderungen der Albedo der verschiedenen Dachflächen ab dem Bewässerungszeitpunkt dargestellt. Während die Werte für das Kiesdach (KI), die niedrige Vegetation (NV) und die hohe Vegetation (HV) während der Austrocknungsphase nur gering anstiegen, ändert sich die Albedo des unbewachsenen Substrates sprunghaft von ca. 0.13 auf Werte zwischen 0.18 und 0.20. Mit zunehmender Austrocknung wird das Substrat also heller und reflektiert mehr Strahlung. Am Tag 208 (27. Juli 2006) war ein kleines Niederschlagsereignis, das sich wiederum in einer spontanen Änderung des Wertes zeigt.

Interessanter ist natürlich der Verlauf der Strahlungsbilanz, denn diese steuert den lokalen Wärmehaushalt der Dachflächen. Hierzu wurden die mittleren Differenzen der Strahlungsbilanzmessungen zwischen den Dachflächen ST, NV und HV zum Kiesdach (KI) nach der Formel $R_{n(ST/NV/HV)} - R_{n(KI)}$ berechnet, d. h. bei positiven Differenzen ist die Strahlungsbilanz der verschiedenen Dachflächen höher als die des Kiesdaches und umgekehrt. In Abb. 5 sind die Werte für den Tag dargestellt. Die verschiedenen Dachflächen verhalten sich hinsichtlich ihrer Strahlungsbilanz sehr unterschiedlich, was sowohl auf die unterschiedliche Albedo der jeweiligen Flächen als auch auf die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen zurückzuführen ist. Generell liegt die Strahlungsbilanz bei allen Dachflächen zu Beginn der Austrocknungsphase deutlich höher als beim Kiesdach. Aus diesen Betrachtungen muss man ableiten, dass bei den vegetationsbestandenen

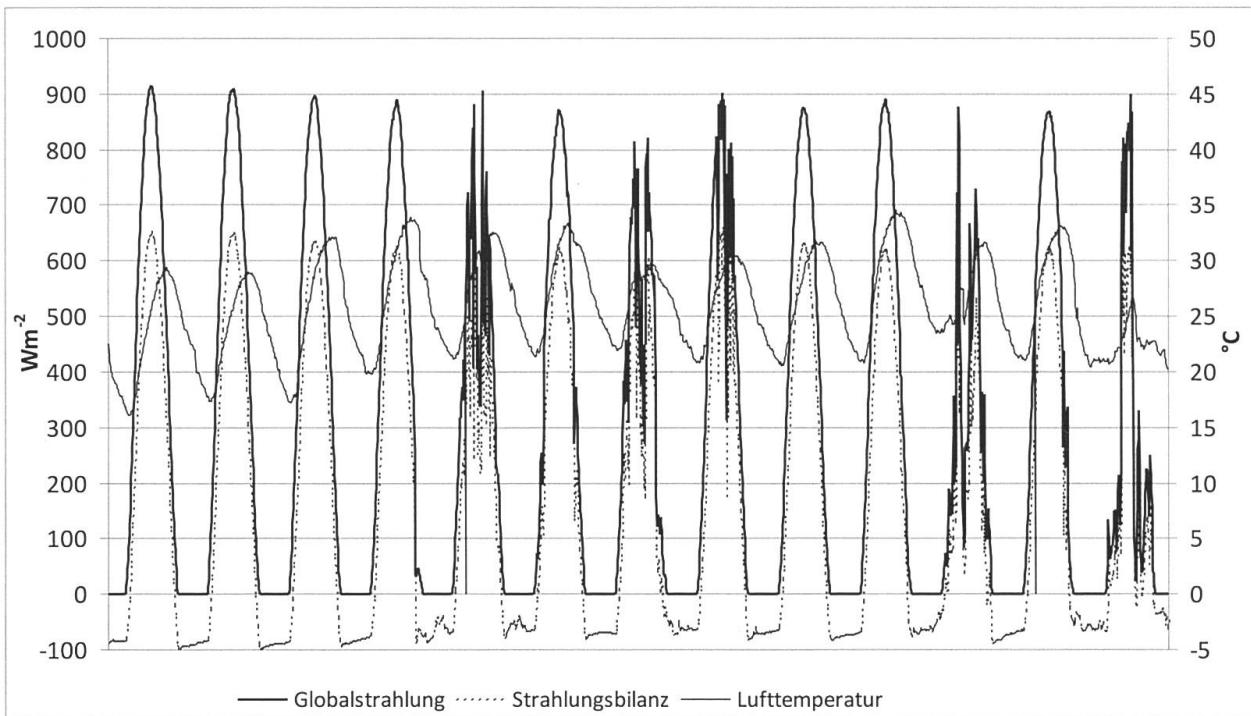


Abb. 3 Synoptische Rahmenbedingungen zwischen dem 16. und 28. Juli 2006 (DOY 197–209).

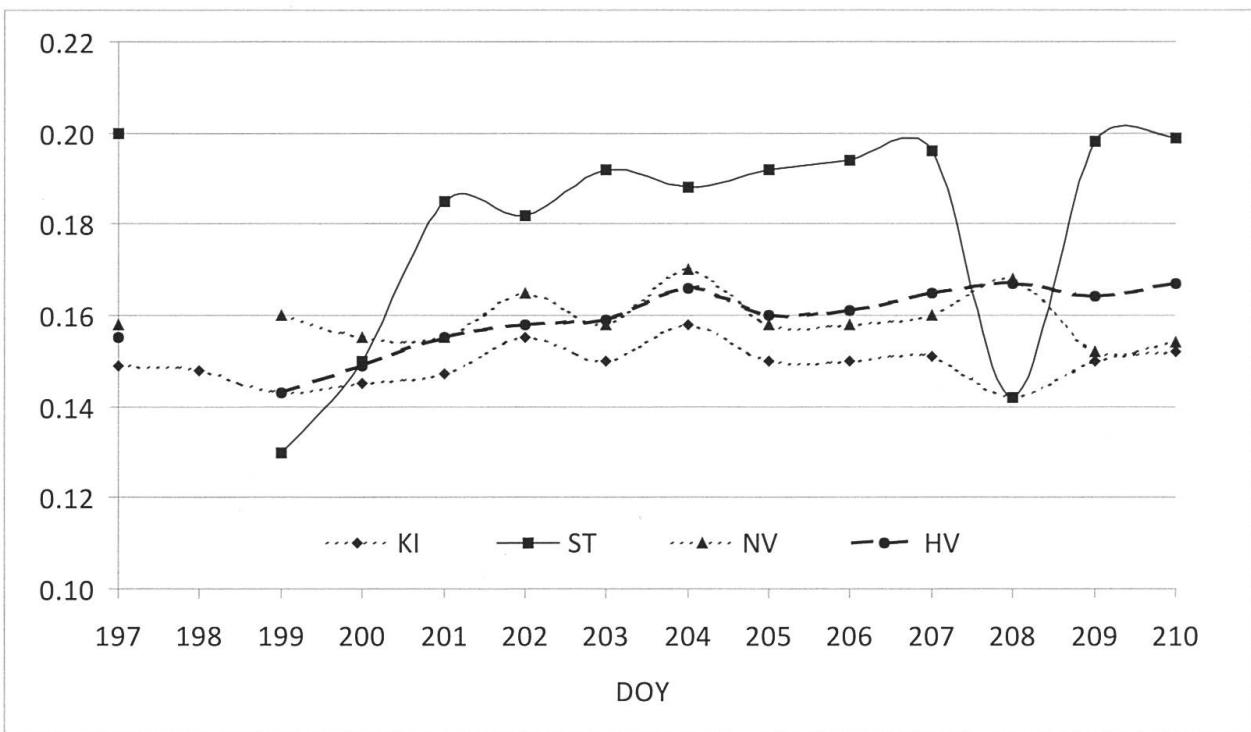


Abb. 4 Verlauf der Albedo der vier Messflächen zwischen dem 16. und 29. Juli 2006 (KI = Kiesdach, ST = Substrat unbewachsen, HV = Hohe Vegetation, NV = Niedrige Vegetation).

Dächern die aus dem Strahlungshaushalt zur Verfügung stehende Energie für die Wärmeströme deutlich erhöht wird. Dies ist bei hoher Vegetation stärker als bei niedriger Vegetation. Die Dachfläche mit unbewachsener Substratauflage (ST) gleicht sich am schnellsten dem Kiesdach an und bereits nach wenigen Tagen sind die Unterschiede mit ca. 10 W m^{-2} sehr gering bzw. die Strah-

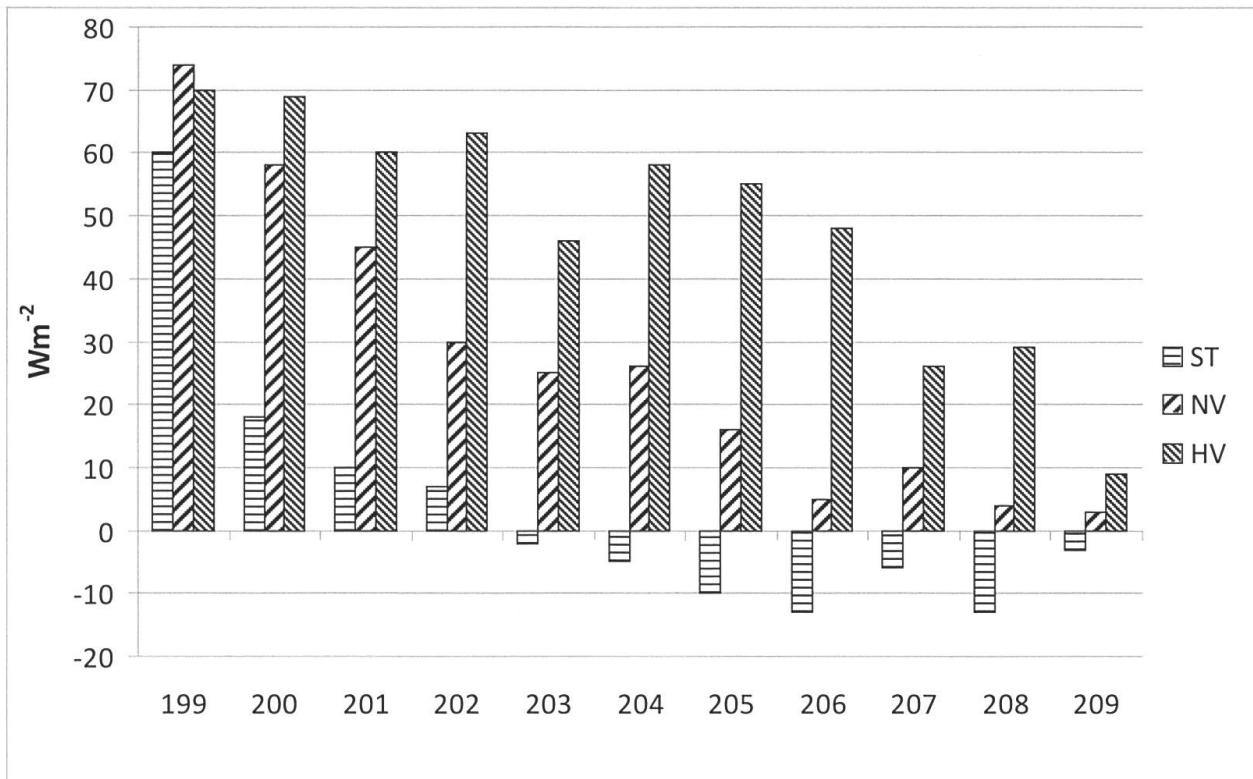
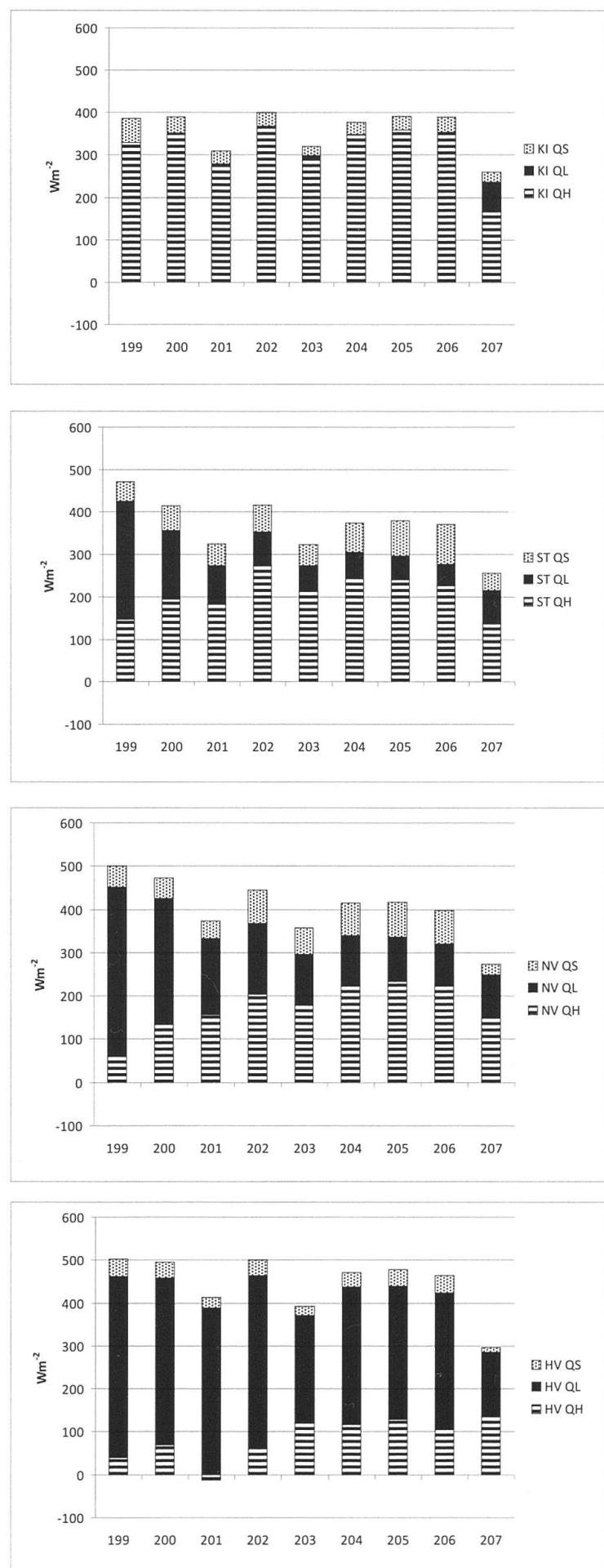


Abb. 5 Mittlere Differenz der Strahlungsbilanz der Dachflächen ST, NV und HV im Vergleich zur Kiesfläche (KI) am Tage für die Zeitspanne vom 18. Juli 2006 (DOY 199) bis zum 28. Juli 2006 (DOY 209) (ST = Substrat unbewachsen, HV = Hohe Vegetation, NV = Niedrige Vegetation).

lungsbilanz des Dachtyps ST ist sogar etwas niedriger als die des Kiesdaches, was aber im Bereich der Messungenauigkeit liegt und daher nicht überinterpretiert werden sollte. Beim angewendeten Messprinzip muss man mit Messungenauigkeiten im Bereich von $\pm 10\text{--}20\text{ Wm}^{-2}$ ausgehen. Das bedeutet, dass sich sowohl der Dachtyp unbewachsenes Substrat als auch die niedrige Vegetation nach einigen Tagen der Austrocknung des Bodens kaum noch vom Kiesdach unterscheiden. Lediglich bei der höheren Vegetation bleibt die Strahlungsbilanz auch nach 10 Tagen noch geringfügig erhöht. Um den Effekt der Erhöhung der Strahlungsbilanz hinsichtlich einer potentiellen Temperaturerhöhung oder -absenkung bewerten zu können, ist daher die Partitionierung der Strahlungsbilanz in die verschiedenen Wärmeströme notwendig.

In den Abb. 6a–d ist dargestellt, wie die verschiedenen Dachflächen die Strahlungsbilanz in die Komponenten des Wärmehaushaltes aufteilen (Zeitspanne vom 18. Juli 2006 [DOY 199] bis zum 26. Juli 2006 [DOY 207]). Das Kiesdach investiert die aus dem Strahlungshaushalt verbleibende Energie fast vollständig in den sensiblen Wärmestrom zur Erhöhung der Lufttemperatur. Im Durchschnitt der Tage sind dies ca. 300 Wm^{-2} , während der Speicherwärmestrom nur $20\text{--}50\text{ Wm}^{-2}$ abbekommt. Der latente Wärmestrom ist mit Ausnahme des Tages 207, an dem ein kurzes Regenereignis stattfand, fast völlig unterdrückt. Beim unbewachsenen Substrat (ST) erkennt man in den Messdaten durch die zurückgehende Verdunstung den langsamer ablaufenden Prozess der Abtrocknung, die sich vom Tag nach der Bewässerung (Tag 199) von ca. 300 Wm^{-2} im Verlauf der nachfolgenden Tage auf ca. 50 Wm^{-2} reduziert. Im gleichen Zeitraum steigt der sensible Wärmestrom, d. h. die für die Lufttemperaturerhöhung investierte Energie, von ca. 150 Wm^{-2} auf $200\text{--}280\text{ Wm}^{-2}$ an und liegt damit nur geringfügig unter den Werten des Kiesdaches. Bei den beiden vegetationsbestandenen Dachflächen ist natürlich der latente Wärmestrom (Verdunstung) deutlich erhöht, wobei bei der niedrigen Vegetation auch eine signifikante Abnahme der Verdun-

Abb. 6 Aufteilung der Wärmeströme für die Dachflächen a) Kiesdach (KI), b) unbewachses Substrat (ST), c) niedrige Vegetation (NV) und d) hohe Vegetation (HV) für die Zeitspanne vom 18. Juli 2006 (DOY 199) bis zum 26. Juli 2006 (DOY 207).



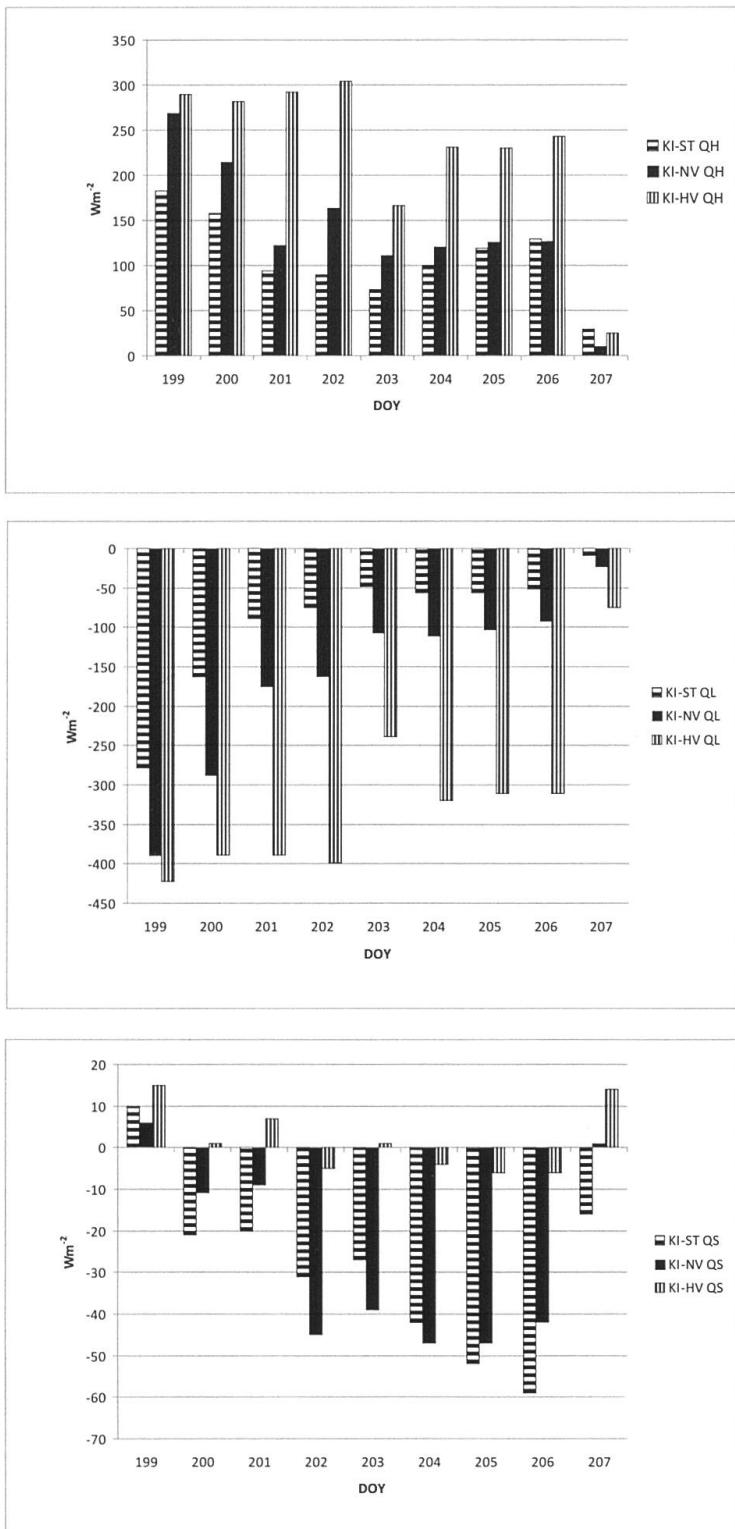


Abb. 7 Differenz von a) sensiblem Wärmestrom (QH), b) latentem Wärmestrom (QL) und c) Bodenwärmestrom (QS) der Dachflächen unbewachsenes Substrat (ST), niedrige Vegetation (NV) und hohe Vegetation (HV) zum Kiesdach (KI) für die Zeitspanne vom 18. Juli 2006 (DOY 199) bis zum 26. Juli 2006 (DOY 207).

stung zu Gunsten des sensiblen Wärmestroms festzustellen ist. Einzig die hohe Vegetation, die auch eine geringfügig erhöhte Strahlungsbilanz aufwies, hält die Verdunstung über die ganze Zeitspanne sehr hoch, was mit einem deutlich kleineren sensiblen Wärmestrom verbunden ist.

In den Abb. 7a–c ist für die drei Dachflächen ST, NV und HV berechnet, wie gross der jeweilige Unterschied der Wärmeströme zum Kiesdach ist. Hierfür wurden die Differenzen zwischen dem Wärmestrom des Kiesdaches und den drei anderen Dachflächen nach der Formel $Q_{(\text{KI})} - Q_{(\text{ST/NV/HV})}$ berechnet. Abbildung 7a zeigt den Unterschied beim sensiblen Wärmestrom, bei dem über alle Tage hinweg das Kiesdach deutlich mehr investiert als die anderen Dachtypen. Insbeson-

dere im Vergleich zur hohen Vegetation ist der Unterschied mit $200\text{--}300 \text{ Wm}^{-2}$ sehr ausgeprägt. Sowohl beim Dach mit der niedrigen Vegetation als auch beim Dach unbewachsenes Substrat liegen die Werte hier näher zu denen des Kiesdaches. Die Werte der Abb. 7b liegen alle im negativen Bereich, d. h. die drei Dächer ST, NV und HV verdunsten deutlich mehr als das Kiesdach, allen voran das Dach mit der höheren Vegetation. Die beiden Dachtypen ST und NV trocknen über die Tage langsam aus und verringern ihre Verdunstung auf $50\text{--}100 \text{ Wm}^{-2}$. Schliesslich sieht man in Abb. 7c die zeitliche Veränderung des Speicherwärmestroms und die Unterschiede der verschiedenen Dachtypen zum Kiesdach. Auch hier liegen die Werte meist im negativen Bereich, was bedeutet, dass der Speicherwärmestrom der drei Dachtypen ST, NV und HV etwas grösser ist als der des Kiesdaches und dass sich dieser Wärmestrom in den Untergrund im Laufe der Tage erhöht. Dies hängt direkt mit der Wärmeleitfähigkeit des schnell austrocknenden Kiesdaches zusammen. Mit zunehmender Trockenheit geht die Wärmeleitfähigkeit zurück, da sich der Luftanteil im trockenen Kies erhöht.

5 Fazit

Auf dem Dach des Institutsgebäudes in der Klingelbergstrasse wurden im Sommer 2006 vergleichende Messungen zum Wärme- und Strahlungshaushalt verschiedener Dachbegrünungen und eines benachbarten Kiesdaches durchgeführt, um zu untersuchen, wie sich Dachbegrünungen auf das lokale und urbane Klima auswirken könnten. Hierzu wurden die Flächen vor einer 9-tägigen Messperiode künstlich bewässert, bis im jeweiligen Substrat eine Wassersättigung auftrat. Die Messungen zeigen deutliche Unterschiede in den Strahlungsflüssen derart, dass die mit Vegetation bewachsenen Flächen erhöhte Strahlungsbilanzen aufweisen. Dies ist auf die geringere Albedo und die geringere Oberflächentemperatur dieser Flächen im Gegensatz zu einem Kiesdach zurückzuführen. Als erstes Zwischenfazit muss man also festhalten, dass am Tage die begrünten Dächer mehr Strahlungsenergie absorbieren als das Kiesdach. Bei der Partitionierung der Strahlungsbilanz in die zwei turbulenten Wärmestrome (sensibler und latenter Wärmestrom) sowie den Speicherwärmestrom, der am Tage in den Boden bzw. die Bausubstanz gerichtet ist, ist ebenfalls ein deutlicher Unterschied festzustellen. Während die Kiesfläche fast die ganze aus dem Strahlungshaushalt gewonnene Energie in den sensiblen Wärmestrom investiert, kommt es bei den anderen Flächen zu unterschiedlich starken Verdunstungsprozessen. Das unbewachsene Substrat gleicht sich relativ schnell nach der Bewässerung den Bedingungen des Kiesdaches an. Von den beiden vegetationsbestandenen Flächen ist vor allem das mit der höheren Vegetation durch erhöhte Verdunstung in der Lage, den fühlbaren Wärmestrom gegenüber dem herkömmlichen Kiesdach zu senken und damit zu einer Erniedrigung der Lufttemperatur beizutragen. Falls die begrünten Dachflächen also ausreichend gewässert werden, so könnte dies zumindest im lokalen Umfeld zu einer Temperaturerniedrigung führen und somit ein positiver Beitrag für das Stadtklima sein. In der Regel findet diese Bewässerung jedoch nicht statt, sondern die Dachflächen erhalten ihre Feuchtigkeit allein aus dem Niederschlagswasser. Wenn Dachflächen in sommerlichen Wärmeperioden stark austrocknen, ist dieser Effekt der Temperaturabsenkung auch weitgehend unwirksam und die Auswirkungen auf das urbane Klima und die Lufttemperatur am Tage sind minimal.

Literatur

- Ahrendt J. 2007. *Historische Gründächer: Ihr Entwicklungsgang bis zur Erfindung des Eisenbetons*. Dissertation Technische Universität Berlin, 1–169.
- Bornkamm R., Bartfelder F. & Köhler M. 1988. *Verbundene Hof-, Fassaden- und Dachbegrünung*. Technische Universität Berlin.
- Brenneisen S. 2003. *Ökologisches Ausgleichspotential von extensiven Dachbegrünungen*. Physiogeographica 41, Universität Basel, 1–284.
- Christen A. & Vogt R. 2004. Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology* 24(11): 1395–1421.
- Christen A. 2005. *Atmospheric turbulence and surface energy exchange in urban environments*. Stratus 11, Universität Basel, 1–142.
- Eriksen W. 1976. Die städtische Wärmeinsel. *Geographische Rundschau* 6(9): 368–373.
- Grize L., Huss A., Thommen O., Schindler C. & Braun-Fahrlander C. 2005. Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. *Swiss Medical Weekly* 135(13-14): 200–205.
- Grize L., Schindler C., Thommen O., Huss A. & Braun-Fahrlander C. 2006. Causes of death during the 2003 heat wave in Switzerland. *Epidemiology* 17(6): 425–426.
- Howard L. 1833. *The climate of London deduced from meteorological observations*. London, 1–436. [Reprint durch International Association for Urban Climate (IAUC) 2006]
- Kleiber T. 2008. *Bestimmung und Vergleich der Strahlungs- und Energieflüsse auf einem begrünten Dach und einem Kiesdach*. Masterarbeit Universität Basel, 1–73.
- Köhler M. 1990. Extensive Dachbegrünung. *Landschaftsentwicklung und Umweltforschung* 76: 1–110.
- Köhler M. 1997. Hof-, Fassaden- und Dachbegrünung – Zentraler Baustein der Stadtökologie. *Landschaftsentwicklung und Umweltforschung* 105: 1–177.
- Krupka B. 1992. *Dachbegrünung: Pflanzen- und Vegetationsanwendung an Bauwerken*. Stuttgart, 1–508.
- Kuttler W. 1985. Stadtklima, Struktur und Möglichkeiten zu seiner Verbesserung. *Geographische Rundschau* 35(5): 226–233.
- Kuttler W. 1993. Stadtklima. In: Sukopp H. & Wittig R. (Hrsg.): *Stadtökologie*. Stuttgart, 113–153.
- Landsberg H. 1981. *The Urban Climate*. New York, 1–275.
- Manley G. 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 84: 70–72.
- Oke T. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108: 1–24.
- Oke T. 1987. *Boundary layer climates*. London, 1–435.
- Rigo G. & Parlow E. 2007. Modelling the ground heat flux of an urban area using remote sensing data. *Theoretical and Applied Climatology* 90: 185–199.
- Parlow E. 1998. Analyse von Stadtklima mit Methoden der Fernerkundung. *Geographische Rundschau* 50(2): 89–93.
- Parlow E. 2007. Stadtklima. In: Gebhardt G., Glaser R., Radtke U. & Reuber P. (Hrsg.): *Geographie*. Heidelberg, 56–60.
- Peterson T.C. 2003. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *Journal of Climate* 16(18): 2941–2959.