Nicolas Lentes, *1996

Gymnasium an der Stadtmauer,
Bad Kreuznach

Eingang der Arbeit:
November 2015

Zur Veröffentlichung angenommen:
Januar 2016

# Hot Spots!

## Lokale städtische Wärmeinseln lokalisieren und effektiv bekämpfen

Grundlage dieses Projekts ist die Theorie der städtischen Wärmeinsel. Dies sind Bereiche, die die Stadtklimaqualität erheblich erniedrigen. In der Arbeit wird ein Konzept vorgestellt, nach dem lokale städtische Wärmeinseln lokalisiert, analysiert und bekämpft werden können. Dieses Konzept ist auf jeden urbanen Raum übertragbar.

### 1 Einleitung

#### 1.1 Aufgabenstellung

Anregung für dieses Projekt war die Arbeit von Niklas und Sebastian Nürnberg (2013), in der Bad Kreuznach als städtische Wärmeinsel betrachtet wurde [1]. Sie ermittelten anhand eines selbstgebauten Modellhauses die Wirkung der Faktoren Dämmung, Farbe und Begrünung eines Gebäudes auf dessen Oberflächen- und Innentemperatur und erbrachten aufgrund dieser Daten Vorschläge zur Verbesserung des Stadtklimas. Städte werden in der Fachliteratur jedoch inzwischen als „Wärmearchipel“ und nicht mehr als „Wärmeinsel“ beschrieben. Der Grund hierfür ist, dass die Klimastruktur von Städten sehr lokal geprägt ist: Bestimmte Bereiche heizen sich besonders stark auf, manche hingegen nur wenig oder gar nicht. Eine einzelne Insel in einem solchen Archipel soll im Folgenden als „lokale städtische Wärmeinsel“ bezeichnet werden [2].

Das Ziel dieses Projekts ist es, mikroklimatische Verhältnisse mitteleuropäischen Städte in einem größeren Maßstab als bisher zu betrachten, mithilfe neuer, dreidimensionaler Darstellungsweisen zu strukturieren, zu analysieren und auszuwerten. Anschließend sollen weitere Verbesserungsvorschläge für ein gesünderes Stadtklima konkretisiert werden. Außerdem wird ein Konzept zur gezielten Bekämpfung der thermischen Belastung vorgestellt werden, das auf andere urbane Räume übertragbar ist und damit eine einfache Möglichkeit für größere Städte darstellt, ihre Stadtklimaqualität erheblich zu verbessern.

#### 1.2 Vorgehensweise

Diese Arbeit stützt sich auf das Beispiel Bad Kreuznach. Im Folgenden wird zuerst die Theorie der städtischen Wärmeinsel in ihren Grundzügen erklärt. In den darauf folgenden Kapiteln wird die Vorgehensweise der Datenaufnahme erläutert, die für Bad Kreuznach gemessenen Werte mithilfe von konventionellen sowie dreidimensionalen Darstellungsmethoden analysiert und über die bisherigen Schritte zur Verbesserung des Stadtklimas berichtet.

### 2 Aktueller Forschungsstand

Das Phänomen der städtischen Wärmeinsel beruht auf unterschiedlichen Ursachen, die sich gegenseitig in verschiedenen Faktoren beeinflussen. Dadurch treten Merkmale zutage, die stärker oder schwächer ausgeprägte Folgen nach sich ziehen [3]. Das Thema Stadtklima ist sehr aktuell und im Wandel, weshalb die Theorie hier nur grob dargestellt wer-

den kann. Die ausführliche Betrachtung eines Stadtklimas findet man im Buch „Das Klima von Essen“, welches sich auf eine fast 30-jährige Forschungsarbeit stützt [4].

### 2.1 Ursachen

Durch die Oberflächenform und insbesondere die wahre Größe der Oberfläche sowie die enge Bebauung innerhalb einer Stadt wird die solare Einstrahlung mehrfach reflektiert. Dadurch erhöht sich insgesamt die Menge an absorbierter Strahlung: Die Oberfläche heizt sich auf. Die höhere Wärmespeicherkapazität der Gebäudematerialien und der hohe Versiegelungsgrad der Oberfläche (geringere Verdunstung) speichern die Wärme. Zusätzliche Ursachen der Wärme einer Stadt sind die anthropogene Wärmeerzeugung (Abgase, schlecht isolierte Häuser, Industrie, …) und der städtische Treibhauseffekt [4].

### 2.2 Faktoren

Die Faktoren für städtische Wärmeinseln werden im folgenden Zitat sehr gut zusammengefasst:

„Dazu zählen der Himmelssichtfaktor (Quotient aus der aktuellen zur potenziellen freien Himmelssicht, Ψ), der Oberflächenversiegelungsgrad (V), die mittlere Strömungshindernishöhe (z), die Oberflächenalbedo (ρ), die Wärmeübergangszahl der Oberflächenmaterialien (α) sowie die freigesetzte anthropogene Wärme ($Q_{anthr}$).“ [3]

Die Berücksichtigung dieser Faktoren beim Nachweis von Mikroklimata in Städten findet sich in einer durch W. P. Lowry definierten Formel als Urbanisierungswert U [6]:

$$W_{itx}=H_{itx}+T_{itx}+U_{itx}$$

Die Formel sagt aus, dass die in einer Stadt gesammelten Messwerte *W* sich immer aus drei verschiedenen Werten zusammensetzen, die gesondert betrachtet werden müssen. Der Hintergrundwert *H* beschreibt die globale Klimazone, in der die Stadt liegt. Der Topographiewert *T* ist die Größe für die regionale Beeinflussung des Stadtklimas. Der Urbanisierungswert *U* schließlich ist der für eine Stadt relevante Wert, denn an diesem lässt sich der Urbanisierungsgrad einer Stadt ablesen. Ziel einer mitteleuropäischen Stadt sollte es sein, diesen Wert so niedrig wie möglich zu halten, um mikroklimatische Effekte wie den der städtischen Wärmeinsel zu vermeiden.

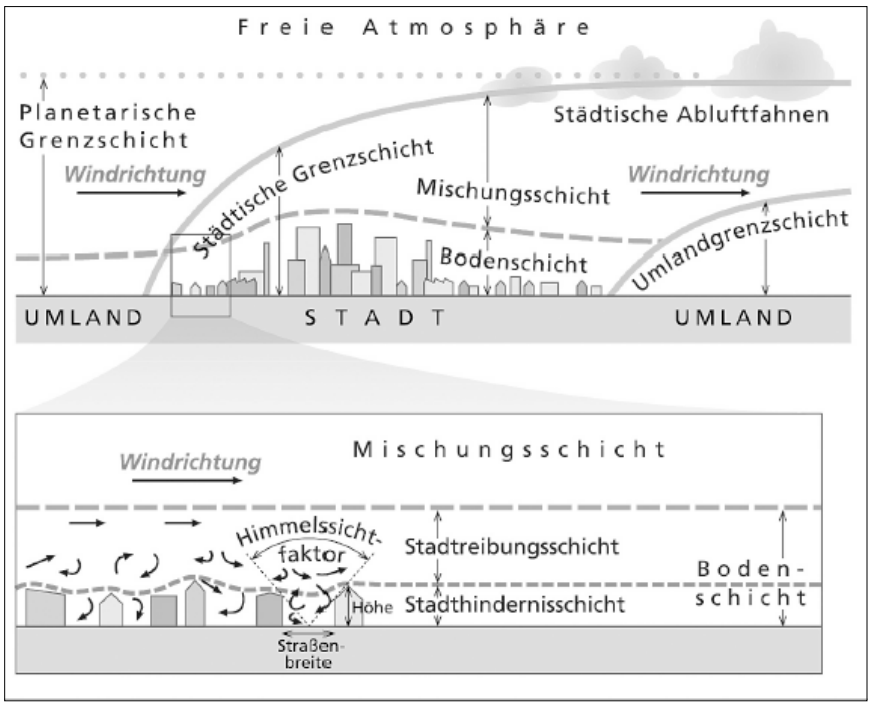


Abb. 1: Struktur einer städtischen Wärmeinsel [3].

Sämtliche Werte sind abhängig von den Wirkgrößen *i* = Witterungstyp; *t* = Messzeitpunkt und *x* = Lage des Messstandortes im Stadtgebiet.

Um den Wert *U* möglichst genau bestimmen zu können, sollten Vergleichsmessungen zwischen urbanen und ruralen Bereichen einer Stadt durchgeführt werden. Dies simuliert eine präurbane Messung bei gleichbleibenden Faktoren *H* und *T*. Daraus folgt, dass die gemessene Differenz zwischen den urbanen und den ruralen Messwerten den Urbanisierungsgrad ergibt [3].

### 2.3 Merkmale

Die Ursachen der städtischen Wärmeinsel bewirken einige typische Merkmale und vor allem eine ganz bestimmte Klimastruktur des Ökosystems Stadt. Die oben genannten Faktoren bestimmen dabei, wie stark oder schwach die Wärmeinsel ausgeprägt ist.

Das wohl prägendste Phänomen der städtischen Wärmeinseln ist die starke thermische Abgrenzung zum Umland. So sind Städte im Durchschnitt 1 bis 3 °C wärmer als ihre Umgebung, an heißen Sommertagen sogar 6 bis 10 °C [5]. Abb. 1 zeigt die Struktur der städtischen Grenzschicht. Durch die topographische Lage einer Stadt ist die allgemeine Windrichtung vorgegeben. Die extremen Veränderungen in den in 2.2 beschriebenen Faktoren markieren die städtische Grenzschicht auf der windzugewandten Seite, an der zwischen ruralen („Land Cover Types“) und urbanen („BuiltTypes“) „Local Climate Zones“ [6] unterschieden wird. Bei diesem Modell sei darauf hingewiesen, dass die aktuelle Klimaforschung Städte nicht mehr als Wärmeinseln, sondern als Wärmearchipele betrachtet, da diese Grenzschicht fließend ist und auch innerhalb einer Stadt auftritt. Die dreidimensionale Struktur der Stadt verändert die bodennahe Atmosphäre; die planetarische Grenzschicht teilt sich hier in Boden- und Mischungsschicht. Erwähnt sei außerdem, dass das Wetter einen großen Einfluss auf die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel hat: Ihr Maximum findet sich in Sommernächten bei austauscharmen, wolkenlosen Wetterlagen.

„In [der Bodenschicht] gelten die Flussdichten von Impuls, Wärme und Luftfeuchtigkeit als quasikonstant.“ [3] Das bedeutet, dass der atmosphärische Austausch in dieser Schicht so gering ist, dass sich über der Stadt ein Mikroklima in Form einer Glocke bildet, das fast komplett von seiner Umgebung abgeschottet ist. Die Höhe der Bodenschicht orientiert sich dabei an der mittleren Strömungshindernishöhe, beträgt im Allgemeinen aber etwa zehn Prozent

der Grenzschicht. Die Bodenschicht kann wiederum unterteilt werden in eine Stadthindernisschicht und eine Stadtreibungsschicht. Die Höhe der Stadthindernisschicht wird durch die Bebauungshöhe bestimmt. Eine genaue Abgrenzung der beiden Schichten ist jedoch nicht möglich, da sie stark abhängig sind von der individuellen dreidimensionalen Struktur der umliegenden Gebäude. Außerdem spielen auch thermische und mechanische Luftturbulenzen eine Rolle. Die Windgeschwindigkeiten der Stadtreibungsschicht sind im Vergleich zur Stadthindernisschicht höher, womit auch die Luftzirkulation in dieser Schicht steigt, die auch durch die Oberflächenrauigkeit beeinflusst wird.

In der Stadthindernisschicht hängt die Stärke der Luftbewegung vom Himmelssichtfaktor ab: Bei niedrigen Werten ($0{,}2 < \Psi < 0{,}6$) stehen die Gebäude dicht beieinander; der atmosphärische Austausch der Luft ist dementsprechend gering und führt zur Ansammlung von Luftschadstoffen sowie einer höheren Dichte an Grob- und Feinstaub. Bei hohen Werten ($\Psi > 0{,}6$) korreliert die Erhöhung der Luftturbulenzen mit der Verschiebung der Grenze zwischen Stadthindernisschicht und Stadtreibungsschicht entsprechend der jeweiligen Breite der Straßenschlucht nach unten (siehe Abb. 1, Seite 55).

In der Mischungsschicht werden die Schadstoffe der Bodenschicht aufgenommen, indem starke Turbulenzen der Stadtreibungsschicht, die durch große Oberflächenrauigkeit entstehen, diese Schadstoffe abtransportieren. Es kommt zur Bildung von typischen städtischen Abluftfahnen, die sich mit der Mischungsschicht in Windrichtung von der Stadt wegbewegen.[3]
Auf der windabgewandten Seite bildet sich, ebenfalls durch die Unterschiede der in 2.2 beschriebenen Faktoren zwischen urbanen („Built Types“) und ruralen („Land Cover Types“ LCZs) die Umlandgrenzschicht.

### 2.4 Folgen

Die Zusammenhänge zwischen den genannten Ursachen, Faktoren und Merkmalen, vor allem das Einwirken von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftzirkulation auf das Verhalten und die Konzentration des Feinstaubs und

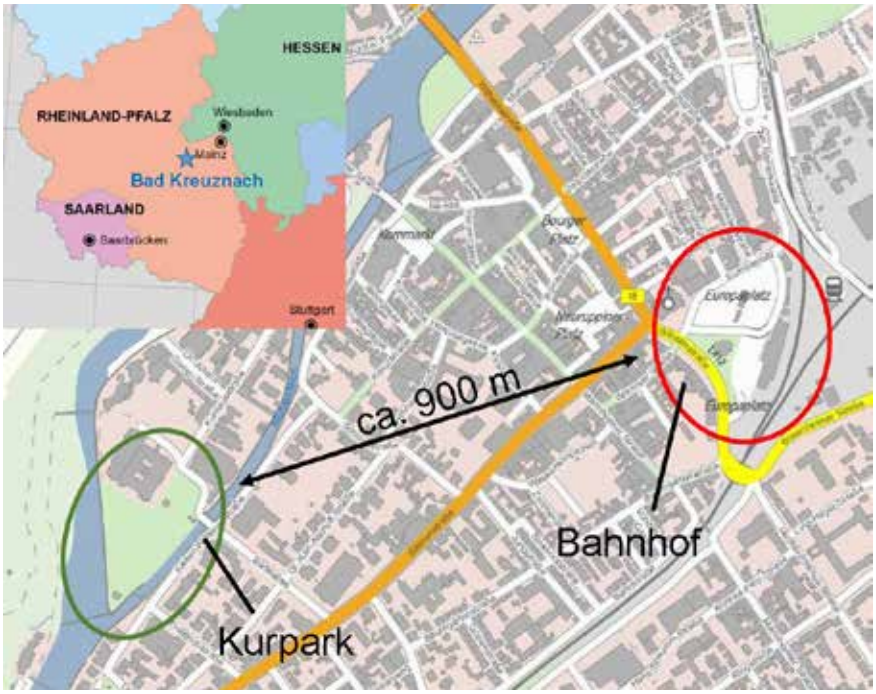


Abb 2: Räumliche Einordnung des Bereichmessgebietes Bahnhof und des Vergleichmessgebietes Kurpark.

anderen Luftverschmutzungen, ziehen gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen nach sich. Dabei ist nach akuten Folgen und Langzeitfolgen zu unterscheiden. Akute Folgen wie zum Beispiel Hitzestress werden meist von hohen Temperaturen ausgelöst und verursachen eine hohe thermische Belastung auf den menschlichen Körper. Der Kreislauf kann dabei so sehr geschwächt werden, dass es zu Hitzekrämpfen, Hitzeerschöpfung oder einem Hitzeschlag kommen kann. [8] Langzeitfolgen sind mehr auf die beschriebene Luftverschmutzung zurückzuführen und verursachen vor allem Lungenkrebs, Atemwegserkrankungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Außerdem sind sie mitverantwortlich für die Zunahme an Asthma-Erkrankungen und heftigeren Allergie-Anfällen. [9] [10] Dies ist besonders bedenklich in Anbetracht der Tatsache, dass immer mehr Menschen vom Land in die Stadt ziehen.

## 3 Erkennen und Analysieren einer Wärmeinsel

Dieses Kapitel soll als Vorschlag für ein Konzept betrachtet werden, nach dem in Zukunft auch andere, vor allem große Städte, ihre Klimaqualität maßgeblich erhöhen können. Das Ziel dieses Konzepts ist es, lokale städtische Wärmeinseln als solche zu identifizieren und zu lokalisieren, danach ihren Urbanisierungsgrad ($U$) zu bestimmen und diesen durch Veränderung der Faktoren (durch Begrünung, Farbänderung, etc., siehe 2.2 Faktoren) auf den geringstmöglichen Wert zu reduzieren. Ein dreidimensionales Klimatogramm ermöglicht es, die Orte, an denen Faktorenmodifizierung sinnvoll ist, zu lokalisieren und den dort notwendigen Grad der Veränderung abzuschätzen. Da das Ziel hierbei nicht eine klimatische Betrachtung der Stadt im globalen Vergleich ist, sondern ausschließlich die Verbesserung des thermischen Stadtklimas, kann hierbei der Wert $H$ immer und der Wert $T$ vernachlässigt werden, falls es keine topographischen Unterschiede (Flüsse, große Felsen o. Ä.) zwischen den Messgebieten gibt. In diesem Kapitel soll das Konzept anhand des Beispiels Bad Kreuznach erläutert werden.

### 3.1 Art des Messens und der Visualisierung

Gemessen wurden sowohl die Umgebungs- als auch die Oberflächentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und die maximale Windgeschwindigkeit. Es wurden folglich nicht die Faktoren der lokalen städtischen Wärmeinsel gemessen, sondern ihre Merkmale, da diese sie direkt beschreiben. Bei Eingriffen zur Verbesserung der Klimaqualität werden jedoch die standortspezifischen Faktoren verändert, auf die die Werte zurückgeführt werden (vgl. dazu die folgenden Kapitel). Als Messgeräte wurden im Bei-

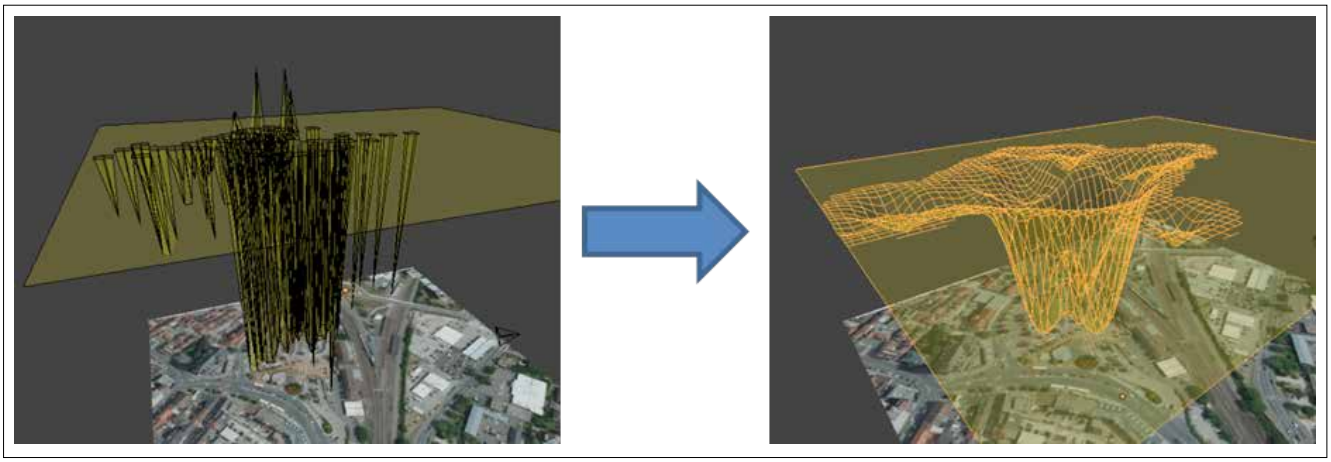

Abb 3: Glätten des Graphs der relativen Luftfeuchtigkeit (08./09.06.14).

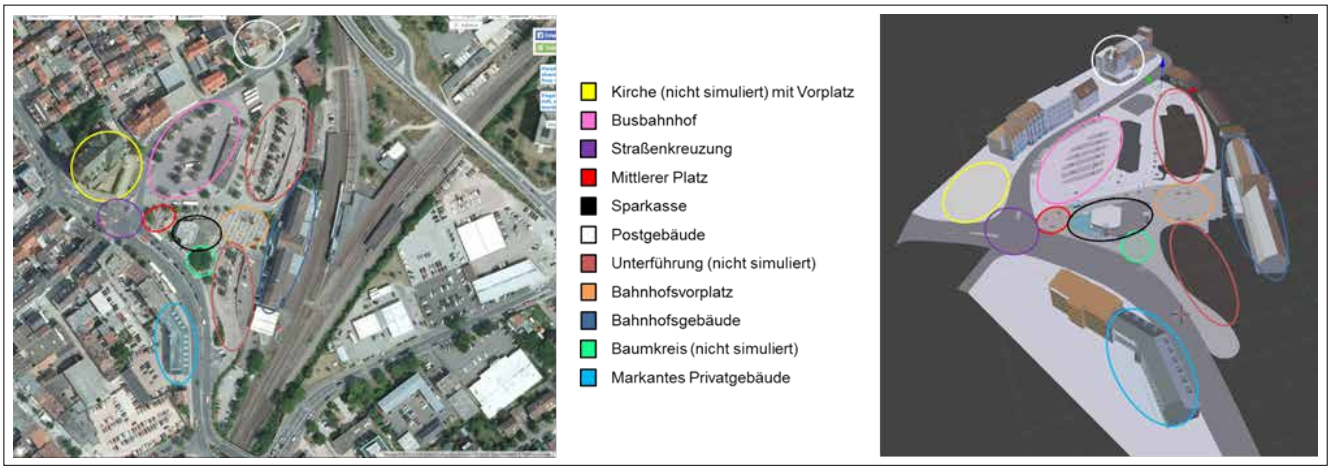


Abb. 4: Räumliche Orientierung im 3D-Modell.

spiel Bad Kreuznach ein Thermodetektor der Firma „BOSCH“ sowie ein Anemometer der Firma „technoline“ verwendet. Der Thermodetektor funktioniert über eine Laser- bzw. Infrarottechnik und misst Luftfeuchtigkeit in % (Fehler laut Hersteller: ± 2 %), Umgebungstemperatur in °C (Fehler laut Hersteller: ± 1 °C) und Oberflächentemperatur in °C (Fehler laut Hersteller: ± 3 °C). Das Anemometer diente zur Messung der maximalen Windgeschwindigkeit in km/h (Fehler laut Hersteller: ±5 %) während des Messvorgangs. Die Werte wurden während der Messung per Sprachaufnahme festgehalten und erst anschließend in eine Tabelle übertragen. Gemessen wurde bei maximaler Ausprägung der Wärmeinsel, also während austauscharmen, wolkenlosen Sommertagen. Die Messungen wurden unter verschiedenen Bedingungen aufgenommen, um den Urbanisierungsgrad auf konkrete Faktoren zurückführen zu können. Es wurden Werte in der Sonne sowie im Schatten (soweit vorhanden) gemessen und bei jeder Messung das Oberflächenmaterial notiert. Bei besonderen Vorkommnissen wurden diese ebenfalls notiert. Zudem wurde für jede Messgröße der Durchschnitt errechnet. Die Umgebungstemperatur (UT) beschreibt die thermische Belastung des Gebietes. Eine hohe Umgebungstemperatur kann in Kombination mit einer niedrigen relativen Luftfeuchte (rL) den Aufenthalt von Verschmutzungen in der Luft begünstigen. Bei einer hohen Luftfeuchtigkeit können Schmutzpartikel durch Bildung einer Hydrathülle aus der Luft „gewaschen“ werden, es kann jedoch auch zur Bildung von Smog kommen. Die Oberflächentemperatur (OT) beeinflusst vor allem die nächtliche Strahlungsbilanz der Stadt. Mittlere Windgeschwindigkeiten (W) sind essentiell für eine gute Durchlüftung, welche dafür sorgt, dass Luftverschmutzungen aus dem Gebiet heraustransportiert werden können. Um festzustellen, ob es sich bei dem gemessenen Bereich tatsächlich um eine lokale städtische Wärmeinsel handelt, wurde ein Vergleichsmessgebiet benötigt, welches klimatisch qualitativ gute Werte in den einzelnen Faktoren aufweist. Ein geeignetes Vergleichsgebiet zu finden, ist schwierig, da es einerseits innerhalb der Stadt oder in unmittelbarer Nähe zu ihr liegen muss (Abhängigkeit der Werte, siehe 2.2 Faktoren), andererseits von urbanen Faktoren möglichst unbeeinflusst sein soll. Für das Beispiel Bad Kreuznach wurden der Bahnhof als Bereichsmessgebiet und der Kurpark als Vergleichsmessgebiet ausgewählt (siehe Abb. 2).

Um eine gute Visualisierung der Klimastruktur zu erhalten, ist es sinnvoll, die gesammelten Messdaten dreidimensional auszuwerten. Dazu werden die beiden kostenlosen Softwarepakete „Blender“ und „Google SketchUp“ genutzt. Es handelt sich dabei um Programme zur Erstellung dreidimensionaler Modelle. Im ersten Schritt wird eine grobe räumliche Orientierung aufgebaut: Dazu werden auf einem Satellitenbild des Bereichsmessgebietes die Messpunkte eingetragen. Diese Karte wird dann als Fläche in Blender importiert. Über der Karte wird nun für jede Messgröße (rL: gelb, UT: rot, OT: grün, W: blau) ein in Größe und Seitenverhältnissen identisches Gitter aufgespannt, dessen Gitterpunkte in der „Top

View“-Perspektive möglichst genau über den Messpunkten der Karte zu liegen kommen. Dieses Gitter dient fortan als dreidimensionaler Graph: Den Gitternetzpunkten, die über den Messpunkten liegen, werden nun die dort gemessenen Werte Bahnhof als z-Koordinate zugewiesen. Alle Gitternetzpunkte, die nicht über einem Messpunkt liegen, erhalten als z-Koordinate den jeweiligen Durchschnitt der Vergleichsmessung Kurpark. Dadurch entsteht eine Ebene, die im Folgenden als Vergleichsebene bezeichnet werden soll. Im letzten Schritt werden die dadurch entstandenen Graphen durch das Tool „Smooth Vertex“ geglättet. Für eine bessere räumliche Orientierung lohnt es sich, die Umgebung mithilfe von Google SketchUp grob zu simulieren und in Blender zu importieren (siehe Abb. 3 und 4, Seite 57).

Das Programm ist bei dieser Visualisierung der Messdaten sehr flexibel und kann auf eine Vielzahl von unterschiedlichen Ablese-Methoden angepasst werden: Bevor man die Graphen glättet, kann anhand der z-Koordinate jeder Wert einzeln abgelesen werden. Man kann einzelne Merkmale genauer betrachten, indem man den jeweiligen Graph heraushebt. Betrachtet man alle Graphen übereinander, entsteht ein Klimatogramm, an dem die Zentren des Urbanisierungsgrades deutlich sichtbar werden (Maxima von UT, OT überlagern sich mit Minimum von rL). Außerdem ist es möglich, in dem Programm einzelne Graphen auszublenden oder transparent zu schalten (gut geeignet zum Vergleichen). Die Vielzahl an Ansichten, die diese Art der Visualisierung bietet, erlaubt es, schnell und einfach den Ort und den Grad der notwendigen Veränderung, den eine Verbesserung des Stadtklimas benötigt, abzuschätzen und stellt somit die Kernkompetenz des vorgestellten Konzepts dar. In gedruckter Form sind leider nicht alle Vorteile der dreidimensionalen Graphen darstellbar.

### 3.2 Erkennen

Der Begriff „Lokale Städtische Wärmeinsel“ soll einen Teilbereich eines Wärmearchipels beschreiben. Es wird also ein Bereich betrachtet, der aufgrund eines besonders hohen Urbanisierungsgrades deutlich aus der Wärmestruktur der Stadt heraussticht und somit eine einzelne Insel im Wärmearchipel darstellt. Um solche Bereiche zu lokalisieren, wird zunächst an Orten, an denen eine hohe Urbanisierung

Abb. 5: Erkennungsmessung (18.06.13).

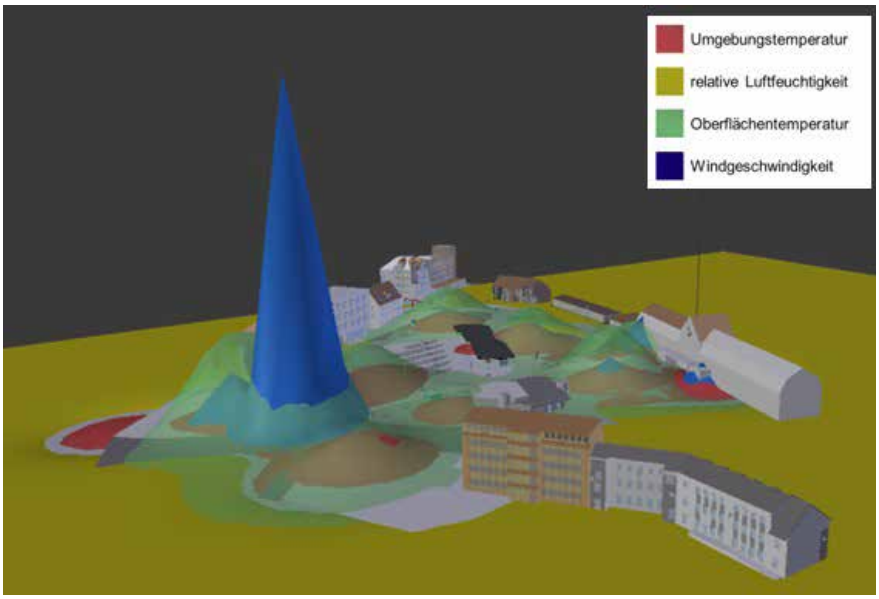


Abb. 6: Klimatogramm der Erkennungsmessung (18.06.13).

vermutet wird, eine Erkennungsmessung durchgeführt. Meistens handelt es sich dabei um Industriegebiete, Verkehrsknotenpunkte oder Ähnliches, da diese eine besonders hohe anthropogene Wärmeerzeugung aufweisen und diese auch in wärmespeicherfähigen Materialien gespeichert wird.

In der Erkennungsphase werden lediglich Messungen an wenigen, repräsentativen Punkten durchgeführt, die über das Bereichsmessgebiet verstreut liegen, um ein erstes Bild der Klimastruktur zu erhalten (siehe Abb. 5: jede farbige Zahl ist ein Messpunkt). Die bei der Messung gewonnenen Daten werden in eine Tabelle übertragen. Um sie auszuwerten, wird zuerst ein Klimatogramm erstellt, welches auf Extremwerte der Graphen überprüft wird. In der Tabelle werden die exakten Werte des jeweiligen Messpunkts abgelesen und in Beziehung zu den Durchschnittswerten der Vergleichsmessung sowie den am Messpunkt vorhandenen Bedingungen gesetzt. Anhand

| | Milieu | Umgebungs-temperatur in °C | relative Luftfeuchtigkeit in % | Oberflächen-temperatur in °C | Windgeschwindig-keit in km/h | Uhrzeit |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MP 2 | Pflasterstein Schatten | 32,0 | 46 | 20,9 | 0,0 | 13:00 |
| MP 6 | Pflasterstein Sonne | 38,6 | 37 | 50,5 | 1,7 | 13:17 |

Tab. 1: Messpunkte 2 und 6 der Erkennungsmessung (18.06.13).

dessen wird entschieden, ob ein weiteres Vorgehen in diesem Bereich für eine Erhöhung der Stadtklimaqualität sinnvoll ist. Die beschriebenen Schritte sollen im Folgenden am Bespiel des Bad Kreuznacher Bahnhofs gezeigt werden (vgl. dabei Abb. 6).

Im Allgemeinen lässt sich beobachten, dass die Umgebungstemperatur im gesamten Messgebiet eindeutig über ihrer Vergleichsebene liegt, die relative Luftfeuchtigkeit stark darunter. Die Oberflächentemperatur liegt an sonnigen Messpunkten stark über ihrer Vergleichsebene, an schattigen Messpunkten dagegen leicht unter ihr. Die beiden leicht sichtbaren Erhebungen der Windgeschwindigkeit befinden sich am Eingang und Ausgang einer Unterführung direkt vor dem Bahnhofsgebäude. Im vorderen Teil der Abbildung sticht sie sehr stark heraus, dort befindet sich die Straßenkreuzung. Interessante Extremstellen finden sich bei der Kirche und auf dem mittleren Platz (Messpunkte 2 und 6, siehe Tab. 1).

Messpunkt 2 (siehe Tabelle 1) besitzt gleichzeitig die höchste Luftfeuchtigkeit, die geringste Umgebungs- sowie Oberflächentemperatur, und an ihm wurde Windstille gemessen. Er weist also in allen Merkmalen Extremwerte auf. Durch seine Lage im Permanentschatten der Kirche lassen sich die niedrige Oberflächentemperatur und die Umgebungstemperatur erklären. Die hohe relative Luftfeuchtigkeit ist auf den nahegelegenen Pfarrgarten zurückführen. Durch das hohe Gebäude ist er allerdings auch abgeschottet von Wind. Bei Messpunkt 6 (siehe Tab. 1) korreliert die niedrigste Luftfeuchtigkeit mit der höchsten Umgebungstemperatur. Dieser Messpunkt liegt auf dem Busbahnhof, einer großen mit Pflastersteinen versiegelten Fläche.

### 3.3 Analysieren

Zeigt die Erkennungsmessung für die Stadtklimaqualität ungünstige Werte, wird eine weitere, wesentlich genauere

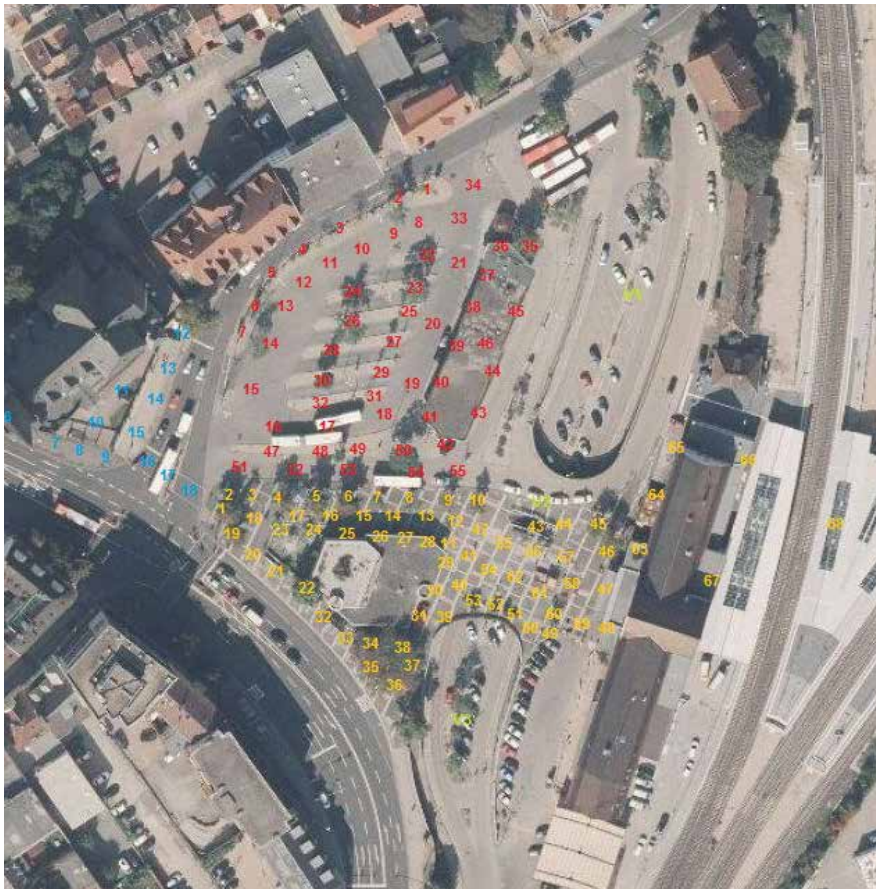

Abb. 7: Analysemessung (08.09.06.14).

Messung durchgeführt. In dieser fortgeschrittenen Phase wird eine große Datenmenge gesammelt, die als strukturaufklärende Datenmenge gedacht ist. Sie soll Aufschlüsse über die Klimastruktur des Bereichsmessgebiets geben und Orte, an denen eine Faktorenänderung sinnvoll ist, lokalisieren. Die Messpunkte liegen deshalb eng beieinander (siehe Abb. 7).

Die Vorgehensweise bei der Auswertung gleicht der der Erkennungsmessung, allerdings ist das Ziel in dieser Phase eine genaue Analyse, anhand derer Zentren der lokalen städtischen Wärmeinsel lokalisiert und Eingriffe zur Verbesserung des Stadtklimas festgelegt werden sollen. Aufgrund der Menge an Messwerten können wesentlich präzisere Aussagen über die Konsekutivität von Faktoren und Merkmalen gemacht werden. Die Analyse soll im Folgenden am Beispiel des Bad Kreuznacher Bahnhofs durchgeführt werden (siehe Abb. 8, Seite 60). Die Klimastruktur des Bahnhofs ist nun deutlich besser erkennbar: Die Umgebungstemperatur liegt im gesamten Messgebiet stark über ihrer Vergleichsebene; von den Rändern bis zur Mitte des Gebietes steigt sie unregelmäßig an. Im Gegensatz dazu liegt die relative Luftfeuchtigkeit immer stark unter ihrer Vergleichsebene; und nimmt von den Rändern zur Mitte hin rapide ab. Die Oberflächentemperatur weist eine sehr komplexe Form mit vielen Extremstellen auf; der größte Teil des Graphs liegt sehr stark über seiner Vergleichsebene.

Der Graph der Windgeschwindigkeit hat in etwa die Form eines Torus. Die Wärmezentren des Messgebiets liegen auf dem mittleren Platz sowie auf dem Bahnhofsvorplatz. Dort überlagern sich

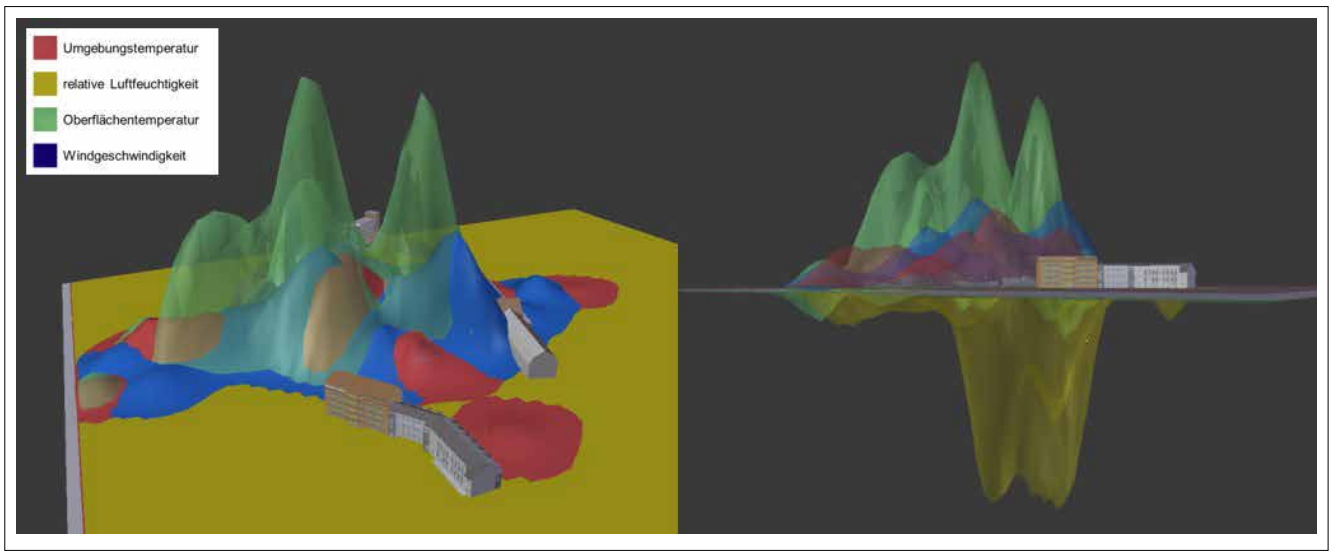


Abb. 8: Klimatogramm der Analysemessung (08./09.06.14).

Maxima von Umgebungs- und Oberflächentemperatur mit Minima der Luftfeuchtigkeit. Besonders positiv fällt dagegen der Bereich um die Messpunkte 34-38 auf; dort steht ein Kreis aus Bäumen. In diesem Bereich nähern sich diese drei Messgrößen deutlich ihrer jeweiligen Vergleichsebene an.

Aus dieser ersten, groben Betrachtung lassen sich bereits viele Schlussfolgerungen ableiten. Das gesamte Erscheinungsbild des Klimatogramms lässt eine lokale städtische Wärmeinsel (sowohl Oberflächen- als auch Lufttemperaturwärmeinsel) vermuten. Eindeutig nachweisbar ist eine große thermische Belastung. Aufgrund des Ampelsystems und des hohen Verkehrs mit Automobilen, Bussen und Zügen entsteht hier viel anthropogene Wärme und es werden viele Schmutzpartikel emittiert. Diese können aufgrund der niedrigen Luftfeuchtigkeit und des geringen Begrünungsgrades nicht gebunden werden. Das System ist jedoch an den Rändern gut durchlüftet; die Torusform lässt eine Art Windstrudel vermuten, dessen Mitte vom Luftaustausch demnach ausgeschlossen ist.

Besondere Messbereiche finden sich in dieser Messung am mittleren Platz (Messpunkte 17-19), am Bahnhofsvorplatz (Messpunkte 54/55) und am Baumkreis (34-38): Wie in Tab. 2 erkennbar, ist die Umgebungstemperatur am Baumkreis deutlich niedriger als in den beiden Wärmezentren des Bahnhofs. Die relative Luftfeuchtigkeit unterscheidet sich nur gering, ist aber am Baumkreis höher. Die Oberflächentemperatur ist ähnlich gegliedert wie die Umgebungstemperatur. Gut erkennbar ist hier auch folgender Zusammenhang: Liegt eine Fläche im Sonnenschein, ist die Oberflächentemperatur niedriger, je höher die Albedo ist, da bei einer hohen Albedo viel Energie des Sonnenlichts reflektiert wird. Liegt die Fläche jedoch im Schatten, spielt die Albedo für die Oberflächentemperatur kaum eine Rolle. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit ist am Baumkreis am niedrigsten, da der Wind dort auf Hindernisse stößt.

Die Gesamtauswertung legt folgende Klimastruktur nahe: Auf dem gesamten Bahnhofsbereich von der Kirche bis zum Bahnhofsgebäude (möglicherweise auch darüber hinaus) und vom Busparkplatz bis zur Sparkasse erstreckt sich eine lokale städtische Wärmeinsel. Diese entsteht durch das Vorhandensein einer großen, versiegelten (hoher Oberflächenversieglungsgrad), dunklen (Oberflächenalbedo) Fläche, die kaum beschattet wird (geringer Begrünungsgrad, hoher Himmelssichtfaktor). Das Zentrum befindet sich dabei auf dem mittleren Platz, obwohl dieser Bereich gleichzeitig auch von einem Windkanal durchströmt wird.

## 4 Gegenmaßnahmen

### 4.1 Mögliche Maßnahmen

Anhand der Analysemessung lassen sich nun die Orte festlegen, an denen die Stadt eine Veränderung der Faktoren vornehmen sollte. Dabei muss das jeweilige Planungsamt nach Kosten und voraussichtlicher Wirkung differenzieren und auf Grundlage des zur Verfügung stehenden Budgets eine individuelle Entscheidung fällen. Da ein Eingriff in den Größen z und $Q_{anthr}$ (vgl. 2.2 Faktoren) mit einem hohen (Kosten-) Aufwand verbunden wäre, werden im Folgenden lediglich Verbesserungsvorschläge für die anderen vier Faktoren erbracht.

Maßnahmen zur Erhöhung der Klimaqualität sollten die Faktoren folgendermaßen beeinflussen:

- Himmelssichtfaktor begrenzen: Dadurch vergrößert man die Schattenfläche und senkt so die Oberflächentemperatur, bei besonders guten Verhältnissen sogar die Umgebungstemperatur.
- Oberfläche entsiegeln: Ein höherer Anteil an natürlichen Böden senkt die Oberflächentemperatur, da diese eine klimaneutrale Wärmeübergangszahl aufweisen. Im Idealfall können natürliche Böden, falls sie begrünt sind, die relative Luftfeuchte erhöhen.
- besonnten Flächen helle Farben geben: Eine hohe Albedo senkt die Oberflächentemperatur.
- Oberflächenmaterialien wechseln: Auch Materialien mit niedrigen Wärmeübergangszahlen senken die Oberflächentemperatur.

Ein guter Eingriff ist das Pflanzen von möglichst großen, hochkronigen Bäumen. Beim Pflanzen muss man die umliegende Oberfläche entsiegeln. Am besten ist es, diese Oberfläche zusätzlich zu begrünen. Je breiter und dichter die Krone des Baumes ist, desto größer ist auch der geworfene Schatten. Ein weiterer Vorteil beim Pflanzen von Bäumen

| | Milieu | Durchschnittliche Umgebungstemperatur in °C | Durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit in % | Durchschnittliche Oberflächentemperatur in °C | Durchschnittliche Windgeschindigkeit in km/h | Uhrzeit |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mittlerer Platz | schwarzer Stein Sonne | 41,0 | 22 | 60,2 | 5,7 | ~15:00 Uhr |
| | weißer Stein Sonne | | | 49,1 | | |
| Bahnhofsvorplatz | schwarzer Stein Sonne | 38,6 | 22 | 50,7 | 4,7 | ~15:40 Uhr |
| | weißer Stein Sonne | | | 41,3 | | |
| | roter Stein Sonne | | | 46,7 | | |
| Baumkreis | schwarzer Stein Schatten | 37,2 | 24 | 27,0 | 2,6 | ~15:20 Uhr |
| | weißer Stein Schatten | | | 25,7 | | |
| | begrünt Schatten | | | 26,9 | | |

Tab. 2: Ausgewählte Messbereiche der Analysemessung im Vergleich.

besteht darin, dass sie $CO_2$ umsetzen und andere Luftschadstoffe zumindest binden können. Dank sogenannter „hydraulischer Ballenstecher“ ist es problemlos möglich, Bäume mit 25 Zentimetern Durchmesser und mehr zu versetzen. Die Kosten für ein solches Gerät sind im fünf- bis sechsstelligen Bereich und damit für größere Städte durchaus tragbar. [11] Vorstellbar wäre auch eine Art Leasing oder Miete. Allerdings stellen Bäume auch ein Hindernis für den Wind dar und benachteiligen damit den Luftaustausch zwischen den Bereichen. Darum sollte die Krone im Optimalfall hoch ansetzen, um den Wind im Bodenbereich so wenig wie möglich zu behindern. Das Pflanzen von jungen Bäumen mit kleiner Krone ist daher nicht sinnvoll. In jedem Fall sollte man sich vor dem Pflanzen eines Baumes über sämtliche Besonderheiten der Art informieren.

Eine ähnliche Möglichkeit bietet das sogenannte „Urban Gardening“, bei dem engagierte Bürgerinnen und Bürger auf Flächen der Stadt einen Garten pflegen können. Dieser könnte zum Beispiel in Form eines Pavillons mit Holzgerüst und „grünen“ Bauteilen gestaltet sein: Das Dach wäre dann aus lebenden Pflanzen und würde, ähnlich wie eine Baumkrone, einen großen Schatten werfen.

Flächen, die im Sonnenschein liegen, sollten helle Farben erhalten. Die hohe Albedo sorgt für eine niedrigere Oberflächentemperatur und damit für eine niedrigere nächtliche Strahlungsbilanz. Die hier vorgestellten Beispiele sollen jedoch lediglich als Anreiz dienen. Es sind hier viele weitere kreative Ideen gefragt, die zur Verbesserung des Stadtklimas beitragen könnten.

### 4.2 Bisher durchgeführte Schritte

Nach dem Erfolg der Facharbeit von Niklas und Sebastian Nürnberg [1] bei Jugend forscht wurde von dem betreuenden Lehrer Jochen Hübscher am Gymnasium an der Stadtmauer Bad Kreuznach eine Nachhaltigkeits-AG ins Leben gerufen. Diese half an der Erkennungsmessung und mehreren anderen Aktionen mit.

Da die Ergebnisse der ersten Messungen bereits auf eine lokale städtische Wärmeinsel hindeuteten, initiierte die Nachhaltigkeits-AG, dass die Einnahmen des Sommerfestes 2013 zum Kauf eines jungen Baumes genutzt wurden, der nun am Bahnhof Bad Kreuznach steht. Die Kosten für den Baum betrugen 250 €.

Im Winter 2013/2014 hielten Schüler aus der AG einen Vortrag vor dem Stadtrat Bad Kreuznach, um die Ratsmitglieder über die Wärmeinsel am Bahnhof zu informieren. Daraufhin erklärte die lokale Parteiabteilung „Bündnis 90/Die Grünen“, ebenfalls einen Baum zu spenden. Im Frühling 2014 schließlich wurden insgesamt drei Bäume gepflanzt.

Im Herbst 2014 bat der Stadtrat darum, Messungen im Bereich der Bahnsteige durchzuführen. Die Präsentation der Ergebnisse führte zu dem Beschluss des Stadtrates, dort eine Fläche für 90.000 € zu kaufen und zu begrünen.

## 5 Fazit

Fassen wir die Bedingungen für eine lokale städtische Wärmeinsel zusammen:

- hoher Himmelssichtfaktor
- hoher Oberflächenversieglungsgrad
- hohe Strömungshindernishöhe
- geringe Oberflächenalbedo
- große Emission anthropogener Wärme

Aus dem Zusammenspiel dieser Faktoren kann eine hohe thermische Belastung sowie eine erhöhte Luftverschmutzung resultieren; in extremen Fällen auch mit Bildung von Smog. Um lokalen städtischen Wärmeinseln und damit auch Wärmearchipelen entgegenzuwirken, wurde folgendes Konzept entwickelt:

- Erkennen: Es werden Bereiche, in denen ein hoher Urbanisierungsgrad vermutet wird, ausgewählt. Dort werden Erkennungsmessungen durchgeführt (wenige, repräsentative Werte). Die Ergebnisse werden dreidimensional visualisiert.
- Analysieren: In Bereichen, in denen sich eine Wärmeinsel andeutet, wird eine Analysemessung durchgeführt (große, strukturaufklärende Daten-

menge). Die Ergebnisse werden dreidimensional visualisiert. Die Zentren des Klimatogramms werden lokalisiert und der notwendige Grad der Veränderung abgeschätzt.
- Gegenmaßnahmen ergreifen: Das Planungsamt der Stadt erbringt Vorschläge und errechnet die jeweiligen Kosten. Im Stadtrat werden die Vorschläge diskutiert und beschlossen. Die Vorschläge werden in die Tat umgesetzt.

Das Konzept ist auf jeden urbanen Raum anwendbar und wurde anhand des Beispiels Bad Kreuznach optimiert. Besonders innovativ ist dabei die dreidimensionale Darstellungsweise, welche viele Ansichten bietet. Damit kann eine große Bandbreite an Informationen aus den Messungen gewonnen werden. Obwohl das Konzept am Beispiel Bad Kreuznach gut veranschaulicht werden kann, sollten einige Dinge beim Messvorgang im Idealfall anders gemacht werden. Dazu gehört vor allem das Equipment: Die im Beispiel verwendeten Messgeräte sind sehr ungenau (siehe 3.1), da diese nicht für diesen Verwendungszweck ausgelegt (dafür aber kostengünstig) sind. Stattdessen sollten professionellere Geräte verwendet werden. Am besten wären eine Kombination aus Messstationen an repräsentativen Punkten und mehrere mobile Messgeräte, da dies die Messdauer erheblich verkürzt. Es gibt außerdem Messgeräte, die die Konzentration von schädlichen Luftpartikeln direkt messen können. Falls diese für die Stadt kostenmäßig tragbar sind, sollten auch solche Anwendung finden. Auch nachts sollte eine Messung durchgeführt werden, um die Strahlungsbilanz zu ermitteln. Zudem wurde in Bad Kreuznach an Pfingstsonntag und Pfingstmontag gemessen. Daraus resultiert, dass wenig Verkehr herrschte und die anthropogene Wärme sehr reduziert war. Es ist zu erwarten, dass die lokale städtische Wärmeinsel an einem verkehrsreichen Tag deutlicher und stärker zutage tritt.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich in irgendeiner Weise unterstützt haben. Die Arbeit der Nachhaltigkeits-AG meiner Schule hat in den Jahren 2011 bis 2013 wichtige Vorarbeiten zu meiner Untersuchung geleistet. Deshalb gebührt diesen Mitschülern mein herzlicher Dank. Bei meinem betreuenden Lehrer Jochen Hübscher möchte ich mich für die Zeit und die unendliche Geduld bedanken, die er für mich gefunden hat. Auch meinem Mitschüler Fynn Kretzschmar danke ich für die vielen Arbeitsstunden, in denen er zusammen mit mir den Bahnhof als räumliche Orientierung simuliert hat. Außerdem möchte ich mich bei allen Firmen, Institutionen und Privatpersonen bedanken, die uns bereitwillig die Baupläne ihrer Gebäude ausgeliehen haben, die uns bei der Erstellung des 3D-Modells sehr geholfen haben.

## Quellenverzeichnis

[1] S. und N. Nürnberg: Facharbeit im Fach Erdkunde: „Verbesserung des Stadtklimas von Bad Kreuznach“, 2011/2012, Gymnasium an der Stadtmauer Bad Kreuznach, URL: http://www.dgzfp.de/Portals/24/IZ/PDF/Jugend%20forscht/RW%20Kaiserslautern%202013.pdf (08.08.14 18:02 Uhr)

[2] P. Hupfer, W. Kuttler: „Witterung und Klima“, 11. Auflage, Teubner-Verlag (2005)

[3] W. Kuttler: „Urbanes Klima, Teil 1”, in: “Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft”, Umweltmeteorologie, 70, Nr. 7/8, Juli/August 2010, S. 329-340; URL: https://www.uni-due.de/imperia/md/content/geographie/klimatologie/gef07_2010_x604_teil_1.pdf (29.06.14 13:39 Uhr)

[4] W. Kuttler, A. Miethke, D. Dütemeyer, A.-B. Barlag: „Das Klima von Essen“ , Westarp Wissenschaften Verlag (2015)

[5] R. Stiles, B. Gasienica-Wawrytko, K. Hagen, H. Trimmel, W. Loibl, M. Köstl, T. Tötzer, S. Pauleit, A. Schirmann, W. Feilmayr: „Urban Fabric Types and Microclimate Response - Assessment and Design Improvement. Final Report, Kapitel 2: Grundlagen”; URL: http://urban-fabric.tuwien.ac.at/documents/K2_Grundlagen.pdf (22.06.14 19:52)

[6] W.P. Lowry: “Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis” J. Appl. Meteorol. 16(1977) Nr.2, S. 129-135

[7] I. D. Stewart und T. R. Oke.: „Local Climate Zones for Urban Temperature Studies” in: “Bulletin of the American Metereological Society (BAMS)”, Dezember 2012, S. 1879-1900; URL: http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-11-00019.1 (08.07.14 15:19 Uhr)

[8] URL: http://gesund.org/info/hitze.htm (05.08.2014 13:47 Uhr)

[9] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Luftverschmutzung#Ausbreitung_von_Schadstoffen (08.08.14 13:54 Uhr)

[10] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Feinstaub#Wirkungen_auf_die_Gesundheit (08.08.14 13:54 Uhr)

[11] L. Weber: „Einen alten Baum verpflanzt man doch“, in: FAZ vom 13.11.2012, URL: http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/hydraulische-ballenstecher-einen-alten-baum-verpflanzt-man-doch-11958317.html (10.11.15 18:31 Uhr)