

Ökonomie der Anpassung an den Klimawandel

Pissarskoi, Eugen; v. Möllendorff, Charlotte; Sterba, Maj-Britt

Abschätzung von Kosten und Nutzen der Anpassung an Hitzeereignisse

Fallstudie für die Stadt Köln

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



| i | ö | w

INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Impressum

Autor/innen:

Eugen Pissarskoi (IÖW), Charlotte v. Möllendorff (IÖW), Maj-Britt Sterba (IÖW)

Projektleitung:

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH, gemeinnützig

Gesamtprojektleitung: Dr. Jesko Hirschfeld (jesko.hirschfeld@ioew.de)

Mitarbeiter: Ulrich Petschow, Dr. Eugen Pissarskoi, André Schröder

Öffentlichkeitsarbeit: Richard Harnisch

www.ioew.de

Kooperationspartner:

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH

Mitarbeiter/innen: Dr. Ulrike Lehr, Dr. Christian Lutz, Dr. Thomas Drosdowski, Anne Nieters

www.gws-os.com

Humboldt Universität zu Berlin

**Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Department für Agrarökonomie,
Fachgebiet Ressourcenökonomie**

Mitarbeiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Konrad Hagedorn, Prof. Andreas Thiel (PhD), Matteo Roggero (PhD)

www.agrar.hu-berlin.de

Zitiervorschlag

Pissarskoi, Eugen; v. Möllendorff, Charlotte; Sterba, Maj-Britt (2015): Abschätzung von Kosten und Nutzen der Anpassung an Hitzeereignisse - Fallstudie für die Stadt Köln, Berlin, Download: www.oekonomie-klimawandel.de

Der vorliegende Beitrag entstand im Forschungsprojekt „Ökonomie der Anpassung an den Klimawandel – Integration ökonomischer Modellierungen und institutioneller Analyse auf verschiedenen Ebenen“. Das Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Förderschwerpunkt "Ökonomie des Klimawandels" (Förderkennzeichen 01LA1137).

Für nähere Informationen zum Projekt: www.oekonomie-klimawandel.de

Berlin, August 2015

Zusammenfassung

Berechnungen von Klimamodellen prognostizieren eine Zunahme von Hitzeereignissen. Aufgrund des Hitzeinseleffektes gelten Städte als besonders betroffen. Im Projekt econCCadapt werden verschiedene Methoden in Hinblick auf die Bewertung von Hitzeereignissen überprüft und angewendet. Das vorliegende Dokument befasst sich mit den Auswirkungen einer klimawandelbedingten Zunahme von Sommer- und Hitzetagen auf die Produktivität, Morbidität und Mortalität in der Stadt Köln. Auf Basis empirischer Literatur wurden Wirkungsfunktionen identifiziert, welche die Beziehung zwischen Hitze und den drei betrachteten Größen – Produktivität, Anzahl an Todesfällen und Anzahl an Krankenhausaufenthalten – beschreiben. In Anlehnung an Projektionen für die Stadt Köln werden dabei ein optimistisches und ein pessimistisches Szenario unterschieden. Den Schätzungen zufolge können sich im pessimistischen Szenario Produktivitätsverluste von rund 96 Mio. € einstellen bzw. 274 Todesfälle und 360 Krankenhausaufenthalte zusätzlich auftreten. Die Schätzungen variieren jedoch stark mit dem zugrundeliegenden Klimaszenario. So verringern sich die entsprechenden Werte im optimistischen Szenario auf 26 Mio. € Produktivitätsverlust, 80 Todesfälle und 91 Krankenhausaufenthalte. Neben diesem Business-As-Usual Szenario werden Kosten-Nutzen-Analysen für einzelne Anpassungsmaßnahmen vorgenommen. Als Anpassungsmaßnahmen werden dabei Klimaanlage, Dachbegrünung und Außenbegrünung betrachtet. Klimaanlage lohnen sich insbesondere in Bürogebäuden, in denen hitzebedingte Produktivitätsverluste infolgedessen vermieden werden können. In Wohngebäuden hängt der Nutzen davon ab, wie viele Menschen sich in klimatisierten Räumen aufhalten. Gemäß unserer Berechnungen können durch eine flächendeckende Installation von Klimaanlage bis zu 218 Todesfälle und 288 Krankenhausaufenthalte vermieden werden. Der Nutzen von Dachbegrünungsmaßnahmen ist dadurch begrenzt, dass sich lediglich ein kleiner Anteil der Dachfläche Kölns für Begrünung eignet. Abschließend wird auch der Nutzen einer graduellen Temperaturabsenkung durch die Begrünung von Außenflächen geschätzt.

Abstract

Climate models project an increase in the number of heat waves. Urban areas are considered as particularly concerned by this development due to the heat island effect. The project econCCadapt evaluates consequences of heat waves using different valuation methods. The document at hand addresses the impacts of an increase in summer and heat days on productivity, morbidity and mortality in the city of Cologne. Impact functions, which relate heat to the three variables productivity, cases of death and number of hospital stays are derived from empirical literature. Based on regional climate projections for Cologne, an optimistic and a pessimistic scenario are defined. According to our estimations for the pessimistic scenario, the climate change induced productivity loss amounts to €96 million while death cases increase by 274 and hospitalization by 360. The estimates vary with regard to the underlying scenario. Hence, the corresponding values for the optimistic scenario are €26 million productivity loss, 80 death cases and 91 hospital stays. In addition the Business-As-Usual scenario we conduct cost-benefit analyses for the adaptation measures, namely air conditioning, roof greening and greening of urban areas. Air conditioning is especially beneficial in office buildings as they prevent heat-related productivity losses. The benefit in residential buildings depends on the number of people who stay indoors. According to our estimations, a wide-ranging installation of air conditioning systems could prevent up to 218 death cases and 288 hospital stays. The benefit of roof greening is limited due to the small share of roofs that are suitable for greening purposes. Finally, the benefit of a gradual temperature decrease due to greening of outer surfaces is estimated.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Zusammenfassung | 3 |
| Abstract | 3 |
| Inhaltsverzeichnis | 4 |
| Abbildungsverzeichnis | 5 |
| Tabellenverzeichnis | 5 |
| 1 Einführung | 7 |
| 2 Die Klimaszenarien | 8 |
| 3 Business as Usual (BAU): Bewertung der Auswirkungen | 9 |
| 3.1 Zentrale Annahmen | 9 |
| 3.1.1 Identifikation von volkswirtschaftlich signifikanten Eigenschaften, die von einer Temperaturzunahme betroffen werden | 9 |
| 3.1.2 Wirkungsfunktionen..... | 10 |
| 3.2 Ergebnisse: Wirkungen der Klimaszenarien | 18 |
| 3.2.1 Produktivität | 18 |
| 3.2.2 Mortalität..... | 18 |
| 3.2.3 Morbidität..... | 19 |
| 4 Anpassungsmaßnahme: Klimaanlage | 20 |
| 4.1 Storyline und zentrale Annahmen..... | 20 |
| 4.2 Ergebnisse: Nutzen der Klimaanlage..... | 20 |
| 5 Anpassungsmaßnahme: Dachbegrünung | 22 |
| 5.1 Storyline und zentrale Annahmen..... | 22 |
| 5.2 Ergebnisse: Nutzen der Dachbegründung | 23 |
| 6 Anpassungsmaßnahme: Außenbegrünung | 24 |
| 6.1 Storyline und zentrale Annahmen..... | 24 |
| 6.2 Ergebnisse: Nutzen der Außenbegrünung | 25 |
| 7 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse | 25 |
| Literaturverzeichnis | 27 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abb. 3.1: Temperaturwirkungsmodell (eigene Darstellung) | 9 |
| Abb. 3.2: Metaanalyse – Zusammenhang zwischen Raumtemperaturen und Produktivität (aus Seppänen u. a. 2004) | 10 |
| Abb. 3.3: Hitzebedingter Anstieg der Mortalität – Ergebnisse ausgewählter Studien | 12 |
| Abb. 3.4: Hitzebedingter Anstieg der Morbidität – Ergebnisse ausgewählter Studien | 17 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tab. 2.1: Klimaszenarien | 8 |
| Tab. 3.1: Steigungswerte der Mortalität | 13 |
| Tab. 3.2: Studien über den Zusammenhang zwischen Mortalität und Temperatur | 14 |
| Tab. 3.3: Auswirkungen der Klimaszenarien auf die Produktivität des Dienstleistungs- und des Industriesektors in der Stadt Köln | 18 |
| Tab. 3.4: Jährliche Auswirkungen von Klimaszenarien auf die Mortalität in Köln | 19 |
| Tab. 3.5: Jährliche Auswirkungen von Klimaszenarien auf die Morbidität in Köln | 19 |
| Tab. 4.1: Jährliche Kosten und Nutzen der Klimaanlage in Bürogebäuden | 20 |
| Tab. 4.2: Jährliche Kosten und Nutzen der Klimaanlage in Wohngebäuden | 21 |
| Tab. 5.1: Jährliche Kosten und Nutzen der Dachbegrünung aus Installations- und Betriebskosten | 23 |
| Tab. 5.2: Jährlicher Nutzen der Dachbegrünung bzgl. Produktivität, Morbidität, Mortalität | 23 |
| Tab. 6.1: Jährlicher Nutzen der Außenbegrünung | 25 |

1 Einführung

Bereits in den letzten Jahren waren einige Veränderungen zu beobachten, die auf den Klimawandel zurückgeführt werden. Im Falle anhaltender Treibhausgasemissionen wird sich diese Entwicklung weiter verschärfen, womöglich mit erheblichen Folgen. Die Auswirkungen des Klimawandels sind vielfältig und unsicher und deshalb schwer zu fassen. Und dennoch müssen Entscheidungen über den Umgang mit dem Klimawandel im Lichte dieser vielfältigen Auswirkungen getroffen werden.

Im politischen Entscheidungsprozess werden herkömmlich Kosten-Nutzen-Analysen (KNA) angestellt, nach deren Maßgabe sich eine konkrete Handlung lohnt, wenn der Gesamtnutzen die Gesamtkosten übersteigt bzw. wird diejenige Handlungsoption bevorzugt, deren Nutzen-Kosten-Verhältnis am größten ist. In manchen Fällen ist es möglich Marktdaten für die Erstellung von KNA heranzuziehen. Handelt es sich jedoch um nicht-marktfähige Güter, die z.B. Krankheit, Flucht und Vertreibung oder Biodiversität betreffen, bedarf es differenzierter Bewertungsverfahren. Um die gesellschaftliche Wohlfahrt richtig zu repräsentieren müssen KNA auch nicht-marktfähige Güter einbeziehen.

Für die Bewertung nicht-marktfähiger Güter gibt es verschiedene Methoden, die es teilweise sogar möglich machen dem Gut einen monetären Wert zuzuordnen. Die Bewertungsverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der zugrundeliegenden Perspektive. Während die einen individuelle Präferenzen von Individuen erfragen, zielen die anderen darauf ab gesellschaftliche Veränderungen in Hinblick auf den resultierenden Erfahrungsnutzen zu bewerten. Die Analyse von Angaben zum persönlichen Wohlbefinden (Zufriedenheitsansatz) oder die Untersuchung individueller Verwirklichungschancen in der Gesellschaft (Befähigungen-Ansatz) stellen dabei zwei unterschiedliche Konzepte dar, den gesellschaftlichen Erfahrungsnutzen messbar zu machen.

Ziel des Projektes econCCadapt ist es unterschiedliche Bewertungsansätze zur Anwendung zu bringen und die Resultate miteinander zu vergleichen. Der konkrete Anwendungsfall bezieht sich dabei auf die Abschätzung der Kosten und Nutzen von Hitzeereignissen in der Stadt Köln. Als Großstadt ist Köln aufgrund des Hitzeinseleffektes besonders anfällig gegenüber Klimaveränderungen.

In diesem Bericht werden die Folgen von Sommer- und Hitzetagen in der Stadt Köln in Bezug auf Morbidität, Mortalität und Produktivität bewertet. Dies geschieht auf Basis von Wirkungsfunktionen, die der Literatur entnommen und mithilfe von Kölner Statistiken auf die Stadt Köln übertragen wurden. Die Unsicherheit bzgl. der Klimaentwicklungen wird durch zwei verschiedene Szenarien bedacht. Für diese beiden Szenarien wurden die Auswirkungen für den Business as Usual (BAU) Fall berechnet. Zusätzlich wurden KNA für die drei Anpassungsmaßnahmen Dachbegrünung, Klimaanlage und Außenbegrünung durchgeführt.

Der Text ist wie folgt strukturiert. Kapitel 2 beschreibt die den Berechnungen zugrundeliegenden Klimaszenarien. Auf Grundlage von Ergebnissen regionaler Klimamodelle für die Stadt Köln aus Grothues u. a. (2013) werden zwei verschiedene Szenarien gezeichnet – ein optimistisches und ein pessimistisches. In Kapitel 3 werden die unterstellten Wirkungsfunktionen beschrieben und Ergebnisse für den BAU-Fall angeführt. In den Kapiteln 4, 5 und 6 werden aufeinanderfolgend Klimaanlage, Dachbegrünung und Außenbegrünung als mögliche Anpassungsmaßnahmen an Hitzeereignisse diskutiert. Kapitel 7 diskutiert die Ergebnisse und schließt mit einem Ausblick auf weitere Forschungsbedarfe.

2 Die Klimaszenarien

Für die Fallstudie sind zwei Szenarien über mögliche Entwicklungen von Hitzewellen in der Stadt Köln bis zum Jahr 2050 angenommen worden: ein optimistisches und ein pessimistisches. Die Szenarien sind so gewählt, dass sie mit den Projektionen von Temperaturentwicklung in der Stadt Köln in Grothues u. a. (2013) konsistent sind. In dieser Studie wird mithilfe von verschiedenen regionalen Klimamodellen die Anzahl der zusätzlichen Sommer- und Hitzetage für den Zeitraum 2021-2050 geschätzt. Sommertage sind Tage mit Maximaltemperaturen von mindestens 25°C, Hitzetage sind Tage mit Maximaltemperaturen von mindestens 30°C (Grothues u. a. 2013:70ff). Die vier Modelle REMO, CLM, WETTREG und STARE kommen auf Grundlage des IPCC Szenarios A1B zu dem Ergebnis, dass die Anzahl an Sommertagen in Köln um bis zu 30% steigen kann, während bei Hitzetagen ein Anstieg von heute 8-9 auf 13-20 Tage möglich ist. Die der Studie entnommenen Werte stellen die Obergrenze (pessimistisches Szenario) bzw. Untergrenze (optimistisches Szenario) aus der Bandbreite der in Grothues u. a. (2013) präsentierten Modellergebnisse dar. Die Erfahrungen aus dem Hitzesommer 2003 haben gezeigt, dass im Zuge einer Hitzewelle die Temperaturen weit über 30 Grad liegen können. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellte Berechnungen an, laut derer in Mannheim im Jahr 2100 an vier Tagen im Jahr Tagesmaximaltemperaturen von 39°C erreicht werden könnten (DWD 2014). Aus diesem Grunde differenzieren wir in unseren Szenarien zwischen Hitzetagen mit Temperaturen über 30°C und extrem heißen Tagen, an denen die Temperatur auf über 39°C steigt.

Die Szenarien lauten:

Tab. 2.1: Klimaszenarien

| | | | | |
|---|--------------------------|-----------|-----|-----------|
| Zunahme von Sommertagen, Hitzetagen und extrem heißen Tagen: | Optimistisches Szenario | 25°C<t<30 | +11 | Tage/Jahr |
| | | 30°C<t<39 | +3 | Tage/Jahr |
| | | t>39 | +1 | Tage/Jahr |
| | Pessimistisches Szenario | 25°C<t<30 | +28 | Tage/Jahr |
| | | 30°C<t<39 | +13 | Tage/Jahr |
| | | t>39 | +4 | Tage/Jahr |

3 Business as Usual (BAU): Bewertung der Auswirkungen

3.1 Zentrale Annahmen

3.1.1 Identifikation von volkswirtschaftlich signifikanten Eigenschaften, die von einer Temperaturzunahme betroffen werden

Auf Grundlage der Literatur, die sich mit den möglichen Auswirkungen von Hitze befasst, wurde das untenstehende Diagramm entwickelt, das die Wirkung von Hitze auf volkswirtschaftlich signifikante Faktoren verdeutlichen soll. Neben dem Temperatureinfluss spielen auch andere Voraussetzungen eine wichtige Rolle in Hinblick auf die tatsächliche Hitzewirkung. So kann eine hohe Luftfeuchtigkeit die Hitze noch schwerer erträglich machen oder ein schlechter Gesundheitszustand den Organismus zusätzlich schwächen. Diese Faktoren sind jedoch schwer zu erfassen und zu berücksichtigen. In unserer Kosten-Nutzen-Analyse fokussieren wir uns auf den Einfluss von Hitze auf Arbeitsproduktivität, Morbidität und Mortalität. In Zusammenhang mit der Erweiterung von Kosten-Nutzen Analysen haben wir uns auch mit dem Effekt von Hitze auf die Lebenszufriedenheit befasst (siehe Hirschfeld und von Möllendorff 2015).

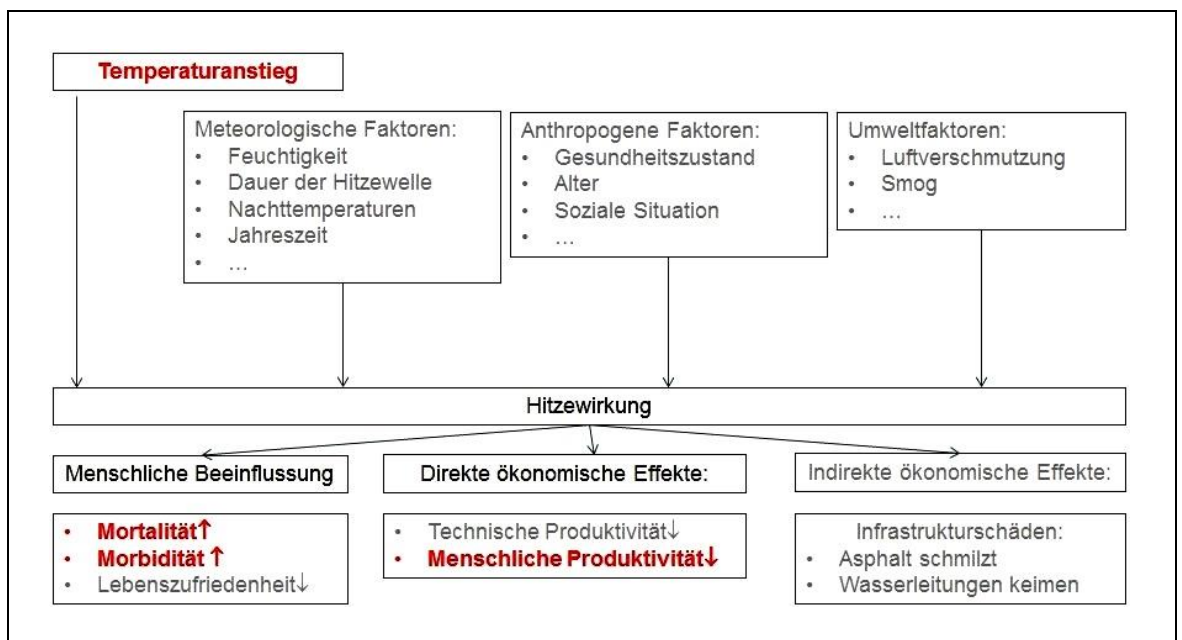


Abb. 3.1: Temperaturwirkungsmodell (eigene Darstellung)

3.1.2 Wirkungsfunktionen

3.1.2.1 Produktivität

Es gibt eine Reihe von Studien, die sich mit dem Einfluss von Hitze auf die Produktivität auseinandersetzen. Eine weit verbreitete Methode, die thermische Behaglichkeit in Räumen zu messen, ist das Predicted Mean Vote (PMV) Verfahren, bei dem verschiedene Individuen aus demselben thermischen Umfeld auf einer siebenstufigen Skala (kalt, -3 bis heiß, 3) angeben, wie sie die aktuellen Temperaturen empfinden (siehe z.B. Roelofsen 2002). Das Gruppenmittel repräsentiert den PMV, der möglichst nahe bei null liegen sollte, wenn Produktivitätsverluste vermieden werden sollen. Im Gegensatz dazu gibt es Studien, die mithilfe von Experimenten im realen Arbeitsumfeld oder im Labor untersuchen, wie sich die Arbeitsproduktivität bei bestimmten Temperaturverhältnissen verändert. Seppänen u. a. (2004) haben die Ergebnisse solcher Experimente zusammengetragen und leiten auf dieser Grundlage den in Abb. 3.2 dargestellten Zusammenhang her: Ab einer Temperatur von 25°C nimmt die Arbeitsproduktivität je Grad Celsius um 2% ab.

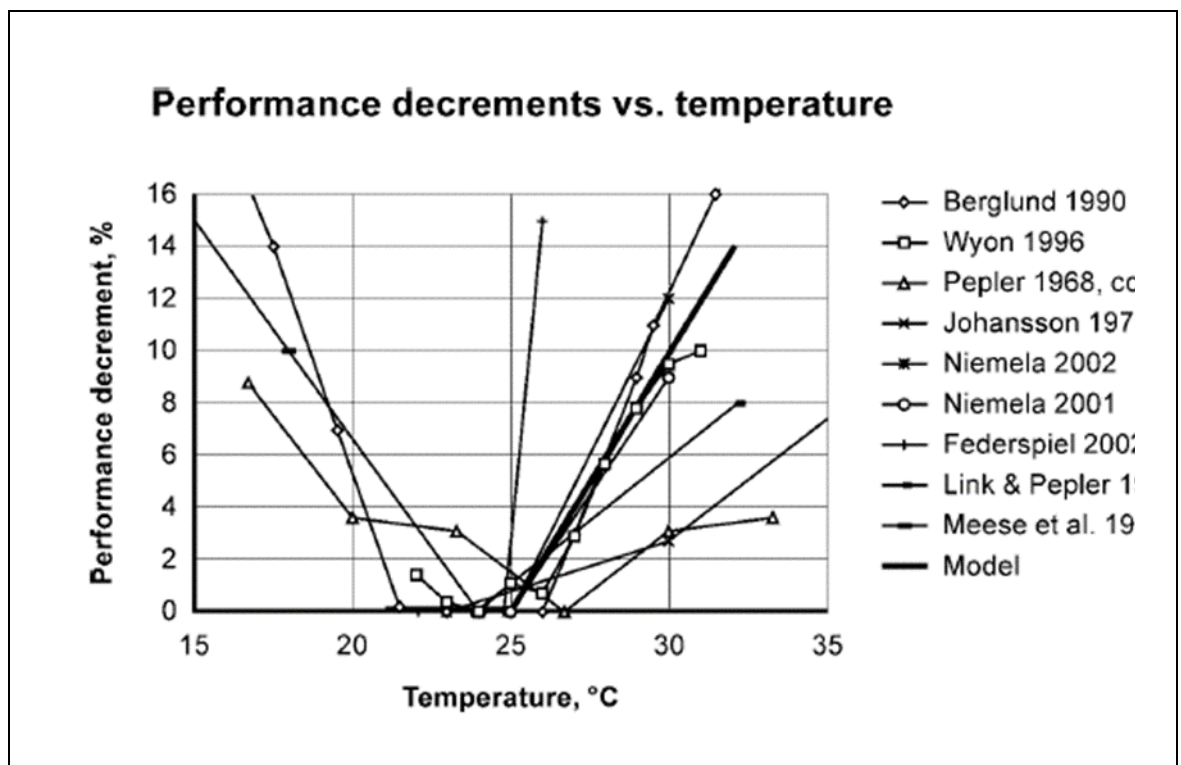


Abb. 3.2: Metaanalyse – Zusammenhang zwischen Raumtemperaturen und Produktivität (aus Seppänen u. a. 2004)

Dieser Zusammenhang bildet die Grundlage für unsere Berechnungen. Zunächst muss die Summe der stündlichen Abweichungen von 25°C an Sommertagen, Hitzetagen und extrem heißen Tagen berechnet werden. Ein typischer Tagestemperaturverlauf für einen Sommertag (>25°C) wird in Seppänen u. a. (2004) gezeichnet. Analoge Daten für Hitzetage (>30°C) und extrem heiße Tage (>39°C) haben wir den Stundenwerten des Deutschen Wetterdienstes entnommen (DWD 2015). Diese Temperaturverläufe sind exemplarisch und können ggf. in der Realität abweichen.

Damit stellt sich unsere Wirkungsfunktion wie folgt dar:

$$PL_s = \sum_k^K Days_{k,s} \sum_h^H (T_{h,k} - 25) \cdot 0,02 \cdot w \cdot Empl$$

PL_s Produktivitätsverlust in Szenario s (ohne Anpassung)

$Days_{k,s}$ Anzahl der zusätzlichen Tage in Kategorie k (Sommertag, Hitzetag, extrem heißer Tag) in Szenario s

$T_{h,k}$ Temperatur in Stunde h für Kategorie k (Sommertag, Hitzetag, extrem heißer Tag),
 $\forall T_{h,k} > 25$ mit $h \in Z^1$

w durchschnittlicher Stundenlohn in Köln im Jahr 2013 (Köln Nachrichten, 25.3.2014)

$Empl$ Anzahl der Angestellten in Köln im Jahr 2012 (Stadt Köln, 2014)

Alle Daten liegen getrennt für den Dienstleistungs- und Industriesektor vor, so dass die Effekte für diese beiden Sektoren einzeln geschätzt werden können. Dies gilt auch für die Bruttowertschöpfung, die dazu dienen kann, den Produktivitätsverlust in Relation zur Gesamtproduktivität zu setzen.

In anderen Studien wird ein ähnlicher Produktivitätsverlust angenommen. So rechnen etwa Hübler und Klepper (2007) in Anlehnung an Ergebnisse von Bux (2006) ab einer Grenztemperatur von 26°C mit einem Produktivitätsverlust von 3 - 12%. Die Ergebnisse der Studie von Seppänen u. a. (2004) beziehen sich auf Raumtemperaturen. Nach eingehender Recherche lässt sich aber kein annähernd allgemeingültiger Zusammenhang zwischen Innen- und Außentemperatur feststellen, da Bauweise, Deckenhöhe, Lüftungsmöglichkeiten, Fensterfläche, Himmelsrichtung, Stockwerk usw. einen erheblichen Einfluss auf diesen Zusammenhang haben (Voss und Pfafferott 2007). Aus diesem Grunde legen wir in unseren Berechnungen die Außentemperatur zugrunde.

In Anlehnung an Voss und Pfafferott (2007) nehmen wir an, dass bereits 64% der Büroflächen klimatisiert sind und in den bereits klimatisierten Gebäuden keine Produktivitätsverluste entstehen.

3.1.2.2 Mortalität

Es gibt eine Reihe von Studien, die auf Grundlage von Mortalitätszeitreihen den Effekt eines Temperaturanstiegs auf die Anzahl der Todesfälle – meist spezifiziert je nach Ursache und Altersgruppe – schätzen. In diesen Studien werden für gewöhnlich mithilfe von linearen Regressionsverfahren eine Grenztemperatur und die Steigung der Mortalität ab dieser Grenztemperatur ermittelt. Die Grenztemperatur gibt an, ab welcher Temperatur die Hitze einen signifikanten Effekt auf die Sterblichkeit hat. Die Steigung beschreibt, wie stark die Sterblichkeit ab dieser Grenztemperatur je Grad Celsius zunimmt. Kontrolliert wurde dabei in den meisten Fällen für Influenza, relative Feuchtigkeit, Saison und teilweise auch für soziökonomische Variablen. Um eine Schadensfunktion für Köln zu bestimmen, wurden für die Grenztemperatur und die Steigung der Median der gesichteten Studienergebnisse verwendet. Insgesamt handelt es sich hierbei um acht Studien, die für 49 Städte oder Regionen die Grenztemperatur und die prozentuale Steigung der Mortalität ab dieser Grenz-

¹ h steht für stündliche Zeiträume während der Arbeitszeit. Die Zeiträume sind wie folgt festgelegt: 8-9 Uhr, 9-10 Uhr, 10-11 Uhr, 11-12 Uhr, 13-14 Uhr, 14-15 Uhr, 15-16 Uhr und 16-17 Uhr.

temperatur geschätzt haben (siehe Tab. 3.2).² Abb. 3.3 zeigt eine Auswahl der verwendeten Schadensfunktionen und den Median aller gesichteten Schadensfunktionen. Um die Bandbreite der Studienergebnisse aufzuzeigen, sind in der Abbildung diejenigen Schadensfunktionen dargestellt, welche die oberen und unteren Grenzen in Hinblick auf Grenztemperatur und Steigung wieder spiegeln. Eine vollständige Auflistung aller Studien, die für die Berechnung des Medians herangezogen wurden, findet sich in Tab. 3.2.

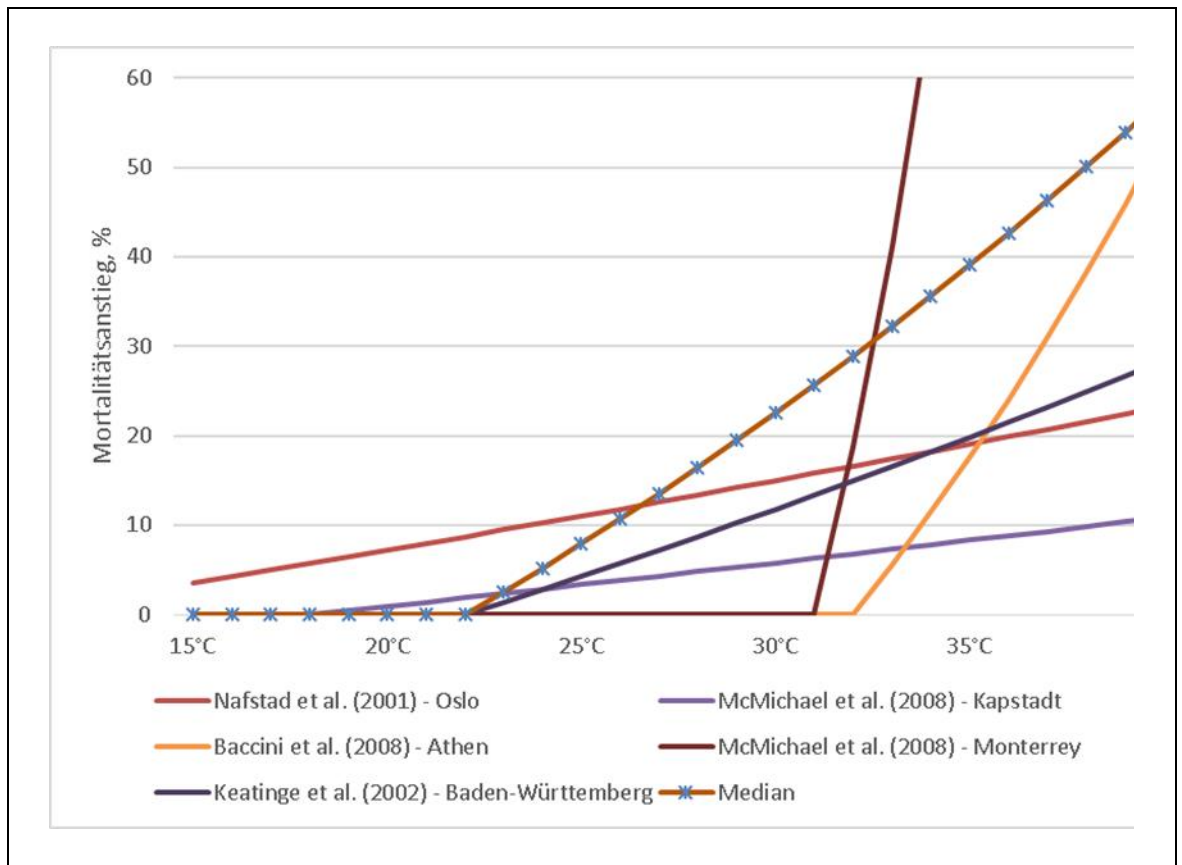


Abb. 3.3: Hitzebedingter Anstieg der Mortalität – Ergebnisse ausgewählter Studien

Die Wirkungsfunktion stellt sich wie folgt dar:

$$\Delta MT_s = \sum_k^K Slope_k * Days_{k,s} / 365 * MT_{2012}$$

ΔMT_s Zusätzliche hitzebedingte Mortalität in Szenario s (ohne Anpassung)

$Days_{k,s}$ Anzahl der zusätzlichen Tage in Kategorie k (Sommertag, Hitzetag, extrem heißer Tag) in Szenario s

² Dieses Vorgehen wurde gewählt mangels Wissens, welche der untersuchten Städte in den relevanten Aspekten (topographisch, klimatologisch, sozioökonomisch usw.) Köln am ähnlichsten ist.

$Slope_k$ Mortalitätsanstieg in Kategorie k (Sommertag, Hitzetag, extrem heißer Tag)

MT_{mean} Durchschnittliche Mortalität in Köln 2005-2014

Gemäß dieser Schadensfunktion wurde die zusätzliche hitzebedingte Mortalität für die Stadt Köln berechnet. Als Grundlage für die Berechnungen dienten dabei die Mortalitätsstatistiken der Stadt Köln für die Jahre 2005 bis 2014 (Stadt Köln 2015). Hierbei wurde eine gleichmäßige Verteilung der Todesfälle über das Jahr angenommen. Da für diese Berechnungen konkrete Temperaturen gewählt werden mussten, wurde für Sommertage 27°C, für Hitzetage 34°C und für extrem heiße Tage 39°C angenommen. Die zugehörigen Steigungswerte für die Temperaturen können Tab. 3.1 entnommen werden. Die Schadensfunktion wurde separat für die beiden Klimaszenarien berechnet.

Da die Studien für andere Städte oder Regionen als Köln konzipiert wurden, ist es möglich, dass bestimmte städtespezifische Faktoren (z.B. Altersstruktur, bestehende (soziale) Infrastruktur, Siedlungsdichte, Gewöhnung der Bevölkerung an Hitze) die Ergebnisse beeinflussen und die Übertragbarkeit auf Köln beeinträchtigen. Die Möglichkeit lediglich eine Auswahl an Werten aus Untersuchungsregionen zu nutzen, die Köln besonders ähnlich sind, wurde bewusst ausgeschlossen, um der methodischen Bandbreite der Studien Rechnung zu tragen. Denn auch methodische Unterschiede können einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben und werden im Mittel einer großen Zahl von Studien eher nivelliert.

Auch wenn fast alle Studien eine erhöhte Gefährdung älterer Menschen feststellen, werden in den meisten Studien unterschiedliche Intervalle für Altersgruppen festgelegt, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert. Aus diesem Grunde haben wir in unseren Berechnungen von einer spezifischen Ausgabe von Werten für ältere Bevölkerungsgruppen abgesehen.

Tab. 3.1: Steigungswerte der Mortalität

| | Steigungswerte |
|--------------------------|-----------------------|
| Sommertag (27°C) | 1,14 |
| Hitzetag (34°C) | 1,36 |
| Extrem heißer Tag (39°C) | 1,51 |

Tab. 3.2: Studien über den Zusammenhang zwischen Mortalität und Temperatur³

| Autor | Untersuchungsregion | Untersuchungszeitraum | Modell / Methode | Schadensfunktion | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|---|--------------------------|---|
| | | | | Grenztemperatur (95% CI) | Prozentualer Mortalitätsanstieg ab Grenztemperatur (95% CI) |
| Baccini u. a. (2008) | Athen (Griechenland) | 1992 - 1996 | Generalisiertes Lineares Modell (<i>Generalized Estimation Equation, GEE</i>) Verwendet wurde ein Maß für die gefühlte Temperatur, das nicht nur die Temperatur sondern auch Daten zu Luftfeuchtigkeit wiederspiegelt. | 32,7 (32,1 - 33,3) | 5,54 (4,30 - 6,80) |
| | Barcelona (Spanien) | 1992 - 2000 | | 22,4 (20,7 - 24,2) | 1,56 (1,04 - 2,08) |
| | Budapest (Ungarn) | 1992 - 2001 | | 22,8 (21,9 - 23,7) | 1,74 (1,47 - 2,02) |
| | Dublin (Irland) | 1990 - 2000 | | 23,9 (20,7 - 27,1) | -0,02 (-5,38 - 5,65) |
| | Helsinki (Finnland) | 1990 - 2000 | | 23,6 (21,7 - 25,5) | 3,72 (1,68 - 5,81) |
| | Ljubljana (Slowenien) | 1992 - 1999 | | 21,5 (15,0 - 28,0) | 1,34 (0,32 - 2,37) |
| | London (England) | 1992 - 2000 | | 23,9 (22,6 - 25,1) | 1,54 (1,01 - 2,08) |
| | Mailand (Italien) | 1990 - 2000 | | 31,8 (30,8 - 32,8) | 4,29 (3,35 - 5,24) |
| | Paris (Frankreich) | 1991 - 1998 | | 24,1 (23,4 - 24,8) | 2,44 (2,08 - 2,80) |
| | Prag (Tschechien) | 1992 - 2000 | | 22,0 (20,4 - 23,6) | 1,91 (1,39 - 2,44) |
| | Rom (Italien) | 1992 - 2000 | | 30,3 (29,8 - 30,8) | 5,25 (4,57 - 5,93) |
| | Stockholm (Schweden) | 1990 - 2000 | | 21,7 (18,2 - 25,3) | 1,17 (0,41 - 1,94) |
| | Turin (Italien) | 1991 - 1999 | | 27,0 (25,2 - 28,9) | 3,32 (2,53 - 4,13) |
| | Valencia (Spanien) | 1995 - 2000 | | 28,2 (23,7 - 32,7) | 0,56 (-0,35 - 1,47) |
| Zürich (Schweiz) | 1990 - 1996 | 21,8 (16,5 - 27,0) | 1,37 (0,49 - 2,25) | | |
| Ballester u. a. (1997) | Valencia (Spanien) | 1991 - 1993 | Autoregressive Poisson Regression | 24 | 1 - 4,2 |
| Curriero u. a. (2002) | Boston (USA) | 1973 - 1994 | Generalisiertes additives Poisson Modell | 20,9 | 3,24 |
| | Chicago (USA) | 1973 - 1994 | | 18,4 | 1,36 |
| | New York (USA) | 1973 - 1994 | | 19,1 | 3,49 |
| | Philadelphia (USA) | 1973 - 1994 | | 21,4 | 3,39 |
| | Baltimore (USA) | 1973 - 1994 | | 21,4 | 3,64 |
| | Washington (USA) | 1973 - 1994 | | 21,4 | 2,04 |
| Keatinge u. a. (2000) | Niederlande | 1988 - 1992 | Lineare Regression für 65-74jährige | 20,3 | 1,3 (0,4 - 2,3) |
| | Baden-Württemberg | 1988 - 1992 | | 22 | 1,4 (0,6 - 2,2) |

³ Leider wurde in den Studien nicht durchgehend angegeben, ob die berechneten Werte signifikant sind. Hier sind alle Studien aufgenommen, in denen nicht explizit erwähnt wird, dass sie Ergebnisse nicht signifikant sind.

| | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------------|--------------------|--|
| | Nord-Finnland | 1988 - 1992 | | 17,3 | 6,2 (4,0 - 8,4) |
| | Süd-Finnland | 1988 - 1992 | | 16,3 | 1,8 (1,0 - 2,6) |
| | London (Großbritannien) | 1988 - 1992 | | 22,3 | 3,6 (1,5 - 5,8) |
| | Norditalien | 1988 - 1992 | | 19,8 | 0,8 (0,3 - 1,2) |
| | Athen (Griechenland) | 1992 | | 25,7 | 2,7 (0,9 - 4,6) |
| Kim u. a. (2006) | Seoul | 1994 - 2003 | Generalisiertes additives Modell | 28,1 | 9,60 (8,04 - 11-17) |
| | Daegu | 1994 - 2003 | | 28,1 | 4,62 (2,74 - 6,54) |
| | Incheon | 1994 - 2003 | | 26,6 | 5,31 (3,1 - 7,56) |
| | Gwangju | 1994 - 2003 | | 26,6 | 2,64 (0,34 - 5,00) |
| | Daejeon | 1994 - 2003 | | 28,1 | 3,91 (-0,63 - 8,66) |
| Kunst u. a. (1993) | Niederlande | 1979 - 1987 | Poisson Regressionsanalyse | 16,5 | 1,23 |
| McMichael u. a. (2008) | Ljubljana (Slowenien) | 1989 - 1992 | Autoregressives Poisson Modell | 17 | 3,12 (1,26 - 5,02) |
| | Bukarest (Rumänien) | 1994 - 1997 | | 22 | 3,30 (2,35 - 4,26) |
| | Sofia (Bulgarien) | 1996 - 1999 | | 16 | 2,88 (2,11 - 3,65) |
| | New Delhi (Indien) | 1991 - 1994 | | 29 | 3,94 (2,80 - 5,08) |
| | Monterrey (Mexiko) | 1996 - 1999 | | 31 | 18,8 (13,0 - 25,0) |
| | Mexico City (Mexiko) | 1994 - 1998 | | 18 | 0,77 (0,14 - 1,39) |
| | Chiang Mai (Thailand) | 1995 - 1997 | | 28 | 2,39 (-0,49 - 5,35) |
| | Bangkok (Thailand) | 1991 - 1992 | | 29 | 5,78 (3,52 - 8,09) |
| | Salvador (Brasilien) | 1996 - 1999 | | 23 | 2,48 (0,93 - 4,05) |
| | Sao Paulo (Brasilien) | 1991 - 1994 | | 23 | 3,46 (2,62 - 4,31) |
| | Santiago (Chile) | 1998 - 1991 | | 16 | 1,04 (0,28 - 1,81) |
| | Kapstadt (Südafrika) | 1996 - 1999 | | 17 | 0,47 (-0,31 - 1,24) |
| | Pattenden u. a. (2003) | Sofia (Bulgarien) | | 1996 - 1999 | Generalisiertes additives Poisson Modell |
| London (Großbritannien) | | 1993 - 1996 | 21 | 1,86 (1,36 - 2,36) | |
| Median | | | | 22 | 2,6 |

3.1.2.3 Morbidität

Der Zusammenhang zwischen Hitze und der Häufigkeit von Erkrankungen wird hier auf Grundlage von drei Studien betrachtet, die sich mit verschiedenen Krankheitsbildern auseinandersetzen. Die Methoden sind ähnlich wie bei den unter Kapitel 3.1.2.2 aufgeführten Mortalitätsstudien. So werden lineare Regressionsverfahren verwendet, um die prozentuale Zunahme einer bestimmten Krankheit ab einer gewissen Grenztemperatur zu schätzen. Lin u. a. (2009) analysieren den Effekt von Hitzeepisoden auf Atemwegserkrankungen und Herz-Kreislaufkrankungen in New York in den Jahren zwischen 1991 und 2004 anhand von Krankenhausaufenthaltsstatistiken. Sie können für beide Krankheitsbilder einen statistisch gesicherten positiven Zusammenhang zwischen Hitze und Krankenhausaufhalten feststellen. Während der Effekt bei Atemwegserkrankungen sofort auftritt, wurde bei Herz-Kreislaufkrankungen erst nach einer Zeitspanne von 3 Tagen ein erhöhtes Krankheitsaufkommen festgestellt. Michelozzi u.a. (2009) untersuchen den Zusammenhang zwischen Hitze und Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Hirngefäßerkrankungen für 12 europäische Städte, ebenfalls auf Grundlage von Krankenhausstatistiken. Neben einer stadtspezifischen Analyse nehmen sie auch eine gruppierte Analyse für nördlich-kontinentale und für mediterrane Städte vor. Die Ergebnisse sind lediglich für Atemwegserkrankungen signifikant. In der Studie von Hansen u. a. (2008) geht es um den Effekt von Hitzewellen auf die mentale Gesundheit in Adelaide, Australien. Laut ihrer Studie liegt die stationäre Aufnahme von Patienten, die an psychischen und Verhaltensstörungen leiden, ab einer Temperatur von 26,7°C um 7,3% höher.

In unserer Analyse verwenden wir die Ergebnisse dieser drei Studien, um den Effekt von Hitze auf die Anzahl an Krankenhausaufhalten in Köln zu untersuchen (siehe Abb. 3.4).

Die Wirkungsfunktion stellt sich ähnlich dar, wie im vorigen Kapitel für die Mortalität:

$$\Delta MB_s = \sum_h^H \sum_k^K (Slope_{k,h}) * Days_{k,s} / 365 * MB_{2012,h}$$

ΔMB_s Zusätzliche hitzebedingte Morbidität in Klimaszenario s (ohne Anpassung)

$Days_{k,s}$ Anzahl der zusätzlichen Tage in Kategorie k (Sommertag, Hitzetag, extrem heißer Tag) in Szenario s

$Slope_{k,h}$ Prozentualer Anstieg der Morbidität in Kategorie k (Sommertag, Hitzetag, extrem heißer Tag) und für Krankheitsbild h (Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislauf und MBD)

$MB_{2012,h}$ Krankenhausentlassungen in Köln im Jahr 2012 für Krankheitsbild h (Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislauf und MBD)

Als Basiswerte für die Krankheitsvorkommen in den verschiedenen Krankheitskategorien wurde die Krankenhausdiagnosestatistik der Stadt Köln für das Jahr 2012 herangezogen, die Aufschluss gibt über die Anzahl der Krankenhausentlassungen je Krankheitstyp. Hierbei wurde wieder eine gleichmäßige Verteilung der Entlassungen über das Jahr angenommen. Ähnlich wie bei den Berechnungen zur Mortalität wurde ausgehend davon die Anzahl der Entlassungen für zusätzliche Sommertage, Hitzetage und extrem heiße Tage ermittelt, d.h. den zusätzlichen Tagen, an denen die Temperatur über der jeweiligen Grenztemperatur liegt. Da für diesen Fall wieder konkrete Temperaturen gewählt werden mussten, wurde für Sommertage 27°C, für Hitzetage 34°C und für extrem heiße Tage 39°C angenommen. Die zusätzlichen hitzebedingten Schäden wurden für die drei Krankheitsbilder separat ermittelt und anschließend aggregiert.

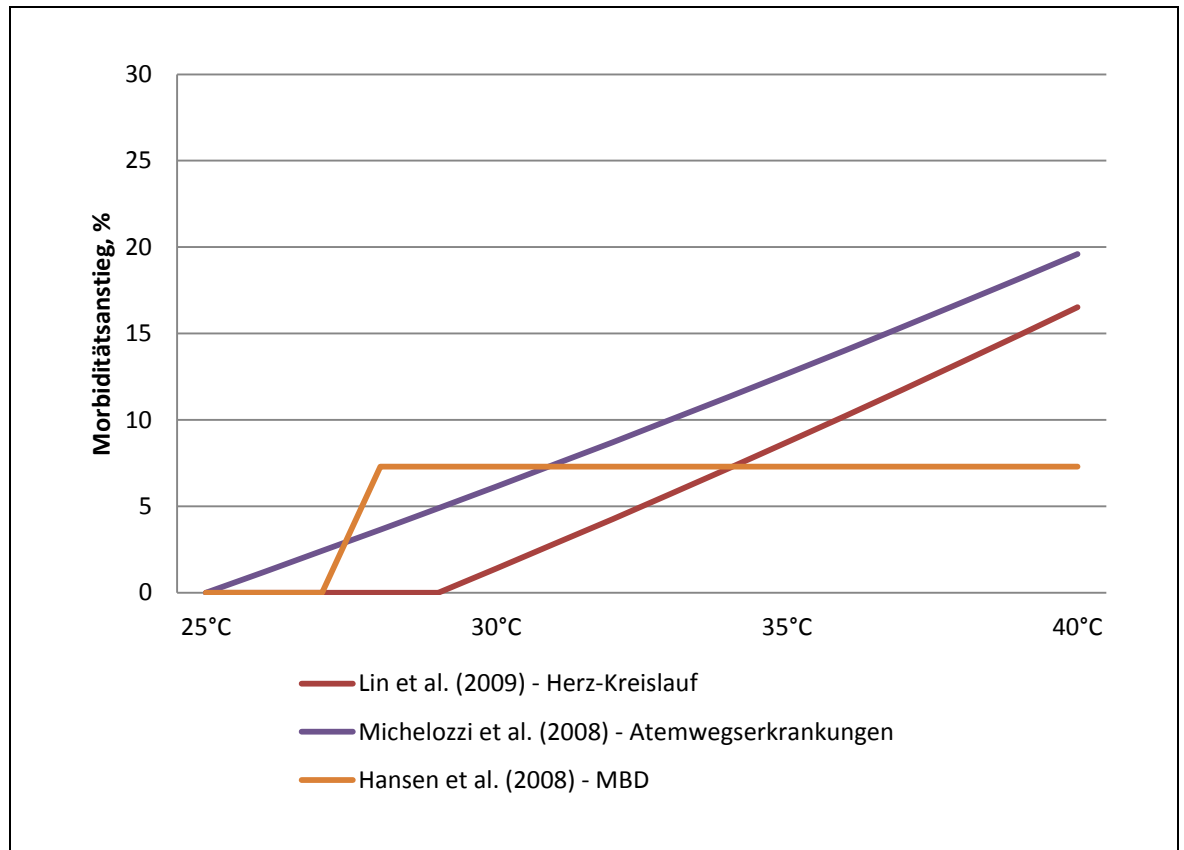


Abb. 3.4: Hitzebedingter Anstieg der Morbidität – Ergebnisse ausgewählter Studien

Es gibt bislang nur sehr wenige Studien, in denen die Auswirkungen von Hitzewellen auf Morbidität quantifiziert werden. Anders als bei der Mortalitätsschätzung stützten sich unsere Berechnungen daher lediglich auf drei Studien. Dass die Ergebnisse je nach Kontext stark variieren können, zeigt die Abweichung von Michelozzi u. a. (2009) (Fallstudie: 12 Europäische Städte) und Lin u.a. (2009) (Fallstudie: New York City) für Herz-Kreislauf-erkrankungen. Während Michelozzi u. a. (2009) keinen Zusammenhang zwischen Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Hitze (bzw. für einige Städte sogar einen negativen Zusammenhang) finden, stellen Lin u. a. (2009) einen positiven Zusammenhang fest. In unseren Berechnungen wurden die Ergebnisse der Studie von Michelozzi u. a. (2009) als Grundlage für die Berechnungen zu Atemwegserkrankungen verwendet und die Studie von Lin u. a. 2009 als Grundlage für die Berechnungen zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

Die Studie von Hansen u. a. (2008) dient der Berechnung für psychische Erkrankungen (MBDs), ist jedoch in einem klimatisch sehr anderen Kontext durchgeführt worden. In Adelaide, Australien gibt es heute schon mehrere Tage im Jahr, an denen die Temperaturen 40°C übersteigen, weshalb die Gewöhnung der Bevölkerung an Hitze vermutlich sehr viel stärker ausgeprägt ist, als in Köln. Zudem werden hier keine Angaben zu einem temperaturabhängigen Anstieg gemacht, sondern lediglich eine Aussage getroffen, wie stark die Anzahl der Krankenhauseinweisungen ab einer bestimmten Grenztemperatur ansteigt.

3.2 Ergebnisse: Wirkungen der Klimaszenarien

Die folgenden Unterkapitel bieten einen Überblick über die Ergebnisse, die wir auf Grundlage des in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Vorgehens berechnet haben.

3.2.1 Produktivität

Die in Tab. 3.3 dargestellten Ergebnisse beschreiben die jährlichen Produktivitätsverluste des Dienstleistungs- und des Industriesektors in Köln, die in Zusammenhang mit der klimawandelbedingten Zunahme an Sommer- und Hitzetagen zukünftig entstehen könnten. Die Werte sind sowohl in absoluten Geldwerten als auch relativ zur Bruttowertschöpfung angegeben. Je nach Szenario können sich die zusätzlichen Produktivitätsverluste insgesamt auf rund 26 Mio. Euro oder 96 Mio. Euro pro Jahr belaufen. Das entspricht 0,06% bzw. 0,23% der Bruttowertschöpfung in der Stadt Köln. Dass die prozentualen Werte für den Dienstleistungs- und den Industriesektor übereinstimmen, liegt daran, dass das Verhältnis zwischen der Anzahl der Angestellten und der Bruttowertschöpfung in beiden Sektoren in etwa gleich ist. Entsprechend der Studie von Voss und Pfafferoth (2007) wird angenommen, dass lediglich 36% der Büroflächen nicht klimatisiert sind und somit Produktivitätsverluste erfahren. In den Berechnungen wird nicht unterschieden zwischen Innen- und Außentemperaturverläufen, zwischen verschiedenen Tätigkeiten und ob die Arbeit tagsüber, nachts, draußen oder drinnen ausgeübt wird.

Tab. 3.3: Jährliche Auswirkungen der Klimaszenarien auf die Produktivität des Dienstleistungs- und des Industriesektors in der Stadt Köln

| | | Optimistisches Szenario | Pessimistisches Szenario |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Dienstleistungssektor | Absoluter Produktivitätsverlust | -21.098.801 € | -79.003.492 € |
| | % der Bruttowertschöpfung | -0,06% | -0,23% |
| Industriesektor | Absoluter Produktivitätsverlust | -4.587.428 € | -17.177.412 € |
| | % der Bruttowertschöpfung | -0,06% | -0,23% |
| Total | Absoluter Produktivitätsverlust | -25.686.229 € | -96.180.904 € |
| | % der Bruttowertschöpfung | -0,06% | -0,23% |

3.2.2 Mortalität

Tab. 3.4 beschreibt den aufgrund der zusätzlichen Sommer- und Hitzetage möglichen jährlichen Mortalitätsanstieg in Köln. Je nach Szenario ergeben sich jährlich zwischen 78 und 265 zusätzliche Todesfälle; das entspricht prozentual einer Zunahme von 0,85% bis 2,89% gegenüber der aktuellen Mortalität. Die Berechnung erfolgte auf Grundlage von Schadensfunktionen, die der Literatur entnommen wurden sowie den Todesfallstatistiken der Stadt Köln (siehe Kap. 3.1.2.2). In den Studien wird zum Teil eine erhöhte Gefährdung älterer Bevölkerungsgruppen festgestellt (siehe z.B. Ballester u. a. 1997). Der demographische Wandel könnte das Problem somit zusätzlich verschär-

fen. Dies bleibt in unseren Berechnungen unberücksichtigt. Hübler u. a. (2008) analysieren ebenfalls die Kosten von Hitzeereignissen, jedoch unter Berücksichtigung des demographischen Wandels und kommen zu dem Ergebnis, dass der veränderten Altersstruktur etwa ein Drittel der zusätzlichen Mortalität zuzurechnen sei.

Tab. 3.4: Jährliche Auswirkungen von Klimaszenarien auf die Mortalität in Köln

| | | Optimistisches Szenario | Pessimistisches Szenario |
|--------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Mortalitätsanstieg | absolut (zusätzliche Todesfälle p.a.) | +80 | +274 |
| | prozentual | +0,85% | +2,89% |

3.2.3 Morbidität

Tab. 3.5 zeigt die Berechnungen der zusätzlichen jährlichen hitzebedingten Morbidität für die Stadt Köln. Die Ergebnisse sind für die verschiedenen Krankheitsbilder dargestellt, die annahmegemäß von Hitze betroffen sein können. Laut unseren Berechnungen sind Atemwegserkrankungen am stärksten betroffen; hier können die jährlichen Krankenhausaufenthalte aufgrund von zunehmender Hitze auf das Jahr gesehen um voraussichtlich 0,22% bis 0,79% ansteigen. Insgesamt wird es laut der Berechnungen je nach Szenario jährlich zwischen 91 und 360 zusätzliche Krankenhausaufenthalte geben. Der Zusammenhang zwischen Hitze und Morbidität wurde bisher nur sehr vereinzelt untersucht, was die Grundlage für unsere Berechnungen stark beeinträchtigt. Auch hier stellen einige Studien eine stärkere Betroffenheit älterer Menschen heraus (siehe z.B. Michelozzi u. a. 2009). Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, vernachlässigen unsere Berechnungen den zusätzlichen Effekt der demographischen Alterung.

Tab. 3.5: Jährliche Auswirkungen von Klimaszenarien auf die Morbidität in Köln

| | | Optimistisches Szenario | Pessimistisches Szenario |
|-----------------------------|---|-------------------------|--------------------------|
| Atemwegserkrankungen | absolut (zusätzliche Krankenhausaufenthalte p.a.) | +43 | +158 |
| | prozentual | +0,22% | +0,79% |
| Herz-Kreislauf-Erkrankungen | absolut (zusätzliche Krankenhausaufenthalte p.a.) | +36 | +152 |
| | prozentual | +0,10% | +0,42% |
| MBDs | absolut (zusätzliche Krankenhausaufenthalte p.a.) | +12 | +51 |
| | prozentual | +0,08% | +0,33% |
| Total | absolut (zusätzliche Krankenhausaufenthalte p.a.) | +91 | +360 |
| | prozentual | +0,13% | +0,50% |

4 Anpassungsmaßnahme: Klimaanlage

4.1 Storyline und zentrale Annahmen

Klimaanlagen bieten eine gute Möglichkeit sich vor Hitze zu schützen. Während Bürogebäude schon heute häufig über Klimaanlage verfügen, sind bislang nur wenige Wohngebäude klimatisiert. Aber auch im privaten Bereich steigt die Nachfrage nach Klimaanlage an (Bettgenhäuser u. a. 2011).

Da gewerbliche Räume auch aufgrund von arbeitsschutzrechtlichen Bestimmungen schon häufig mit Klimaanlage ausgestattet sind, differenzieren wir im Folgenden zwischen Wohnräumen und Büroräumen. In Anlehnung an Voss und Pfafferott (2007) nehmen wir an, dass bereits in 64% der Büroräume Klimaanlage installiert sind. Damit verbleibt eine Fläche von 2,7 Mio. m² auf der Klimaanlage nachgerüstet werden müssen (Bürofläche Köln: 7,5 Mio m², Quelle: Tschammler und Scheunemann 2015). Annahmegemäß wird der hitzebedingte Produktivitätsverlust durch Klimaanlage gänzlich vermieden. Damit vernachlässigen wir Außendienstarbeit.

In Anlehnung an Jochem und Schade (2009), die davon ausgehen, dass der Klimaanlagebestand in Wohngebäuden 2005 unter 3% lag, nehmen wir an, dass die Wohngebäude in Köln bislang nicht klimatisiert sind und aus diesem Grunde auf der gesamten Wohnfläche Kölns Klimaanlage installiert werden (Wohnfläche Köln: 40,2 Mio. m², Quelle: Statistisches Bundesamt 2015a). Um die Wirkung auf Morbidität und Mortalität abzuschätzen, differenzieren wir zwei Szenarien darüber wie viele Leute sich in (klimatisierten) Wohngebäuden aufhalten und damit vor Hitzeeinwirkung geschützt sind. In dem einen Szenario befinden sich 20% in Wohnräumen, während es in dem anderen Szenario 80% sind.

Die Kosten der Klimaanlage setzen sich zusammen aus Installationskosten, Wartungskosten und Energiekosten. Die Installationskosten belaufen sich auf ca. 58,50 Euro pro m² (BKI Kostenplanung 2013). Die jährlichen Wartungskosten entsprechen in etwa 3% der Installationskosten, die durchschnittliche Lebensdauer beträgt 15 Jahre (Bettgenhäuser u. a. 2011). Die Berechnung der Energiekosten richtet sich nach einem Informationsblatt des Öko-Instituts (Öko-Institut 2011). Die Energiekosten sind variabel und richten sich nach den zusätzlichen Sommer- und Hitzetagen, an denen die Klimaanlage annahmegemäß 8 Stunden laufen. Aus diesem Grunde unterscheiden sich die Kosten für Klimaanlage im optimistischen und im pessimistischen Szenario.

4.2 Ergebnisse: Nutzen der Klimaanlage

In Tab. 4.1 und Tab. 4.2 sind die Ergebnisse unserer Berechnung in Bezug auf Kosten und Nutzen von Klimaanlage zusammengefasst. Die auf das Jahr heruntergebrochenen Kosten für Klimaanlage in Bürogebäuden liegen laut unserer Berechnungen zwischen 17,7 Mio. Euro und 22,8 Mio. Euro und fallen damit aufgrund der kleineren Gesamtfläche und des größeren Bestandes sehr viel geringer aus, als die Kosten für Klimaanlage in Wohngebäuden. Dem gegenüber stehen jährlich vermiedene Produktivitätsverluste von 25,7 Mio. Euro bis 96,2 Mio. Euro. Aus Tab. 4.1 geht hervor, dass sich Klimaanlage in Bürogebäuden allein aufgrund der vermiedenen Produktivitätsverluste rentieren; darauf verweist der positive Nettonutzen von 7,9 Mio. Euro bis 73,4 Mio. Euro pro Jahr.

Tab. 4.1: Jährliche Kosten und Nutzen der Klimaanlage in Bürogebäuden

| Annahmen | Kosten-/Nutzen-Kategorie | Optimistisches Szenario | Pessimistisches Szenario |
|---|---|-------------------------|--------------------------|
| Klimaanlagen in allen Bürogebäuden; Bestand = 64% | Kosten für Klimaanlagen in Bürogebäuden | 17.773.201,54 € | 22.782.604,61 € |
| | Vermiedene Produktivitätsverluste | 25.686.229,01 € | 96.180.904,20 € |
| | Nettonutzen | 7.913.027,48 € | 73.398.299,59 € |

Für die Installation von Klimaanlagen in Wohngebäuden werden die jährlichen Kosten auf zwischen 264,4 Mio. Euro und 338,6 Mio. Euro geschätzt (s. Tab. 4.2). Dieser beträchtliche Wert kann darauf zurückgeführt werden, dass annahmegemäß auf der gesamten Wohnfläche Kölns Klimaanlagen installiert werden. Diese Annahme greift möglicherweise zu hoch, wenn man sich vorstellt, dass zunächst vermutlich nur die vulnerablen oder besonders exponierten Bevölkerungsgruppen mit Klimaanlagen ausgestattet würden.

Der Nutzen in Bezug auf Morbidität und Mortalität variiert mit dem Anteil an Personen, die sich in Innenräumen aufhalten, wo sie durch die Klimaanlagen vor der Hitze geschützt sind. Die Anzahl der zusätzlichen Krankenhausaufenthalte kann pro Jahr im Vergleich zum BAU je nach Szenario um 18 bis 288 gesenkt werden. Die Anzahl der zusätzlichen Todesfälle sinkt pro Jahr im Vergleich zum BAU um 15 bis 212. Aufgrund der un stetigen Steigung von MBD Erkrankungen, ist hier keine Unterscheidung zwischen Hitze- und Sommertagen möglich. Somit können nur begrenzt Schlussfolgerungen über den Nutzen von Anpassungsmaßnahmen getroffen werden, da sie nur dann eine Auswirkung haben, wenn sie die Anzahl der Tage, die über der Grenztemperatur liegen, reduzieren.

Der Nutzen bezieht sich nur auf die klimawandelbedingte Zunahme an Sommer- und Hitzetagen. Die Wirkung auf den „Bestand“ an Sommer- und Hitzetagen wird hier außer Acht gelassen. Grothues u. a. (2013) zufolge gibt es schon jährlich 67 Sommertage und 20 Hitzetage, an denen die Klimaanlagen ebenfalls Erleichterung schaffen würden.

Tab. 4.2: Jährliche Kosten und Nutzen der Klimaanlagen in Wohngebäuden

| Annahmen | Kosten-/Nutzen-Kategorie | Optimistisches Szenario | Pessimistisches Szenario |
|---|---|-------------------------|--------------------------|
| Klimaanlagen in allen Wohngebäuden; Bestand = 0% | Kosten für Klimaanlagen in Wohngebäuden | 264.386.113,84 € | 338.617.358,51 € |
| Anteil der Leute, die sich in Innenräumen aufhalten 20% | Vermiedene Krankenhausaufenthalte | 18,27 | 72,09 |
| | Vermiedene Todesfälle | 16,06 | 54,73 |
| Anteil der Leute, die sich in Innenräumen aufhalten 80% | Vermiedene Krankenhausaufenthalte | 73,06 | 288,36 |
| | Vermiedene Todesfälle | 64,22 | 218,92 |

5 Anpassungsmaßnahme: Dachbegrünung

5.1 Storyline und zentrale Annahmen

Während sich konventionelle Flachdächer unter Sonneneinstrahlung stark aufheizen, können Gründächer die Sonnenenergie besser absorbieren. Auf diese Weise wirken sich Gründächer positiv auf das Stadtklima aus und können dazu beitragen den Hitzeinseleffekt in der Umgebung abzuschwächen (Susca u. a. 2011). Noch stärkere Effekte zeigen sich in Bezug auf die Innenraumtemperatur des begrünten Gebäudes, die laut verschiedenen Untersuchungen um 2° C bis 4,2° C abgesenkt werden kann (Niachou u. a. 2001, Pompeii und Hawkins 2011). Ein weiterer Nutzen von Gründächern besteht in der Aufnahme von Niederschlagswasser. Flachdächer sind besonders gut für die Dachbegrünung geeignet, jedoch ist es auch möglich Dachflächen mit einer Neigung von bis zu 35° zu begrünen (Trölztsch u. a. 2012).

In unseren Berechnungen konzentrieren wir uns auf Flachdächer, deren Fläche wir mithilfe von GIS-Daten der Stadt Köln ermittelt haben. Die Fläche beläuft sich auf ca. 5,9 Mio. m², was in etwa 7% der gesamten Dachflächen in Köln entspricht.⁴ Durch die Dachbegrünung entstehen im Vergleich zu Kiesdächern Mehrkosten der Installation, die zwischen 5 und 15 Euro pro m² liegen (Mann 2005). Diese einmaligen Installationskosten wurden in jährliche Werte für den beobachteten Zeitraum (2015-2050) umgerechnet. Neben den Installationskosten liegen auch die jährlichen Wartungskosten um ca. 0,3 Euro pro m² höher, als bei konventionellen Flachdächern (Mann 2005). Dem gegenüber steht ein ökonomischer Nutzen aus Energieeinsparungen und vermiedenen Kosten für die Kiesdacherneuerung. Während Kiesdächer ungefähr alle 20 Jahre erneuert werden müssen, weisen Gründächern eine sehr viel längere Lebensdauer auf (Schulze u. a. 2012). Zudem ergeben sich aus der Temperatursausgleichsfunktion von begrünten Dächern Energieeinsparung durch geringere Heizkosten im Winter und geringere Klimatisierungskosten im Sommer, die sich jährlich auf ca. 0,1 Euro pro m² belaufen (Peck 2003). Aufgrund dieser Einsparungen wird in einigen Studien angemerkt, dass sich Gründächer bereits aus rein privatwirtschaftlicher Sicht rentieren können, auch unberücksichtigt der Wirkung auf das Stadt- und Innenraumklima (Schulze u. a. 2012).

In Anlehnung an die o.g. Studie von Niachou u. a. (2001) nehmen wir an, dass die Innenraumtemperatur durch Gründächer um 2°C abgesenkt wird. Die Werte von Pompeii und Hawkins (2011), laut der die Temperatur sogar um 4,2°C sinkt, kommen uns auffallend hoch vor. Ferner gehen wir davon aus, dass bei einem Gründachanteil von lediglich 7%, die Außentemperatur nicht absenkt wird. Angenommen, dass sich der Anteil der Flachdächer gleichmäßig auf Wohn- und Bürogebäude verteilt, wird also in 7% der Büroflächen im Vergleich zum BAU ein niedrigerer Produktivitätsverlust eingefahren.

Um die Wirkung von Gründächern und einer dadurch verminderten Innenraumtemperatur auf Morbidität und Mortalität abschätzen zu können, müssen wir eine Annahme darüber treffen wie viele Personen sich in Innenräumen aufhalten. Da wir darüber keine Informationen haben berücksichtigen wir zwei unterschiedliche Szenarien. In dem einen halten sich 20% der Stadtbewohner in Innenräumen auf und in dem anderen Szenario 80%.

⁴ Für die anteilmäßige Berechnung haben wir die Daten zu „Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung“ des Statistischen Bundesamtes aus 2012 für Köln abgerufen und die Fläche für Wohnen und Gewerbe addiert (Statistisches Bundesamt 2015b).

5.2 Ergebnisse: Nutzen der Dachbegründung

Im Folgenden gehen wir davon aus, dass alle Flachdächer in Köln begrünt werden. In Tab. 5.1 sind die Kosten und Nutzen der Dachbegründung aus Installations- und Betriebskosten zusammengefasst. Entsprechend der oben angegebenen Werte von Mann (2005) nehmen wir an, dass die Mehrkosten einer Dachbegründung im Vergleich zum konventionellen Dach bei 5 bis 14 Euro pro m² liegen. Aus diesem Grunde ergibt sich für die Installations- und Wartungskosten eine Spannweite von 2,6 bis 4,1 Mio. Euro.

Tab. 5.1: Jährliche Kosten und Nutzen der Dachbegründung aus Installations- und Betriebskosten sowie Produktivität

| | Optimistisches Szenario | Pessimistisches Szenario |
|---|---|--|
| Installations- und Wartungskosten | 2.607.113 € bis 4.120.920 € | 2.607.113 € bis 4.120.920 € |
| Energieeinsparungen | 588.702,89 € | 588.702,89 € |
| Eingesparte Kosten der Kiesdacherneuerung | 2.060.460,11 € | 2.060.460,11 € |
| Vermiedene Produktivitätsverluste | 804.479,96 € | 2.612.876,33 € |
| Nettonutzen | -667.277,25 € bis 846.530,17 € | 1.141.119,11 € bis 2.654.926,54 € |

Im pessimistischen Szenario ist der Nettonutzen allein unter Berücksichtigung der monetären Faktoren (Energieeinsparungen, vermiedene Kosten der Kiesdacherneuerung und entgangene Produktivitätsverluste) positiv. Im optimistischen Szenario ergibt sich ein positiver Nettonutzen nur dann, wenn die Installationskosten unter 10 Euro pro m² liegen. Da annahmegemäß die Dachbegründung bei Hitze niedrigere Innenraumtemperaturen herbeiführt, können die jährlichen Produktivitätsverluste im Vergleich zum BAU um 0,8 Mio. Euro bis 2,6 Mio. Euro gesenkt werden.

Tab. 5.2: Jährlicher Nutzen der Dachbegründung bzgl. Produktivität, Morbidität, Mortalität

| Annahmen | | Optimistisches Szenario | Pessimistisches Szenario |
|---|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Arbeit findet in Innenräumen statt | Vermiedene Produktivitätsverluste | 804.479,96 € | 2.612.876,33 € |
| Anteil der Leute, die sich in Innenräumen aufhalten 20% | Vermiedene Krankenhausaufenthalte | 0,45 | 1,57 |
| | Vermiedene Todesfälle | 0,33 | 1,01 |
| Anteil der Leute, die sich in Innenräumen aufhalten 80% | Vermiedene Krankenhausaufenthalte | 1,81 | 6,29 |
| | Vermiedene Todesfälle | 1,31 | 4,04 |

In Tab. 5.2 wird der Nutzen der Dachbegründung in Bezug auf Morbidität und Mortalität dargestellt. In Bezug auf die Wirkung hinsichtlich Morbidität und Mortalität benötigen wir Annahmen darüber wie viele Leute sich in Innenräumen aufhalten. Je mehr Leute sich in Innenräumen aufhalten, desto positiver wirkt sich die Dachbegründung auf Krankenhausaufenthalte und Todesfälle aus. Der Nutzen der Dachbegründung tritt sehr viel deutlicher hervor, wenn wir ein pessimistisches Klimaszenario

rio zugrunde legen. Da lediglich auf 7% der Gebäude Dächer begrünt werden können und nur hier Veränderungen erzeugt werden, sind die Effekte relativ gering. Je nach Szenario können laut unserer Berechnungen jährlich 0,33 bis 4,04 Todesfälle bzw. 0,45 bis 6,29 Krankenhausaufenthalte vermieden werden.

6 Anpassungsmaßnahme: Außenbegrünung

6.1 Storyline und zentrale Annahmen

Vergleicht man die Temperaturen in der Kölner Innenstadt mit denen des Umlandes, stellt man fest, dass der mittlere Temperaturunterschied 2 K (mittlerer Wärmeinseleffekt) beträgt (Grothues u. a. 2013). Besonders stark ist der Unterschied bei Hitze – hier können Temperaturunterschiede von bis zu 10 K auftreten (maximaler Wärmeinseleffekt). Dementsprechend variiert auch die Anzahl der Sommer- und Hitzetage: Während die Messstationen in der Innenstadt 2012 16 heiße Tage verzeichneten, waren es im Umland lediglich 5 (Grothues u. a. 2013).

Flächenversiegelung, dichte Bebauung und wenig Grünflächen tragen zum Wärmeinseleffekt bei. Mathey u. a. (2011) haben die Auswirkungen einzelner Begrünungsmaßnahmen hinsichtlich ihres Temperaturabsenkungspotenzials untersucht. Dabei wird angenommen, dass die Vegetation auf einer Fläche von 1ha angelegt wird und die Temperatur an einem heißen Sommertag in 2m Höhe gemessen wird. Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass eine hohe Temperaturabnahme von über 2 K durch hohe und dichte Vegetationstypen, wie bspw. Wälder erzielt werden kann. Eine deutliche Abnahme von 1 K bis 2 K kann durch Baumreihen oder Gebüsch erzielt werden. Einen geringen Effekt auf die Temperatur haben Rasenflächen, Stadtbrachen oder Straßenverkehrsflächen mit Begleitgrün (Mathey u. a. 2011). Die Stadt Köln investiert vereinzelt in Begrünungsmaßnahmen. So wurde beispielsweise im Herbst 2013 ein Programm über 1,3 Mio. Euro für den Ersatz von Straßenbäumen beschlossen (Stadt Köln 2013).

Da eine Bewertung einzelner Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Stadtklima nicht durchführbar ist, gehen wir von einer systematischen Durchgrünung aus. In Anlehnung an die o.g. Studie von Mathey u. a. (2011) spielen wir verschiedene Szenarien durch, in denen eine Temperaturabsenkung von 1°C, 2°C bzw. 3°C erreicht wird.

Eine Kostenschätzung für Außenbegrünung ist im Rahmen dieser Studie nicht angefertigt worden, da hierfür eine umfangreiche Analyse nötig wäre, in der einzelne Begrünungsmaßnahmen hinsichtlich der geeigneten Flächen unter Berücksichtigung von Nutzungskonflikten untersucht würden. Eine solche Bewertung war im Rahmen dieses Projekts nicht möglich, bietet jedoch einen interessanten Ansatzpunkt für weitere Forschungsvorhaben.

Im Folgenden konzentrieren wir uns also auf den Nutzen, der durch Außenbegrünung in Hinblick auf Produktivität, Mortalität und Morbidität entsteht. Die in Kapitel 4 und 6 diskutierten Anpassungsmaßnahmen konzentrierten sich auf die Absenkung der Raumtemperaturen. Im Unterschied dazu geht es in diesem Kapitel um die Absenkung der Außentemperatur durch die Begrünung von Außenflächen. Da gemäß unseren Annahmen Innen- und Außentemperatur übereinstimmen, profitieren die Stadtbewohner sowohl drinnen als auch draußen.

6.2 Ergebnisse: Nutzen der Außenbegrünung

Die in Tab. 6.1 dargestellten Ergebnisse zeigen den jährlichen Nutzen der Außenbegrünung in Bezug auf Produktivität, Morbidität und Mortalität. Da Unklarheit darüber besteht um wie viel Grad die Temperatur in Köln durch Begrünungsmaßnahmen abgesenkt werden kann, spielen wir hier verschiedene Szenarien durch.

Der Nutzen durch die Anpassungsmaßnahme wächst, je höher die erzielte Wirkung in Bezug auf die Temperaturabsenkung. Während der Nutzen in Bezug auf Mortalität mit der Höhe der Temperaturabnahme linear zunimmt, ist in Bezug auf Produktivität und Morbidität ein abnehmender Grenznutzen zu beobachten.

Angenommen die Temperaturentwicklungen folgen dem pessimistischen Szenario und die Anpassungsmaßnahme kann die Temperatur um 3°C absenken, so würden laut unserer Berechnungen jährlich über 100 Todesfälle und annähernd 150 Krankenhausaufenthalte vermieden.

Tab. 6.1: Jährlicher Nutzen der Außenbegrünung

| | | Optimistisches Szenario | Pessimistisches Szenario |
|-----|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1°C | Vermiedene Produktivitätsverluste | 5.990.493,34 € | 19.285.022,42 € |
| | Vermiedene Krankenhausaufenthalte | 16,25 | 56,53 |
| | Vermiedene Todesfälle | 11,89 | 36,50 |
| 2°C | Vermiedene Produktivitätsverluste | 11.492.570,92 € | 37.326.804,71 € |
| | Vermiedene Krankenhausaufenthalte | 32,29 | 112,35 |
| | Vermiedene Todesfälle | 23,48 | 72,07 |
| 3°C | Vermiedene Produktivitätsverluste | 14.226.959,17 € | 48.323.559,63 € |
| | Vermiedene Krankenhausaufenthalte | 40,98 | 149,24 |
| | Vermiedene Todesfälle | 34,77 | 106,75 |

7 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Der vorliegende Text bietet einen Überblick über mögliche Folgen einer Zunahme an Sommer- und Hitzetagen für die Stadt Köln in Bezug auf Produktivität, Morbidität und Mortalität. Kapitel 3 fasst die Ergebnisse für das Business-As-Usual (BAU) Szenario zusammen und zeigt die nicht unerheblichen Konsequenzen eines Nicht-Handelns auf. Laut den Berechnungen können sich im pessimistischen Szenario Produktivitätsverluste von rund 96 Mio. € einstellen bzw. 274 Todesfälle und 360 Krankenhausaufenthalte zusätzlich auftreten. Jedoch variieren die Ergebnisse erheblich in Hinblick auf das zugrundeliegende Szenario. So betragen die Produktivitätsverluste im optimistischen Szenario lediglich rund 26 Mio. € und die Anzahl der hitzebedingten zusätzlichen Todesfälle und Krankenhausaufenthalte verringert sich im Vergleich zum pessimistischen Szenario um mehr als 2/3. Diese Unterschiede zeigen, dass die Unsicherheit in Bezug auf die Klimaveränderungen in der Betrachtung von Klimafolgen eine bedeutsame Rolle spielt. Gleichwohl zeigt sich in den Ergebnissen der Bedarf, sich mit Klimaveränderungen auseinanderzusetzen und mögliche Handlungsoptionen

zu erörtern, welche die Auswirkungen mindern können. Aus diesem Grunde wurden in den Kapiteln 4, 5 und 6 Anpassungsmaßnahmen diskutiert und in Hinblick auf ihr Kosten-Nutzen-Verhältnis untersucht.

In Kapitel 4 wird die Maßnahme erörtert, alle Büro- und Wohngebäude mit Klimaanlage auszustatten. Insbesondere in Bürogebäuden könnten hitzebedingte Produktivitätsverluste dadurch gänzlich vermieden werden. Der Nettonutzen, der sich durch den Vergleich von Installations- und Betriebskosten mit den entgangenen Produktivitätsverlusten einfach berechnen lässt, ist selbst im optimistischen Szenario positiv. Hingegen ist die KNA für Wohngebäude etwas komplizierter. Hier hängt der Nutzen der Klimaanlage davon ab, wie viele Personen sich in den klimatisierten Räumen aufhalten und wie viele sich draußen befinden. Aus Unkenntnis darüber wurden zwei unterschiedliche Szenarien entworfen. Im ersten Szenario wird angenommen, dass sich 20% drinnen aufhalten und 80% draußen, während im zweiten Szenario der umgekehrte Fall durchgespielt wird (80% drinnen und 20% draußen). In Verbindung mit dem Klimaszenario ergibt sich dadurch eine breite Ergebnisspanne. So können durch die Installation von Klimaanlage zwischen 16 und 218 Todesfälle und 18 bis 288 Krankenhausaufenthalte vermieden werden. Ein Nettonutzen für Klimaanlage in Wohngebäuden kann nicht berechnet werden, weil die Installations- und Betriebskosten in monetären Einheiten ausgedrückt sind und sich nicht direkt in Verbindung setzen lassen mit der Anzahl an Todesfällen und Krankenhausaufenthalten. Auf Methoden, die eine Monetarisierung von Menschenleben ermöglichen wurde hier bewusst verzichtet. Eine Einschränkung unserer Untersuchung ist, dass wir keine Kenntnis darüber besitzen, wie hoch die Innenraumtemperaturen ohne die Installation von Klimaanlage sind. In unserer Analyse nehmen wir vereinfachend an, dass Innen- und Außentemperaturen äquivalent sind und Klimaanlage die Hitze in Innenräumen vollständig abwenden können.

In Kapitel 5 werden Kosten und Nutzen der Dachbegrünung diskutiert. Annahmegemäß reduziert diese Maßnahme die Innenraumtemperaturen um 2°C. Da die für Dachbegrünung zur Verfügung stehende Dachfläche jedoch sehr begrenzt ist, können hier laut unseren Berechnungen keine bedeutenden Vermeidungseffekte in Hinblick auf Produktivität, Morbidität und Mortalität erzielt werden. Jedoch kann aufgrund von Energieeinsparungen und reduziertem Renovierungsbedarf der Nettonutzen (je nach Installationskosten) auch ohne die Berücksichtigung von Klimaeffekten positiv sein. Ein Nachteil der Untersuchung ist, dass die genaue Wirkung von Gründächern auf die Innenraumtemperatur unklar ist. Es ist anzunehmen, dass insbesondere in mehrstöckigen Häusern, der Effekt sich vordergründig in den oberen Stockwerken zeigt.

In Kapitel 6 wird der Nutzen der Begrünung von Außenflächen diskutiert. Da wir keine Kenntnis darüber besitzen, wie groß das Flächenpotenzial in Hinblick auf Außenbegrünung ist und welche Temperaturabsenkungseffekte dadurch erzielt werden können, wurden Berechnungen für verschiedene Szenarien angestellt. Aus den gleichen Gründen wurde auch auf eine Kostenschätzung verzichtet. Der Vorteil dieser Anpassungsmaßnahme ist, dass mit der Absenkung des Stadtklimas auch die Innenraumtemperatur reduziert wird und so ein umfangreicher Effekt erzielt werden kann.

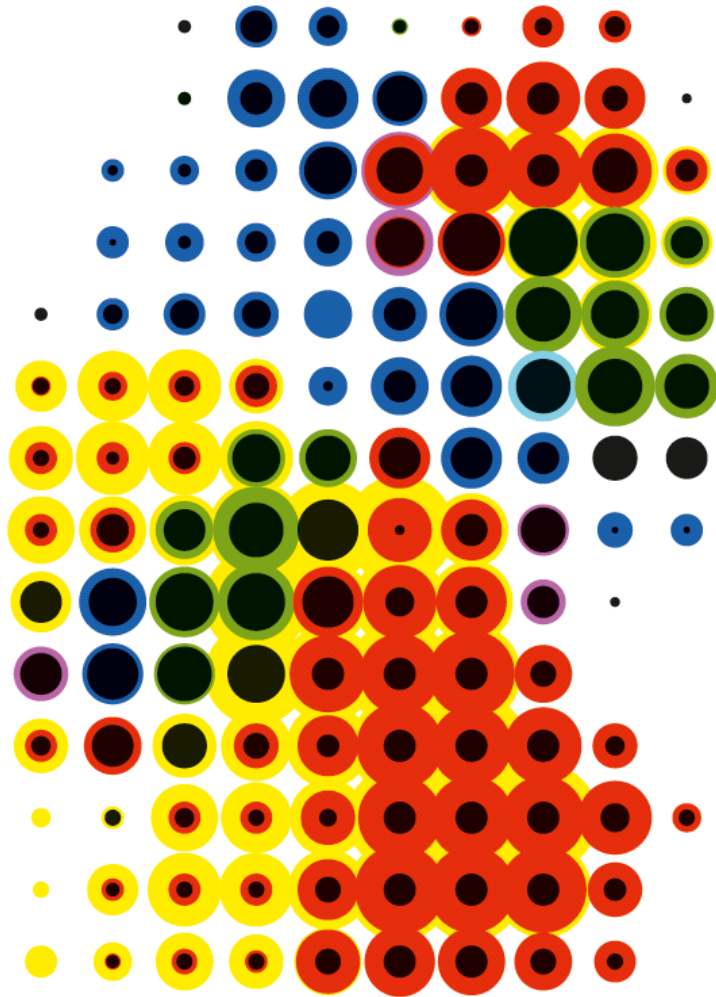
Die Einschränkungen unserer Analyse bieten Potenzial für weitere Forschungsvorhaben. So wäre es interessant Daten zu Innenraumtemperaturen und deren Beziehung zur Außentemperatur zu erheben. Zudem wäre es nützlich die Wirkung von Gründächern auf die Innenraumtemperatur für die einzelnen Etagen zu messen. Ferner basiert unsere Studie auf Sekundärdaten. Dieser Punkt ist insbesondere in Bezug auf die Wirkungsfunktionen von Morbidität und Mortalität relevant. Hier wäre es interessant mithilfe von Primärdaten, d.h. tagesgenauen Morbiditäts- und Mortalitätsstatistiken, eine eigens für die Stadt Köln konzipierte Analyse durchzuführen.

Literaturverzeichnis

- Baccini, Michela, Annibale Biggeri, Gabriele Accetta, Tom Kosatsky, Klea Katsouyanni, Antonis Analitis, H. Ross Anderson, Luigi Bisanti, Daniela D'Ippoliti, und Jana Danova (2008). „Heat effects on mortality in 15 European cities“. *Epidemiology*, vol. 19 (5), pp.: 711–19.
- Ballester, Ferran, Dolores Corella, Santiago Pérez-Hoyos, Marc Sáez, und Ana Hervás (1997). „Mortality as a function of temperature. A study in Valencia, Spain, 1991-1993“. *International journal of epidemiology*, vol. 26 (3), pp.: 551–61.
- Bettgenhäuser, Kjell, Thomas Boermans, Markus Offermann, Anja Krechting, Daniel Becker (2011). "Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung". *Climate Change 10/2011*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- BKI Kostenplanung (2013). "Baukosten, Bauelemente - Statistische Kostenkennwerte". Baukosteninformationssystem Deutscher Architektenkammern GmbH, Stuttgart.
- Bux, Kersten (2006). "Klima am Arbeitsplatz – Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse – Bedarfsanalyse für weitere Forschungen," Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, Forschung Projekt F 1987.
- Curriero, Frank C., Karlyn S. Heiner, Jonathan M. Samet, Scott L. Zeger, Lisa Strug, und Jonathan A. Patz (2002). „Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States“. *American journal of epidemiology*, vol. 155 (1), pp.: 80–87.
- DWD (2014). „Das Klima unter der Lupe". Deutscher Wetterdienst.
http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KUPK/Wir__ueber__uns/Broschueren/pdf/Klima__unter__der__Lupe,templateld=raw,property=publicationFile.pdf/Klima_unter_der_Lupe.pdf
- DWD (2015). Klima und Umwelt - Klimadaten. Deutscher Wetterdienst.
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FKU%2FKU2%2FKU21%2FKlimadaten%2Fgerman%2Fausgabe__stundenwerte__tu.html
- Grothues, Ellen, Barbara Köllner, Dominika Ptak, Clementine Dalelane, Thomas Deutschländer, Heinz Ertel, Mario Hafer, u. a. (2013). Klimawandelgerechte Metropole Köln. Abschlussbericht. LANUV-Fachbericht 50. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV).
- Hansen, Alana Lee, Peng Bi, Monika Nitschke, Philip Ryan, Dino Pisaniello, und Graeme Tucker (2008). „The effect of heatwaves on mental health in a temperate Australian city“. *Epidemiology*, vol. 19 (6), pp. 85.
- Hirschfeld, Jesko, und Charlotte v. Möllendorff. 2015. "Klimaökonomie braucht erweiterte Bewertungsmaßstäbe". *Ökologisches Wirtschaften*, Jg. 30, Nr. 1.
- Hübler, Michael, and Gernot Klepper (2007). Kosten des Klimawandels: Die Wirkung steigender Temperaturen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Eine Studie für WWF Deutschland.
- Hübler, Michael, Gernot Klepper, und Sonja Peterson (2008). "Costs of climate change: the effects of rising temperatures on health and productivity in Germany." *Ecological Economics*, vol. 68.1, pp.: 381-393.
- Jochem, Eberhard, und Wolfgang Schade (2009). Report of the Reference and 2°C Scenario in Europe. Deliverable M1.2 in the project Adaptation and Mitigation Strategies Supporting European Climate Policy (ADAM) in FP 6 of the European Commission, DG TREN.
 Available at: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/project_ADAM.pdf
- Keatinge, W. R., G. C. Donaldson, Elvira Cordioli, M. Martinelli, A. E. Kunst, J. P. Mackenbach, S. Nayha, und I. Vuori (2000). „Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: observational study“. *British Medical Journal*, vol. 321 (7262), pp.: 670–73.

- Kim, Ho, Jong-Sik Ha, und Jeongim Park (2006). „High temperature, heat index, and mortality in 6 major cities in South Korea“. *Archives of environmental & occupational health*, vol. 61 (6), pp.: 265–70.
- Köln Nachrichten (2014): "NRW: Reallöhne gehen deutlich zurück". 25.3.2014.
<http://koeln-nachrichten.de/neues-aus-nrw/statistik/nrw-realloehne-gehen-deutlich-zurueck/>.
- Kunst, Anton E., Casper W.N. Looman, und Johan P. Mackenbach (1993). „Outdoor air temperature and mortality in the Netherlands: a time-series analysis“. *American Journal of epidemiology*, vol. 137 (3), pp.: 331–41.
- Lin, Shao, Ming Luo, Randi J. Walker, Xiu Liu, Syni-An Hwang, und Robert Chinery (2009). „Extreme high temperatures and hospital admissions for respiratory and cardiovascular diseases“. *Epidemiology*, vol. 20 (5), pp.: 738–46.
- Mann, Gunter (2005). Ansätze zu objektbezogenen Kosten-Nutzen-Analysen. Fachvereinigung Bauwerksbegrünung.
- Mathey, Juliane, Stefanie Rößler, Iris Lehmann, Anne Bräuer, Valerie Goldberg, Cornelia Kurbjuhn, und Anna Westbeld (2011). "Noch wärmer, noch trockener? Stadtnatur und Freiraumstrukturen im Klimawandel". Abschlussbericht zur Voruntersuchung für das gleichnamige Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), Naturschutz und Biologische Vielfalt 111, Bonn.
- McMichael, Anthony J., Paul Wilkinson, R. Sari Kovats, Sam Pattenden, Shakoor Hajat, Ben Armstrong, Nitaya Vajanapoom, Emilia M. Niciu, Hassan Mahomed, und Chamnong Kingkeow (2008). „International study of temperature, heat and urban mortality: the 'ISOTHURM'project“. *International Journal of Epidemiology*, vol. 37 (5), pp.: 1121–31.
- Michelozzi, Paola, Gabriele Accetta, Manuela De Sario, Daniela D'Ippoliti, Claudia Marino, Michela Baccini, Annibale Biggeri, H. Ross Anderson, Klea Katsouyanni, und Ferran Ballester (2009). „High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities“. *American journal of respiratory and critical care medicine*, vol. 179 (5), pp.: 383–89.
- Niachou, A., K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, und G. Mihalakakou (2001). "Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance". *Energy and buildings*, vol. 33(7), pp.: 719-729.
- Öko-Institut (2012). Energieverbrauch von Raumklimageräten. Hrsg: Öko-Institut e.V., Freiburg und Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V., Mainz.
http://www.oeko.de/uploads/oeko/forschung_beratung/themen/nachhaltiger_konsum/infoblatt_raumklima.pdf
- Pattenden, S., B. Nikiforov, und B. G. Armstrong (2003). „Mortality and temperature in Sofia and London“. *Journal of Epidemiology and Community Health*, vol. 57 (8), pp.: 628–33.
- Peck, Steven (2003). "The green roof infrastructure monitor". Volume 5, No. 1.
<http://www.greenroofs.org/resources/GRIM-Spring2003.pdf>
- Pompeii, William C., und Timothy W. Hawkins (2011). „Assessing the impact of green roof on urban heat island mitigation: a hardware scale modeling approach“. *The Geographical Bulletin*, vol. 52, pp.: 52–61.
- Roelofsen, Paul (2002). „The impact of office environments on employee performance: The design of the workplace as a strategy for productivity enhancement“. *Journal of facilities Management*, vol. 1 (3), p.: 247–64.
- Schulze, Sven, Jenny Tröltzsch u.a. (2012). Gutachten zu den ökonomischen Folgen des Klimawandels und Kosten der Anpassung für Hamburg. Hamburg: Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut, ecologic Institut. <http://www.hamburg.de/contentblob/3815154/data/gutachten-oekonomischen-folgen-des-klimawandels.pdf>.
- Seppänen, Olli, William J. Fisk, und David Faulkner (2004). „Control of temperature for health and productivity in offices“. Lawrence Berkeley National Laboratory. <http://escholarship.org/uc/item/39s1m92c>.
- Stadt Köln, Amt für Stadtentwicklung und Statistik (2014). „Kölner Zahlenspiegel 2013“. http://www.stadt-koeln.de/mediaasset/content/pdf15/koelner_zahlenspiegel_2013.pdf.

- Stadt Köln, Amt für Stadtentwicklung und Statistik (2015). „Statistisches Jahrbuch Köln 2015“.
<http://www.stadt-koeln.de/politik-und-verwaltung/statistik/jahrbuecher/>.
- Stadt Köln (2013): "1.000 neue Bäume für Köln".
<http://www.stadt-koeln.de/politik-und-verwaltung/presse/1000-neue-baeume-fuer-koeln>
- Statistisches Bundesamt (2015a). Fortschreibung auf Basis GWZ 2011 Wohngebäude- und Wohnungsbestand - Stichtag 31.12.2012.
<https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data;jsessionid=86BBA7633C78DB7230E5E6B58273B6F8?operation=abruftabelleAbrufen&selectionname=035-02-4&levelindex=1&levelid=1440684630882&index=1>
- Statistisches Bundesamt (2015b). Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung - Stichtag 31.12.2012.
<https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data;jsessionid=14B809DE9FC1999F7F175DE821A3EA9C?operation=previous&levelindex=3&levelid=1440685973201&levelid=1440685828272&step=2Susca>,
- Susca, T., S. R. Gaffin, und G. R. Dell’Osso (2011). "Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs." *Environmental Pollution*, vol. 159.8, pp.: 2119-2126.
- Tröltzsch Jenny, Benjamin Görlach, Helen Lückge, Martin Peter, und Christian Sartorius (2012). "Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel – Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland". *Climate Change 10/2012*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Tschammler, Timo, und Helge Scheunemann (2015). Büromarktüberblick. Jones Lang Lasalle (JLL) GmbH, Frankfurt.
<http://www.jll.de/germany/de-de/Research/Bueromarktueberblick-Q2-2015-Germany-JLL.PDF?35091ed0-e08c-4809-a24e-ec21a57f59e1DWD>. 2015. Stundenwerte für Temperaturen.
- Voss, Karsten, und Jens Pfafferott (2007). "Energieeinsparung contra Behaglichkeit?". Forschungsbericht Heft 121. Bonn: BMVBS/BBR.



www.oekonomie-klimawandel.de