Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse

Inaugural-Dissertation zur
Erlangung der Doktorwürde
der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der
Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg i. Brsg.

vorgelegt von

Christina Koppe

Freiburg im Breisgau
2005

Datum der Disputation: 20.05.2005

Dekan:	Prof. Dr. Ernst E. Hildebrand
Referent:	Prof. Dr. Gerd Jendritzky
Korreferent:	Prof. Dr. Helmut Mayer

DANKSAGUNG

Nachdem ich mich einige Jahre mit der Erstellung meiner Doktorarbeit herum geschlagen habe und nun nur noch die letzten kleineren Formatierungsarbeiten anstehen, ist es an der Zeit, den Menschen zu danken, die mich in dieser Zeit unterstützt haben.

Daher gilt mein Dank in erster Linie Herrn Prof. Dr. Gerd Jendritzky für die Bereitstellung des Themas, die Betreuung der Arbeit und für die vielen anregenden Diskussionen, ohne die diese Arbeit sicher nicht das geworden wäre, was sie ist. Bei Herrn Prof. Dr. Helmut Mayer möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die Aufmunterungen aus dem Werderring bedanken.

Auch den „*Sponsoren*“ meiner Arbeit danke ich. Während meiner Zeit als Doktorandin wurde ich aus dem europäischen Projekt **cCASHh** (**c**limate **C**hange and **A**daptation **S**trategies for **H**uman **h**ealth in Europe) und aus dem **KLARA**-Projekt (**K**limawandel – **A**uswirkungen, **R**isiken, **A**npassung) des Landes Baden-Württemberg finanziert. Ein Dankeschön geht auch an den Deutschen Wetterdienst für die Bereitstellung der Räumlichkeiten, der Hard- und Software sowie der netten und stets hilfsbereiten Kollegen bei der Medizin-Meteorologie in Freiburg.

Für die Bereitstellung von Daten bedanke ich mich beim Statistischen Landesamt Baden-Württemberg sowie bei Prof. Dr. Gerstengarbe, Sari Kovats, Dr. Anna Paldi, Dr. Julio Díaz und Prof. Dr. Pim Martens.

Ein großes Dankeschön geht auch an Jutta Rost, Thomas Holst und Ulla Bertsche, die sich durch die zahlreichen Kommafehler der Rohversion dieser Arbeit quälen mussten. Jutta und Thomas danke ich zusätzlich für die vielen nützlichen Dinge, die mich in Form eines „*Dissertationsabgabekalenders*“ seit Oktober 2004 durch die heiße Phase meiner Doktorarbeit begleitet haben.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei meinem Lebensgefährten und eifrigsten Korrekturleser Tom Schaller bedanken, der neben Kommafehlern und Schachtelsätzen auch noch meine Launen in der Endphase dieser Arbeit geduldig ertragen hat.

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung **5**

Abstract **9**

1 Einleitung **13**

2 Problemstellung **15**

3 Stand der Wissenschaft **17**

3.1 Thermophysiologische Grundlagen 17

3.1.1 Der Wärmehaushalt des Menschen 17

3.1.2 Thermoregulation 19

3.1.3 Thermisch bedingte Beschwerden 21

3.1.4 Thermische Behaglichkeit 22

3.1.5 Akklimatisation 23

3.1.6 Individuelle Unterschiede in der Hitzetoleranz 27

3.2 Verfahren zur Bewertung der thermischen Belastung 32

3.2.1 Einführung 32

3.2.2 Einfache Verfahren 33

3.2.3 Komplexe Verfahren 34

3.3 Umweltepidemiologische Untersuchungen zum Thema Hitze und Mortalität 40

3.3.1 Verfahren zur Bestimmung der hitzebedingten Sterblichkeit 42

3.3.2 Verfahren zur Bewertung der thermischen Belastung 43

3.3.3 Auswirkungen der Luftfeuchtigkeit 46

3.3.4 Zeitliche Verschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalität 47

3.3.5 Auswirkungen der Andauer thermischer Belastung 48

3.3.6 Regionale Unterschiede 49

3.3.7 Jahreszeitliche Unterschiede 49

3.3.8 Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung 51

3.3.9 Vorverlegung des Sterbezeitpunktes 52

3.3.10 Alter und Geschlecht 55

3.4 Fazit 56

4 Arbeitshypothesen und Zielsetzungen 59

5 Untersuchungsmethodik 63

5.1 Bewertung der thermischen Umwelt 63

5.1.1 Einführung 63

5.1.2 Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung 66

5.1.3 Fazit 73

5.2 Abschätzung der „erwarteten“ Mortalität 76

5.2.1 Mittlerer Jahresgang als Erwartungswert 77

5.2.2 Berechnung des Erwartungswertes mittels Filterfunktionen 79

5.2.3 Vergleich der verschiedenen Verfahren 87

5.2.4 Abschätzung der thermisch bedingten Mortalität 89

5.2.5 Relative Mortalität, Sensitivität und Vulnerabilität 90

5.2.6 Wochengang der Mortalität 92

5.2.7 Fazit 94

5.3 Datengrundlage 96

5.3.1 Mortalität 96

5.3.2 Gefühlte Temperatur 97

6 Ergebnisse 101

6.1 Auswirkungen thermischer Belastung auf die Mortalität in Baden-Württemberg 102

6.1.1 Gesamtmortalität 102

6.1.2 Altersspezifische Mortalität 111

6.1.3 Geschlechtsspezifische Mortalität 116

6.2 Vergleich verschiedener Regionen in Europa 119

6.2.1 Auswirkung thermischer Belastung auf die relative Mortalität 119

6.2.2 Vorverlegung des Sterbezeitpunktes 123

6.2.3 Auswirkung der Andauer thermischer Belastung 125

6.2.4 Trends der relativen Mortalität im Jahresverlauf 127

6.2.5 Vulnerabilitätsvergleich 127

6.3 Auswirkungen von Klimaänderungen 129

6.3.1 Bestimmung der thermischen Belastung 129

6.3.2 Bestimmung der Vulnerabilität der Bevölkerung 133

6.4 Hitzebelastungsvorhersage 138

7 Diskussion der Ergebnisse 143

7.1 Analyse der Daten aus Baden-Württemberg 143

7.2 Vergleich der Europadaten 148

7.3 Auswirkungen von Klimaänderungen 153

7.4 Hitzebelastungsvorhersage 156

8 Schlussfolgerungen 159

Literaturverzeichnis **167**

Verzeichnis der verwendeten Symbole **181**

Verzeichnis der Abbildungen **185**

Verzeichnis der Abbildungen im Text 185

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang 188

Verzeichnis der Tabellen **189**

Verzeichnis der Tabellen im Text 189

Verzeichnis der Tabellen im Anhang 192

Anhang **193**

ZUSAMMENFASSUNG

Über seinen Wärmehaushalt ist der Mensch eng mit der atmosphärischen Umwelt verknüpft. Daher kann thermische Belastung mit negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit verbunden sein. Zahlreiche umweltepidemiologische Untersuchungen haben dieses Thema bisher aufgegriffen, um eine Beziehung zwischen thermischer Umwelt und thermisch bedingter Mortalität herzustellen. In keiner dieser Studien wird die thermische Umwelt jedoch konsequent gesundheitsrelevant bewertet. Dazu gehört neben der Verwendung eines thermophysiologisch relevanten Bewertungsverfahrens, welches alle Mechanismen des Wärmeaustauschs des Menschen mit seiner Umgebung berücksichtigt, auch die Einbeziehung der kurzfristigen verhaltensgesteuerten und physiologischen Anpassung des Menschen an die lokalen Witterungsverhältnisse der letzten Wochen.

Durch die physiologische Anpassung (*kurzfristige Akklimatisation*) ändert sich die Reaktion des menschlichen Körpers auf die thermische Umwelt, weil diese durch eine Effizienzsteigerung des Thermoregulationssystems die effektiv auf ein Individuum wirkende thermische Belastung reduziert. Daneben vermindert die verhaltensgesteuerte kurzfristige Anpassung über die Änderung der getragenen Bekleidung den auf ein Individuum einwirkenden thermischen Stress.

In einem Großteil der bisher durchgeführten biometeorologischen und umweltepidemiologischen Studien machte sich die Tatsache, dass sich die Menschen an die lokalen Witterungsverhältnisse der letzten Wochen anpassen, in von der Region und der Jahreszeit abhängigen unterschiedlich hohen Schwellenwerten der thermischen Bewertungsfunktion für das Mortalitätsminimum bemerkbar. Dabei wurden nur wenige Versuche unternommen, das Bewertungsverfahren unabhängig von Region und Jahreszeit zu machen. Die Anpassungen bezogen sich alle auf die mittleren klimatischen Verhältnisse einer Region und nicht auf die für die kurzfristige Anpassung entscheidenden aktuellen Witterungsbedingungen der vorangegangenen Tage bis Wochen.

Da die kurzfristige Anpassung bei der Bewertung der thermischen Situation bisher unberücksichtigt geblieben ist, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode zur Berechnung von variablen Schwellenwerten für einzelne thermische Belastungsklassen entwickelt. Die neue Methode **HeRATE** (***He**alth **R**elated **A**ssessment of the **T**hermal **E**nvironment*) kombiniert ein physiologisch relevantes Bewertungsverfahren für die thermische Umwelt mit einem konzeptionellen Modell für die kurzfristige Anpassung (bestehend aus kurzfristiger Akklimatisation und verhaltensgesteuerter Anpassung) an die lokale Witterung der letzten vier Wochen. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, einen konstanten Schwellenwert mittels eines variablen Anteils zu modifizieren. Das Einbeziehen der kurzfristigen Anpassung hat den Vorteil, dass das Verfahren ohne weitere Veränderungen auf Daten aus unterschiedlichen klimatischen Regionen und zu unterschiedlichen Jahreszeiten angewendet werden kann. Durch die Berücksichtigung des konstanten Anteils hingegen werden nur Situationen berücksichtigt, die gewisse „*Mindestanforderungen*“ für die thermische Belastung erfüllen, was physiologisch begründet ist.

Zur thermophysiologisch relevanten Bewertung der Umwelt wird sowohl für den konstanten als auch für den relativen Anteil die sich aus dem Klima-Michel-Modell ergebende Gefühlte Temperatur (°C) verwendet.

Neben der Entwicklung einer Methode zur gesundheitsrelevanten Bewertung der thermischen Umwelt war es notwendig, ein Verfahren zur Abschätzung der thermisch bedingten Mortalität zu entwickeln, welches auch auf nicht-stationäre Mortalitätszeitreihen unterschiedlicher Längen anwendbar und von der Verfügbarkeit zusätzlicher Informationen wie beispielsweise der Populationsgröße unabhängig ist. Es wurde daher ein Verfahren entwickelt, das auf einer Filterung der Mortalitätsdaten mit einem 365 Tage umfassenden Gaußfilter basiert. Die sich durch die große Filterlänge ergebende Problematik einer zu flachen Amplitude des derart ermittelten Jahresganges wurde über eine Multiplikation der gefilterten Zeitreihe mit einem Restaurationsfaktor ausgeglichen. Dabei wurde der Restaurationsfaktor über eine Minimierung der quadratischen Abweichung der Rohdaten der Mortalität von den Werten der Filterfunktion bestimmt. Der so ermittelte Jahresgang der Sterbefallzahlen diente zur Abschätzung des Erwartungswertes der Mortalität. Um Zeitreihen aus unterschiedlichen Regionen miteinander vergleichen zu können, wurde in den weiterführenden Analysen die prozentuale Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert betrachtet (*relative Mortalität*).

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen standen tägliche Daten der Mortalität und der Gefühlten Temperatur für London (1976-1996), die Niederlande (1979-1997), Baden-Württemberg (1968-2003), Budapest (1971-2000), Lissabon (1980-

1998) und Madrid (1986-1997) aus dem **cCASHh**-Projekt (**c**limate **C**hange and **A**daptation **S**trategies for **H**uman **h**ealth in Europe) der EU und dem **KLARA**-Projekt (**Kl**imawandel – **A**uswirkungen, **R**isiken, **A**npassung) des Landes Baden-Württemberg zur Verfügung.

Signifikante Unterschiede in der Sensitivität der Bevölkerung für die einzelnen thermischen Belastungsklassen in allen untersuchten Gebieten zeigen an, dass mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit die Umwelt gesundheitsrelevant bewertet wird. Würde keine gesundheitsrelevante Bewertung der thermischen Situation erfolgen, so müssten sich die Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert zufällig über alle Belastungsklassen verteilen.

Die Abweichung der Sterbefallzahlen vom Erwartungswert ist um so größer, je stärker der thermische Stress eingestuft wird. Dabei ergibt sich bei der gemeinsamen Betrachtung aller untersuchter Zeitreihen eine Abhängigkeit der Sensitivität der Bevölkerung für eine bestimmte thermische Belastungsstufe von deren Häufigkeit. Da größere Häufigkeiten mit geringeren Sensitivitäten verbunden sind, könnte dieser Zusammenhang ein Hinweis auf langfristige Anpassungsmaßnahmen sein, welche bei der Bewertung der thermischen Umwelt unberücksichtigt bleiben.

Eine Anwendungsmöglichkeit von **HeRATE** ergibt sich aus dessen Eignung als Belastungsindikator für Hitzewarnsysteme. Da unabhängig von der klimatischen Region und der Jahreszeit als „*starke Wärmebelastung*“ eingestufte Situationen mit um 13-34% erhöhten relativen Mortalitäten die höchsten Abweichungen der Sterbefallzahlen vom Erwartungswert aufweisen, wird dieses Kriterium als Warnschwelle für eine Hitze-Warnung herangezogen. Eine Analyse der Eignung dieses Kriteriums ergibt in allen untersuchten Gebieten eine geringe Anzahl von Fehlwarnung, d.h. Warnungen, welche nicht mit einem Anstieg der Mortalität einhergehen.

Der Harvesting-Effekt (*Vorverlegung des Todeszeitpunktes*) für „*starke Wärmebelastung*“ und „*mäßigen Kältestress*“ beträgt maximal 35%, liegt aber in den untersuchten Gebieten meist zwischen 10% und 20%. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Harvesting-Effekt nach Wärmebelastung vor allem in den wärmeren und nach Kältestress in den kühleren Regionen Europas besonders ausgeprägt ist.

Bei einer Untersuchung der Bevölkerung unter und über 75 Jahren in Baden-Württemberg ergibt sich eine höhere Sensitivität der Älteren für thermische Belastung. Von einer Vorverlegung des Todeszeitpunktes sind jedoch vor allem die „*unter 75-Jährigen*“ betroffen. In dieser Altersklasse erreicht der Harvesting-Effekt nach „*starker Wärmebelastung*“ rund 50% und nach „*mäßigem Kältestress*“ 85% der zuvor aufgetretenen Übersterblichkeit.

Nach einem regionalen Klimaänderungsszenario des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung PIK wird sich die Häufigkeit von Tagen mit „*mindestens mäßiger Wärmebelastung*“ im Zeitraum 2001-2055 (Zukunftsszenario) verglichen mit dem Zeitraum 1951-2000 (Basisszenario) in Baden-Württemberg um 5-30% erhöhen. Der Rückgang der Tage mit Kältestress ist weniger stark ausgeprägt. Gleichzeitig ist von einer Sensitivitätssteigerung der Bevölkerung durch den höheren Anteil älterer Menschen auszugehen. Im Zukunftszeitraum kommt es verglichen mit dem Basiszeitraum zu einem Rückgang der kältebedingten und zu einem Anstieg der wärmebedingten Mortalität. Je nach Szenario über die Entwicklung der Mortalitätsrate über den bekannten Bereich (1968-2003) hinaus, fällt die Zunahme der wärmebedingten Sterblichkeit oder die Abnahme der kältebedingten Mortalität stärker ins Gewicht. Wird von einem negativen Trend in der Mortalitätsrate ausgegangen, so erhöht sich die thermisch bedingte Mortalität lediglich in den tieferen Regionen Baden-Württembergs um 0,15 Sterbefälle pro Jahr und 100.000 Einwohner. In den mittleren und höheren Lagen kommt es unter diesem Szenario für die Mortalitätsraten dagegen zu einem Rückgang der thermisch bedingten Mortalität um 0,81 beziehungsweise 0,97. Wird von einer konstant bleibenden Mortalitätsrate ausgegangen, so überwiegt in allen Höhenlagen der Einfluss des Anstiegs der wärmebedingten Mortalität. Entsprechend wird für die tieferen Lagen Baden-Württembergs mit einer Zunahme der thermisch bedingten Sterbefälle pro Jahr und 100.000 Einwohnern um 2,53, für die mittleren Lagen um 1,47 und für die höheren Lagen um 1,21 gerechnet.

ABSTRACT

Human beings are closely related to the atmospheric environment by the need to balance their heat budget, which involves all the complex conditions of heat exchange between the human body and the thermal environment. Therefore thermal stress can lead to adverse effects for human health. This issue has already been addressed in numerous epidemiological studies, in which the thermal environment has been related to thermal related mortality. However, none of these studies applied a consequent health relevant assessment procedure for the thermal environment. Apart from the use of a thermophysiologically relevant assessment procedure, that includes all mechanisms of heat exchange, a health relevant assessment procedure requires the consideration of short-term physiological and behavioural adaptation to the meteorological conditions of the past few weeks.

Due to the fact that humans adapt physiologically (acclimatisation) to the meteorological situation of the recent past, there is a change in the physiological response to thermal stress. This response reduces the effective heat load or cold stress a human being has to bear by increasing the effectiveness of the thermoregulatory system. Additionally, the thermal load is reduced due to short term behavioural adaptation.

In many of the former studies the fact that humans are adapted and acclimatised to a certain extent to their local climate can be seen in a regional and temporal variability within the thresholds upon which health effects can be found. In the past only few efforts have been made to adapt the thermal assessment procedure to these changing thresholds. However, these procedures were all based on the mean climatic conditions of the previous years and not on the actual thermal conditions of the past few weeks.

Therefore it was necessary to include short-term adaptation to the meteorological conditions of the past few weeks in an assessment procedure in order to conduct a health relevant assessment of the thermal environment. The method that has been developed **HeRATE** (***He**alth **R**elated **A**ssessment of the **T**hermal **E**nvironment*) combines a physiologi-

cally relevant assessment procedure of the thermal environment with a conceptual model to describe the short-term adaptation (including short-term acclimatisation and behavioural adaptation) to the actual thermal conditions of the past four weeks. The above described procedure aims at modifying a constant threshold by means of a variable part. Including short-term adaptation means that the method can be applied to data from different locations and at different times of the year without further modification. Based on the constant part only such thermal conditions are classified as heat load or cold stress that fulfil some minimum requirements, which is physiologically significant.

Perceived Temperature (°C), the output parameter of the so-called *Klima-Michel-Model*, is used for the relative as well as for the absolute part of the assessment procedure.

In addition, it was necessary to develop a new procedure for the estimation of thermal related mortality. The requirements were that it could be used even with non stationary mortality data and for time-series of different lengths. Additionally, the application of the method should be independent of the availability of further information such as population data. Therefore a procedure was chosen that is based on a Gaussian smoothing with a filter length of 365 days. Due to the length of the filter function of one year the minima and maxima of this function become too flat. In order to control this fact a restoration factor is introduced. The restoration factor can be used if the oscillation of interest is sinusoidal as is the course of the year. In this study the correction factor has been chosen in a way that the differences between the raw-data and the filter function were minimised. The corrected filter response function is taken as the expected mortality time series. For the analyses the deviation of the mortality rate from the expected mortality in percent was calculated (= *relative mortality*). This procedure enables the comparison of different mortality datasets with different baseline populations.

In the framework of this study daily mortality and Perceived Temperature data from London (1976-1996), The Netherlands (1979-1997), Baden-Württemberg (1968-2003), Budapest (1971-2000), Lisbon (1980-1998) and Madrid (1986-1997) from the EU-funded **cCASHh**-Project (**c**limate **C**hange and **A**daptation **S**trategies for **H**uman **h**ealth in Europe) and from the **KLARA**-Project (**Kl**imawandel – **A**uswirkungen, **R**isiken, **A**npassung) of the Federal State of Baden-Württemberg were available.

Significant differences in the sensitivity of all analysed populations between the different cold stress and heat load categories indicate that the results do not arise by chance. Thus it can be concluded that there is a high probability that with **HeRATE** the environment is assessed in a health relevant way. If not, the deviations of mortality from the expected values would be stochastically distributed.

Relative mortality is the higher the more severe the thermal situation is categorised. A correlation between the relative mortality of a certain thermal stress category and its relative frequency could be established. As high frequencies are connected with low relative mortality it can be concluded that apart from short-term adaptation also long-term adaptation, which is not included in the assessment procedure, acts as a modifying factor for sensitivity.

HeRATE can also be applied to Heat Health Warning Systems. All of the analysed time-series show the highest relative mortality with values between 13-34% about the expected value for a "*strong heat load*". Therefore a "*strong"* or *"extreme heat load*" seems to be a suitable criteria for a heat health warning. The analysis of the appropriateness of this criteria shows a low number of incorrect warnings, meaning warnings not associated with an increase in mortality.

The harvesting-effect after a day with a "*strong heat load*" or a "*moderate cold stress*" was less than 35%, but normally between 10-20%, of the thermal related mortality in all of the analysed regions. After a day with heat load harvesting-effects are more pronounced in the warmer regions and after cold stress in the colder regions of Europe.

An analysis of age-structured data in Baden-Württemberg (south-west Germany) has shown that people older than 75 years are more sensitive to thermal stresses than younger ones. Harvesting-effects, however, occur particularly in the age group under 75 years. After a "*strong heat load*" a harvesting-effect of about 50% and after a "*moderate cold stress*" of about 85% can be found in the younger age group.

Based on a regional climate change scenario of the Potsdam-Institute for Climate Impact Research (PIK) for Baden-Württemberg between 1951-2000 and 2001-2055 an increase in the frequency of days with a moderate or higher heat load of about 5-30% and a less pronounced decrease in the frequency of days with a moderate or lower cold stress can be expected. Due to changes in the age structure it can be assumed that at the same time there will be an increase in the sensitivity. Therefore, heat-related mortality will increase and cold-related mortality will decrease when comparing the period 2001-2055 with 1951-2000. Depending on the scenario that is used for the estimation of the mortality rate before 1968 and after 2003, the increase in heat-related mortality is or is not compensated by the decrease in cold-related mortality. If we assume a negative trend in mortality rate, an increase in total thermal-related mortality of 0,15 deaths per year and 100.000 inhabitants can be found in the lower parts of Baden-Württemberg, while in the higher regions thermal related mortality will decrease by 0,81 and 0,97 deaths per year and 100.000 inhabitants, respectively. In case a constant mortality rate before 1968 and after 2003 is assumed, the

increase of heat related mortality prevails the decrease of cold-related mortality in all altitudes. Accordingly, there will be an increase in thermal related mortality in the lower altitudes of 2,53 deaths per year and 100.000 inhabitants, in the middle altitudes of 1,47 and in the higher altitudes of 1,21.

1 EINLEITUNG

Der Mensch ist über seinen Wärmehaushalt sehr eng mit der atmosphärischen Umwelt verknüpft. Der Wärmehaushalt schließt alle komplexen Gegebenheiten des Wärmeaustauschs zwischen menschlichem Körper und atmosphärischer Umwelt ein. Neben diesem so genannten thermischen Wirkungskomplex haben auch der lufthygienische und der aktinische Wirkungskomplex Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen.

Die Auswirkungen der atmosphärischen Umwelt auf die menschliche Gesundheit gehen in der Regel jedoch nicht von einem Element alleine aus. So treten beispielsweise während sommerlicher Hochdrucklagen Wärmebelastung (thermischer Wirkungskomplex), hohe UV-Strahlungsintensitäten (aktinischer Wirkungskomplex) und höhere Immissionskonzentrationen von Photooxidantien (lufthygienischer Wirkungskomplex) gleichzeitig auf (Jendritzky und Grätz, 1999). Für akute Auswirkungen auf die Gesundheit sind die anderen Wirkungskomplexe verglichen mit dem thermischen allerdings häufig von untergeordneter Bedeutung.

Durch die enge Verknüpfung des menschlichen Wärmehaushalts mit seiner thermischen Umwelt sind Hitzewellen in den Vereinigten Staaten von Amerika und in Australien die Hauptursache für wetterbedingte Todesfälle. Auch in Europa, für welches kein Vergleich der Todesfallzahlen von unterschiedlichen „*Wetterkatastrophen*“ existiert, forderte thermische Belastung in der Vergangenheit eine nicht zu vernachlässigende Anzahl an Menschenleben. Während der Hitzewelle im Jahr 2003 dürften beispielsweise in ganz Europa rund 35.000 Menschen der Hitze zum Opfer gefallen sein (Larsen, 2003).

Im Gegensatz zu anderen Naturkatastrophen werden Hitzewellen oftmals von der Öffentlichkeit nicht als solche wahrgenommen. Dies liegt unter anderem daran, dass sie in der Regel nur geringen materiellen Schaden verursachen und verglichen mit einem Sturm oder einer Flutwelle eine geringe Medienwirksamkeit besitzen. Hinzu kommt die große Unsicherheit bei der Abschätzung der hitzebedingten Todesfälle. Da die Todesursache der

meisten Sterbefälle während einer Hitzewelle nicht direkt die Hitze ist, sondern durch die Hitze hervorgerufenes Versagen verschiedener Systeme im Körper, muss die Anzahl der Hitzetoten mittels statistischer Verfahren abgeschätzt werden. Dies ist, wenn kein Echtzeitmonitoring der Sterbefallzahlen durchgeführt wird, oft erst mit zeitlicher Verzögerung der Fall.

In Hinsicht auf eine globale Klimaänderung ist es wahrscheinlich, dass Hitzewellen in Zukunft häufiger, intensiver, länger und mit größerer räumlicher Ausdehnung auftreten werden als in der Vergangenheit (IPCC, 2001; Robinson, 2001). Beim Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur während des „*Hitzewellensommers*“ 2003 in Basel (Schweiz) mit der des SRES A2 Szenarios des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zeigt sich eine nicht eindrucksvolle Übereinstimmung der beiden Häufigkeitsverteilungen (Beniston, 2004). Wenn die Klimamodelle Recht behalten, wäre der Sommer 2003 ein Analogon für einen „*normalen*“ Sommer im letzten Drittel des 21. Jahrhunderts.

Die von den Klimamodellen prognostizierte größere Häufigkeit von Wärmebelastungssituationen wird voraussichtlich zu einem Anstieg der hitzebedingten Mortalität führen. Gleichzeitig wird mit einer Abnahme der Kältebelastung im Winter gerechnet.

Der Fokus dieser Arbeit wird auf die Wärmebelastung gerichtet, da der Zusammenhang zwischen Wärmebelastung und Mortalität direkter ist als der Zusammenhang zwischen Kältestress und einem Anstieg der Sterbefallzahlen (Díaz et al., 2005). Der weniger direkte Zusammenhang zwischen thermischer Belastung und Mortalität in der kalten Jahreszeit ist dadurch begründet, dass sich die Menschen im Winter häufiger in Innenräumen aufhalten, deren thermisches Milieu stärker von den Außenbedingungen abgekoppelt ist als im Sommer. Zusätzlich spielen Infektionskrankheiten wie Grippenwellen, die in dieser Studie nicht berücksichtigt werden konnten, für die Wintermortalität eine nicht unwesentliche Rolle.

2 PROBLEMSTELLUNG

Verschiedene regionale Klimamodelle prognostizieren für Europa eine sich ändernde thermische Umwelt (z.B. Beniston, 2004; Räisänen et al., 2004). Diese führt über ihre enge Verknüpfung zum Wärmehaushalt des Menschen zu neuen Chancen und Risiken für die menschliche Gesundheit. Es ist daher wichtig, Methoden zu entwickeln, um diese Vor- und Nachteile gesundheitsrelevant identifizieren, quantifizieren und bewerten zu können. Eine derartige Analyse ermöglicht es, Anpassungsmaßnahmen zur Vermeidung der negativen Auswirkungen auf die Gesundheit zu entwickeln und umzusetzen.

Bei der gesundheitsrelevanten Bewertung der thermischen Umwelt ergibt sich das Problem, dass neben den meteorologischen und nicht-meteorologischen Faktoren, die den Wärmehaushalt des Menschen beeinflussen, auch der individuelle Akklimatisationsgrad und die körperliche Verfassung die Reaktion eines Individuums auf seine thermische Umgebung mitbestimmen.

Die sich hieraus ergebende Problematik ist auch der Grund, warum bisher eine Vielzahl von Methoden zur Bewertung der thermischen Umwelt für die unterschiedlichen Fragestellungen der Medizin-Meteorologie beziehungsweise der Umweltepidemiologie entwickelt wurden. Die aus den unterschiedlichen Methoden resultierenden Ergebnisse haben in der Regel nur für den untersuchten Fall (Ort, Zeitraum) Gültigkeit. Dies macht einen Vergleich der unterschiedlichen Untersuchungen schwierig.

Zudem erschwert die kurzfristige Anpassung an die lokalen Witterungsverhältnisse der letzten Wochen eine Definition des Begriffs „*Hitzewelle*“. Denn obwohl die Hitzewelle ein rein meteorologisches Ereignis ist, kann sie nicht definiert werden, ohne die Auswirkungen auf den Menschen zu beachten, welche unter anderem von kurz- und langfristigen Anpassungsprozessen abhängig sind (Robinson, 2001). Wie alle Definitionen von Extremereignissen muss eine Hitzewellendefinition zwei Bedingungen erfüllen:

1. die statistische Bedingung, d.h. der Begriff „*Hitzewelle*“ sollte so formuliert werden, dass es sich um ein seltenes Ereignis handelt;

2. die sozioökonomische Bedingung, die besagt, dass eine Gesellschaft durch ein derartiges Extremereignis geschädigt wird und/oder unfähig ist, damit umzugehen.

Ohne eine gesundheitsrelevante Definition von thermischer Belastung verschiedener Intensität und somit auch des Begriffs „*Hitzewelle*“ ist es nicht möglich, Änderungen der Eigenschaften thermischer Belastung zu bewerten oder die Folgen dieser Veränderungen auf die menschliche Gesundheit abzuschätzen. Eine Abschätzung dieser Folgen ist aber wichtig, um rechtzeitig langfristige Anpassungsmaßnahmen zur Verringerung der Sensitivität der Bevölkerung für thermische Belastung identifizieren und andernorts implementieren zu können.

Aufgrund der Auswirkungen, welche die kurz- und langfristigen Anpassungsmechanismen der Bevölkerung auf die thermisch bedingte Mortalität haben, wurde daher in einigen Studien vorgeschlagen, die Folgen von Klimaänderungen für die menschliche Gesundheit basierend auf räumlichen Analogien abzuschätzen (Smith und Pitts, 1997; IPCC-TGCIA., 1999; Expert Group on Climate Change and Health in the UK, 2001). Die Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist, dass die für die Übertragung herangezogenen klimatischen Charakteristika auch gesundheitsrelevant sind. Diese vermögen maximal die langfristige Anpassung an das Lokalklima widerzuspiegeln, nicht jedoch kurzfristigere witterungs- und wetterabhängige Anpassungsmaßnahmen.

3 STAND DER WISSENSCHAFT

3.1 Thermophysiologische Grundlagen

3.1.1 Der Wärmehaushalt des Menschen

Der menschliche Organismus befindet sich in permanenter Auseinandersetzung mit seiner thermischen Umwelt. Da Menschen homöotherm (Warmblüter) sind, müssen Wärmeproduktion und Wärmeabgabe ins Gleichgewicht gebracht werden, um die Körperkerntemperatur unabhängig von wechselnden Umweltbedingungen konstant auf ca. 37 °C zu halten (Hensel, 1973). Dies wird durch eine Reihe von autonomen physikalischen und chemischen Regulationsmechanismen erreicht. Zusätzlich unterstützen bestimmte Verhaltensweisen die Thermoregulation (Jendritzky, 1990). Bereits Abweichungen um wenige Kelvin von diesen 37 °C wirken sich negativ auf die Gesundheit aus (Rein, 1948).

Der Energieaustausch des Organismus mit seiner Umgebung erfolgt über Strahlung sowie über den Fluss von fühlbarer und latenter Wärme. Daraus ergeben sich vier grundlegende Umweltfaktoren, welche die Reaktion des menschlichen Körpers auf die thermische Umgebung bestimmen: Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit (Tab. 3.1). Bei der Untersuchung der thermischen Umwelt des Menschen ist daher eine Quantifizierung dieser vier Umweltfaktoren unerlässlich (Parsons, 2003).

Die Stärke des Energieaustauschs hängt grundsätzlich vom Gradienten einer Größe (z.B. Lufttemperatur, Luftfeuchte) ab, d.h. der Änderung von den Werten an der Oberfläche des Menschen zu denen in der Atmosphäre. Die turbulenten Flüsse werden darüber hinaus von der Windgeschwindigkeit gesteuert, die dafür sorgt, dass aus einem rein diffusiven ein wesentlich effizienterer turbulenter Transport wird (Jendritzky, 1990).

Tab. 3.1: Arten des Energieaustauschs und dazugehörige meteorologische Elemente (nach Rein, 1948; Hensel, 1973; Jendritzky, 1990)

Art des Energieaustauschs	meteorologische Elemente, Umweltfaktoren
fühlbarer Wärmefluss	Lufttemperatur Luftbewegung
latenter Wärmefluss	Luftfeuchte (absolut) Luftbewegung
Strahlung	lang- und kurzwellige Strahlungsflüsse (Strahlungsbilanz)
Atmung (fühlbarer und latenter Wärmefluss)	Lufttemperatur Luftfeuchte

Zusammen mit der metabolischen Rate und der getragenen Kleidung bilden die in Tabelle 3.1 genannten meteorologischen Elemente die sechs fundamentalen Einflussfaktoren, welche die Bedingungen des Wärmeaustauschs definieren. Weitere die Reaktion des menschlichen Körpers auf seine thermische Umwelt beeinflussende Faktoren sind beispielsweise die Temperatur von Oberflächen, mit denen der Körper unmittelbar in Kontakt ist (Konduktion), sowie Verhalten und Akklimatisation (ASHRAE, 1997; Parsons, 2003). Die Konduktion ist in der Regel jedoch von untergeordneter Bedeutung (Höppe, 1993).

Um die Köperkerntemperatur konstant zu halten (Wärmespeicherung = 0), muss der Körper die eigene Wärmeproduktion und die Wärmeaufnahme von außen mit den Wärmeverlusten ausgleichen. Das Konstanthalten der Körperkerntemperatur ist daher ein dynamisches Gleichgewicht. Die Wärmebilanz lässt sich folgendermaßen beschreiben (VDI, 1998):

$$\mathbf{M + W + Q^* + Q_H + Q_L + Q_{Sw} + Q_{Re} = 0} \qquad \textbf{Gl. 3.1}$$

M: *Gesamtenergieumsatz (metabolische Rate) (W)*
W: *mechanische Leistung (W)*
M-W: *innere Wärme: überschüssige Energie, welche als Wärme freigesetzt wird. abhängig von der Aktivität einer Person (W)*
Q:* *Strahlungsbilanz (W)*
Q_H: *turbulenter Fluss fühlbarer Wärme (W)*
Q_L: *Fluss latenter Wärme durch Wasserdampfdiffusion (W)*
Q_{Sw}: *turbulenter Fluss latenter Wärme durch die Verdunstung von Schweiß (W)*
Q_{Re}: *Wärmetransport über die Atmung (W)*

Dabei haben die Energieflüsse ein positives Vorzeichen, wenn sie zu einem Energiegewinn des Körpers führen und ein negatives Vorzeichen, falls sie mit einem Energieverlust verknüpft sind.

Durch die Oxidation der Nahrungsbestandteile (Kohlehydrate, Fette, Proteine) wird Energie in Wärme umgewandelt. Diese sogenannte metabolische Rate hängt in erster Linie von der Aktivität ab (Rein, 1948). Im Ruhezustand wird sie zudem von körperlichen Charakteristika (z.B. Größe, Gewicht, Geschlecht) beeinflusst (Höppe, 1993). Die metabolische Rate beträgt bei einem erwachsenen Menschen im Ruhezustand ungefähr 100 W. Dies ist gleichbedeutend mit einer auf die Hautoberfläche bezogenen Wärmeproduktion von 50 kcal/m²h (Jendritzky et al., 1979) und wird im Körper unter diesen Bedingungen (d.h. mechanischer Wirkungsgrad = 0) fast vollständig zu Wärme umgewandelt. Ungenügende Wärmeabgabe führt zu einem Aufheizen des Körpers (Hyperthermie) und zu starker Wärmeverlust zu einer Abkühlung (Hypothermie).

3.1.2 Thermoregulation

Das primäre Kontrollzentrum für die Thermoregulation liegt im Hypothalamus. Dort sind von arteriellem Blut umflossene Wärme- und Kältesensoren lokalisiert. Die Temperatur des arteriellen Blutes kann als Indikator für die mittlere Körpertemperatur angesehen werden. Zudem laufen im Hypothalamus die Informationen der Temperatursensoren zusammen, die in der Haut und an anderen Stellen des Körpers lokalisiert sind (Rein, 1948; Hensel, 1973; Khosla und Guntupalli, 1999).

Für den Ausgleich von Wärmeproduktion und Wärmeabgabe gibt es verschiedene Regulierungsmechanismen. Diese dienen in erster Linie der Minimierung der Abweichung der Körperkerntemperatur vom Soll-Wert. Eine der wichtigsten Stellgrößen ist die Regulierung des Wärmedurchgangswiderstandes der Haut über die Hautdurchblutung. Eine Reduktion dieser bei Soll-Wert-Unterschreitung kann die gleiche Isolationswirkung haben wie ein dicker Pullover (ASHRAE, 1997). Zusätzlich erfolgen bei Kälte eine Zunahme der Wärmebildung (chemische Thermoregulation), eine Steigerung des Muskeltonus, Kältezittern und eine zitterfreie Thermogenese (Rein, 1948; Hensel, 1973).

Bei einer Soll-Wert-Überschreitung wird die Durchblutung der Haut bis um das 15-fache erhöht (Vasodilation). Damit werden die Möglichkeiten der Wärmeabgabe an die Umgebung durch Konvektion und Abstrahlung verbessert. Diese Verlagerung des Blutes in die Peripherie bedeutet eine Belastung für das Herz-Kreislauf-System, da es gleichzeitig

Herzminutenvolumen und Blutdruck konstant halten muss (Khosla und Guntupalli, 1999). Zudem kommt es zur Sekretion von Schweiß. Dadurch wird der Haut Verdunstungswärme entzogen. In einer warmen Umgebung ist die Verdunstung von Schweiß (latenter Wärmefluss) der dominante Regulationsmechanismus zur Konstanthaltung der Körperkerntemperatur (Rein, 1948). Der Hautbenetzungsgrad erhöht sich so lange, bis die Fläche der benetzten Haut groß genug ist, um den Schweiß, welcher neu an die Hautoberfläche transportiert wird, zu verdunsten (ASHRAE, 1997). Daher kann der Hautbenetzungsgrad als ein Indikator für die thermischen Bedingungen angesehen werden.

Wenn der Wasserdampfdruck der Luft steigt, verringert sich die Differenz des Wasserdampfdrucks zwischen der Hautoberfläche und der Umgebungsluft. Da diese Differenz für die Wärmeabgabe durch Transpiration entscheidend ist, wird die Abgabe latenter Wärme dadurch reduziert.

Übersteigt die Lufttemperatur die Hauttemperatur, ist eine Wärmeabgabe über Konvektion nicht mehr möglich und es kommt zu einem Zugewinn von fühlbarer Wärme. In diesem Fall ist eine Abgabe von Wärme nur noch über die Verdunstung von Schweiß möglich. Ist diese gleichzeitig durch einen hohen Wasserdampfdruck der Umgebungsluft gehemmt, dann übersteigt die innere Wärmeproduktion die Wärmeverluste und die Körperkerntemperatur erhöht sich. Fände überhaupt keine Wärmeabgabe an die Umgebung statt, würde die Körperkerntemperatur einer sitzenden Person um etwa 1 K pro Stunde steigen (Khosla und Guntupalli, 1999).

Die physiologische wird durch die verhaltensgesteuerte Thermoregulation ergänzt. Diese beinhaltet beispielsweise die Anpassung der Kleidung, die Änderung der Haltung, Bewegung oder die Orientierung zur Wärmequelle. Die verhaltensgesteuerte Thermoregulation kann auch „*bewusst*“ gelernt werden. Des Weiteren ist der Mensch in der Lage, seine thermische Umwelt auf „*technischem*“ Weg zu beeinflussen. Diese „*technische*“ Thermoregulation besteht beispielsweise aus dem Bau von Häusern zum Schutz vor Wärme, Kälte und Wind sowie aus der Benutzung von Klimaanlagen oder Heizungen. Während unter warmen Bedingungen die physiologische Thermoregulation dominiert, ist unter kalten Bedingungen die verhaltensgesteuerte entscheidend (Khosla und Guntupalli, 1999). Durch die hohe Effizienz des menschlichen Thermoregulationssystems ist ein Ausgleich der Wärmebilanz innerhalb einer relativ großen Schwankungsbreite meteorologischer Einflussfaktoren möglich (Jendritzky et al., 1979).

3.1.3 Thermisch bedingte Beschwerden

Thermisch bedingte Beschwerden werden durch einen gestörten Wärmehaushalt hervorgerufen und entstehen infolge einer Abweichung der Körperkerntemperatur um wenige Kelvin vom Sollwert 37 °C. Eine Körperkerntemperatur von weniger als 28 °C (Hypothermie) kann zu ernsthaften Herzrhythmusstörungen und zum Tod führen. Steigt die Körperkerntemperatur über 41 °C (Hyperthermie), können wichtige Proteine beschädigt werden, was zu unzulänglicher Vasokonstriktion (Gefäßzusammenziehung), zur Einstellung der Schweißproduktion sowie zu einer erhöhten Wärmeproduktion durch Zittern führen kann. Die Schäden eines Hitzschlags sind häufig irreversibel und können zum Tod führen (ASHRAE, 1997). Während sportlicher Betätigung ist ein Anstieg der Körperkerntemperatur jedoch auf 38-39 °C möglich, ohne sich negativ auf die Gesundheit auszuwirken (Hensel, 1973; Parsons, 2003).

Es werden dabei die in Tabelle 3.2 aufgeführten Formen von direkt hitzebedingten Beschwerden unterschieden (Hildebrandt et al., 1998).

Tab. 3.2: Direkt hitzebedingte Beschwerden sowie deren Ursachen und Symptome (nach Mammarella und Paoletti, 1989; Hildebrandt et al., 1998)

hitzebedingte Krankheit	Ursache	Symptome
Hitzeerschöpfung	starker Schweißverlust ohne ausreichende Flüssigkeitszufuhr	Schocksymptome, keine Temperaturerhöhung
Hitzschlag	Störung der Thermoregulation nach längerer Einwirkung hoher Temperatur und unzureichender Wärmeabgabe	Kopfschmerz, Übelkeit, Bewusstlosigkeit, erhöhte Pulsfrequenz, Körpertemperatur über 40 °C, Haut: rot, trocken, heiß
Hitzekrämpfe	schwere Arbeit bei einer hohen Umgebungstemperatur und einem Defizit von extrazellulärer Flüssigkeit und Kochsalz	Muskelzuckungen, Krämpfe
Sonnenstich (Insolation, Heliosis)	unmittelbare Einwirkung der Sonnenstrahlen auf den unbedeckten Kopf und Nacken	heftiger Kopfschmerz, Übelkeit, Fieber, Schwindel, Ohrensausen

Bei Hitzeerschöpfung werden zwei Formen unterschieden. Die erste Form hat eine unzureichende Flüssigkeitszufuhr zur Ursache. Die zweite entsteht durch hohe Salzverluste bei

gleichzeitiger Zufuhr von ausreichend, aber elektrolytarmer Flüssigkeit (Khosla und Guntupalli, 1999).

Mit steigender Wärme- oder Kältebelastung wird das Herz-Kreislauf-System bei der Thermoregulation zunehmend gefordert (Hensel, 1973). Dass sich thermische Belastung auch negativ auf nicht direkt thermisch bedingte Erkrankungen auswirkt, scheint zudem daran zu liegen, dass dem Thermoregulationssystem im menschlichen Körper eine relativ hohe Priorität eingeräumt wird (Parsons, 2003). Daher wird beispielsweise eine hohe Schweißsekretion auch dann beibehalten, wenn der Körper bereits dehydriert ist. Zudem hängt der Regelkreis für die Thermoregulation eng mit dem Regelkreis für den Blutdruck zusammen. In Konkurrenzsituationen unterliegen die gefäßverengenden Impulse der Blutdruckregulation den gefäßerweiternden der Thermoregulation (Hensel, 1973). Dies erklärt auch, warum bei Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen thermischer Umwelt und Mortalität gute Zusammenhänge zwischen Gesamtmortalität und Umweltfaktoren (Gefühlte Temperatur, Lufttemperatur) gefunden werden (Jones et al., 1982; Kunst et al., 1993; Laschewski und Jendritzky, 2002).

Ein Schlüsselfaktor für das Auftreten hitzebedingter Krankheiten ist neben bereits vorliegenden Erkrankungen die fehlende Akklimatisation (Armstrong, 1998). Daher sind die Folgen von Hitzestress dort am größten, wo die Menschen nicht daran angepasst sind. Die Anpassung schließt sowohl die physiologische als auch die verhaltensgesteuerte Thermoregulation ein.

3.1.4 Thermische Behaglichkeit

Derjenige Zustand, der Zufriedenheit mit der thermischen Umwelt ausdrückt, wird häufig als thermische Behaglichkeit bezeichnet. Thermischer Komfort ist demnach ein psychologisches Phänomen, welches nicht direkt von den physikalischen Umgebungsbedingungen oder dem physiologischen Zustand abhängig ist (ASHRAE, 1992; Parsons, 2003). Das Behaglichkeitsempfinden schwankt somit von Tag zu Tag. Interindividuelle Schwankungen sind dabei etwa doppelt so groß wie die intraindividuelle Streuung (VDI, 1998).

Unter Behaglichkeitsbedingungen weisen die Thermoregulationsmechanismen minimale Aktivität auf (Hensel, 1973). Basierend auf der Lufttemperatur, dem Feuchteempfinden auf der Haut, der Körperkerntemperatur und den Anstrengungen, welche zur Regulation der Körpertemperatur unternommen werden, stellt sich der Eindruck des thermischen Komforts oder Diskomforts ein. Allgemein lässt sich sagen, dass sich dann thermische Behag-

lichkeit einstellt, wenn die Körpertemperatur in einem vorgegebenen engen Bereich gehalten wird, der Hautbenetzungsgrad gering ist und die Thermoregulationsmechanismen minimale Aktivität aufweisen (Jendritzky et al., 1979). Dies schließt auch bewusstes Verhalten mit ein, welches auf eine Reduktion des Diskomforts zielt.

3.1.5 Akklimatisation

3.1.5.1 EINFÜHRUNG

Akklimatisation ist als Reihe von physiologischen Anpassungen definiert, welche sich nach einer andauernden Hitzeexposition (Kälteexposition) von einigen Tagen einstellen und die Intensität der Wärmebelastung (des Kältestresses) in heißer (kalter) Umgebung verringern (Fanger, 1972; Yousef et al., 1986). Der Vorgang der Akklimatisation beruht daher auf einer Ökonomisierung der Thermoregulationsmechanismen (Hensel, 1973). Es ist zwischen langfristiger und kurzfristiger Akklimatisation zu unterscheiden. Im Gegensatz zur kurzfristigen Akklimatisation bleiben bei der Langfristakklimatisation die erworbenen physiologischen Anpassungen an die thermische Umgebung über einen langen Zeitraum erhalten (Frisancho, 1991; Hori, 1995).

Wenn Menschen an aufeinander folgenden Tagen einer warmen Umgebung ausgesetzt sind, ändert sich ihre physiologische Reaktion auf einen gegebenen Wärmereiz (Parsons, 2003). Akklimatisierte Personen tolerieren daher die heiße Umgebung besser und sind in einem geringeren Maß von hitzebedingten Beschwerden betroffen (Mammarella und Paoletti, 1989; Armstrong, 1998; Pandolf, 1998). Gleichzeitig reduziert sich die Belastung des Herz-Kreislauf-Systems und des Stoffwechsels (Armstrong, 1998). Neben den sechs fundamentalen Einflussfaktoren, welche die Bedingungen der Wärmeabgabe bestimmen, ist der Grad der Akklimatisation eines Individuums daher ein weiterer Punkt, der bei der Beurteilung der thermischen Umgebung berücksichtigt werden sollte.

Auch bezüglich der Geschwindigkeit beziehungsweise Stärke der Akklimatisation gibt es individuelle Unterschiede. Fitte Personen und Personen, die sich in der warmen Umgebung bewegen, akklimatisieren sich rascher als weniger fitte oder vorwiegend sitzende Individuen (Pandolf, 1998). Zusätzlich gibt es Hinweise darauf, dass die im Rahmen der kurzfristigen Akklimatisation erworbenen physiologischen Veränderungen bei der ersten Personengruppe länger erhalten bleiben (Armstrong, 1998; Pandolf, 1998). Die ohne körperliche Bewegung erworbenen physiologischen Veränderungen der kurzfristigen Akklimatisation zielen in erster Linie auf eine verstärkte Abgabe von fühlbarer Wärme und auf eine Ver-

ringerung der Körperkerntemperatur (Armstrong, 1998). Obwohl körperliches Training in warmer Umgebung den Akklimatisationsprozess beschleunigt, führt körperliche Anstrengung ohne gleichzeitige Wärmeexposition nicht zu den entsprechenden physiologischen Veränderungen (Nielson, 1998). Für eine vollständige Akklimatisation reicht bereits eine tägliche Exposition von ungefähr 100 Minuten aus (Pandolf, 1998).

3.1.5.2 PHYSIOLOGISCHE VERÄNDERUNGEN

a) Hitzeakklimatisation

Bei der kurzfristigen Akklimatisation verringert sich nach wiederholter aber unterbrochener Hitzeexposition der Soll-Wert für die Schweißsekretion (Khosla und Guntupalli, 1999). Während des Akklimatisationsprozesses wird die maximale Schweißproduktion stark erhöht. Eine gegebene submaximale Schweißrate wird dann bereits bei geringeren Werten für die Haut- und Kerntemperatur erreicht. Zudem ändert sich durch den Akklimatisationsprozess die Verteilung des Schweißes. Das Schwitzen wird zunehmend in die Peripherie verlagert, wo es effektiver ist. Als Folge der physiologischen Anpassung sinkt der Salzgehalt in Schweiß und Urin, das Blutvolumen erhöht sich und es stellt sich bei gleicher thermischer Belastung eine geringere Körperkerntemperatur ein (Hensel, 1973; Armstrong und Dziados, 1986; Mammarella und Paoletti, 1989; Nielson, 1998).

Durch den Salzgehalt im Schweiß wird der Wasserdampfdruck herabgesetzt und somit die Verdunstung erschwert. Nach längerem Schwitzen sammelt sich das Salz auf der Haut an und führt zu einem höheren Hautbenetzungsgrad (ASHRAE, 1997). Eine Reduktion des Salzgehaltes im Schweiß in Folge der Akklimatisation erhöht daher dessen Verdunstungsfähigkeit und somit dessen Effektivität (Hensel, 1973).

Weitere physiologische Veränderungen während des Akklimatisationsprozesses sind die Verringerung der metabolischen Rate sowie der Herzfrequenz (Mammarella und Paoletti, 1989; Pandolf, 1998; Shapiro et al., 1998). Des Weiteren kommt es zu einer Verbesserung der Durchblutung der Peripherie, was dort zu einer Erhöhung der Hauttemperatur und somit zu einer vermehrten Abgabe von fühlbarer Wärme führt (Armstrong, 1998).

In der Regel stellen sich die physiologischen Veränderungen im Rahmen der kurzfristigen Akklimatisation nach 3-12 Tagen ein (Tab. 3.3). Dabei beginnt die Akklimatisation bereits am ersten Tag. Innerhalb der ersten 4-6 Tage wird bereits 75% des maximal möglichen kurzfristigen Akklimatisationsgrades erreicht (Pandolf, 1998; Shapiro et al., 1998). Diese Veränderungen gehen nach Absetzen des thermischen Reizes langsam innerhalb von ein

bis zwei Wochen zurück und verschwinden nach einem Monat vollständig. Zuerst werden dabei diejenigen physiologischen Veränderungen zurück gebildet, welche bereits sehr früh nach Beginn der Hitzeexposition einsetzen (Armstrong, 1998).

Tab. 3.3: Untersuchungen zum zeitlichen Einsetzen und zum Verlust von physiologischen Veränderungen im Rahmen der kurzfristigen Akklimatisation

physiologische Veränderung		Tage (d)	Referenz
Einsetzen der Akklimatisation			
Erhöhung der Schweißrate		< 8	Williams und Heyns, 1969
		10-12	Armstrong und Dziados, 1986
		3-4	Hori, 1995
		2-7	Griefahn, 1997
Rückgang des Salzgehaltes im Schweiß		7-8	Armstrong und Dziados, 1986
		3-9	Armstrong, 1998
Rückgang des Salzgehaltes im Urin		4-5	Armstrong und Dziados, 1986
		3-9	Armstrong, 1998
Rückgang der Rektaltemperatur		8	Williams und Heyns, 1969
		6-7	Armstrong und Dziados, 1986
		4-8	Griefahn, 1997
Verringerung der Herzfrequenz		8	Williams und Heyns, 1969
		4-5	Armstrong und Dziados, 1986
		3-6	Griefahn, 1997
		1-5	Armstrong, 1998
Ausdehnung des Plasmavolumens		4-5	Armstrong und Dziados, 1986
		1-5	Armstrong, 1998
Verlust der Akklimatisation			
Rektaltemperatur	25% Verlust	7	Williams et al., 1967
	40% Verlust	14	
	50% Verlust	21	
Herzfrequenz	40% Verlust	7	
	75% Verlust	14	
	90% Verlust	21	
Schweißrate	65% Verlust	7	
	80% Verlust	14	
	100% Verlust	21	

Die sich im Rahmen der kurzfristigen Akklimatisation einstellenden physiologischen Veränderungen weisen keine Unterschiede zwischen der Anpassung an eine trocken-heiße und an eine feucht-warme Umgebung auf. Es wurde allerdings beobachtet, dass die Veränderungen, die im Rahmen einer Anpassung an trockene Hitze erworben wurden, langsamer zurückgehen, als jene, die sich bei einer Akklimatisation an feucht-heiße Bedingungen eingestellt haben (Pandolf, 1998).

Die in Klimakammern durchgeführten Studien zur Akklimatisation lassen sich nicht ohne weiteres auf reale Wärmebelastungsbedingungen übertragen, wie sie beispielsweise während Hitzewellen auftreten. Des Weiteren wurden die Studien meist mit einer bestimmten Populationsgruppe – oft gesunde, junge Männer – durchgeführt. Die studierten Individuen wurden zudem einem anderen Expositionsmuster ausgesetzt, als es im „*Alltag*“ während Hitzewellen vorkommt.

Bei langfristiger Akklimatisation ist zu beobachten, dass sich der Soll-Wert für die Schweißproduktion erhöht. Durch Langfristakklimatisation an tropische Bedingungen angepasste Individuen führen Wärme vermehrt über den Strom fühlbarer Wärme ab und vermeiden damit uneffektive Schweißverluste (Matsumoto et al., 1999). Der Grund hierfür könnte sein, dass der Körper versucht, die physiologische Anstrengung, welche für das Schwitzen nötig ist, sowie Flüssigkeits- und Salzverluste zu minimieren (Hori, 1995; ASHRAE, 1997).

b) Kälteakklimatisation

Der Mensch ist von Natur aus ein tropisches Lebewesen, daher ist er gegen Kälte nur sehr mangelhaft geschützt (Hensel, 1973). Dies führt dazu, dass unter kalten Bedingungen die verhaltensgesteuerte Thermoregulation dominant ist (Khosla und Guntupalli, 1999) und die Kälteakklimatisation nur geringfügig auf physiologischen Umstellungen beruht. Ein mehrtägiger Aufenthalt in der Kälte führt zu einem Nachlassen des subjektiven Kälteempfindens. Diese Gewöhnung ist eine Angelegenheit des Zentralnervensystems und nicht etwa ein Nachlassen der peripheren Erregung aus den Kälterezeptoren (Hensel, 1973).

Das Kältezittern, welches aufgrund des gleichzeitig auftretenden konvektiven Wärmeverlustes unökonomisch ist, wird im Rahmen der Kälteakklimatisation durch eine zitterfreie Thermogenese ersetzt (Hensel, 1973). Zudem setzt bei Menschen, die an Kälte akklimatisiert sind, die Kältevasokonstriktion zwar schneller ein, ist aber auf Dauer geringer, was die Möglichkeit der Arbeit in der Kälte verbessert (Jendritzky, 1990).

3.1.6 Individuelle Unterschiede in der Hitzetoleranz

3.1.6.1 KÖRPERBAU UND KÖRPERFETTGEHALT

Unterschiede in der Körpergröße, im Körperbau und im Körperfettgehalt von Individuen beeinflussen die Thermoregulation über ihre Auswirkungen auf den physikalischen Prozess des Wärmeaustauschs und über die unterschiedliche Masse, welche ein Körper bewegen muss.

Die Körperoberfläche beeinflusst den Austausch von fühlbarer und latenter Wärme sowie von Strahlungswärme. Solange dem Körper eine Wärmeabgabe möglich ist, ist daher bei Hitzebelastung eine große Körperoberfläche von Vorteil. Die Körpermasse beeinflusst die Produktion metabolischer Wärme in Situationen, in denen das Körpergewicht getragen werden muss (z.B. beim Gehen) und korreliert daher positiv mit der Wärmeproduktion. Des Weiteren beeinflusst sie die Wärmespeicherkapazität des Körpers (Anderson, 1999; Havenith, 1999). Daher ist für die Thermoregulation das Verhältnis von Oberfläche zu Masse entscheidend. Je größer dieses Verhältnis ist, desto leichter kann Wärme mit der Umgebung ausgetauscht werden (Hensel, 1973; Inoue, 2004).

Subkutanes Körperfett bestimmt die physikalische Isolation des Körpers bei Kälte (Anderson, 1999). Da es in der Regel jedoch gut durchblutet ist, behindert es die Wärmeabgabe unter warmen Bedingungen nicht. Weil die spezifische Wärme des Körperfettes nur ungefähr halb so groß ist wie die anderer fettfreier Gewebe, kann weniger Wärme im Gewebe gespeichert werden. Menschen mit gleicher Körpermasse aber höherem Körperfettanteil heizen sich hierdurch schneller auf. Zudem ist die Herzfunktion bei Fettleibigkeit eingeschränkt, was zu einer geringeren Hitzetoleranz führt (Anderson, 1999; Havenith, 1999). Eine übergewichtige Person muss aufgrund ihrer höheren Wärmeproduktion pro Kilogramm Körpergewicht mehr Blut in die Peripherie pumpen als ein normalgewichtiger Mensch, um diese Wärme wieder abzugeben. Dies führt zu einer größeren Belastung für das Herz-Kreislauf-System und einer größeren Anfälligkeit für direkt und indirekt hitzebedingte Erkrankungen (Anderson, 1999).

Für Behaglichkeitsbedingungen konnte Fanger (1972) keine signifikanten Unterschiede zwischen normal- und übergewichtigen Personen im sitzenden Zustand feststellen. Er räumte jedoch ein, dass da die metabolische Rate bei übergewichtigen Personen in Bewegung höher ist, eine kühlere Umgebung als angenehmer empfunden werden könnte.

3.1.6.2 GESCHLECHT

Zwischen den Geschlechtern wurden keine signifikanten Unterschiede bezüglich des Behaglichkeitsbereichs gefunden. Frauen und Männer mit vergleichbarem Körperfettgehalt, vergleichbarer Größe, vergleichbarem Verhältnis von Körpermasse zu Körperoberfläche und vergleichbarer aerober Leistung zeigen nur minimale Unterschiede in ihrer Thermoregulation (Kenney, 1984; Armstrong, 1998; Havenith et al., 1998).

Es gibt jedoch Hinweise, dass Frauen empfindlicher auf Abweichungen vom Optimum reagieren als Männer (Fanger, 1972). Untersuchungen über geschlechtsspezifische Unterschiede bei der Reaktion auf Hitzebelastung ergaben, dass Frauen eine höhere Kern- und Hauttemperatur, eine höhere Herzschlagfrequenz, einen höheren Blutdruck und höhere Schwellenwerte für das Einsetzen der Schweißsekretion sowie eine geringere Schweißeffizienz haben. Diese Unterschiede zwischen den Geschlechtern sind in unterschiedlichen physiologischen Eigenschaften begründet (siehe auch Kapitel 3.1.6.1). Auf dem Populationsniveau ist es daher wahrscheinlich, dass Frauen durchschnittlich weniger hitzetolerant sind als Männer (Kenney, 1985).

Einige der geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Thermoregulation scheinen zudem klimaspezifisch zu sein. So kommen Frauen besser mit feucht-warmen und schlechter mit trockenen und heißen Bedingungen zurecht (Kenney, 1985; Havenith, 1999).

3.1.6.3 ALTER

Für Behaglichkeitsbedingungen scheinen keine signifikanten Unterschiede zwischen Alt und Jung zu bestehen (Fanger, 1972; Parsons, 2003). Unter Bedingungen in der Nähe des Behaglichkeitsbereiches gleicht die geringere metabolische Rate älterer Menschen geringere Verluste an Verdunstungswärme aus. Diese sind unter anderem durch einen höheren Diffusionswiderstand der gealterten Haut für Wasserdampf bedingt (Fanger, 1972).

Auch bei Untersuchungen über die Hitzetoleranz wurden keine Unterschiede zwischen jungen und älteren Menschen mit gleichen körperlichen Charakteristika und gleicher Fitness gefunden (Pandolf, 1991; Armstrong, 1998; Havenith, 1999). Während sich die Schweißrate von fitten älteren und jüngeren Personen nach einer halben Stunde Training kaum noch voneinander unterschied, entsprach die Schweißrate von durchschnittlich fitten Älteren nur etwa der Hälfte der beiden anderen Personengruppen (Inoue, 2004). Auf der Populationsebene wird daher eine geringere Hitzetoleranz älterer Personen beobachtet.

Die höhere Sensitivität der Älteren hängt mit Faktoren wie der geringeren physischen Fitness, dem Vorhandensein diverser Erkrankungen, falscher Wahrnehmung der thermischen Umgebung und schlechter Thermoregulation zusammen (Havenith, 2001). Es wurde zudem beobachtet, dass Veränderungen im Schweißverhalten bei älteren Individuen langsamer vonstatten gehen als bei jungen Menschen (Hori, 1995).

Neben älteren Menschen gelten auch Säuglinge und Kleinkinder mit ihrer noch instabilen Thermoregulation und ihrer Abhängigkeit von der Hilfe Erwachsener bei der verhaltensgesteuerten Thermoregulation als besonders gefährdet (Khosla und Guntupalli, 1999; Basu und Samet, 2002). Kinder vor der Pubertät haben geringere Schweißraten als junge Erwachsene. Bei Werten der Lufttemperatur, welche unter der Hauttemperatur liegen, vermögen sie dies jedoch über die stärkere Abgabe von fühlbarer Wärme durch das bessere Verhältnis von Körperoberfläche zu Körpermasse auszugleichen. Übersteigt die Lufttemperatur die Hauttemperatur kommt es aufgrund dieses größeren Oberflächen-Massen-Verhältnisses und der geringen Schweißproduktion allerdings zu einem stärkeren Zugewinn von Wärme aus der Umgebung (Inoue, 2004).

3.1.6.4 Nationale und geografische Unterschiede

Für Behaglichkeitsbedingungen konnten keine nationalen und geografischen Unterschiede gefunden werden. Zu den Gründen hierfür zählen, dass unter Behaglichkeitsbedingungen Akklimatisationsvorgänge kaum eine Rolle spielen und dass unter den sechs Faktoren, welche die thermische Umwelt definieren, Kleidung und Aktivität von Bedeutung sind. Diese können wiederum kulturellen Unterschieden unterworfen sein. Daher sind unter ähnlichen Bedingungen für Kleidung, körperliche Aktivität, Luftfeuchtigkeit und Luftbewegung auch die Komfortbedingungen in den verschiedenen Klimazonen, Kulturen und unter unterschiedlichen Lebensbedingungen ähnlich (Fanger, 1972; Parsons, 2003).

Bei der Betrachtung von Hitzebelastungssituationen hingegen spielen Akklimatisationsvorgänge eine wichtige Rolle. Daher werden abhängig von der geografischen Breite unterschiedliche Schwellenwerte für die Hitzesterblichkeit gefunden (Curriero et al., 2002). Untersuchungen deuten darauf hin, dass Populationen an die mittlere Sommertemperatur ihrer Region angepasst sind (Keatinge et al., 2000). Die Einwohner tropischer Gebiete haben in Folge der langfristigen Akklimatisation einen geringeren Schwitzreflex und niedrigere Chloridkonzentrationen im Schweiß als die Einwohner gemäßigter Klimazonen (Hori et al., 1974).

3.1.6.5 JAHRESZEITLICHE UNTERSCHIEDE

Aufgrund von Akklimatisationsprozessen sind nicht nur geografische Unterschiede der Schwellenwerte für die Hitzetoleranz zu erwarten sondern auch jahreszeitliche Unterschiede (Kalkstein, 2001). Untersuchungen an jungen Japanern zeigten, dass als Folge der jahreszeitlichen Akklimatisation die Versuchspersonen im Sommer geringere Werte der Rektaltemperatur hatten, stärker und schneller schwitzten und niedrigere Salzkonzentrationen im Schweiß besaßen als im Winter (Hori et al., 1974). Für Behaglichkeitsbedingungen scheint es jedoch keine jahreszeitlichen Unterschiede zu geben (Fanger, 1972).

3.1.6.6 INDIVIDUELLER AKKLIMATISATIONSGRAD

Mit zunehmender Akklimatisation wird die Wärmebelastung, welche auf ein Individuum einwirkt, reduziert. Der individuelle Akklimatisationszustand kann durch wiederholte Hitze- bzw. Kälteexposition verändert werden (Kapitel 3.1.5). Personen, welche in der gleichen Region leben, können sich zudem aufgrund individueller Charakteristika (Alter, Geschlecht, Fitness etc.) im Akklimatisationsstatus unterscheiden (Havenith, 1999).

3.1.6.7 BLUTHOCHDRUCK

Da bei Personen mit Bluthochdruck eine schlechtere Durchblutung des Unterarmes stattfindet sowie ein geringeres Herzschlagvolumen und ein geringeres Herzminutenvolumen (Herzleistung) zu verzeichnen sind, ist eine geringere Wärmetransportkapazität vom Körperkern zur Haut vorhanden. Damit erhöht sich das Risiko der Überhitzung. Die höhere Schweißrate von Bluthochduckpatienten vermag dies gegebenenfalls auszugleichen (Havenith, 1999). Es ist daher schwer zu sagen, ob Bluthochdruck einen Risikofaktor für hitzebedingte Morbidität und Mortalität darstellt oder nicht.

3.1.6.8 MEDIKAMENTE UND DROGEN

Die Einnahme von Medikamenten und Drogen kann Individuen anfällig für hitzebedingte Morbidität und Mortalität machen. Dies geschieht entweder durch physiologische Effektormechanismen oder durch von den Medikamenten bzw. Drogen hervorgerufene Änderungen im Verhalten.

Die für die Hitzetoleranz relevanten Drogen und Medikamente beeinflussen hauptsächlich die Flüssigkeitsbilanz, Gefäßverengungs- und Erweiterungsmechanismen und die Herzfunktion (Havenith, 1999). Anticholinergika verringern beispielsweise die Schweißproduktion und die Durchblutung der Haut. Medikamente wie zum Beispiel Neuroleptika verhindern die Wärmeabgabe. Andere Medikamente, beispielsweise Antidepressiva, wirken sich auf den Wärmehaushalt aus, indem sie die innere Wärmeproduktion erhöhen (Khosla und Guntupalli, 1999).

3.2 Verfahren zur Bewertung der thermischen Belastung

3.2.1 Einführung

Thermische Indizes sind nützliche Instrumente zur Beschreibung und Bewertung der thermischen Umwelt. Hinter diesen Indizes steckt das Prinzip, dass verschiedene Faktoren, welche die Reaktion des Menschen auf seine thermische Umgebung beeinflussen, zu einer Größe zusammengefasst werden. Das Ziel ist es daher, diese Größe so zu definieren, dass sie die Auswirkungen der thermischen Umwelt auf den Menschen wiedergibt. Ein idealer Index würde demnach gleiche Indexwerte bei gleicher Reaktion der Menschen auf eine bestimmte thermische Umgebung liefern, also reproduzierbar sein (Jendritzky, 1990).

Die Verfahren zur Bewertung der thermischen Belastung lassen sich im Wesentlichen zu zwei Gruppen zusammenfassen: einfache Verfahren und komplexe Ansätze (Abb. 3.1; Koppe et al., 2004).

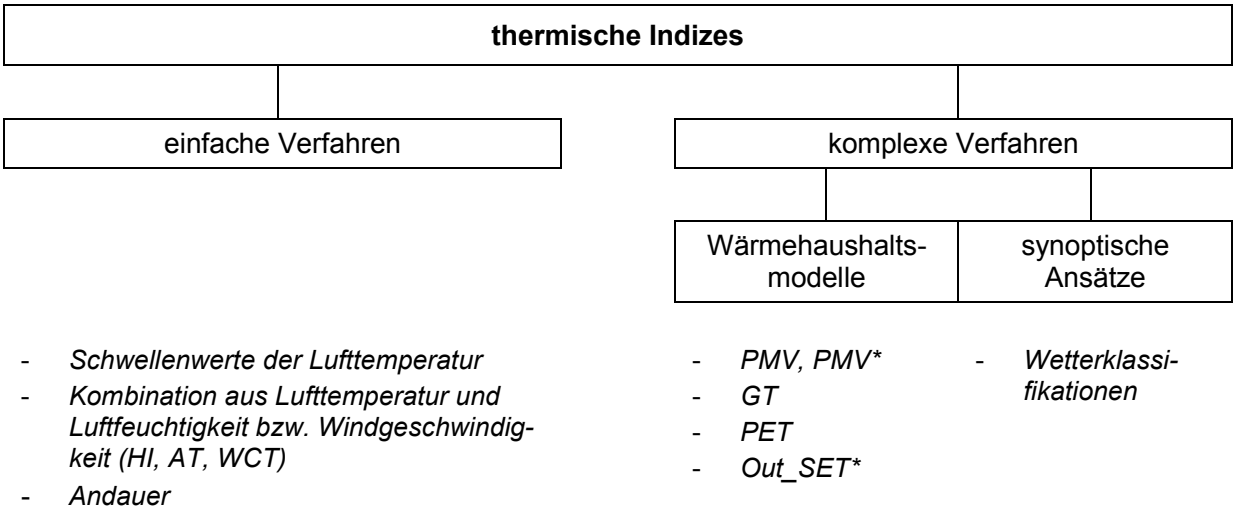


Abb. 3.1: Zusammenstellung einiger Verfahren zur Bewertung der thermischen Umwelt. *HI: Heat Index; AT: Apparent Temperature; WCT: Wind Chill Temperature; PMV: Predicted Mean Vote; PMV*: Predicted Mean Vote einschließlich der Korrektur von Gagge et al. (1986); GT: Gefühlte Temperatur; PET: Physiologisch Äquivalente Temperatur; Out_SET*: Outdoor Standard Effective Temperature*

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über verschiedene thermische Indizes gegeben. Dieser Überblick ist bei weitem nicht vollständig. Es existieren allein über 100 einfache Indizes. Hinzu kommen noch einige komplexe Verfahren, daher ist eine vollständige Vorstellung aller Indizes im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

3.2.2 Einfache Verfahren

Einfache Verfahren zur Bewertung der thermischen Umwelt basieren auf Schwellenwerten der Lufttemperatur oder einer Kombination aus Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit für warme Bedingungen beziehungsweise aus Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit für kalte Bedingungen (Jendritzky, 1990). Teilweise werden diese noch mit einer Mindestdauer kombiniert (Koppe et al., 2004). Aufgrund ihrer einfachen und schnellen Berechenbarkeit werden die einfachen Indizes in epidemiologischen Studien häufig angewendet. Oftmals wird dort zur Bewertung der thermischen Umgebung nur die Lufttemperatur herangezogen (z.B. Kunst et al., 1993; Keatinge et al., 2000; Nafstad et al., 2002; Kyselý und Huth, 2004).

Die Apparent Temperature AT (°F oder °C) berücksichtigt den kombinierten Einfluss von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit auf den menschlichen Organismus (Steadman, 1979a, b). Sie basiert auf physiologischen Studien über das Abkühlungsverhalten der Haut durch die Verdunstung von Schweiß für verschiedene Kombinationen aus Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit. Die AT entspricht bei einer Taupunkttemperatur von 14 °C der Lufttemperatur und übersteigt diese bei höheren Werten der Taupunkttemperatur. In ihrer ursprünglichen Form bleiben Windgeschwindigkeit und Strahlung unberücksichtigt. Auch der von der NOAA (National Oceanic and Admospheric Administration) verwendete Heat Index (HI) basiert auf der Apparent Temperature (Rothfusz, 1990; Kilbourne, 1997).

Im Gegensatz zu den oben genannten Verfahren ist die Wind Chill Temperature zur Bewertung des Einflusses von Kälte auf den menschlichen Organismus entwickelt worden. Daher besteht sie in ihrer ursprünglichen Form aus einer Kombination aus Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit zur Beschreibung des turbulenten Transportes von fühlbarer Wärme (OFCM, 2003).

Der Nachteil dieser einfachen Verfahren ist, dass sie nicht alle für die Beschreibung des Wärmeaustauschs zwischen Mensch und Umgebung wesentlichen Einflussfaktoren berücksichtigen (Mayer und Höppe, 1987; Höppe, 1993). Daher sind die mit ihnen durchgeführten Bewertungen nicht verallgemeinerbar, und gleiche Indexwerte führen nicht zwin-

gend zu gleichen thermischen Belastungen (Jendritzky, 1990; Höppe, 1993). Ihr Vorteil ist, dass sie einfach zu berechnen sind, und dass die Menge an benötigten Eingangsdaten gering ist. Dadurch ist auch die große Verbreitung dieser einfachen Bewertungsverfahren in umweltepidemiologischen Studien begründet.

3.2.3 Komplexe Verfahren

Komplexe thermische Indizes schließen alle meteorologischen und physiologischen Parameter mit ein, die zur thermophysiologisch relevanten Beschreibung des Wärmeaustauschs notwendig sind. Zu diesen Parameter gehören Lufttemperatur, Wasserdampfdruck der Luft, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwellige Strahlungsflüsse, aber auch physiologische Kenngrößen wie zum Beispiel die metabolische Rate oder das Gewicht einer Person sowie die Bekleidung.

Die komplexen Verfahren lassen sich weiter in Indizes, welche auf Wärmebilanzmodellen des menschlichen Körpers beruhen, und Indizes, welche auf synoptischen Ansätzen aufbauen, untergliedern.

Ein nützliches Hilfsmittel, dessen sich einige der thermischen Indizes bedienen, ist die Standardumgebung. Die Definition einer Standardumgebung ermöglicht es, den thermischen Index als die Temperatur der Standardumgebung anzugeben, welche die gleichen Wirkungen auf das Individuum hätte wie die aktuelle Umgebung (Parsons, 2003). Neben der Standardumgebung werden einige der Wärmehaushaltsmodelle auch für Standardpersonen berechnet. Die für die Standardperson verwendeten physiologischen Parameter wie Körpergröße oder Körpergewicht variieren jedoch innerhalb der Bevölkerung. Der Indexwert kann daher nur als Näherung für den von einem Individuum tatsächlich empfundenen thermischen Stress angesehen werden (Kilbourne, 1997).

3.2.3.1 Auf Wärmehaushaltsmodellen beruhende Indizes

Zur quantitativen Beschreibung der komplexen Bedingungen der Wärmeabgabe bedient man sich eines Wärmehaushaltsmodells. Da die Schnittstelle zwischen Mensch und thermischer Umwelt im Wärmehaushalt des Menschen liegt, führen Wärmehaushaltsmodelle zu einer thermophysiologisch relevanten Bewertung der Umwelt. Zu den auf Wärmebilanzmodellen beruhenden Indizes gehören unter anderem PMV (Predicted Mean Vote),

PMV*, GT (Gefühlte Temperatur), PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) und Out_SET* (Outdoor Standard Effective Temperature).

Da die Energiebilanzmodelle alle relevanten Mechanismen des Wärmeaustauschs berücksichtigen, gelten sie als „*Stand der Wissenschaft*“ für die gesundheitsbezogene Bewertung der thermischen Umwelt (VDI, 1998).

Predicted Mean Vote, PMV

Fanger (1972) geht davon aus, dass sich thermische Belastung über den Grad an Diskomfort ausdrücken lässt. Er fand, dass unter Behaglichkeitsbedingungen ein linearer Zusammenhang zwischen der mittleren Hauttemperatur beziehungsweise der Schweißsekretion und der inneren Wärmeproduktion besteht. Die Verwendung dieser beiden Beziehungen zur Berechnung der einzelnen Terme der Wärmebilanzgleichung (Gl. 3.1) führt zur Behaglichkeitsgleichung (Gl. 3.2). Zusätzlich konnte durch Untersuchungen in Klimakammern an über 1000 Personen eine Beziehung zwischen rechnerisch nicht ausgeglichener Wärmebilanz und dem subjektiven Empfinden auf einer psycho-physischen Skala hergestellt werden.

Die Behaglichkeitsgleichung hat die allgemeine Form (VDI, 1998):

$$\mathbf{PMV = f\left(H/A_{Du}, I_{Cl}, T_a, T_{mrt}, e, v_r\right)} \qquad \textbf{Gl. 3.2}$$

A_{Du}: *Oberfläche eines Einheitskörpers (m²)*
H: *innere Wärmeproduktion (abhängig von der Aktivität) (W)*
I_{cl}: *Wärmeisolation der Bekleidung (clo)*
T_a: *Lufttemperatur (°C)*
T_{mrt}: *mittlere Strahlungstemperatur (°C)*
e: *Wasserdampfdruck der Luft (hPa)*
v_r: *relative Windgeschwindigkeit (relativ zum Körper des Menschen) (m/s)*

Auf Basis der das thermische Milieu bestimmenden meteorologischen Faktoren Lufttemperatur, Wasserdampfdruck, mittlere Strahlungstemperatur und Windgeschwindigkeit sowie der nicht-meteorologischen Einflussgrößen Kleidung und Aktivität lässt sich ein skalierter Wert für das Empfinden, das Predicted Mean Vote (PMV), bestimmen. Dieser Wert gibt an, welche Einschätzung das thermische Milieu durch ein großes Kollektiv an Personen erfährt (Tab. 3.4; Fanger, 1972; Jendritzky, 1990). Die PMV-Gleichung gilt streng genommen nur für nicht allzu große Abweichungen vom Behaglichkeitsbereich.

Tab. 3.4: Bewertung der PMV Werte (nach Fanger, 1972; Madsen, 1979; ASHRAE, 1997)

PMV	Bewertung	PMV	Bewertung
0	neutrale Bedingungen		
1	leicht warm	- 1	leicht kühl
2	warm	- 2	kühl
3	heiß	- 3	kalt

Fanger (1972) definiert daher folgende Bedingungen, unter welchen sich eine Person im Behaglichkeitsbereich befindet:

1. die Wärmeproduktion entspricht den Wärmeverlusten;
2. die Schweißrate befindet sich im Komfortbereich;
3. die Hauttemperatur befindet sich im Komfortbereich.

Thermische Belastung ist definiert als Differenz zwischen innerer Wärmeproduktion und Wärmeverlust für einen Menschen mit seinem aktuellem Aktivitätsniveau, dessen mittlere Hauttemperatur und Schweißrate hypothetisch im Komfortbereich gehalten werden.

Die Behaglichkeitsgleichung gilt nur für stationäre Bedingungen. Dies stellt jedoch keine bedeutsame Einschränkung dar, da es in der Biometeorologie in der Regel um repräsentative Aussagen für ein großes Kollektiv von Individuen geht (Jendritzky, 1990). Mit dem Bewertungsverfahren nach Fanger können unterschiedliche räumliche Situationen in Hinblick auf ihre thermischen Bedingungen relativ zueinander beurteilt werden (VDI, 1998).

PMV*

Da nach Gagge et al. (1986) der PMV-Index insbesondere bei positiven Werten die Wirkung der Feuchtigkeit unterschätzt, schlagen diese die PMV*-Korrektur vor. Grund für die Modifikation ist, dass die grundlegende Theorie des Energietransfers von einer feuchten Oberfläche durch den Fluss latenter Wärme nicht vollständig auf die Energiebilanz einer teilweise feuchten Haut, welche zusätzlich mit Kleidung bedeckt ist, übertragen werden kann. Die PMV*-Modifikation besteht darin, dass die operative Temperatur der PMV-Gleichung, welche durch die arithmetische Mittelung von mittlerer Strahlungstemperatur und Lufttemperatur für Innenräume berechnet wird (DIN 1946 Teil 2, 1994), durch ET* (Effektivtemperatur) ersetzt wird. ET* (Gagge et al., 1971) ist die Temperatur einer Standardumgebung (relative Feuchte = 50%, $T_a = T_{mrt}$, $v < 0{,}15$ m/s), welche das gleiche ther-

mische Empfinden hervorbringt, wie die aktuelle Umgebung. Die bewertete Person hat den gleichen Hautbenetzungsgrad, die gleiche mittlere Hauttemperatur und den gleichen thermischen Wärmeverlust an der Haut wie in unter den aktuellen Gegebenheiten.

Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur, GT

Das Klima-Michel-Modell KMM verknüpft die Wärmeproduktion aufgrund des aktivitätsabhängigen Energieumsatzes unter Berücksichtigung der Bekleidung mit den aktuellen meteorologischen Bedingungen der Wärmeabgabe (Jendritzky et al., 1979; Jendritzky, 1990; Jendritzky et al. 2000). Das Modell basiert ursprünglich auf dem Predicted Mean Vote von Fanger (1972) und verwendet die PMV*-Korrektur Gagge et al. (1986), um die latenten Wärmeflüsse besser berücksichtigen zu können. Daher ist das Klima-Michel-Modell in der Lage, physiologisch relevante Aussagen über die thermische Reiz- und Belastungsstärke zu machen (Jendritzky und Grätz, 1999). Die meteorologischen Eingangsgrößen des Klima-Michel-Modells sind Lufttemperatur, Taupunkttemperatur, Windgeschwindigkeit und zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt}: Gesamtbedeckungsgrad, Bedeckungsgrad mit niedrigen und mittelhohen Wolken und die Wolkenarten in den tiefen, mittleren und hohen Wolkenstockwerken.

Der Output des KMMs berücksichtigt alle relevanten Mechanismen des Wärmeaustauschs und eine Anpassung der Bekleidung an die aktuelle thermische Situation. Die ursprüngliche PMV-Gleichung von Fanger (1972) liefert die Einschätzung der thermischen Bedingungen als PMV-Wert auf der psycho-physischen ASHRAE-Skala (Tab. 3.4). Diese Skala wird manchmal als schwer verständlich angesehen. Durch mathematische Umformungen wird daraus die Gefühlte Temperatur GT (°C) berechnet. GT ist als die Lufttemperatur einer Standardumgebung definiert, in welcher das thermische Empfinden den aktuellen Gegebenheiten entspricht. In dieser Standardumgebung ist die Windgeschwindigkeit auf einen leichten Windzug reduziert, die mittlere Strahlungstemperatur entspricht der Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit entspricht 50% (Staiger et al., 1997). Während die Behaglichkeitsgleichung von Fanger für Innenräume abgeleitet wurde, liefert das Klima-Michel-Modell eine thermophysiologisch relevante Bewertung für Freilandbedingungen.

Aus Gründen der räumlichen und zeitlichen Vergleichbarkeit werden die nicht-meteorologischen Einflussgrößen standardisiert. Die thermophysiologische Bewertung wird für eine standardisierte Person, den sogenannten „*Klima-Michel*“, durchgeführt. Dieser passt seine Bekleidung zwischen 0,5 clo (Sommerkleidung) und 1,75 clo (Winterkleidung) den

aktuellen Gegebenheiten an. Der Klima-Michel ist 35 Jahre alt, 1,75 m groß und wiegt 75 kg. Seine Leistung entspricht 175,5 W (z.B. Gehen in der Ebene mit ca. 4 km/h).

Die Gefühlte Temperatur unterscheidet sich meist von der im Schatten gemessenen Lufttemperatur. Unter warmen, sonnigen und windschwachen Bedingungen steigt sie schneller an als die Lufttemperatur. In Mitteleuropa kann die Gefühlte Temperatur bis zu 15 K über der Lufttemperatur liegen. Entsprechend kann sie bei fehlender direkter Sonneneinstrahlung und hohen Windgeschwindigkeiten bis zu 15 K unter die Lufttemperatur fallen (Jendritzky und Grätz, 1999).

Physiologisch Äquivalente Temperatur, PET

Die Bewertungsgröße PET (°C) wurde aus dem Energiebilanzmodell **MEMI** (**M**ünchner **E**nergiebilanz **M**odell für **I**ndividuen) abgeleitet. **MEMI** basiert auf der Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers für stationäre Bedingungen. Abweichend von der Behaglichkeitsgleichung gehen hier jedoch die realen Werte der Hauttemperatur und der Schweißverdunstung ein (Höppe, 1984; Höppe und Mayer, 1987; Höppe, 1993).

Für eine beliebige Stelle im Freien ist die Physiologisch Äquivalente Temperatur als diejenige Lufttemperatur definiert, bei der in einem typischen Innenraum ($T_{mrt} = T_a$; v = 0,1 m/s; e = 12 hPa) die Wärmebilanz des Menschen bei Werten der Haut- und Kerntemperatur, die den aktuellen Bedingungen entsprechen, ausgeglichen ist. Die Bewertung der thermischen Umwelt wird für einen Menschen mit einer Bekleidung von 0,9 clo und einer Aktivität von 80 W („*leichte Tätigkeit*“) vorgenommen.

Outdoor Standard Effective Temperature, Out_SET*

Über das Modell OUT_MRT gelang es Pickup und de Dear (1999), die für Innenräume entwickelte Standard Effective Temperature SET* an Außenbedingungen anzupassen. SET* ist als die Temperatur einer hypothetischen Standardumgebung ($T_{mrt} = T_a$; relative Luftfeuchtigkeit = 50%; v = 0,12 m/s) definiert, in der eine mit leichter Sommerbekleidung (0,6 clo) bekleidet, stehende Person die gleiche mittlere Hauttemperatur und den gleichen Hautbenetzungsgrad hätte, wie unter den aktuellen Gegebenheiten (Gagge et al, 1986; de Dear und Pickup, 1999).

3.2.3.2 SYNOPTISCHE VERFAHREN

Die synoptischen bzw. holistischen Verfahren basieren auf der Identifikation von Wetterklassen und berücksichtigen daher einen großen Teil des Wettergeschehens. Die Wetterklassen werden durch Clusterbildung von Tagen ermittelt, welche als meteorologisch homogen ansehen werden. Die meteorologischen Parameter, welche zur Charakterisierung der Tage und somit auch der Cluster und Wetterklassen hinzugezogen werden, sind in der Regel Lufttemperatur, Bewölkungsgrad, Luftdruck, Taupunkttemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie teilweise auch die Sichtweite (Kalkstein, 1991; Kyselý und Huth, 2004). Die Luftmasse, welcher eine erhöhte Mortalität zugeordnet werden kann, wird von Kalkstein als „*offensiv*“ bezeichnet.

3.3 Umweltepidemiologische Untersuchungen zum Thema Hitze und Mortalität

Schon seit Anfang des 20. Jahrhunderts beschäftigen sich Studien mit dem Zusammenhang zwischen Wärmebelastung und Mortalität (Basu und Samet, 2002). Hier kann allerdings nur eine Auswahl dieser Studien diskutiert werden. Dabei wird der Schwerpunkt auf Untersuchungen gelegt, welche in den letzten Jahren in Europa durchgeführt wurden (Tab. 3.5). Die Studien unterscheiden sich hinsichtlich der Aufschlüsselung der zugrundeliegenden Mortalitätsdaten (Alter, Geschlecht, Todesursache), der Zeitreihenlängen, der Methoden zur Bestimmung der hitzebedingten Mortalität und der Ansätze zur Bewertung der thermischen Belastung.

Neben den Zeitreihenuntersuchungen gibt es Studien zu einzelnen Hitzewellen (Episodenanalysen), die sich detailliert mit einem oder wenigen Ereignissen befassen. Dabei wird eine Hitzewelle allgemein als Ereignis verstanden, während dessen eine definierte Periode extremer thermischer Belastung mit einem hohen Risiko für negative Auswirkungen auf die Gesundheit bis hin zu erhöhter Mortalität einhergeht (Basu und Samet, 2002).

Tab. 3.5: Zusammenstellung der diskutierten Studien zum Zusammenhang zwischen thermischer Belastung und Mortalität

Ort / Region	Zeitreihe Länge	Untersuchung von	Referenz
Oslo, Norwegen	1990-1995 6 Jahre	Gesamtmortalität, Atemwegs- und CV-Mortalität[1]	Nafstad et al., 2002
Niederlande	1979-1987 9 Jahre	Gesamtmortalität, Todesursachen	Kunst et al., 1993
	1979-1997 19 Jahre	Gesamtmortalität, Todesursachen, Alter	Huynen et al., 2001
Baden-Württemberg, Deutschland	1968-1997 30 Jahre	Gesamtmortalität	Laschewski und Jendritzky, 2002
Tschechische Republik	1992-2000 9 Jahre	Gesamtmortalität, CV-Mortalität[1], Geschlecht	Kyselý und Huth, 2004
	1982-2000 19 Jahre	Gesamtmortalität, CV-Mortalität[1], Geschlecht	Kyselý, 2004
Frankreich	1999-2003 5 Jahre	Gesamtmortalität	Vandentorren et al., 2003

Ort / Region	Zeitreihe Länge	Untersuchung von	Referenz
England, Wales	1963-1966 4 Jahre	Todesursachen, Geschlecht, Alter	Bull und Morton, 1978
	1998-2003 6 Jahre	Gesamtmortalität	Stedman, 2004
England, Wales, Großraum London	1993-1995 3 Jahre	Gesamtmortalität, Todesursachen, Geschlecht, Alter	Rooney et al. (1998)
Großraum London, Großbritannien	1976-1996 21 Jahre	Gesamtmortalität, Atemwegs- und CV-Mortalität[1]	Hajat et al., 2002
Großraum Lissabon, Portugal	1980-1998 19 Jahre	Gesamtmortalität	Dessai, 2002
Sevilla, Spanien	1986-1997 12 Jahre	Gesamtmortalität, Atemwegs- und CV-Mortalität[1], Geschlecht, Alter[2]	Díaz et al., 2002
Valencia, Spanien	1991-1993 3 Jahre	Gesamtmortalität, Todesursachen, Alter[3]	Ballester et al., 1997
Madrid, Spanien	1986-1992 7 Jahre	Gesamtmortalität, Todesursachen, Geschlecht, Alter	Alberdi et al., 1998
	1986-1991 6 Jahre	Gesamtmortalität, Todesursachen, Geschlecht, Alter[2]	Montero et al., 1997
	1986-1991 6 Jahre	Gesamtmortalität, Todesursachen, Geschlecht, Alter[4]	Pajares et al., 1997
	1986-1997 12 Jahre	Gesamtmortalität, Todesursachen, Alter[2]	Díaz et al., 2005
Barcelona, Spanien	1986-1991 6 Jahre	ischämische Herzerkrankungen	Saez et al., 2000
Schottland	1981-1993 13 Jahre	Gesamtmortalität, Todesursachen, Alter[5]	Gemmell et al., 2000
Rom, Italien	1987-1996 10 Jahre	Gesamtmortalität, Todesursachen, Alter	Michelozzi et al., 2000
	1995-2003 9 Jahre	Gesamtmortalität, Alter	Michelozzi et al., 2004
Nord Finnland Süd Finnland London Niederlande Baden-Württemberg Nord Italien	1988-1992 5 Jahre	Gesamtmortalität, Geschlecht, Alter[6]	Keatinge et al., 2000
Athen, Griechenland	1992 1 Jahr		
	1981-1987 7 Jahre	Gesamtmortalität	Katsouyanni und Touloumi, 1998

[1] *herzkreislaufbedingte Sterblichkeit*
[2] *Bevölkerung über 65 Jahre*
[3] *Bevölkerung über 70 Jahre*
[4] *Bevölkerung zwischen 45 und 64 Jahre*
[5] *wöchentliche Daten*
[6] *Bevölkerung zwischen 65 und 74 Jahren*

3.3.1 Verfahren zur Bestimmung der hitzebedingten Sterblichkeit

Um die hitzebedingte (genau: die der Hitze zuzuordnende) Sterblichkeit ermitteln zu können, ist es notwendig, die Anzahl der Todesfälle abzuschätzen, welche auch ohne den Einfluss der thermischen Belastung eingetreten wären. Entsprechend sind hitzebedingte Todesfälle als diejenigen Sterbefälle definiert, welche ohne die Wärmebelastung nicht aufgetreten wären (McMichael et al., 1996). Da die direkt hitzebedingte Mortalität, z.B. durch Hitzschlag, häufig falsch klassifiziert wird (Basu und Samet, 2002) und ein Großteil der hitzebedingten Todesfälle indirekter Natur ist (siehe Kapitel 3.1.3), ist es erforderlich, die hitzebedingte Sterblichkeit auf Basis der Abweichung der „*aktuellen*“ Gesamtmortalität von deren Erwartungswert zu berechnen.

Zur Bestimmung des Erwartungswertes der Mortalität werden unterschiedliche Verfahren angewendet. Häufig wird die erwartete Anzahl der Sterbefälle auf Basis von Mittelwerten bestimmt. Für die Mittelwertsbildung werden unterschiedliche Zeiträume herangezogen. Diese beziehen sich beispielsweise auf Saisonmittelwerte (Smoyer et al., 2000) sowie Monatsmittelwerte (Bull und Morton, 1978; Dessai, 2002). In einigen Studien wird ein mittlerer Jahresgang berechnet, welcher zusätzlich geglättet wird (Michelozzi et al., 2004).

Sheridan und Dolney (2003) verwenden beispielsweise den „*Sommermittelwert*“ des jeweiligen Jahres, wobei Beginn und Ende der Sommersaison willkürlich auf den 15. Mai beziehungsweise den 30. September festgelegt werden. Dessai (2002) bildet jeweils für die Monate Juni, Juli und August einen Mittelwert aus einer 19-jährigen Zeitreihe.

Bei der Bestimmung des Erwartungswertes auf Basis von Mittelwerten der Sterbefallzahlen von Vorjahren ist es von Bedeutung, dass Trends in der Mortalität, wie sie durch eine Änderung der Bevölkerungszahl oder einen Rückgang der Mortalitätsrate entstehen können, vorher entfernt werden (Kyselý, 2004).

Vor allem bei der Analyse von Episoden wird die Mortalität während der Hitzewelle häufig mit der Anzahl der Sterbefälle des gleichen Zeitraums des Vorjahres verglichen. In einer Analyse der Hitzewelle im August 2003 in England und Wales verwendet Stedman (2004) den Mittelwert der Mortalität vom 4. bis 13. August der fünf vorangegangenen Jahre als Vergleichswert. Auf der Basis von mittleren Tageswerten von 1999-2002 berechnen Vandentorren et al. (2003) den Erwartungswert der Mortalität für Frankreich während der Hitzewelle 2003. Huynen et al. (2001) bestimmen den Erwartungswert der Mortalität, indem sie die einer Hitzeepisode entsprechenden Tage der beiden des „*Hitzewellenjahrs*“ vorangegangenen Jahre mitteln und mit einem 31 Tage umfassenden gleitenden Mittelwert glätten. Bei der Analyse von Mortalitätsepisoden kann auch die tägliche Anzahl der Ster-

befälle, welche einige Tage vor dem Ereignis aufgetreten war, als Erwartungswert herangezogen werden (Basu und Samet, 2002).

Eine weitere Methode zur Ermittlung des Erwartungswertes ist die Berechnung eines gleitenden Mittelwertes der „*aktuellen*“ Periode (Rooney et al., 1998; Dessai, 2002). Dieses hat ähnlich wie die numerische Filterung der „*aktuellen*“ Mortalitätsdaten mit relativ kurzen Filterlängen, wie z.B. das von Laschweski und Jendritzky (2002) verwendete 101-Tage Gaußfilter, den Nachteil, dass für längere Episoden mit erhöhter Mortalität der Erwartungswert ansteigt (Huynen et al., 2001). Hajat et al. (2002) verwenden daher zur Bestimmung des Jahresgangs der Mortalität ein 183-Tage Loessfilter. Eine weitere Möglichkeit den Jahresgang in den Mortalitätsdaten abzuschätzen, besteht in der Anpassung einer sinusförmigen Funktion (Gemmell et al., 2000; Díaz et al., 2002).

Kyselý (2004) berücksichtigt bei der Berechnung des Erwartungswertes den langjährigen Trend in den Mortalitätsdaten, den Jahresgang und den Wochengang. Der Wochengang der Mortalität wurde auch in anderen Studien berücksichtigt (Michelozzi et al., 2000; Hajat et al., 2002; Kyselý und Huth, 2004). Des Weiteren werden das Auftreten von Grippewellen (Kunst et al., 1993; Alberdi et al., 1998; Gemmell et al., 2000; Hajat et al., 2002; Nafstad et al., 2002), Luftverschmutzung (Kunst et al., 1993; Stedman, 2004) oder Schulferien (Michelozzi et al., 2000; Hajat et al., 2002) in das Modell zur Bestimmung des Erwartungswertes der Mortalität einbezogen. Nafstad et al. (2002) fanden allerdings am Beispiel von Oslo, dass die Effekte des Wochenganges der Mortalität und der Ferien zu vernachlässigen seien.

3.3.2 Verfahren zur Bewertung der thermischen Belastung

In den hier zusammengestellten Studien zur Bewertung des thermischen Stresses und zur Identifikation von heißen Episoden (Hitzewellen) wird größtenteils die Lufttemperatur als Indikator für die thermische Belastung verwendet. Kyselý und Huth (2004) verwenden u.a. den Heat Index, der zusätzlich die Luftfeuchtigkeit berücksichtigt. Letztere wird teilweise auch in den Regressionsmodellen, die den Zusammenhang zwischen thermischem Stress und Mortalität beschreiben, berücksichtigt. Nur Laschewski und Jendritzky (2002) verwenden mit der Gefühlten Temperatur einen komplexen thermischen Index, welcher auf einem kompletten Wärmehaushaltsmodell beruht. In ihren Analysen verwenden sie zum einen das Tagesmittel der Gefühlten Temperatur, zum anderen dessen Abweichung vom Jahresgang, welcher analog zu ihrer Bestimmung des Erwartungswertes der Mortalität mittels eines 101-Tage Gaussfilters berechnet wurde.

Die in Tabelle 3.6 aufgelisteten Studien sind nur bedingt miteinander vergleichbar. Ein Grund hierfür sind die unterschiedlichen Verfahren, welche zur Ermittlung der mit dem Mortalitätsminimum einhergehenden Temperatur angewendet werden. Des Weiteren definieren viele Autoren nicht genau, was sie unter einem "*starken Mortalitätsanstieg*" verstehen. So ist beispielsweise für Kyselý und Huth (2004) hierfür lediglich ein „*signifikanter*" Anstieg der Mortalität ausschlaggebend.

Ein relativ großer Anteil der Variation in den täglichen Sterbefallzahlen ist mit Schwankungen in der Lufttemperatur zu erklären (Kunst et al., 1993). In vielen Studien wurde eine „*J*"- beziehungsweise „*U*"- oder „*V*"-förmige Beziehung zwischen thermischer Umwelt (Lufttemperatur) und der Mortalität gefunden (Huynen et al., 2001; Basu und Samet, 2002; Dessai, 2002). Diese Beziehung wird häufig mit einer Poisson-Regression modelliert (Kunst et al. 1993; Huynen, 2001; Hajat et al., 2002). Die Schwellenwerte des Tagesmittelwertes der Lufttemperatur für das Mortalitätsminimum liegen je nach Untersuchungsgebiet zwischen 10 °C in Oslo (Nafstad et al., 2002) und 26 °C in Madrid (Pajares et al., 1998). In der Regel steigt die Mortalität bei Werten der Lufttemperatur über dem mit minimalen Sterbefallzahlen einhergehenden Temperaturoptimum stärker an als bei Temperaturwerten darunter (Montero et al., 1997; Pajares et al., 1997; Alberdi et al., 1998; Keatinge et al., 2000).

Für die Bewertung der thermischen Umwelt werden in einigen Studien Tagesmittelwerte in anderen jedoch Tagesmaxima oder Tagesminima verwendet. Durch die hohe Interkorrelation dieser Größen sind die Unterschiede, welche sich hierdurch bei deren Verwendung in Regressionsmodellen ergeben, allerdings unerheblich.

In Baden-Württemberg führen positive Änderungen der Gefühlten Temperatur während des gesamten Jahres zu Anstiegen in der Mortalitätsrate (Laschewski und Jendritzky, 2002). Ob dieses Ergebnis im Winter nur dadurch zustande kommt, weil die Zeitverschiebung zwischen Kältestress und Mortalität etwa eine Woche beträgt (Kapitel 3.3.4) – was hier nicht berücksichtigt worden ist – und daher der Mortalitätsanstieg nicht auf dem Temperaturanstieg, sondern auf dem vorangegangenen Kältestress beruht, bleibt offen.

Tab. 3.6: Schwellenwerte für das Mortalitätsminimum und „*starke*“ Anstiege der Mortalität. *max: Tagesmaximum; mittel: Tagesmittelwert; min: Tagesminimum*

Ort	Lufttemperatur (°C)						Referenz
	Mortalitätsminimum			„*starker*“ Mortalitätsanstieg			
	max	mittel	min	max	mittel	min	
Nordfinnland		15,8					Keatinge et al., 2000
Südfinnland		14,8					
Oslo		10,0					Nafstad et al., 2002
London, Großbritannien		19,0			23,3		Hajat et al., 2002
		20,8					Keatinge et al., 2000
Niederlande		16,5					Kunst et al., 1993
		18,8					Keatinge et al., 2000
		16,5			22,0		Huynen et al., 2001
Baden-Württemberg		14,0					Laschewski und Jendritzky, 2002[1]
		20,5					Keatinge et al., 2000
Tschechische Republik				26,0	20,0	14,0	Kyselý und Huth, 2004[2]
Norditalien		18,3					Keatinge et al., 2000
Lissabon, Portugal	29,0						Dessai, 2002[3]
Madrid, Spanien	33,0	26,0	17,0				Pajares et al., 1997[4]
	31,9	23,9	15,6				Montero et al., 1997[5]
	30,8	20,3	15,4				Alberdi et al., 1998
Barcelona, Spanien		21,1					Saez et al., 2000
Valencia, Spanien		24,0					Ballester et al., 1997[6]
Sevilla, Spanien				41,0			Díaz et al., 2002
Rom, Italien				28,0	24,0	18,0	Michelozzi et al., 2000
Griechenland		23,0			30,0		Katsouyanni und Touloumi, 1998
Athen, Griechenland		24,2					Keatinge et al., 2000

[1] *Gefühlte Temperatur*

[2] *erhöhte Mortalität = signifikanter ($\alpha \leq 0,05$) Anstieg über dem Mittelwert*

[3] *Mortalitätsminimum zwischen 16 °C und 31 °C; hitzebedingte Todesfälle ab 29 °C*

[4] *Bevölkerung zwischen 45 und 64 Jahren*

[5] *Bevölkerung über 65 Jahren*

[6] *Schwellenwert für Sommer; Minimum der Mortalität im Winter bei 15 °C*

3.3.3 Auswirkungen der Luftfeuchtigkeit

Aufgrund ihres Einflusses auf den Fluss latenter Wärme ist es zu erwarten, dass sich eine hohe absolute Luftfeuchtigkeit bei gleichzeitig hoher Lufttemperatur negativ auf die Gesundheit auswirkt (Kapitel 3.1).

Bei ihrem Vergleich von Schwellenwerten der Lufttemperatur mit dem Heat Index in der Tschechischen Republik stellten Kyselý und Huth (2004) fest, dass sich zwischen dem Heat Index, der neben der Lufttemperatur auch die relative Luftfeuchtigkeit berücksichtigt, und Mortalität etwas stärkere Zusammenhänge ergeben als mit der Lufttemperatur allein. In der selben Studie wird unter Verwendung des synoptischen Ansatzes jedoch gefunden, dass bei der „*offensiven*“ Luftmasse, welche durch hohe Werte der Lufttemperatur (Tagesmaximum ≥ 30 °C, Tagesminimum ≥ 23 °C), geringe Bewölkung und starken Südwind gekennzeichnet ist, die Luftfeuchtigkeit eine untergeordnete Rolle spielt. Dieses Ergebnis darf physiologisch nicht überinterpretiert werden, da das synoptische Verfahren nicht auf dem Wärmehaushalt des Menschen beruht, sondern stark vom Ursprung der Luftmasse abhängig ist.

Dessai (2002) maß der relativen Luftfeuchtigkeit bei der Analyse der Beziehung zwischen Wärmebelastung und Mortalität in Lissabon eine untergeordnete Bedeutung bei. Kunst et al. (1993) stellten fest, dass hohe Werte der relativen Luftfeuchtigkeit (hier 88,3%) einen Rückgang der Mortalität bei Wärmebelastung bewirken. Dies hängt damit zusammen, dass die von der Lufttemperatur abhängige relative Luftfeuchtigkeit bei hoher Lufttemperatur niedrigere Werte annimmt (und umgekehrt) und daher als Parameter zur Bewertung der thermischen Umwelt ungeeignet ist.

Für die Wärmeabgabe eines Menschen ist der den Fluss latenter Wärme beeinflussende absolute Wasserdampfgehalt in der Luft von Bedeutung. Bei einer Hauttemperatur von 33 °C liegt der Sättigungsdampfdruck direkt an der Hautoberfläche bei ungefähr 50 hPa. Da der Wasserdampfdruck in der Außenluft in Mitteleuropa kaum über 25 hPa steigt, ist bei ausreichender Luftbewegung die Abgabe latenter Wärme weiterhin möglich, wenn auch durch zunehmenden Wasserdampfdruck die Wärmeabgabe erschwert wird (Jendritzky und Grätz, 1999).

Werden absolute Feuchtemaße als Indikator verwendet, so wird häufig erwartungsgemäß ein negativer Einfluss (d.h. ein Mortalitätsanstieg) der Luftfeuchtigkeit auf die Mortalität bei gleichzeitig hohen Werten der Lufttemperatur gefunden (Michelozzi et al., 2000).

3.3.4 Zeitliche Verschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalität

Unter warmen Bedingungen ist der statistische Zusammenhang zwischen thermischer Belastung und Mortalität in der Regel am stärksten, wenn Zeitverschiebungen zwischen 0 und 3 Tagen berücksichtigt werden (Tab. 3.7). Nach einem Monat können in der Regel keine signifikanten Auswirkungen der thermischen Umwelt auf die Mortalität mehr festgestellt werden (Kunst et al., 1993).

Tab. 3.7: Zeitverschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalität unter warmen und kalten Bedingungen

Ort / Region	Wärmebelastung (d)	Kältestress (d)	Referenz
Oslo	1-7[1]		Nafstad et al., 2002
Niederlande	0	3-6	Kunst et al., 1993
	0	7-14	Huynen et al., 2001
Baden-Württemberg	1	≥ 8	Laschewski und Jendritzky, 2002
Tschechische Republik	0	*keine Angabe*	Kyselý und Huth, 2004
	1	*keine Angabe*	Kyselý, 2004
Großraum London	0	*keine Angabe*	Hajat et al., 2002
Rom	1	*keine Angabe*	Michelozzi et al., 2000
	0-2	*keine Angabe*	Michelozzi et al., 2004
Großraum Lissabon	0-1	*keine Angabe*	Dessai, 2002
Madrid	0	0-3	Montero et al., 1997
	0	10-13	Pajares et al., 1997
	1	4-11	Alberdi et al., 1998
	keine Angabe	7-8	Díaz et al., 2005
Sevilla	1-3	*keine Angabe*	Díaz et al., 2002
Valencia	3-6	7-14	Ballester et al., 1998
Schottland	*keine Angabe*	7[2]	Gemmell et al., 2000
Nord- und Südfinnland, London, Niederlande, Baden-Württemberg, Norditalien, Athen	0	3	Keatinge et al., 2000

[1] *keine gesonderte Betrachtung von Wärmebelastung und Kältestress*
[2] *Analyse wöchentlicher Daten*

Die kurze zeitliche Verzögerung zwischen Wärmebelastung und Mortalitätsanstieg verdeutlicht, dass Wärmebelastung ein akutes Ereignis ist und daher auch sofortige Interventi-

onen erfordert (Basu und Samet, 2002). Die Angaben über die mit den stärksten Mortalitätsauswirkungen einhergehende Zeitverschiebung nach Kältestress gehen sehr weit auseinander und liegen zwischen 0 und 14 Tagen. Dies ist ein Hinweis auf die weniger direkte Beziehung zwischen thermischer Umwelt und Mortalität im Winter (Laschewski und Jendritzky, 2002; Díaz et al., 2005).

Dessai (2002) untersuchte die Zeitverschiebung zwischen Tagesmaximumtemperatur und Mortalität in Lissabon für die achtziger Jahre und die neunziger Jahre getrennt. Ergab sich bei der Analyse des ersten Zeitraums noch eine Zeitverschiebung von 0 Tagen, so betrug diese beim zweiten Zeitraum einen Tag. Mögliche Gründe könnten eine Verbesserung von lebenserhaltenden Maßnahmen oder auch Änderungen bei der Erfassung der Todesfälle sein.

3.3.5 Auswirkungen der Andauer thermischer Belastung

Wärmebelastung, die einige Tage andauert, geht mit einer höheren hitzebedingten Mortalität einher als einzelne heiße Tage (Saez et al., 1995; Smoyer et al., 2000; Díaz et al., 2002). Eine Kombination aus Dauer und Überschreitung einer bestimmten Tagesmaximumtemperatur wird daher beispielsweise in den Niederlanden bei der Definition des Begriffs „*Hitzewelle*“ verwendet. So definiert das KNMI (Königlich Niederländisches Meteorologisches Institut) eine Hitzewelle als Episode von mindestens 5 Tagen mit einem Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 25 °C. Von diesen 5 Tagen müssen mindestens 3 Tage eine Tagesmaximumtemperatur von 30 °C oder mehr erreichen (Huynen et al., 2001). Analog wird in der tschechischen Republik immer dann von einer „*Hitzewelle*“ gesprochen, wenn an mindestens 3 aufeinander folgenden Tagen das Tagesmaximum der Lufttemperatur 30 °C erreicht oder überschreitet (Kyselý, 2004).

Im Zeitraum von 1977 bis 1996 stieg in London die Mortalität um 5,7% pro Grad mittlerer Lufttemperatur (gleitendes Mittel über 3 Tage) über dem Schwellenwert von 23,3 °C (= 99%-Perzentilwert des Tagesmittels der Lufttemperatur) an. Wird anstatt des gleitenden 3-Tagesmittelwertes als Überschreitungskriterium der Schwelle 23,3 °C der einfache Tagesmittelwert heran gezogen, verringert sich der entsprechende Mortalitätsanstieg pro Grad Lufttemperaturanstieg auf 3% (Hajat et al., 2002). Dies könnte ein Indikator für die Bedeutung der Andauer einer thermischen Belastungssituation in London sein.

Auch Smoyer (1998) und Kalkstein (2001) unterstützen die These, dass die Gesundheitseffekte umso negativer ausfallen, je länger eine Hitzewelle andauert. Für eine Hitzewelle in

der Tschechischen Republik mit einer Dauer von 17 Tagen wurde von Kyselý (2004) jedoch nur ein vergleichsweise geringer Anstieg der Mortalität während der gesamten Hitzewelle gefunden. Dieses Phänomen wird vom Autor mit der kurzfristigen Akklimatisation an die heiße Witterung erklärt, welche bereits einen Monat vor Beginn der Hitzewelle einsetzte.

3.3.6 Regionale Unterschiede

Hitzebedingte Mortalität tritt sowohl in Gebieten mit kühleren Sommern (z.B. den Niederlanden: Huynen et al., 2001; London: Hajat et al., 2002) als auch in Regionen mit mediterranem Klima und warmen Sommern auf (z.B. Athen: Katsouyanni und Touloumi, 1998; Lissabon: Dessai, 2002; Madrid: Diaz et al., 2002). Curriero et al. (2002) fanden bei einer Analyse von 11 Städten in den Vereinigten Staaten von Amerika einen Zusammenhang zwischen geografischer Breite und der Beziehung zwischen Temperatur und Mortalität. In den südlicheren Gebieten hatte die Kälte stärkere Auswirkungen auf die Mortalität und in den nördlicheren Gebieten spielte die Wärmebelastung eine größere Rolle. Dies konnte jedoch von Keatinge et al. (2000) bei einer Untersuchung von sieben Regionen in Europa nicht bestätigt werden. Die Autoren dieser Studie fanden keine signifikanten Unterschiede in der jährlichen hitzebedingten Mortalität zwischen warmen und kalten Regionen Europas. Die Höhe der Schwellenwerte des Maßes für die thermische Belastung unterscheidet sich allerdings von Region zu Region. In wärmeren Gebieten ergeben sich vermutlich in Folge von Anpassung und Akklimatisation auch in Europa höhere Schwellenwerte für die hitzebedingte Mortalität als in kühleren Klimaten (Keatinge et al., 2000; Hajat et al., 2002).

3.3.7 Jahreszeitliche Unterschiede

Die Mortalitätsrate ist jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen und weist ein Maximum im Winter und ein Minimum im Sommer auf (Sakamoto-Momiyama, 1977; Gemmell et al., 2000; Dessai, 2002; Laschewski und Jendritzky, 2002; McGregor et al., 2004). Der Jahresgang in den Mortalitätsraten wurde in Deutschland im Zeitraum von 1946 bis 1995 schwächer, wobei ein Großteil dieser Abschwächung bis Ende der 60er-Jahre vonstatten ging (Lerchl, 1998).

Die Auswirkungen von thermischer Belastung auf die Gesundheit hängen nicht nur von den aktuellen Witterungsbedingungen ab, sondern auch von der vorangegangenen meteo-

rologischen Situation (Dessai, 2002). Hitzewellen, welche im Frühjahr oder Frühsommer auftreten, haben eine stärkere Auswirkung auf die Mortalität als Hitzewellen später im Jahr (Smoyer, 1998; Kalkstein, 2000; Basu und Samet, 2002; Dessai, 2002; Kyselý, 2004). Die Schwellenwerte, die zu einem signifikanten Mortalitätsanstieg führen, scheinen daher auch jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen zu sein. Kyselý und Huth (2004) ermittelten für die Tschechische Republik einen um 2-3 K geringeren Schwellenwert der Lufttemperatur für einen signifikanten Mortalitätsanstieg in den Monaten April, Mai und September als in den Monaten Juni und Juli. In London fällt der Mortalitätsanstieg pro Grad Lufttemperaturanstieg über der Schwelle des 97%-Perzentilwertes im Juli und August mit 3,3% geringer aus als im Juni und Mai mit 5,4% (Hajat et al., 2002).

Für Kältestress konnte in Madrid keine Abnahme der Anfälligkeit der Bevölkerung im Verlauf der Wintersaison gefunden werden. Díaz et al. (2005) schließen daraus, dass eine Akklimatisation an Kälte nicht stattfindet.

In einer weiteren Studie über die Auswirkungen von Hitzewellen auf die Mortalität in der Tschechischen Republik stellt Kyselý (2004) fest, dass absolute Schwellenwerte einen stärkeren Einfluss auf die Mortalität im Sommer ausüben als reine Abweichungen der Lufttemperatur vom mittleren Jahresgang.

Sakamoto-Momiyama (1977) fand bei Untersuchungen der Monatsmittelwerte der Mortalität in Europa, den USA, Asien und Afrika einen Hysterese-Effekt zwischen der mittleren monatlichen Mortalität und den Monatsmittelwerten der Lufttemperatur. Die Existenz dieses Effekts konnten auch Laschewski und Jendritzky (2002) für Baden-Württemberg bestätigen. In beiden Studien wurden bei gleichen Monatsmittelwerten der Lufttemperatur bzw. der Gefühlten Temperatur höhere Mortalitätsraten in der ersten Jahreshälfte gefunden als in der zweiten.

Des Weiteren ermittelten Laschewski und Jendritzky (2002) engere Zusammenhänge (höhere Korrelationskoeffizienten) zwischen der Mortalitätsrate und der Gefühlten Temperatur für die Sommermonate als für die Wintermonate. Dies deutet auf eine engere Ursache-Wirkungsbeziehung in der wärmeren Jahreszeit hin und wird von den Autoren mit einem von der Jahreszeit abhängigem Expositionsverhalten erklärt. Eine weitere Erklärung ist, dass unter warmen Bedingungen – im Gegensatz zu kalten Bedingungen, bei denen die verhaltensgesteuerte Thermoregulation dominiert – die physiologische Thermoregulation von größerer Bedeutung ist (Khosla und Guntupalli, 1999) und sich daraus ein stärkerer Zusammenhang zwischen thermischer Umwelt und Mortalität ergibt.

Michelozzi et al. (2004) wiesen während des Sommers 2003 drei Hitzewellen in Rom aus (9. Juni - 2. Juli; 10.-30. Juli; 3.-13. August). Die Übersterblichkeit wurde für die erste Hitzewelle auf 352, für die zweite auf 319 und für die dritte auf 170 geschätzt. Während der dritten Hitzewelle wurden zudem geringere Spitzen in der täglichen Mortalität festgestellt. Diese Ergebnisse veranlassten die Autoren zu dem Schluss, dass die geringere Mortalität während der Augusthitzewelle durch eine Reduktion der gefährdeten Bevölkerung durch die vorangegangenen Hitzewellen zustande kam. Dadurch, dass die Hitzewelle im August 2003 jedoch viel kürzer war als diejenigen im Juni und Juli, lag die durchschnittliche Anzahl von hitzebedingten Sterbefällen im August pro Tag höher als bei den vorangegangenen Hitzewellen.

3.3.8 Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung

Die jahreszeitlichen und regionalen Unterschiede, die sich in der Beziehung zwischen thermischer Belastung und Mortalität ergeben, verdeutlichen die Bedeutung der Anpassung der Menschen an die lokalen Witterungsverhältnisse der letzten Wochen (Kilbourne, 1997). Bisher wurde jedoch nur in wenigen Studien der Versuch unternommen, diese zu berücksichtigen.

Zur Berücksichtigung der jahreszeitlichen Anpassung führten Smoyer et al. (2000) eine Dummy-Variable für den Tag in der Sommersaison ein. Damit tragen sie der Beobachtung Rechnung, dass Hitzebelastungen gleicher Intensität stärkere Auswirkungen im Frühsommer haben als im Hochsommer. Dieses Verfahren bezieht die thermischen Verhältnisse der letzten Tage und Wochen jedoch nicht direkt ein, sondern basiert auf den mittleren thermischen Bedingungen der vergangenen Jahre.

Ein weiterer Versuch jahreszeitliche sowie regionale Unterschiede zu berücksichtigen, wurde von Watts und Kalkstein (2004) unternommen. Die Autoren unterteilten das Jahr in 10-Tages-Intervalle. Für jede meteorologische Station und jedes dieser Intervalle bestimmten sie auf Basis einer 30-jährigen Zeitreihe die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von 5 meteorologischen Parameter (Tagesmaximum und Tagesminimum der AT, Cooling Degree Days, Tagesmittelwert des Bedeckungsgrades und Tage in Folge, in denen das Tagesmaximum der AT den Mittelwert der AT einer 10-Tages-Periode um eine Standardabweichung überschritt). Die sich hieraus ergebenden Perzentilwerte wurden für jeden Tag ohne weitere Gewichtung aufsummiert. Für diese Summen wurden wiederum für jedes 10-Tages-Intervall Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen bestimmt. Diese wiesen keine

räumlichen und zeitlichen Muster mehr auf. Die hieraus resultierenden Perzentilwerte werden als **H**eat **S**tress **I**ndex (**HSI**) bezeichnet.

Die jahreszeitliche Anpassung der Menschen an die thermische Umwelt scheint mit dieser Methode jedoch nicht ausreichend berücksichtigt zu werden. Beim Vergleich der **HSI**-Werte mit den Mortalitätsdaten von Philadelphia ergaben sich im Hoch- und Spätsommer geringere Todesfahlzahlen bei gleichen Indexwerten als früher im Jahr. Vergleiche der Mortalitäts-**HSI**-Beziehungen mit anderen Regionen liegen nicht vor.

Ein Nachteil dieser Vorgehensweise, wie auch der von Smoyer et al. (2000), ist, dass nicht die Anpassung an die aktuellen Witterungsbedingungen berücksichtigt wird, sondern an einen historischen mittleren Verlauf des Witterungsgeschehens. Zusätzlich ist dieses Verfahren nicht thermophysiologisch relevant und es werden verhältnismäßig lange Zeitreihen der meteorologischen Eingangsgrößen zur Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen benötigt.

Im Gegensatz dazu versuchten Laschewski und Jendritzky (2002) die Anpassung an die aktuelle Witterung zu berücksichtigen, indem sie die Abweichung der Gefühlten Temperatur von den Werten einer Filterfunktion betrachteten. Diese Funktion soll das thermische Milieu repräsentieren, in dem es zu keinen negativen Auswirkungen auf die Gesundheit kommt. Die Filterfunktion ist von der Gefühlten Temperatur der 50 Tage vor und nach dem betrachteten Tag abhängig. Der menschliche Organismus kann sich jedoch nur retrospektiv an die thermische Umwelt anpassen. Außerdem liegt bei einer derartigen Vorgehensweise die Annahme zugrunde, dass die Anpassung vollständig erfolgt und dass es keine physiologischen Grenzen für die Anpassung gibt. Ein weiteres Problem ist, dass für die Definition von Kältestress Abweichungen nach unten im Winter und für die Definition von Wärmebelastung Abweichungen nach oben im Sommer von Interesse sind. Daher müssen Sommer- und Winterhalbjahr festgelegt werden.

3.3.9 Vorverlegung des Sterbezeitpunktes

Unter dem „*Harvesting-Effekt*“ wird die Vorverlegung des Todeszeitpunktes um wenige Tage oder Wochen verstanden. Daher sind hiervon vor allem Personen betroffen, welche bereits schwerkrank oder gebrechlich sind und ein hohes Sterberisiko haben (Basu und Samet, 2002). Für die Bewertung der Auswirkungen einer thermischen Belastung auf die Gesellschaft ist es von Bedeutung, ob die Menschen, welche an dieser Belastung gestorben sind, auch ohne diesen Stress nur noch eine kurze Lebenserwartung gehabt hätten oder

noch länger hätten leben können. Der Harvesting Effekt macht sich in einer negativen Korrelation zwischen thermischer Belastung und Mortalität nach der Exposition bemerkbar (Abb. 3.2; Zanobetti et al., 2002).

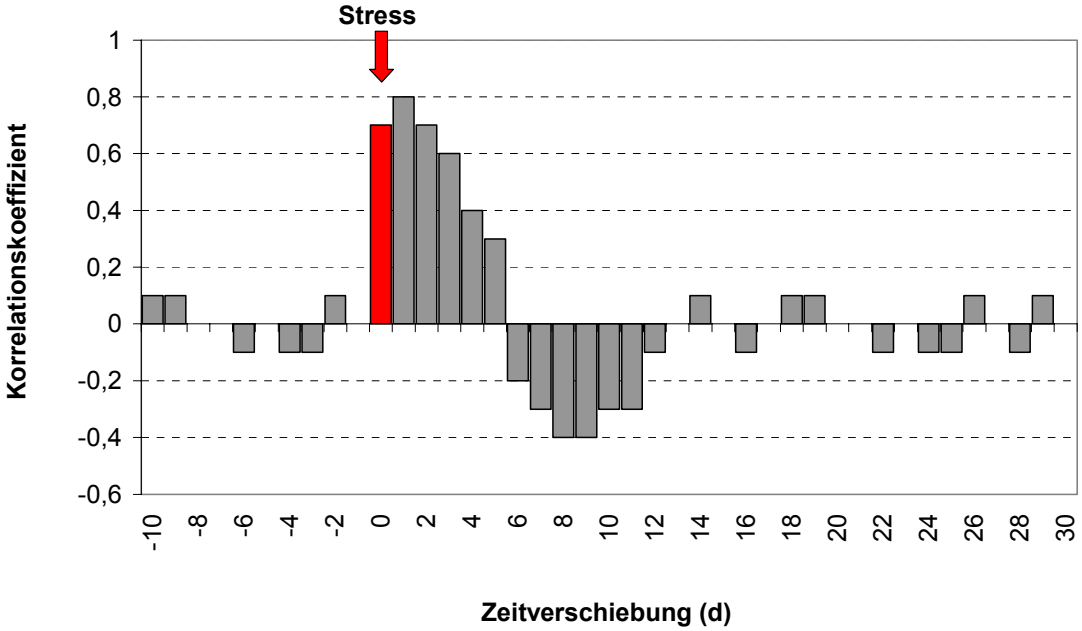


Abb. 3.2: Hypothetischer Verlauf des Korrelationskoeffizienten zwischen thermischer Belastung und Mortalität beim Auftreten eines Harvesting-Effektes

Laschewski und Jendritzky (2002) stellten nach einer mittleren Hitzewelle in Baden-Württemberg eine „*Untersterblichkeit*“ fest, welche je nach Intensität der Hitzewelle 3-5 Tage nach dem heißesten Tag einsetzte und anschließend 18-24 Tage andauerte (Tab. 3.8). Der in dieser Studie ermittelte Harvesting-Effekt überkompensierte die hitzebedingte Sterblichkeit. Das von Laschweski und Jendritzky (2002) angewendete Verfahren zur Ermittlung des Erwartungswertes der Mortalität hat jedoch den Nachteil, dass die hitzebedingte Sterblichkeit während Mortalitätsepisoden tendenziell unterschätzt wird.

Eine ähnliche zeitliche Erstreckung des Harvesting-Effektes wie in Baden-Württemberg fanden Kyselý und Huth (2004) für die Tschechische Republik. Für eine Hitzewelle im Jahr 1994 wird die Vorverlegung des Sterbezeitpunktes auf circa 50% der Übersterblichkeit während der Hitzewelle geschätzt. Bei einer Studie mit 12 US-amerikanischen Städten wurde kurze Zeit nach „*warmen*“ Tagen mit einer um etwa 4% erhöhten Mortalität eine

ungefähr 10 Wochen anhaltende „*Unstersterblichkeit*“ festgestellt, nach „*kalten*“ Tagen jedoch nicht (Braga et al., 2001). Nach Kältestress scheint sich auch in Baden-Württemberg und den Niederlanden kein wahrnehmbarer Harvesting-Effekt einzustellen (Kunst et al., 1993; Huynen, 2001; Laschewski und Jendritzky, 2002). Huynen et al. (2001) stellten fest, dass die Anzahl der Sterbefälle, bei denen es sich lediglich um eine Vorverlegung des Todeszeitpunktes handelt, in den Niederlanden von Hitzewelle zu Hitzewelle stark schwankt.

Tab. 3.8: Andauer und Ausmaß des Harvesting-Effektes nach Wärmebelastung

Ort / Region	Andauer (d)	Ausmaß (%)	Bemerkung	Referenz
Baden-Württemberg	18-24	>100	wahrscheinlich ungeeignete Methode für Erwartungswertbestimmung	Laschewski und Jendritzky, 2002
Tschechische Republik	4-25	50	Ausmaß wurde anhand von nur einer Hitzewelle abgeschätzt	Kyselý und Huth, 2004
	variabel	< 90	untersuchter Zeitraum vom ersten Tag der letzten 3-Tagesperiode mit erhöhter Mortalität vor einer Hitzewelle bis letzter Tag der letzten 3-Tagesperiode mit „*Untersterblichkeit*“ nach einer Hitzewelle	Kyselý, 2004
Niederlande	7-30	~ 50		Kunst et al., 1993
	7-14 15-30 7-30	82 2 15	Altersgruppe 0-64 Jahre Altersgruppe über 65 Jahre alle Altersgruppen	Huynen et al., 2001
		9-24	6 Hitzewellen	
Madrid	8-10	*k.A.*[1]		Pajares et al., 1997
	9-14[2]	*k.A.*[1]		Montero et al., 1997

[1] *k.A.: keine Angabe*
[2] *keine Untersuchung für Zeitverschiebungen länger als 14 Tage*

3.3.10 Alter und Geschlecht

Die Auswirkungen von thermischem Stress sind besonders deutlich bei Menschen ausgeprägt, deren Gesundheit bereits angeschlagen oder deren Fähigkeit zur Thermoregulation eingeschränkt ist. Daher werden in vielen Studien die als besonders gefährdet angesehenen älteren Personengruppen untersucht (z.B. Michelozzi et al., 2000; Huynen et al., 2001; Basu und Samet, 2002; Díaz et al., 2002; Hajat et al., 2002). Welche Altersgruppe als besonders gefährdet angesehen wird, hängt dabei auch von der Verfügbarkeit altersstrukturierter Mortalitätsdaten ab.

In Rom war während der Hitzewellen 2003 eine „*Übersterblichkeit*“ nur in der Altersgruppe der „*über 65-Jährigen*“ festzustellen. Die größten Auswirkungen waren dabei in der Altersgruppe „*über 85 Jahren*“ zu finden (Michelozzi et al., 2004). Auch in den Niederlanden gab es während der 6 Hitzewellen im Zeitraum 1979-1998 nur bei den „*über 65-Jährigen*“ signifikante Übersterblichkeit (Huynen et al., 2001). Von der Hitzewelle im Jahr 1987 in Athen waren vor allem die über 70 Jahre alten Menschen betroffen (Besancenot, 2002).

Die stärkere Gefährdung älterer Menschen konnte auch in den Studien von Montero et al. (1997) und Pajares et al. (1997) gezeigt werden. In beiden Studien wurde die Auswirkung der Lufttemperatur auf die Mortalität in Madrid im Zeitraum 1986-1991 untersucht. Die Autoren der zuerst genannten Studie untersuchten die Sterbefallzahlen der Bevölkerung über 65 Jahren und die Autoren der zweiten Studie die der 45- bis 64-Jährigen. Die Werte der Lufttemperatur, für welche das jeweilige Mortalitätsminimum festgestellt wurde, lagen bei den Älteren um 1 K (Tagesmaximum) bis 2 K (Tagesmittelwert) unter denen der jüngeren Bevölkerung.

Die Altersgruppen unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Sensitivität, sondern auch bezüglich ihrer Neigung zum Vorverlegen des Todeszeitpunktes um wenige Tage. In den Niederlanden sind vor allem die Menschen unter 65 Jahren von einem Harvesting-Effekt betroffen (Huynen et al., 2001).

Zwischen Männern und Frauen stellten Bull und Morton (1978) für die Niederlande keinen Unterschied in der temperaturabhängigen Mortalität fest. In Europa sind jedoch in der Regel Frauen stärker von der Wärmebelastung betroffen als Männer (Alberdi et al. 1998; Rooney et al., 1998; Díaz et al., 2002; Kyselý und Huth, 2004; Michelozzi et al., 2004). Kyselý (2004) führt als Grund die größere physiologische und verhaltensbedingte Anfälligkeit von Frauen für thermische Belastung an. Dies könnte durch den höheren Anteil von älteren und damit auch sensitiveren Frauen an der Bevölkerung bedingt sein.

3.4 Fazit

Für die Bewertung der thermischen Umwelt ist es wichtig, die sechs fundamentalen Einflussfaktoren, welche die Bedingungen des Wärmeaustauschs bestimmen, zu berücksichtigen. Zu diesen Faktoren zählen Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, innere Wärmeproduktion und die getragene Bekleidung (Fanger, 1972; Jendritzky et al., 1979; Parsons, 2003). Diese Parameter werden in der Regel in Wärmehaushaltsmodellen berücksichtigt. Daneben ist der Grad der Akklimatisation für die Bewertung von thermischem Stress wichtig, weil er durch eine Effizienzsteigerung des Thermoregulationssystems die effektiv auf ein Individuum wirkende thermische Belastung reduziert (Fanger, 1972; Hensel, 1973). Die kurzfristige Akklimatisation an die aktuellen Witterungsverhältnisse wurde jedoch bisher in keinem der Verfahren zur Bewertung der thermischen Umwelt berücksichtigt.

Die im Rahmen der kurzfristigen Akklimatisation stattfindenden physiologischen Veränderungen stellen sich innerhalb weniger Tage ein. Sie werden bei fehlender Exposition jedoch auch wieder zurückgebildet und nach etwa einem Monat kommt es zum vollständigen Verlust der Akklimatisation.

In einigen der ausgewerteten epidemiologischen Studien konnte festgestellt werden, dass die Gesundheitsauswirkungen thermischer Belastung nicht nur von den aktuellen thermischen Verhältnissen, sondern auch von der vorangegangenen meteorologischen Situation abhängig sind (Dessai, 2002; Kyselý und Huth, 2004). Dabei zeigt sich der Einfluss der Akklimatisation unter anderem darin, dass in unterschiedlichen Regionen und zu unterschiedlichen Jahreszeiten auch unterschiedliche Schwellenwerte für eine mit einer bestimmten Mortalitätssteigerung verbundene thermische Belastung gefunden werden. Oftmals wird in diesen Untersuchungen die thermische Umwelt allein über die Lufttemperatur definiert, es findet also keine thermophysiologisch relevante Bewertung der Umwelt statt. Die Ergebnisse dieser Studien deuten trotzdem darauf hin, dass sich die Bevölkerung kurzfristig (innerhalb weniger Wochen) an thermische Belastung anpassen kann und dass diese Anpassung oder Akklimatisation relativ schnell wieder nachlässt.

Eine weitere Hypothese für die stärkere Auswirkung von thermischem Stress im Frühjahr und Frühsommer ist, dass die für Hitzebelastung empfindliche Bevölkerung bereits infolge der ersten Hitzewelle im Jahr stirbt und daher der Pool der anfälligen Personen von einer Hitzewelle zur nächsten abnimmt (z.B. Basu und Samet, 2002; Dessai, 2002).

Für ältere Menschen und Frauen wird in der Regel eine größere Sensitivität für Wärmebelastung festgestellt als für junge Menschen und Männer. Viele alters- und geschlechtsspezifische Unterschiede lassen sich zumindest teilweise auf Unterschiede in körperlicher Fitness, dem Akklimatisationszustand, dem Flüssigkeitshaushalt sowie in der Morphologie zurückführen (Havenith, 1999). Die individuellen Unterschiede bei der Hitzetoleranz sind bei der Untersuchung von Zeitreihen größerer Grundgesamtheiten nicht zu erkennen. Daher werden oft Parameter, wie beispielsweise das Alter, stellvertretend für eine geringere körperliche Fitness und eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Vorerkrankungen herangezogen.

In Europa reagiert die Mortalitätsrate auf einen Tag mit Wärmebelastung meist direkt mit einem Anstieg. Die Reaktion auf Kältestress erfolgt häufig mit einer zeitlichen Verzögerung von 3-14 Tagen. Das könnte ein Hinweis auf eine sehr direkte Beziehung des menschlichen Wärmehaushaltes mit seiner thermischen Umwelt bei Wärmebelastung sein. Kältestress wirkt sich indirekt und gegebenenfalls auch über andere Wirkungswege, wie beispielsweise die stärkere Verbreitung von Infektionskrankheiten, aus.

Länger andauernde Wärmebelastung geht mit höheren Sterbefallzahlen einher als einzelne heiße Tage. Dies könnte damit zusammenhängen, dass nach mehreren heißen Tagen die Gebäude nachts nicht mehr richtig auskühlen und so die Differenz zwischen dem thermischen Milieu außen und dem der Innenräume immer geringer wird.

Einige der diskutierten Studien haben das Ausmaß der Vorverlegung des Sterbezeitpunktes um wenige Tage durch Wärmebelastung und Kältestress untersucht. In der Regel wurde nach Wärmebelastung ein Harvesting-Effekt von 2-100% der vorangegangenen „*Übersterblichkeit*“ gefunden. Nach Kältestress konnte in den Niederlanden und in Baden-Württemberg hingegen kein Harvesting-Effekt festgestellt werden (Kunst et al., 1993; Huynen et al., 2002; Laschewski und Jendritzky, 2002). Die Größenordnung dieser Vorverlegung des Todeszeitpunktes ist stark von der Methode abhängig, die zur Bestimmung der erwarteten Mortalität herangezogen wird. Da in den diskutierten Studien unterschiedliche Methoden zur Erwartungswertbestimmung angewendet wurden, sind die Ergebnisse nur schwer vergleichbar.

In einigen Studien wird der Einfluss von Luftschadstoffen auf die Mortalität während Wärmebelastungssituationen untersucht. Vor allem erhöhten Ozon- und PM_{10}-Konzentrationen wird ein Teil der Übersterblichkeit während Hitzewellen oder heißer Episoden zugeordnet (Fischer et al., 2004; Stedman, 2004). Da während Hitzewellen in der Regel auch die Ozon- und PM_{10}-Konzentrationen erhöht sind (Basu und Samet, 2002; Fischer et al., 2004), ist es in statistischen Untersuchungen auf Populationsebene sehr problematisch,

diese potenziellen Einflussfaktoren auf die Mortalität getrennt zu betrachten. Allerdings wird in der Literatur durchaus kontrovers diskutiert, ob Luftschadstoffe bei Wärmebelastung eine direkte Auswirkung auf die Mortalität haben, die Auswirkungen der Hitze auf die Mortalität lediglich modifizieren (Sartor et al., 1995; Kasouyanni et al., 1997) oder aber überhaupt keinen Einfluss auf die Anzahl der Sterbefälle während Hitzewellen haben (Driscoll, 1971; Kalkstein, 1991; Hennessy, 2002). In vielen Studien konnte gezeigt werden, dass vor allem ältere Menschen an den Folgen von Hitzewellen sterben. Diese halten sich jedoch überwiegend in Innenräumen auf, wo meist auch bei sehr hohen Ozonkonzentrationen in der Außenluft sehr geringe Ozonkonzentrationen herrschen. Der Einfluss von Luftschadstoffen wurde in der vorliegenden Studie nicht bearbeitet.

4 ARBEITSHYPOTHESEN UND ZIELSETZUNGEN

Die meisten der bisher durchgeführten Studien über die Auswirkungen von thermischer Belastung auf die Sterbefallzahlen weisen Defizite sowohl bei der Bewertung der thermischen Umwelt als auch bei der Bestimmung der thermisch bedingten Mortalität auf.

Die Defizite bei der Bewertung der thermischen Umwelt haben zwei Gründe:

1. In vielen der epidemiologischen Studien wird die thermische Umwelt anhand eines einfachen Verfahrens bewertet. Einfache Verfahren haben jedoch den Nachteil, dass sie thermophysiologisch nicht relevant sind, da sie nicht alle den Wärmehaushalt des Menschen beeinflussenden meteorologischen und nicht-meteorologischen Größen berücksichtigen.

2. Keine der bisher durchgeführten Untersuchungen berücksichtigt die kurzfristige Anpassung des Menschen an die lokalen Witterungsverhältnisse der letzten Wochen. Diese hat jedoch einen großen Einfluss auf die Belastungsintensität, die ein Individuum in einer bestimmten thermischen Umgebung tatsächlich empfindet. Als Folge hiervon ergeben sich unterschiedliche Schwellenwerte der thermischen Umwelt in unterschiedlichen Regionen Europas und zu unterschiedlichen Jahreszeiten.

Daher wurden folgende Arbeitshypothesen aufgestellt:

- Ein Verfahren zur Bewertung der thermischen Umwelt, welches auf einem thermophysiologisch relevanten Bewertungsparameter beruht und zusätzlich die kurzfristige Anpassung an die lokalen Witterungsverhältnisse der letzten Wochen berücksichtigt, sollte diese Defizite nicht aufweisen.

- Die kurzfristige Anpassung setzt sich aus kurzfristiger verhaltensgesteuerter Anpassung und aus kurzfristiger Akklimatisation (physiologische Anpassung) zusammen.

- Für eine dynamische, thermophysiologisch relevante Bewertung der Umwelt ist es daher erforderlich, die zugrunde liegenden einzelnen Prozesse basierend auf einem empirischen oder konzeptionellen Modell zusammenzufassen und zu beschreiben.

- Durch die Berücksichtigung der kurzfristige Anpassung ergeben sich variable Schwellenwerte für unterschiedliche thermische Belastungsstufen. Diese Schwellenwerte sind sowohl räumlich als auch zeitlich variabel.

- Im Jahresverlauf ändert sich daher die Sensitivität der Bevölkerung für thermische Belastung eines bestimmten Ausmaßes nicht signifikant.

- Unterschiede in der Sensitivität für thermische Belastung zwischen verschiedenen Regionen sind bei Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung nur noch auf Unterschiede in der langfristigen Anpassung und in den Bevölkerungscharakteristika (z.B. der Altersstruktur) zurückzuführen.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Verfahren zur Bewertung der thermischen Umwelt abzuleiten, welches die kurzfristige Anpassung an die lokalen Witterungsverhältnisse berücksichtigt. Es sollte daher auf Zeitreihen aus unterschiedlichen klimatischen Regionen Europas, zu unterschiedlichen Jahreszeiten sowie auf unterschiedliche Fragestellungen angewendet werden können. Ein derartiges Verfahren ermöglicht vergleichende Untersuchungen von Zeitreihen und ist dazu geeignet, Änderungen der Auswirkungen von thermischen Belastungen auf die Gesundheit zu identifizieren.

Das bedeutet, dass dieses Verfahren in der Lage sein sollte, im Grundsatz die Bedingungen zu erfüllen, welche an den von der ISB-Kommission 6 zu entwickelnden **U**niversal **T**hermal **C**limate **I**ndex (**UTCI**) gestellt werden (Jendritzky et al., 2001):

- thermophysiologische Relevanz über die ganze Spannweite des Wärmeaustauschs;
- Gültigkeit für alle Klimate, Jahreszeiten und Skalen;
- Anwendbarkeit auf alle Schlüsselanwendungen der Biometeorologie.

Ein solches Verfahren kann des Weiteren als Basis für eine allgemeine Definition des Begriffes „*Hitzewelle*“ herangezogen werden.

Auch die thermisch bedingte Mortalität ist in einem Großteil der in Kapitel 3.3 aufgezählten Studien nur auf unbefriedigende oder auf speziell auf eine Fragestellung zugeschnittene

Weise bestimmt worden. Daraus ergibt sich als weiteres Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Methode, welche es ermöglicht, stabile Schätzungen über die thermisch bedingte Mortalität zu erhalten. Diese Methode sollte sowohl für unterschiedliche Fragestellungen (Zeitreihenanalysen, Episodenanalysen) als auch bei unterschiedlicher Datenverfügbarkeit (lange bzw. kurze Zeitreihen) einsetzbar sein. Damit soll eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus verschiedenen Untersuchungen gewährleistet werden.

5 UNTERSUCHUNGSMETHODIK

5.1 Bewertung der thermischen Umwelt

5.1.1 Einführung

Eine Zuordnung einzelner Tage zu verschiedenen Belastungsstufen erfordert die Festlegung von Schwellenwerten für die Bewertungsfunktion der thermischen Umwelt. Ziel dabei ist, die Schwellenwerte so zu wählen, dass der statistische Zusammenhang zwischen den Belastungsklassen und bestimmten Auswirkungen auf die Gesundheit (z.B. Anstieg der Mortalität) möglichst hoch ist. Für die Festlegung solcher Schwellenwerte sind sowohl absolute als auch relative Ansätze gebräuchlich.

Hinter einem absoluten Schwellenwert verbirgt sich die Philosophie, dass ab einer gewissen thermischen Belastung unabhängig vom Grad der Anpassung an die lokalen Witterungsverhältnisse negative Auswirkungen auf die Gesundheit eines Menschen zu erwarten sind. Das Problem ist die Festlegung der Höhe der absoluten Schwelle. Hier ergeben sich verschiedene Möglichkeiten:

Zum einen ist es möglich, den absoluten Schwellenwert an vorgegebene Empfehlungen anzulehnen, wie sie z.B. in ASHRAE (1997) oder VDI (1998) zu finden sind. Für Situationen mit „*starker Wärmebelastung*“ wird vom VDI (1998) beispielsweise ein Schwellenwert von PMV = 2,5 vorgeschlagen. Dies entspricht einer Gefühlten Temperatur von 32 °C (Tab. 5.1).

Tab. 5.1: Gefühlte Temperatur, PMV, thermisches Empfinden und Belastungsstufe (verändert nach: VDI, 1998; Friedrich et al., 2001; Jendritzky et al., 2001)

Klassen-breite (K)	GT (°C)	PMV	thermisches Empfinden	Belastungsstufe
	< -39	< -3,5	sehr kalt	-4: extremer Kältestress
13 -[	-39 bis -26	-3,5 bis -2,5	kalt	-3: starker Kältestress
13 -[	-26 bis -13	-2,5 bis -1,5	kühl	-2: mäßiger Kältestress
13 -[	-13 bis 0	-1,5 bis -0,5	leicht kühl	-1: leichter Kältestress
	0 bis 20	-0,5 bis 0,5	behaglich	0: kein thermischer Stress
6 -[	20 bis 26	0,5 bis 1,5	leicht warm	1: leichte Wärmebelastung
6 -[	26 bis 32	1,5 bis 2,5	warm	2: mäßige Wärmebelastung
6 -[	32 bis 38	2,5 bis 3,5	heiß	3: starke Wärmebelastung
	≥ 38	≥ 3,5	sehr heiß	4: extreme Wärmebelastung

Die gesundheitlichen Auswirkungen einer Überschreitung dieser Schwellen sind jedoch räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen, da die Menschen an die lokalen Witterungsverhältnisse angepasst sind. In London liegt beispielsweise die Mortalität bei einer Gefühlten Temperatur von 32 °C bereits etwa 10% über dem Erwartungswert (Abb. 5.1). In Madrid hingegen zeigt die Mortalität bei diesem Schwellenwert kaum eine Abweichung vom Erwartungswert (≈ 3%). Das Beispiel veranschaulicht, dass ein absoluter Schwellenwert nur dann sinnvoll eingesetzt werden kann, wenn er an die lokalen Gegebenheiten angepasst ist, da diese aufgrund der Verhaltensanpassung und Akklimatisation die Auswirkungen der absoluten Wärmebelastung auf die menschliche Gesundheit beeinflussen.

Als zweite Möglichkeit bietet sich an, den absoluten Schwellenwert mit Hilfe von Morbiditäts- oder Mortalitätsdaten zu kalibrieren. Die Kalibrierung hat zum Ziel, der festzulegenden Schwelle eine vorher definierte Wirkung zuzuordnen. Würden beispielsweise Situationen, in denen es zu einer Erhöhung der Mortalität um mindestens 10% kommt, als belastend definiert, so läge die Schwelle für Wärmebelastung in London etwas unter einer Gefühlten Temperatur von 30 °C und in Madrid bei 36 °C. Daher sind Analysen von unterschiedlichen Regionen, die auf Basis von absoluten Schwellenwerten durchgeführt werden, schlecht miteinander vergleichbar. Diese Vorgehensweise hat zudem den Nachteil, dass Unterschiede in der Sensitivität der Bevölkerung für thermische Belastungen nicht erfasst werden können.

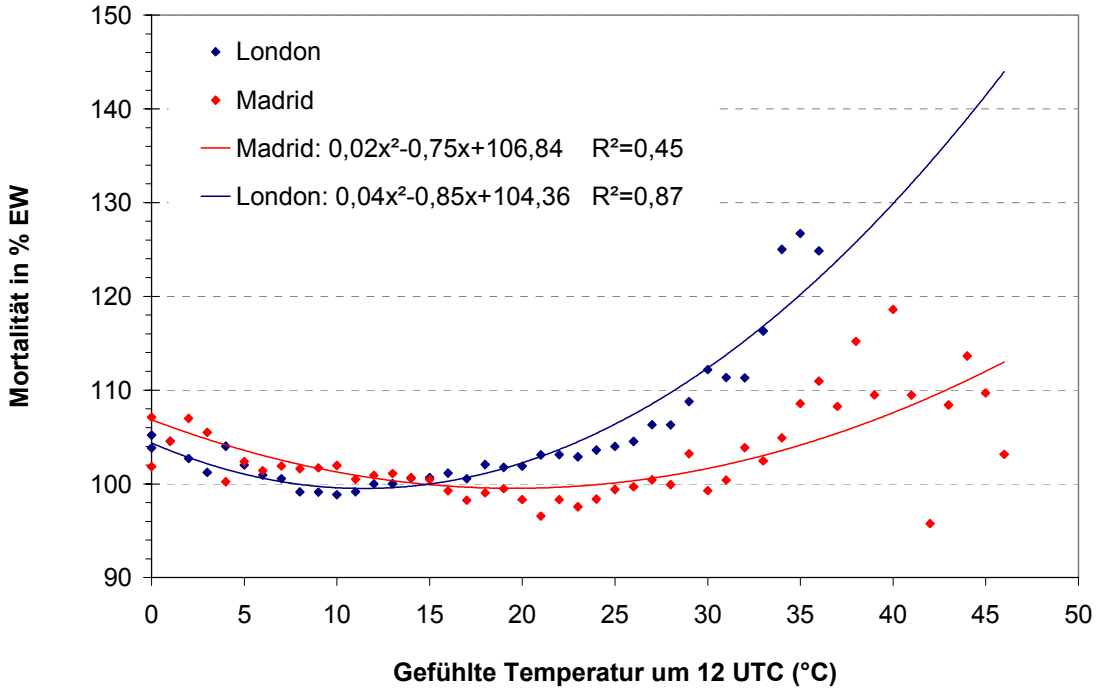


Abb. 5.1: Mittelwert der relativen Mortalität (Mortalität in % EW) in Abhängigkeit von der Gefühlten Temperatur um 12 UTC für London (1976-2000) und Madrid (1986-1997). *EW: Erwartungswert, R²: Bestimmtheitsmaß*

Um wie oben beschrieben vorgehen zu können, müssen Mortalitäts- bzw. Morbiditätsdaten für die Kalibrierung der Schwellenwerte vorhanden sein. Zusätzlich sollte der Zusammenhang zwischen thermischem Bewertungsparameter und Mortalität die Bedingung der Stationarität erfüllen. Schon innerhalb eines Jahres verändert sich diese Beziehung jedoch aufgrund der kurzfristigen Anpassung (Kapitel 3.3.6). Auch über längere Zeiträume gibt es durch die langfristige Anpassung Veränderungen des Zusammenhangs zwischen thermischer Umwelt und Mortalität. Die Sensitivität der Gesamtbevölkerung gegenüber thermischer Belastung ist zudem von sozioökonomischen Faktoren wie Wohlstand, Bauweise, medizinischem Fortschritt oder Altersstruktur abhängig (Basu und Samet, 2002). Diese können ebenfalls nicht als konstant über die Zeit angesehen werden.

Statt absoluten Schwellenwerten ist es auch möglich, relative Ansätze zur Ausweisung einer thermisch belastenden Situation zu verwenden. Hierdurch wird eine Anpassung an das Lokalklima berücksichtigt (Kapitel 3.3.8). Relative Schwellenwerte werden meist in Form von Perzentilwerten festgelegt. Dabei ergibt sich unabhängig von den klimatischen Gegebenheiten einer Region immer die gleiche Anzahl von Tagen mit einer durch ein Per-

zentil definierten thermischen Belastung. Dies impliziert aber auch, dass thermisch belastende Situationen wie beispielsweise Hitzewellen am Nordpol genauso häufig vorkommen wie in Neapel.

Der relative Schwellenwert, welcher sich aus einem Perzentilwert ergibt, ist unter anderem vom Zeitraum abhängig, welcher zur Bestimmung der Perzentilschwelle herangezogen wurde (Abb. 5.2). Für eine Berücksichtigung langfristiger Anpassungsprozesse wäre es daher nötig, die Perzentilschwelle permanent anzupassen.

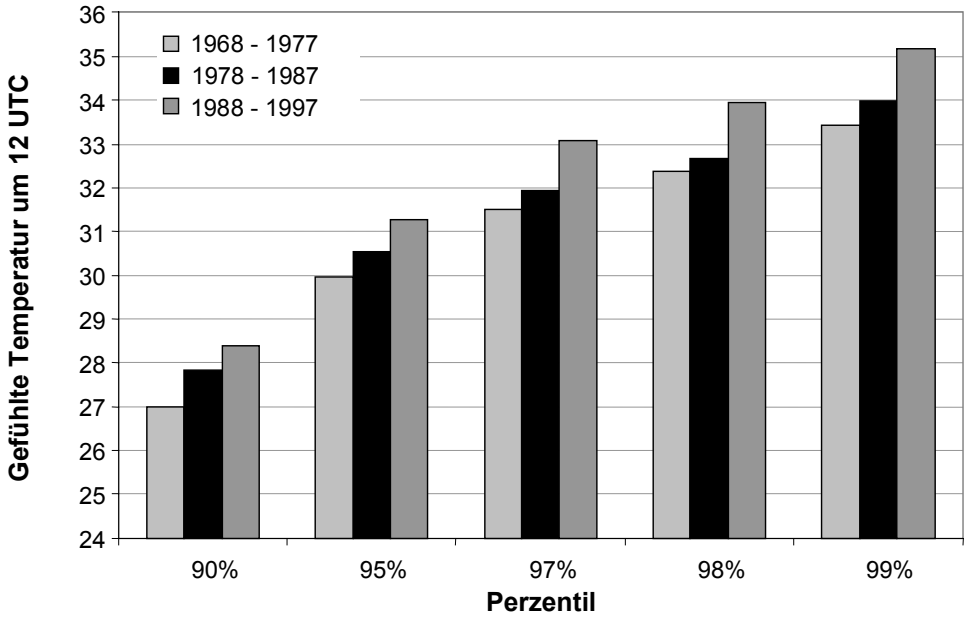


Abb. 5.2: Perzentilwerte der Gefühlten Temperatur um 12 UTC für verschiedene Zeiträume (Baden-Württemberg)

5.1.2 Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung

Um die Schwächen der bereits existierenden Bewertungsverfahren für die thermische Umwelt zu umgehen, wurde das Verfahren **HeRATE** (**He**alth **R**elated **A**ssessment of the **T**hermal **E**nvironment) zur Berechnung von Schwellenwerten für die einzelnen Stufen thermischer Belastung entwickelt. **HeRATE** kombiniert ein physiologisch relevantes Bewertungsverfahren für die thermische Umwelt mit einem konzeptionellen Modell für die kurzfristige Anpassung (bestehend aus kurzfristiger Akklimatisation und verhaltensgesteu-

erter Anpassung) an die lokale Witterung der letzten vier Wochen. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, einen konstanten Schwellenwert mittels eines variablen Anteils zu modifizieren. Das Einbeziehen der kurzfristigen Anpassung hat unter anderem den Vorteil, dass das Verfahren ohne weitere Veränderungen auf Daten aus unterschiedlichen klimatischen Regionen und zu unterschiedlichen Jahreszeiten angewendet werden kann. Durch die Integration des konstanten Anteils hingegen werden nur Situationen berücksichtigt, die gewisse „*Mindestanforderungen*“ für die thermische Belastung erfüllen.

Zur thermophysiologisch relevanten Bewertung der Umwelt wird sowohl für den konstanten als auch für den relativen Anteil die sich aus dem Klima-Michel-Modell ergebende Gefühlte Temperatur verwendet (Jendritzky et al., 1979; Jendritzky und Nuebler, 1981; Jendritzky, 1990; Staiger et al., 1997). Gegenüber den anderen auf Wärmehaushaltsmodellen beruhenden Indizes Out_SET* und PET hat die Gefühlte Temperatur den Vorteil, dass sie eine Anpassung der Bekleidung berücksichtigt und für Außenbedingungen ausgelegt ist. Zudem ist die Gefühlte Temperatur einer der Standard-Bewertungsparameter, welche routinemäßig vom Deutschen Wetterdienst (DWD) berechnet werden, was eine Implementierung der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse in die DWD Routinen ermöglicht.

5.1.2.1 KONSTANTER ANTEIL

Der konstante (absolute) Anteil soll – im Gegensatz zum relativen oder variablen Anteil, der die kurzfristige Anpassung widerspiegelt – absolute Grenzen einbeziehen, an welche der menschliche Organismus bei der Thermoregulation aufgrund des Konstanthaltens der Kerntemperatur gebunden ist.

Die hier verwendeten absoluten Schwellenwerte der Gefühlten Temperatur für Wärmebelastung und Kältestress entstehen durch eine Umrechnung von PMV-Werten und sind über die psycho-physische Bewertungsskala von ASHRAE (1997) sowie über die VDI-Richtlinie 3787/2 (1998) bestimmten Belastungsstufen zugeordnet (Tab. 5.1, S.64).

5.1.2.2 VARIABLER ANTEIL

Die Belastungssituation wird unter anderem von der Akklimatisation mitbestimmt, da diese die physiologischen Anstrengungen minimiert, welche für die Thermoregulation notwendig sind (Kapitel 3.1.5). Daher sollte der Akklimatisationsgrad bei einer gesundheitsrelevanten Bewertung der thermischen Umwelt berücksichtigt werden.

Für die kurzfristige Anpassung an eine thermische Umgebung spielt neben der Akklimatisation (physiologische Anpassung) auch die verhaltensgesteuerte Anpassung über die Bekleidung eine Rolle. Morgan und de Dear (2003) fanden heraus, dass der Zusammenhang zwischen dem Isolationswert der gewählten Bekleidung und der Außentemperatur der vergangenen Tage exponentiell mit zunehmender zeitlicher Verschiebung abnimmt. Der Erklärungsanteil der Außentemperatur für den Isolationswert der Bekleidung am selben Tag (x) beträgt beispielsweise über 50%, am Tag x-7 sind es nur noch 3%.

Auf Basis der Literaturrecherche über den zeitlichen Verlauf der kurzfristigen Akklimatisation (Kapitel 3.1.5) und der Studie von Morgan und de Dear (2003) über die verhaltensgesteuerte Anpassung, lassen sich konzeptionelle bzw. empirische Modelle für diese beiden Komponenten aufstellen (Abb. 5.3).

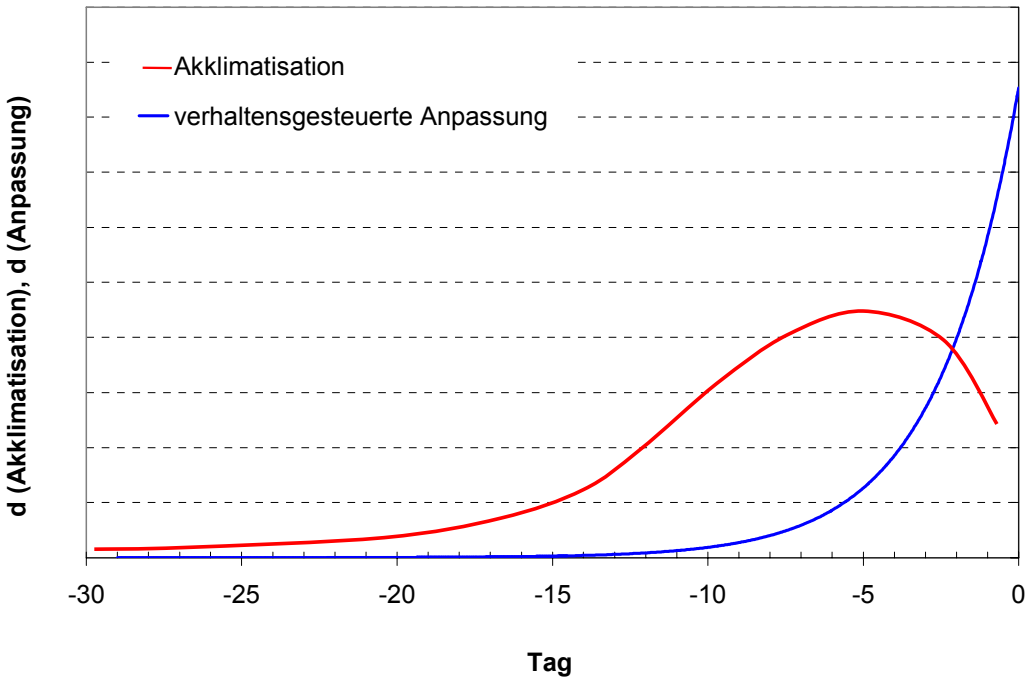


Abb. 5.3: Konzeptionelles Modell für die Gewichtungsfunktionen für kurzfristige Akklimatisation und empirisches Modell für die kurzfristige, verhaltensgesteuerte Anpassung. *d: Änderung zum Vortag*

Der Einfluss der Akklimatisation nimmt zunächst mit zunehmender zeitlicher Verschiebung zu, nach 4-6 Tagen sind dann etwa 75% der maximal möglichen Akklimatisation erreicht (Pandolf, 1998; Shapiro et al., 1998). Anschließend kommt es zu einer langsameren Zunahme des Akklimatisationsgrads, bis sich nach knapp zwei Wochen die maximal

möglichen physiologischen Veränderungen eingestellt haben (Fanger, 1972). Bei Ausbleiben des Wärmereizes bilden sich die durch die Akklimatisation gewonnenen physiologischen Veränderungen wieder zurück und sind nach einem Monat vollständig verschwunden.

Bisher ist die Stärke des Einflusses der verhaltensgesteuerten Anpassung relativ zum Einfluss der Akklimatisation nicht vollständig verstanden. Zudem ist dieses Verhältnis vermutlich nicht stationär. Für warme Bedingungen ist der Einfluss der physiologischen Thermoregulation dominant, unter kalten Bedingungen dominiert die verhaltensgesteuerte Thermoregulation (Hensel, 1973; Khosla und Guntupalli, 1999).

Werden die beiden Modelle einfach addiert, wird für die Gewichte der thermischen Umwelt der Vortage näherungsweise eine halbe Normalverteilungsfunktion erhalten. Im Vergleich mit anderen Gewichtungsfunktionen (linear, exponentiell) hat sich diese als beste herausgestellt, auch wenn die Unterschiede bezüglich der Auswirkungen auf die Mortalität nicht signifikant waren (Abb. A 1, S.194; Abb. A 2, S.194).

Zur Beschreibung der kurzfristigen Anpassung wird daher vereinfachend ein rückwärtsreichendes, einseitiges (halbes) Gaußfilter mit einer Länge von 41 Tage verwendet (Abb. 5.4). Das entspräche einer Filterlänge von 81 Tagen bei einem zweiseitigen Gaußfilter. Dieses einseitige Filter hat 30 signifikante Filtergewichte (Schönwiese, 1992), was ungefähr dem Zeitrahmen entspricht, in welchem die physiologischen Veränderungen der Akklimatisation nach Ausbleiben des Wärmereizes gerade noch aktiv sind.

Die rohen Filtergewichte (w_k) des Gaußfilters lassen sich wie folgt berechnen (Schönwiese, 1992):

$$\mathbf{w_k} = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2\pi}}} \cdot \mathbf{e}^{\left(\frac{-\mathbf{k} \cdot \left(\frac{\mathbf{6}}{\mathbf{T^*}} \right)^{\mathbf{2}}}{\mathbf{2}} \right)} \qquad \textbf{Gl. 5.1}$$

für k = 0, 1, ..., T.*

Dabei ist T* die Länge des Filters. Die Summe der rohen Filtergewichte wird auf 1 normiert. Da hier nur Filtergewichte mit einem signifikanten Anteil am „*Filterergebnis*“ berücksichtigt werden sollen, wurde das von Schönwiese (1992) vorgeschlagene Abbruchkriterium angewendet, welches Filtergewichte ausschließt, die weniger als ein Zehntel des ersten Filtergewichtes (w_0) betragen.

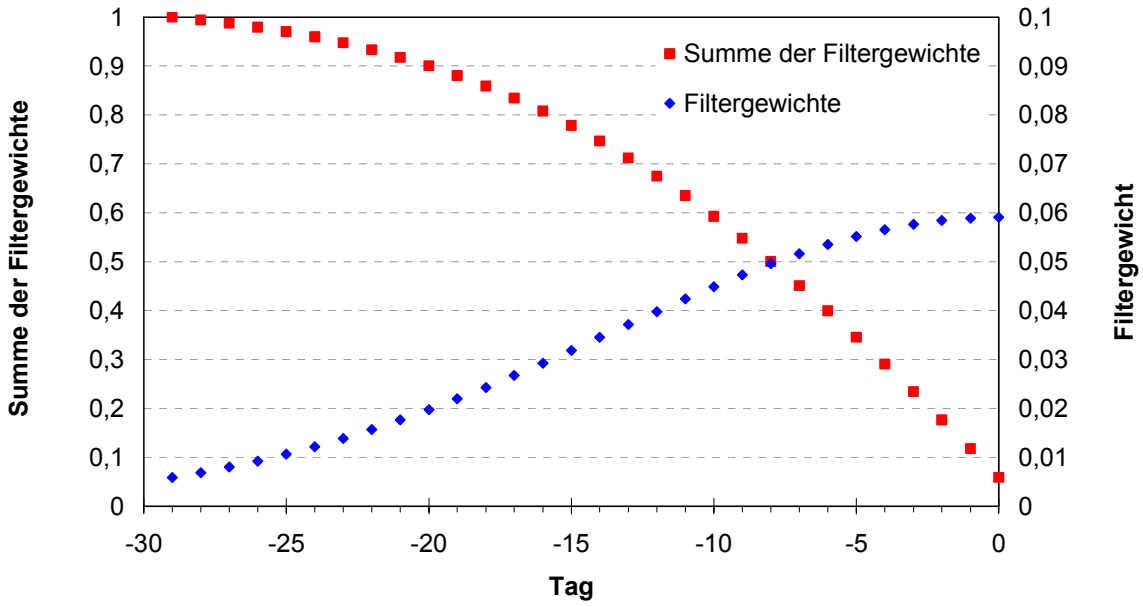


Abb. 5.4: Filtergewichte des halben Gaußfilters F41 und Summe der Filtergewichte

Die auf Basis dieses konzeptionellen Modells ermittelten Werte für die Gefühlte Temperatur repräsentieren die bestmögliche kurzfristige Anpassung, die ein Mensch ohne Berücksichtigung weiterer Restriktionen (z.B. maximale thermische Belastungen, an die eine Anpassung möglich ist) erreichen kann (Abb. 5.5).

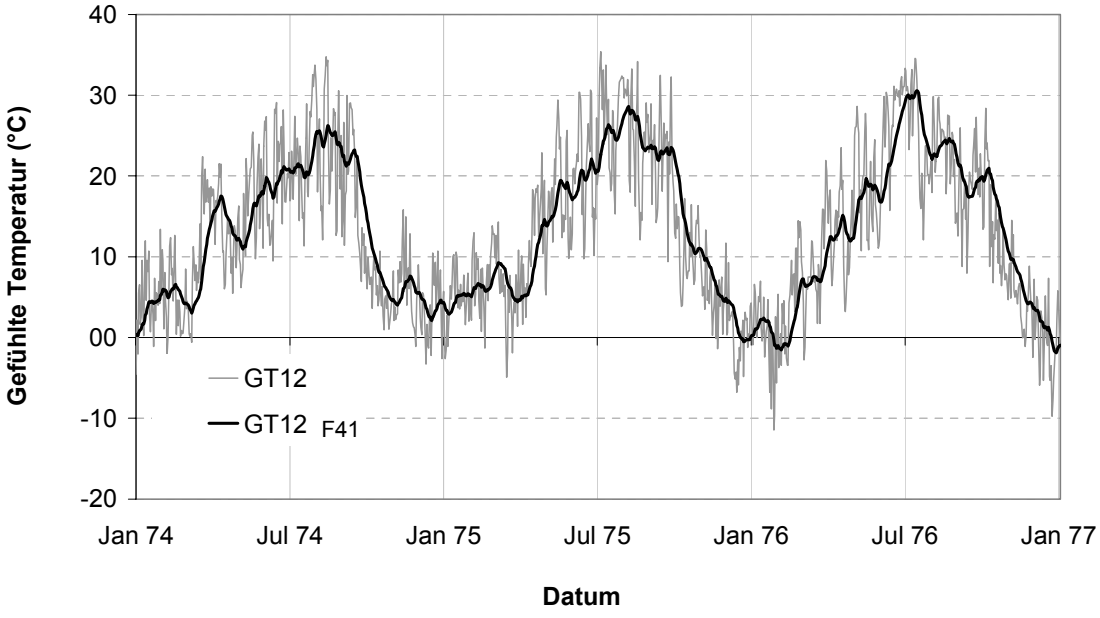


Abb. 5.5: Verlauf der mit dem halben Gaußfilter gefilterten Werte ($GT12_{F41}$) der Gefühlten Temperatur um 12 UTC (GT12) (Baden-Württemberg)

5.1.2.3 KOMBINATION VON KONSTANTEM UND VARIABLEM ANTEIL

Durch die Kombination des relativen oder variablen Teils (kurzfristige Anpassung) mit dem absoluten oder konstanten Teil sollen die Vorteile von beiden Ansätzen bei der Festlegung von Schwellen für bestimmte gesundheitliche Auswirkungen mit dem Ziel kombiniert werden, den konstanten Anteil (Tab. 5.1, S.64) mittels des variablen Anteils (Abb. 5.4; Abb. 5.5) zu modifizieren. Dabei wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Die Obergrenze (Untergrenze) des Komfortbereichs, welche beim konstanten Anteil bei GT = 20 °C (0 °C) liegt, wird durch den relativen Teil modifiziert.

2. Die einzelnen Belastungsstufen werden für Wärmebelastung (Kältestress) entsprechend Tabelle 5.1 durch Addition (Subtraktion) einer festen Klassenbreite von 6 K (13 K) ermittelt.

Die unterschiedlich breiten Inkremente für Wärmebelastung und Kältestress ergeben sich durch Umrechnung der PMV-Werte in Werte der Gefühlten Temperatur.

Die Obergrenze des Komfortbereichs (Kb_O) aus Tabelle 5.1 wird durch den relativen Anteil ($GT12_{F41}$) wie folgt modifiziert:

$$\mathbf{aKb_O = Kb_O + \left(GT12_{F41} - Kb_O\right) \cdot \frac{1}{3}} \qquad \mathbf{[°C]} \qquad \mathbf{Gl.\ 5.2}$$

aKb_O: Obergrenze des Komfortbereichs mit Berücksichtigung der Anpassung (°C)
Kb_O: Obergrenze des Komfortbereichs ohne Berücksichtigung der Anpassung (°C)
$GT12_{F41}$: Wert der mit dem einseitigen 41-Tage Gaußfilter gefilterten Gefühlten Temperatur um 12 UTC (°C)

Entsprechend wird die Untergrenze des Komfortbereichs berechnet:

$$\mathbf{aKb_U = Kb_U + \left(GT06_{F41} - Kb_U\right) \cdot \frac{1}{3}} \qquad \mathbf{[°C]} \qquad \mathbf{Gl.\ 5.3}$$

aKb_U: Untergrenze des Komfortbereichs mit Berücksichtigung der Anpassung (°C)
Kb_U: Untergrenze des Komfortbereichs ohne Berücksichtigung der Anpassung (°C)
$GT06_{F41}$: Wert der mit dem einseitigen 41-Tage Gaußfilter gefilterten Gefühlten Temperatur um 06 UTC (°C)

Die Verwendung der Gefühlten Temperatur um 12 UTC (GT12) für die Bewertung der Wärmebelastung ist zum einen mit der relativ guten Verfügbarkeit der meteorologischen Parameter zum 12 UTC Termin begründet, zum anderen liegt dieser Wert meist in der Nähe des Tagesmaximums der Gefühlten Temperatur. Es ist daher nicht unwahrscheinlich, dass die Gefühlte Temperatur den GT12-Wert für 1-2 Stunden am Tag überschreitet. Diese Expositionsdauer ist für eine vollständige kurzfristige Akklimatisation ausreichend (Pandolf, 1998). Entsprechend wird die Gefühlte Temperatur um 06 UTC (GT06) als repräsentativ für die Minimumbedingungen, welche zur Bewertung des Kältestresses herangezogen werden, angesehen.

Der absolute Teil wird mit 2/3 und der relative Teil mit 1/3 gewichtet. Die Wahl der Gewichte erfolgt hierbei relativ willkürlich und soll die Tatsache wiedergeben, dass die Obergrenze des Komfortbereichs durch die Akklimatisation auf der Populationsebene innerhalb gewisser Grenzen schwankt. Diese Grenzen sind durch den physiologischen Zwang vorgegeben, die Körperkerntemperatur konstant auf 37 °C zu halten.

Durch die Kombination des absoluten Schwellenwertes aus Tabelle 5.1 und des auf dem konzeptionellen Modell über die kurzfristige Anpassung beruhenden relativen Teils ändern sich die Schwellen für eine bestimmte Belastungsstufe im Jahresverlauf (Abb. 5.6) und sind auch von Region zu Region verschieden (nicht dargestellt). Der Schwellenwert für „*leichte Wärmebelastung*“, welcher im statischen Fall 20 °C ist, lag in Baden-Württemberg im Jahr 1984 beispielsweise zwischen 13 °C im Winter und 22 °C im Hochsommer.

Die Bestimmung der Gefühlten Temperatur zu einem einzelnen Termin kann nicht immer als repräsentativ für den ganzen Tag angesehen werden. So kann beispielsweise die Bewölkung um 12 UTC kurzfristig aufreißen und zu einem vorrübergehenden Ansteigen der Gefühlten Temperatur führen. Daher wird das 2-Tagesmittel der Gefühlten Temperatur um 12 UTC am Tag x und am Tag x-1 gebildet. Anschließend wird geprüft, welche Schwellenwerte dieses 2-Tagesmittel über- bzw. unterschreitet. Ein weiterer Grund für die Mittelung ist, dass ein singuläres Über- bzw. Unterschreiten der Schwelle ausgeschlossen werden soll, damit das Verfahren auch zur Definition des Begriffs „*Hitzewelle*“ herangezogen werden kann. Zudem ist die Auswirkung auf die Mortalität während Wärmebelastungssituationen stärker und es ergeben sich signifikante Unterschiede der mittleren Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert zwischen den Klassen während Situationen mit Wärmebelastung und Kältestress, wenn das 2-Tagesmittel zur Schwellenwertüberschreitung herangezogen wird (Abb. A 3, S.195).

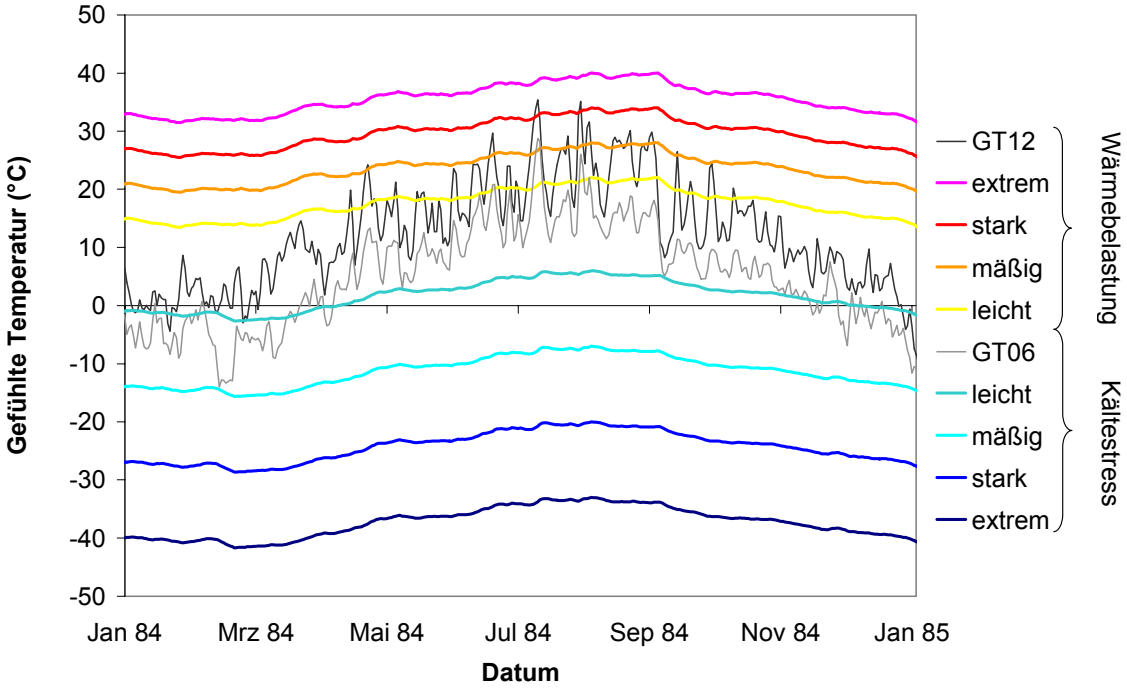


Abb. 5.6: Verlauf der Schwellenwerte für die thermischen Belastungsstufen (Baden-Württemberg, 1984). *GT12: Gefühlte Temperatur um 12 UTC; GT06: Gefühlte Temperatur um 06 UTC*

Um jedem Tag genau eine Belastungsstufe zuzuordnen, werden die Stufen, welche sich durch Überschreitung der Schwellen für den aKb_O und durch Unterschreitung für den aKb_U ergeben, addiert. Es kommt selten vor, dass am selben Tag sowohl aKb_U unter- also auch aKb_O überschritten wird. Meist werden dann nur „*leichter Kältestress*“ und „*leichte Wärmebelastung*“ festgestellt, so dass sich die Belastungsstufen zu 0 addieren. Da die gesundheitliche Relevanz dieser Tage gering ist, entstehen dadurch für die Bewertung von Situationen mit mindestens mäßiger thermischer Belastung keine Nachteile.

5.1.3 Fazit

Soll eine thermophysiologisch relevante Bewertung der Umwelt erfolgen, muss neben den den Wärmeaustausch bestimmenden Parametern auch die kurzfristige Anpassung berücksichtigt werden, da sie die Wirkung der thermischen Belastung auf den Menschen nachhaltig beeinflusst. In den bisher existierenden Bewertungsverfahren fand die kurzfristige Anpassung jedoch keine Berücksichtigung.

Daraus ergibt sich der Bedarf eine Methode zu entwickeln, die eine Integration der kurzfristigen Anpassung in ein thermophysiologisch relevantes Bewertungsverfahren ermöglicht. Dies wurde durch Kombination eines relativen, auf einem konzeptionellen Modell über die kurzfristige Anpassung beruhenden und eines absoluten Teils, welcher sich auf die Bewertungsstufen nach ASHRAE (1997) und VDI (1998) stützt, erreicht.

Das neu entwickelte Verfahren **HeRATE** (**He**alth **R**elated **A**ssessment of the **T**hermal **E**nvironment) hat den Vorteil, dass es für vergleichende Bewertungen der thermischen Umwelt in verschiedenen Regionen eingesetzt werden kann, ohne dass eine Kalibrierung anhand von Mortalitätsdaten notwendig wird. Durch die Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung ist es zudem möglich, das Verfahren auf lange, nicht stationäre Zeitreihen oder auf Klimaänderungssimulationen anzuwenden. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von **HeRATE** liegt in dessen Eignung als Belastungsindikator für Hitzewarnsysteme.

Als Bestandteil des Klima-Michel-Modells KMM geht die Anpassung der Bekleidung sowohl in den variablen Teil als auch in den konstanten Anteil ein. Das KMM geht jedoch davon aus, dass der Mensch seine Bekleidung sofort an die thermische Umwelt anpasst. Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen der getragenen Kleidung und der Außentemperatur der Vortage (Morgan und de Dear, 2003) deuten jedoch darauf hin, dass dies nicht immer der Fall ist, sondern dass auch die Erinnerung an das thermische Empfinden der Vortage eine Rolle spielt. Daher wurde die verhaltensgesteuerte Thermoregulation in das konzeptionelle Modell zur Beschreibung der kurzfristigen Anpassung an die aktuelle Witterung integriert.

Das konzeptionelle Modell beruht auf der Annahme, dass der Einfluss der vergangenen Tage näherungsweise mit einer halben Gaußfunktion gewichtet werden kann. Es wären jedoch theoretisch auch andere Glättungsfunktionen denkbar. Daher wurden lineare und exponentielle Filterfunktionen mit entsprechenden Längen getestet. Die Unterschiede zwischen dem jeweils besten linearen und exponentiellen Modell im Vergleich zum Gaußfilter waren nicht signifikant. Bei der Verwendung des Gaußfilters zeigten sich allerdings bei „*starker*“ und „*mäßiger Wärmebelastung*“ etwas höhere Auswirkungen auf die Mortalität als bei den anderen Filterfunktionen.

Es wäre wünschenswert, die kurzfristige Anpassung anstatt auf Basis eines sehr einfachen konzeptionellen Modells basierend auf einem empirischen oder deterministischen Modell zu berücksichtigen. Aufgrund der Schwächen der existierenden Studien über die physiologischen Veränderungen (geringe Probandenzahl; unterschiedliche Expositionsmuster) war es im Rahmen dieser Untersuchung jedoch nicht möglich, den kurzfristigen Akklimatisati-

onsprozess quantitativ genauer zu beschreiben oder auf ein deterministisches Modell zu stützen.

Die hier einfließenden Erkenntnisse beruhen alle auf Studien über die Akklimatisation an warme Bedingungen und werden ohne weitere Modifikation auch für Kältebelastung verwendet. Daher muss bei der Bewertung von Kältestress mit größeren Fehlern gerechnet werden als bei der Bewertung der Wärmebelastung. Diese Ungenauigkeiten dürften jedoch aufgrund der besseren Berücksichtigung der kurzfristigen verhaltensgesteuerten Anpassung wesentlich geringer sein, als die Fehler, welche bei alleiniger Berücksichtigung der absoluten Schwelle gemacht werden.

Trotz dieser „*Schwächen*“ stellt die neue Methodik einen Fortschritt bei der Bewertung der thermischen Umwelt dar. Bisher fand die kurzfristige Anpassung an die Witterung vor Ort keine Berücksichtigung bei der Bewertung der thermischen Umwelt. Durch **HeRATE** ist es jetzt jedoch möglich geworden, ein einheitliches Verfahren flächendeckend und über längere Zeiträume hinweg anzuwenden. Zudem besteht die Möglichkeit, auf Basis von **HeRATE** den Begriff „*Hitzewelle*“ einheitlich zu definieren. Als Hitzewellendefinition könnte beispielsweise die Überschreitung der Schwelle zur „*starken Wärmebelastung*“ herangezogen werden. Eine weitere Möglichkeit wäre, die Überschreitung einer bestimmten Schwelle zusätzlich an eine Mindestandauer zu koppeln.

5.2 Abschätzung der „erwarteten“ Mortalität

Eine Untersuchung der Auswirkungen von besonderen Ereignissen wie beispielsweise Hitzewellen oder Kältewellen auf die Mortalität erfordert den Vergleich des für die entsprechende Periode „*gemessene*“ Wertes mit dem „*erwarteten*“ Wert. Hitzebedingte (kältebedingte) Mortalität wird als die Anzahl der Sterbefälle definiert, welche im Falle des Ausbleibens der Wärmebelastung (des Kältestresses) nicht aufgetreten wären (McMicheal et al., 1996). Dies entspricht einer Aufteilung der Mortalitätszeitreihe in zwei Komponenten: dem Erwartungswert und der Streuung um diesen. Praktisch ist der Erwartungswert der Mortalität jedoch nicht bestimmbar, da sich der Wettereinfluss nie ganz herausrechnen lässt. Daher ist es erforderlich, den Erwartungswert basierend auf Näherungsverfahren abzuschätzen.

Die Mortalitätsdaten enthalten in der Regel einen Jahresgang mit einem Minimum im Sommer und einem Maximum im Winter (Sakamoto-Momiyama, 1977; Laschewski und Jendritzky, 2002). Würde der Zeitreihenmittelwert als Erwartungswert herangezogen, ergäben sich im Sommer aufgrund des Jahresganges meist Sterbefallzahlen unter dem Erwartungswert und im Winter darüber. Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, wäre die Bildung separater Mittelwerte für Sommer- und Winterhalbjahr. Diese Lösung ist problematisch, da eine Festlegung von Sommer- und Winterhalbjahr willkürlich ist, zudem ändert sich die Mortalität kontinuierlich und weist daher innerhalb einer Jahreszeit Unterschiede auf. Darüber hinaus ist es erforderlich, langfristige Trends zu berücksichtigen. In Baden-Württemberg sank beispielsweise die mittlere jährliche Mortalitätsrate von ungefähr 2,9 Sterbefällen pro 100.000 Einwohner Anfang der 70er-Jahre auf rund 2,5 am Anfang des 21. Jahrhunderts. Diese Absenkung der Mortalitätsrate um etwa 15% verlief nicht kontinuierlich. Die Verwendung von Mittelwerten zur Erwartungswertbestimmung ist trotz ihrer offensichtlichen Mängel weit verbreitet (Kapitel 3.3.1).

Beim Vergleich der Zahl der Todesfälle während der Hitzewelle im August 2003 in Baden-Württemberg mit der mittleren Zahl der Todesfälle im August der Jahre 1998-2002, 1999-2002, 2000-2002 und 1998-2001 wird deutlich, dass die Zahl der „*Hitzetoten*“ bei der Verwendung von Monatsmittelwerten vorangegangener Jahre als Erwartungswert von der Bezugsperiode abhängt (Tab. 5.2). Sie fällt für den Vergleichszeitraum 1999-2002 am höchsten und für die Periode 1998-2001 am niedrigsten aus. Diese Art der Bestimmung des Erwartungswertes hat zudem den Nachteil, dass die Mortalitätsdaten häufig nicht auf die Einwohnerzahl standardisiert werden. So ist ein Teil der Übersterblichkeit auf eine

Zunahme der Bevölkerungszahl um ungefähr 270.000 zurückzuführen. Die um die Bevölkerungszunahme korrigierte Übersterblichkeit fällt daher um rund 100 Sterbefälle niedriger aus.

Tab. 5.2: **Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle in Baden-Württemberg als Differenz zwischen der Summe der Todesfälle im August 2003 und der mittleren Summe der Todesfälle der Vergleichsperioden**

Vergleichsperiode	hitzebedingte Sterbefälle	
	unbereinigt[1]	bereinigt[2]
1998 – 2002	1390	1269
1999 – 2002	1412	1309
2000 – 2002	1365	1282
1998 – 2001	1345	1202

[1] *unbereinigt: Bevölkerungsschwankungen wurden ignoriert*
[2] *bereinigt: Werte wurden auf Bevölkerungszahl standardisiert*

Da die bisher existierenden Verfahren zur Abschätzung der erwarteten Mortalität unbefriedigend sind, wurden verschiedene Ansätze zur Ermittlung des Erwartungswertes entwickelt und getestet. Diese Verfahren werden in den folgenden Abschnitten am Beispiel der Mortalitätsdaten aus Baden-Württemberg vorgestellt.

5.2.1 Mittlerer Jahresgang als Erwartungswert

Es besteht die Möglichkeit, den Erwartungswert basierend auf dem mittleren Jahresgang zu berechnen, der durch die Mittelung der einzelnen Julianischen Tage einer längeren Zeitreihe bestimmt wird (Vantorren et al., 2003). Um diese Methode sinnvoll anwenden zu können und um stabile Schätzungen für den Erwartungswert zu erhalten, sollte die Mortalitätszeitreihe ausreichend lang sein. Zudem müssen die Mortalitätsdaten als Mortalitätsraten vorliegen, damit Trends in der Bevölkerungsentwicklung die Schätzung des Erwartungswertes nicht beeinflussen. Hierfür ist wiederum eine Kenntnis der Populationsgröße und -entwicklung erforderlich. Zusätzlich ist eine Trendbereinigung der Daten notwendig.

Obwohl zur Berechnung des mittleren Jahresganges der Mortalitätsrate in Baden-Württemberg eine für Mortalitätsdaten relative lange Zeitreihe (01.01.1968 bis 30.09.2003) zur Verfügung steht, schwanken die Mittelwerte von Tag zu Tag deutlich (Abb. 5.7). Dies macht eine weitere Glättung der Daten erforderlich.

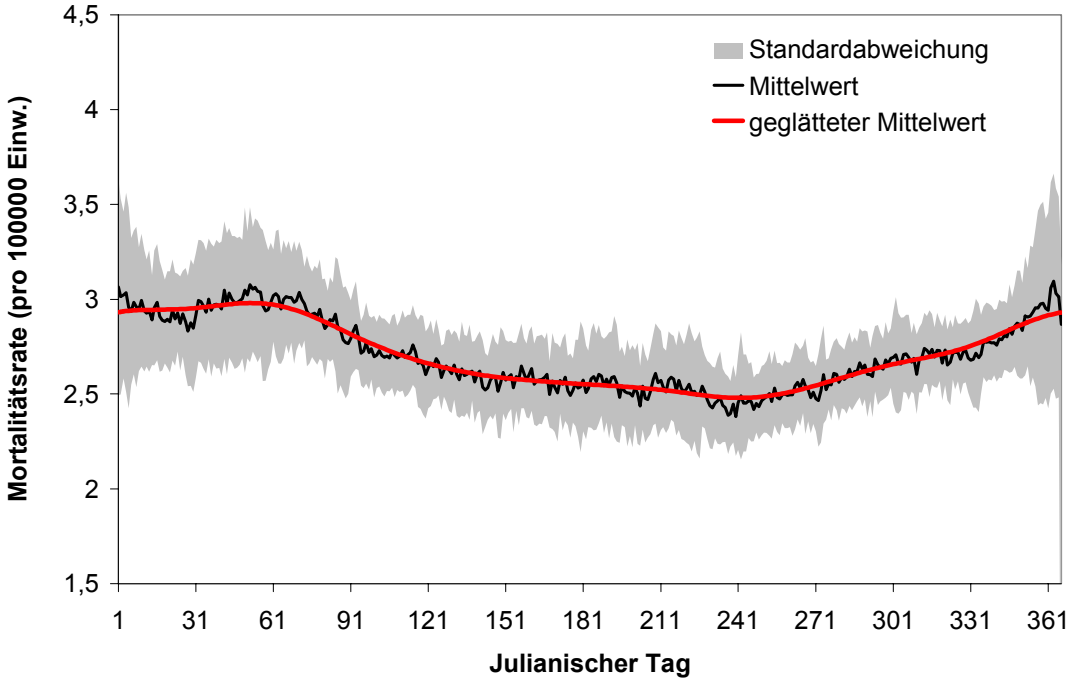


Abb. 5.7: **Mittlerer Jahresgang der Mortalitätsrate durch Mittelung der Julianischen Tage (Baden-Württemberg, 1968-2003)**

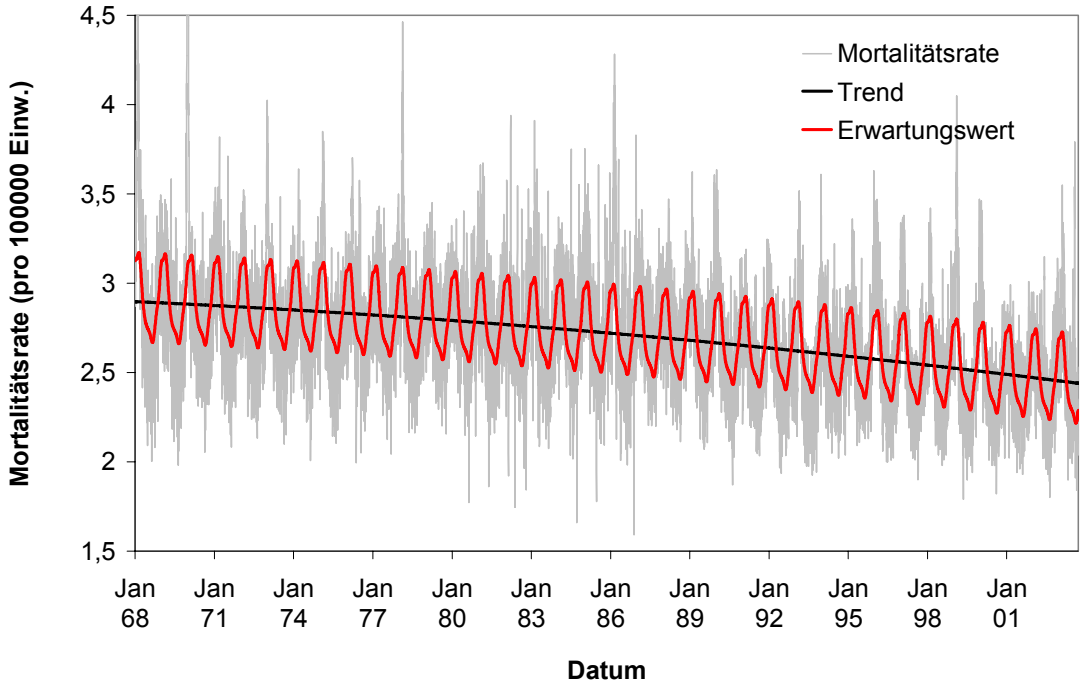


Abb. 5.8: Trendbereinigter Erwartungswert basierend auf dem geglätteten mittlerem Jahresgang (Baden-Württemberg, 1968-2003)

Wird eine Trendkomponente (hier quadratischer Trend der Form: $y = 2{,}897 - 0{,}00002x - 0{,}000000001x^2$) berücksichtigt, ergeben sich die in Abb. 5.8 dargestellten Erwartungswerte für die Mortalitätsrate für Baden-Württemberg.

5.2.2 Berechnung des Erwartungswertes mittels Filterfunktionen

5.2.2.1 ALLGEMEINES

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung des Erwartungswertes einer Zeitreihe bietet der Einsatz eines Tiefpassfilters. Die Tiefpassfilterung ist wesentlich effektiver als eine übergreifende Mittelung und sollte dieser daher stets vorgezogen werden (Schönwiese, 1992). Dieses Verfahren hat die Vorteile, dass es auf Zeitreihen von wenigen Jahren angewendet werden kann, dass eine Trendbereinigung sowie eine Kenntnis der Populationsgröße nicht notwendig sind und dass die Lage der Mortalitätsminima und -maxima flexibel ist.

Laschewski und Jendritzky (2002) verwendeten beispielsweise ein gaußsches Tiefpassfilter mit der Länge 101 Tage. Die Bestimmung des Erwartungswertes mittels eines Tiefpassfilters von 101 Tagen ist allerdings immer noch mit dem Problem behaftet, dass er selbst von Episoden mit Übersterblichkeit beeinflusst ist. Daher ist es notwendig Filter mit größeren Längen zu verwenden.

In der hier vorliegenden Studie wurden daher gaußsche Tiefpassfilter verschiedener Länge getestet. Die Berechnung der Filtergewichte erfolgt analog zu der in Kapitel 5.1.2.2 beschriebenen Methodik. Im Unterschied zur Berechnung der Filtergewichte der Gefühlten Temperatur werden hier jedoch beidseitige Filterfunktionen verwendet.

Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die resultierenden Tiefpassfilter in dem Sinn niemals ideal sind, dass sie einerseits alle Spektralkomponenten der Zeitreihe oberhalb einer gewissen Frequenz völlig unterdrücken und andererseits alle tiefen Frequenzen ungedämpft durchlassen würden. Dies führt dazu, dass sich die interessierende langsame Variation des Erwartungswertes nur mangelhaft von einem hochfrequenten Rauschen differenzieren lässt. Der Grund hierfür ist, dass sowohl noch ein Restbetrag des Rauschens vorhanden als auch das Spektrum der interessierenden langsamen Variation schon in gewissem Maße verändert ist. Wenn sich das Spektrum des Rauschens mit dem Spektrum des Tiefpassfilters überlappt, dann kann in diesem Überlappungsbereich das Tiefpassfilter überhaupt keine Trennung des Signals vom Rauschen erreichen (Taubenheim, 1969).

Bei einer Filterung der Mortalitätsdaten macht sich diese Tatsache folgendermaßen bemerkbar: werden lange Filterlängen (183-365 Tage) benutzt, ist der ermittelte Jahresgang des Erwartungswertes nur sehr schwach ausgeprägt, d.h. die Amplitude ist stark gedämpft und es kommt zu ähnlichen Problemen wie bei Verwendung von Jahresmittelwerten, d.h. zur Unterschätzung des Erwartungswertes im Winter und zur Überschätzung des Erwartungswertes im Sommer. Wählt man eine kürzere Filterlänge, z.B. 101 Tage, dann ist die Amplitude des Jahresganges zwar stärker ausgeprägt, aber das Filter reagiert auch auf Mortalitätsepisoden wie beispielsweise Grippewellen oder ausgeprägte Hitzewellen mit entsprechenden Anstiegen. Die Anstiege der Werte der Filterfunktion führen während solcher Mortalitätsepisoden zu einem zu hohen Erwartungswert und somit zu einer Unterschätzung der Übersterblichkeit.

5.2.2.2 ELIMINATION VON EPISODEN

Eine Möglichkeit dieses Problem zumindest teilweise zu umgehen, besteht in der Entfernung der Episoden vor der Filterung. Die Zeitreihe wird hierbei in drei Komponenten zerlegt: 1. Jahresgang (=Erwartungswert, EW); 2. Episoden (E_{rein}) und 3. Reststreuung (S_R). Sinn dieser Vorgehensweise ist, über eine Variation der Filterlänge die Amplitude an die Rohdaten anzupassen, jedoch gleichzeitig durch eine Elimination der Episoden zu vermeiden, dass der Erwartungswert von diesen beeinflusst wird. Das Verfahren besteht aus folgenden Schritten:

1. Die Rohdaten der Mortalitätsrate (MR_{roh}) werden mit einem Gaußfilter der Länge 365 Tage (F365) gefiltert. Die sich ergebenden Werte dieser Filterfunktion sind weitgehend unbeeinflusst von Mortalitätsepisoden, haben jedoch in der Regel eine zu flache Amplitude (Abb. 5.9).

2. Auf die Rohdaten wird ein kurzes Filter mit einer Länge von 25 Tagen (F25) angewandt**.** Dieses Filter hebt die Mortalitätsepisoden hervor, die sich normalerweise in einer zeitlichen Rahmen von 1-4 Wochen abspielen, beinhaltet jedoch einen Jahresgang (Abb. 5.9).

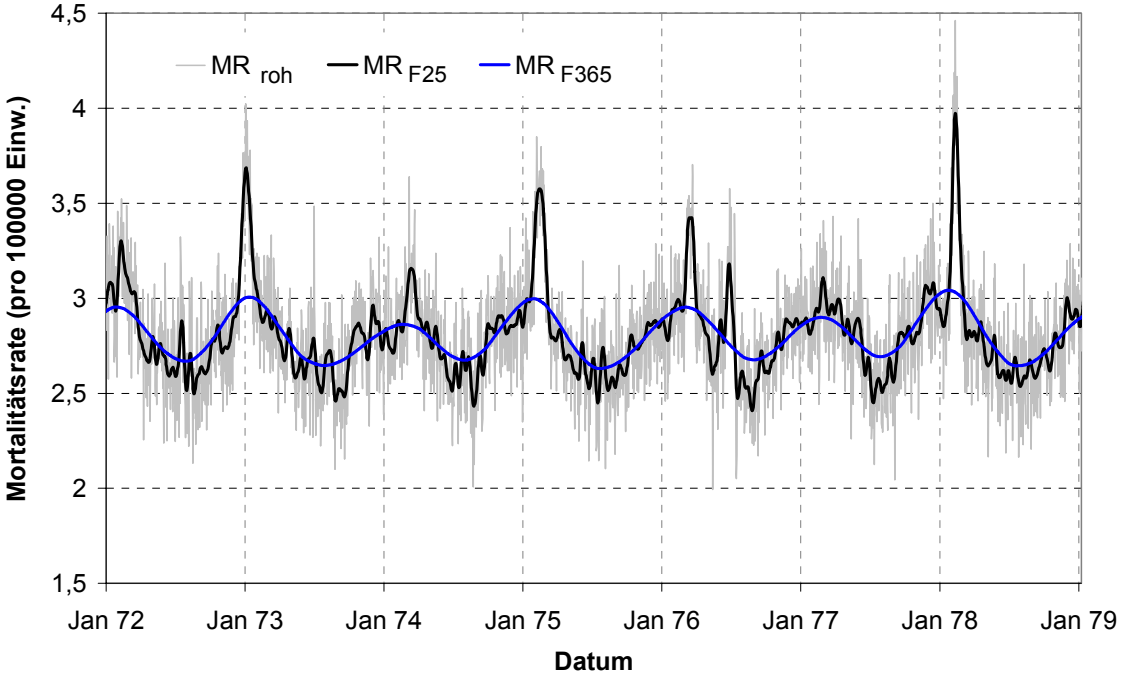


Abb. 5.9: **Bestimmung der Mortalitätsepisoden (Baden-Württemberg).** *MR_{F25}: mit 25-Tage Gaußfilter (Mortalitätsepisoden) gefilterte Mortalitätsrate; MR_{F365}: mit 365-Tage Gaußfilter (Jahresgang) gefilterte Mortalitätsrate*

3. Der Jahresgang wird eliminiert, indem der mittels des 365-Tage Filters ermittelte Jahresgang der Mortalitätsrate (MR_{F365}) von den mit F25 gefilterten Mortalitätsraten (MR_{F25}) abgezogen wird. Dieser Schritt führt zu den so genannten Rohepisoden (E_{roh}). Diese enthalten in der Regel immer noch einen leichten Jahresgang, da der mittels F365 bestimmte Jahresgang meist zu flach ist (siehe oben).

$$\mathbf{E_{roh} = MR_{F25} - MR_{F365}} \qquad \textbf{Gl. 5.4}$$

4. Die Werte der Rohepisoden, welche das 1,645-fache der Standardabweichung über- bzw. unterschreiten (bei einer Normalverteilung sind das insgesamt 10% der Werte), werden durch die negative Standardabweichung im Sommer und durch die positive Standardabweichung im Winter ersetzt. „Sommer“ und „Winter“ werden hier basierend auf MR_{F365} bestimmt. Unterschreitet diese den Jahresmittelwert, dann wird der Wert dem Sommer zugeordnet und überschreiten sie den Jahresmittelwert, dann entsprechend dem Winterhalbjahr. Die derart bereinigten Episoden (E_{roh}*) beinhalten nur noch Werte innerhalb der 1,645-fachen Standardabweichung (Abb. 5.10).

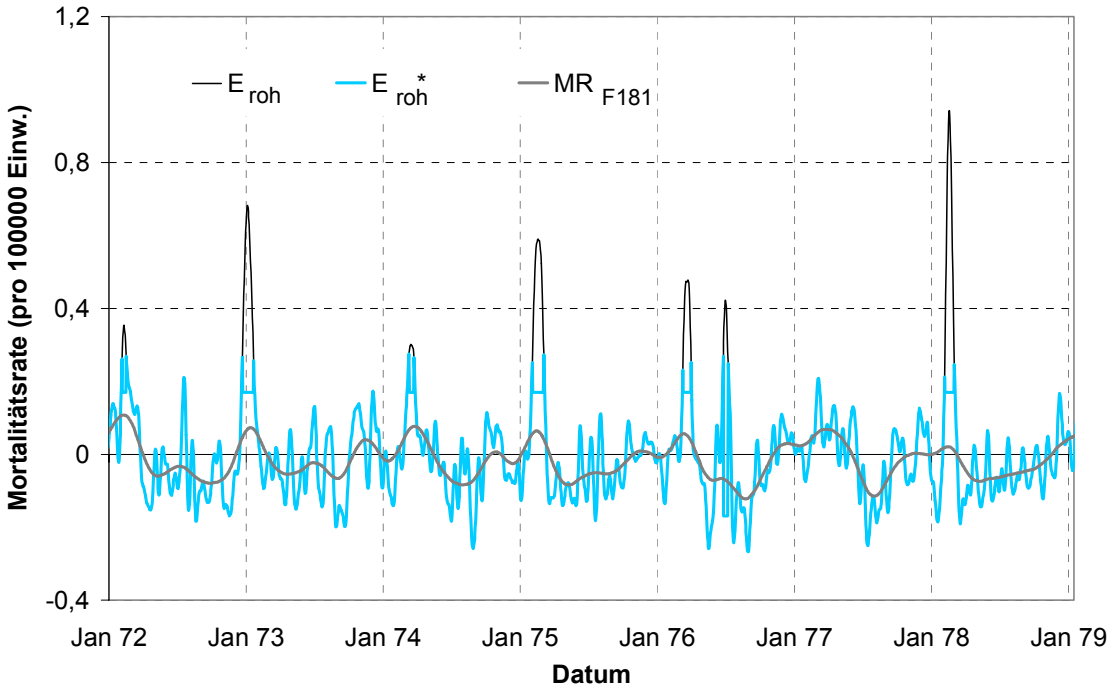


Abb. 5.10: **Bereinigung der Rohepisoden (E_{roh}) und Bestimmung des Jahresganges (MR_{F181}) der bereinigten Rohepisoden (E_{roh}*)**

5. Mittels eines Tiefpassfilters der Länge 181 (F181) wird anschließend der in E_{roh}* immer noch vorhandene Jahresgang ermittelt (Abb. 5.10).

6. Die Reinepisoden (E_{rein}) ergeben sich daraus mit (Abb. 5.11):

$$\mathbf{E_{rein} = E_{roh} - MR_{F181}} \qquad \textbf{Gl. 5.5}$$

7. Durch Subtraktion der Reinepisoden von den Rohdaten (MR_{roh}) erhält man eine Komponente die sowohl den Jahresgang (EW) als auch die Reststreuung (S_R) beinhaltet.

$$\mathbf{MR_{roh} - E_{rein} = EW + S_R} \qquad \textbf{Gl. 5.6}$$

8. Der Jahresgang lässt sich über eine weitere Tiefpassfilterung, welche diesmal eine Länge von 81 Tagen (F81) hat, von der Reststreuung trennen (Abb. 5.11). Die Filterlänge zur Ermittlung des Jahresganges spielt an dieser Stelle keine große Rolle mehr, sofern sie sich im Rahmen von 25 bis 181 Tagen bewegt, da diese Frequenzen bereits herausgefiltert wurden. Hier wurde eine Filterlänge gewählt, die knapp einem viertel Jahr entspricht. Der mittels des 81-Tage Filters ermittelte Jahresgang wird als Schätzer für den Erwartungswert der Mortalität benutzt.

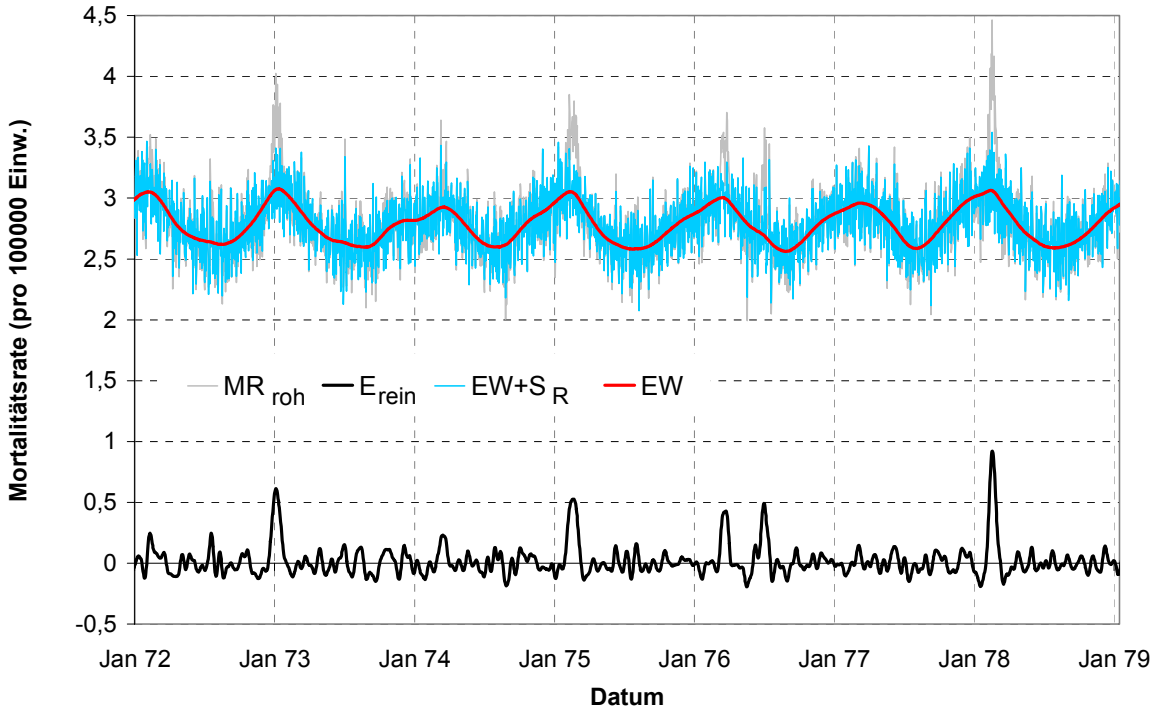


Abb. 5.11: **Zeitreihe zerlegt in Reinepisoden (E_{rein}), Erwartungswert (EW) und Reststreuung + Erwartungswert (EW+S_R).** *MR_{roh}: Mortalitätsrate*

Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der Bestimmung des Erwartungswertes auf Basis des mittleren Jahresganges besteht darin, dass der Erwartungswert auf den „aktuellen" Daten beruht. Somit ist eine Trendbereinigung nicht nötig und der Erwartungswert passt sich flexibler an die aktuellen Gegebenheiten (Lage der Minima und Maxima) an. Zudem ermöglicht die oben beschriebene Vorgehensweise eine Zerlegung der Zeitreihe in unterschiedliche Komponenten (Jahresgang, Episoden und Reststreuung). Problematisch ist bei diesem Verfahren, dass die Wahl der Filterlängen willkürlich erfolgt.

5.2.2.3 RESTAURATIONSVERFAHREN

Die Maxima und Minima einer Funktion werden durch die Glättungsoperation bei der Filterung mit langen Filterlängen „*abgeschliffen*". Dies wird beispielsweise in Abbildung 5.9 (S.81) beim Jahresgang der Mortalität deutlich, der basierend auf dem 365-Tage Filter ermittelt wurde. Diese Funktion scheint zu „*flach*" zu sein, d.h. die Minima erscheinen zu hoch und die Maxima zu gering. Daraus folgt der Wunsch, die interessierende langsame Variation von dieser Verformung zu befreien, d.h. sie in ihrer unverzerrten Form wiederherzustellen. Eine derartige als Restauration bezeichnete Operation hat das Ziel, die

Durchlasscharakteristik im Frequenzbereich des interessierenden Signals so nahe wie möglich an den (reellen) Wert 1 heranzubringen. Es handelt sich somit um eine Korrektur der Tiefpassfilterung im interessierenden Frequenzbereich, mit der die Nachteile der gewählten Glättungsoperation ausgeglichen werden (Taubenheim, 1969).

Ist die interessierende Variation in erster Näherung eine sinusförmige Variation einer bestimmten Frequenz, lässt sich diese wiederherstellen, indem man die ganze gefilterte Zeitfunktion mit einem Faktor multipliziert (Taubenheim, 1969). Dies ist für den Jahresgang der Mortalitätsdaten annähernd erfüllt (z.B. Gemmell et al., 2000; Diaz et al., 2002).

Auch hier ist ein mehrstufiges Vorgehen nötig:

- Der erste Schritt besteht in der Bestimmung des mittleren Jahresganges basierend auf einem 365-Tage Gaußfilter. Der zu flache Jahresgang wird mit einem Faktor multipliziert, der dies ausgleichen soll. Damit diese Multiplikation so durchgeführt werden kann, dass sowohl die Minima reduziert als auch die Maxima erhöht werden, muss das 365-Tage Gaußfilter derart verschoben werden, dass es um Null schwankt. Dies geschieht durch Abzug des arithmetischen Mittels über 365 Tage (je 182 Tage vorher und nachher) vom jeweiligen Wert. Dieses Vorgehen hat gegenüber dem Abzug des Zeitreihenmittelwertes den Vorteil, dass es unabhängig von Trends in der Mortalitätsrate und der Bevölkerungsentwicklung ist und somit wie das oben beschriebene Filterverfahren auf einem Minimum an Zusatzinformationen beruht (Abb. 5.12).

- In einem zweiten Schritt wird der Korrekturfaktor, mit dem diese Zeitreihe multipliziert werden soll, bestimmt. Durch eine Minimierung der Summe der quadratischen Abweichungen der Rohdaten vom Erwartungswert (Methode der kleinsten Quadrate) ergibt sich für die Zeitreihe der Gesamtmortalität vom 01.01.1968 bis zum 30.09.2003 in Baden-Württemberg ein Korrekturfaktor von 1,98.

  Die Multiplikation mit dem Korrekturfaktor (1,98) erzeugt eine stärkere Amplitude des Jahresgangs, welcher sich dann besser den Rohdaten anpasst als die gefilterte Funktion (MR_{F365}) (Abb. 5.12). Er ist gleichzeitig von Schwankungen mit höheren Frequenzen als 1 Jahr unbeeinflusst.

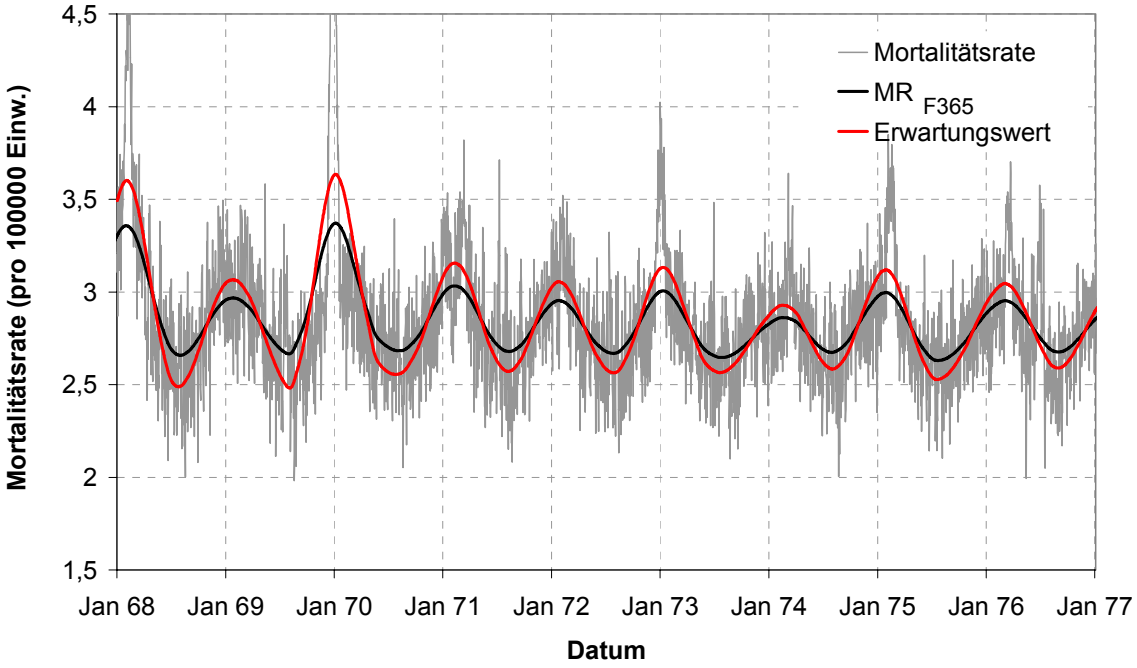


Abb. 5.12: **Restaurationsverfahren basierend auf Rohdaten (Baden-Württemberg, 1968-1977).** *MR_{F365}: mit dem 365-Tage Gaußfilter gefilterte Mortalitätsrate*

Die so ermittelte Zeitreihe ergibt jedoch dann keinen sinnvollen Erwartungswert, wenn die Filterfunktion selbst schon zu stark von einzelnen „*Mortalitätsepisoden*“ beeinflusst ist. Dies ist unter anderem bei der Grippewelle im Winter 1969/1970 zu erkennen (Abb. 5.12). Daher müssen, wie auch im vorherigen Kapitel beschrieben, diese Episoden entfernt werden. Da das 365-Tage Gaußfilter jedoch relativ unempfindlich gegenüber nicht allzu stark ausgeprägten Episoden ist, kann hier eine einfachere Methodik zur Entfernung dieser Werte angewendet werden. Rohdaten, die um das zweifache der Standardabweichung vom zentrierten gleitenden Jahresmittelwert (182 Tage vorher und nachher) abweichen, werden durch den Jahresmittelwert ersetzt. Anschließend wird wie oben beschrieben verfahren. Auch hier ergibt sich für die Mortalitätsdaten von Baden-Württemberg ein Korrekturfaktor von 1,98 (Abb. 5.13).

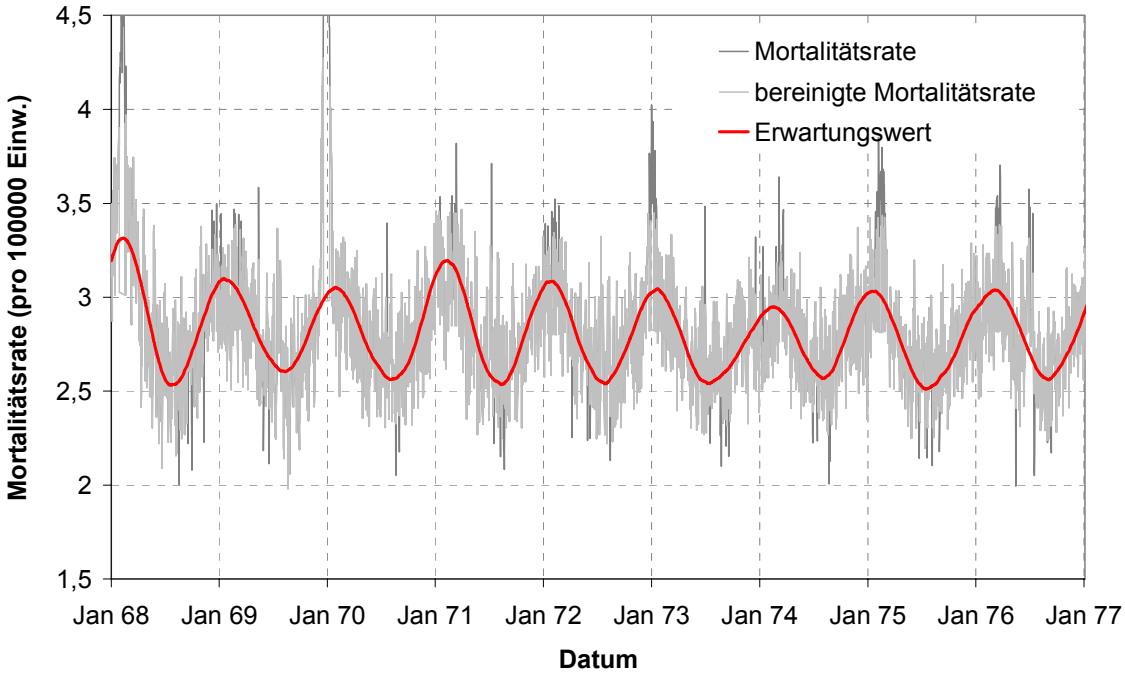


Abb. 5.13: **Erwartungswerte basierend auf bereinigter Mortalitätsrate mittels Restaurationsverfahren (Baden-Württemberg, 1968-1977)**

Damit der Erwartungswert auch für den Anfang und das Ende der vorhandenen Mortalitätszeitreihen bestimmt werden kann, muss für die 182 Tage vorher und nachher eine künstliche Zeitreihe erzeugt werden. Für die zu simulierenden Daten vor Beginn der vorhandenen Zeitreihe wird die künstliche Zeitreihe aus den mittleren Tageswerten der entsprechenden Periode der ersten fünf vorhandenen Jahre erzeugt. Entsprechend wird die künstliche Zeitreihe am Ende durch die Mittelung der Tageswerte der letzten fünf Jahre ermittelt. Da dieser 5-Jahres Mittelwert nur über maximal die Hälfte der Filtergewichte mit in den Erwartungswert am Anfang und Ende der Zeitreihe einfließt, ist der Fehler, welcher hierdurch gemacht wird, relativ gering (Abb. 5.14).

Theoretisch müssten die Erwartungswerte über einen längeren Zeitraum betrachtet die gleichen Mittelwerte aufweisen, wie die bereinigten Mortalitätsdaten. Praktisch liegen die Mittelwerte der Erwartungswerte, jedoch etwas unter diesen. Für den Zeitraum 1968-2003 betrug der Mittelwert der bereinigten Mortalitätsraten 2,689 pro 100.000 Einwohner. Der Mittelwert des Erwartungswertes betrug im gleichen Zeitraum 2,684. Die Differenz dürfte auf Rundungsfehler zurückzuführen sein.

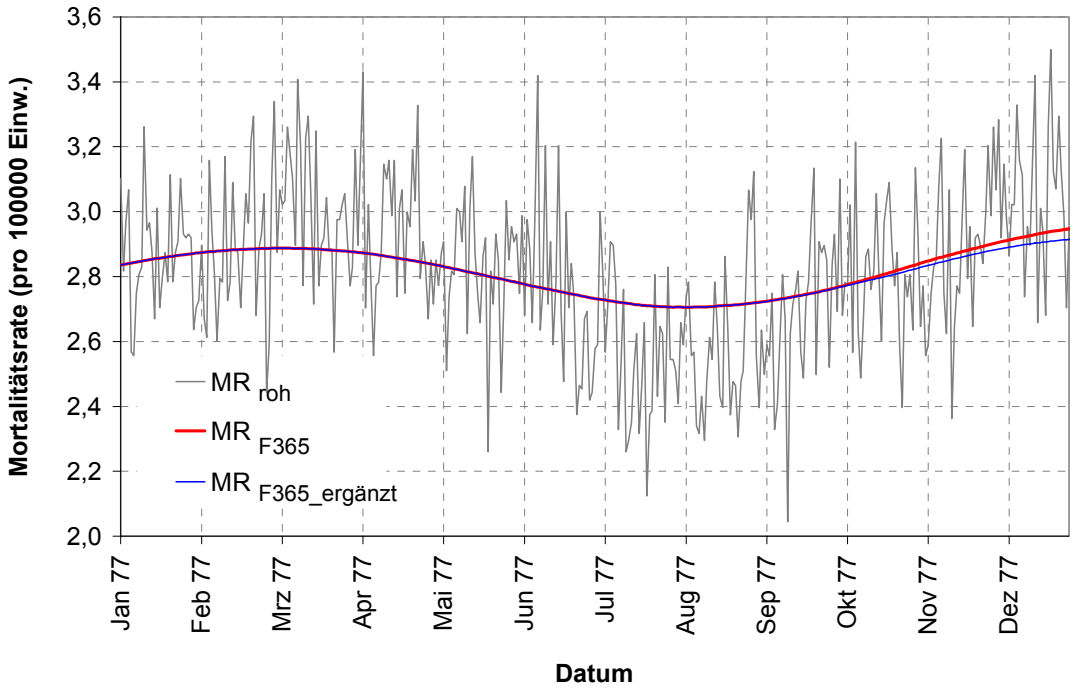


Abb. 5.14: Vergleich der Werte der Filterfunktion für die Original-Mortalitätsraten (MR_{F365}) mit den auf Basis des 5-Jahres Mittelwertes der letzten 5 vorhandenen Jahre berechneten Werten der Filterfunktion ($MRF_{365_ergänzt}$) (Baden-Württemberg, 1977). *MR_{roh}: Mortalitätsrate*

5.2.3 Vergleich der verschiedenen Verfahren

Der Erwartungswert, der auf dem mittleren Jahresgang der Zeitreihe beruht (EW_Mittel), unterscheidet sich am deutlichsten von den übrigen und liegt im Winter meist über den anderen Werten. Dadurch, dass er auf der Mittelung der gesamten vorhandenen Zeitreihe basiert, liegen seine Jahresmaxima und Jahresminima immer am selben Tag des Jahres. Die Ergebnisse der übrigen drei Verfahren unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander (Abb. 5.15). Dabei fällt auf, dass das Verfahren, welches auf der Elimination der Episoden beruht (EW_Epis), weiterhin leicht von derartigen Episoden beeinflusst ist (z.B. im Sommer 1976 oder im Winter 1976). Gleiches gilt auch für den Erwartungswert, welcher basierend auf den Rohdaten mittels des Restaurationsverfahrens berechnet wurde (EW_Rest_{roh}). Dieser wird vor allem von extremen winterlichen Mortalitätsereignissen mit längerer Andauer beeinflusst (z.B. im Winter 1978).

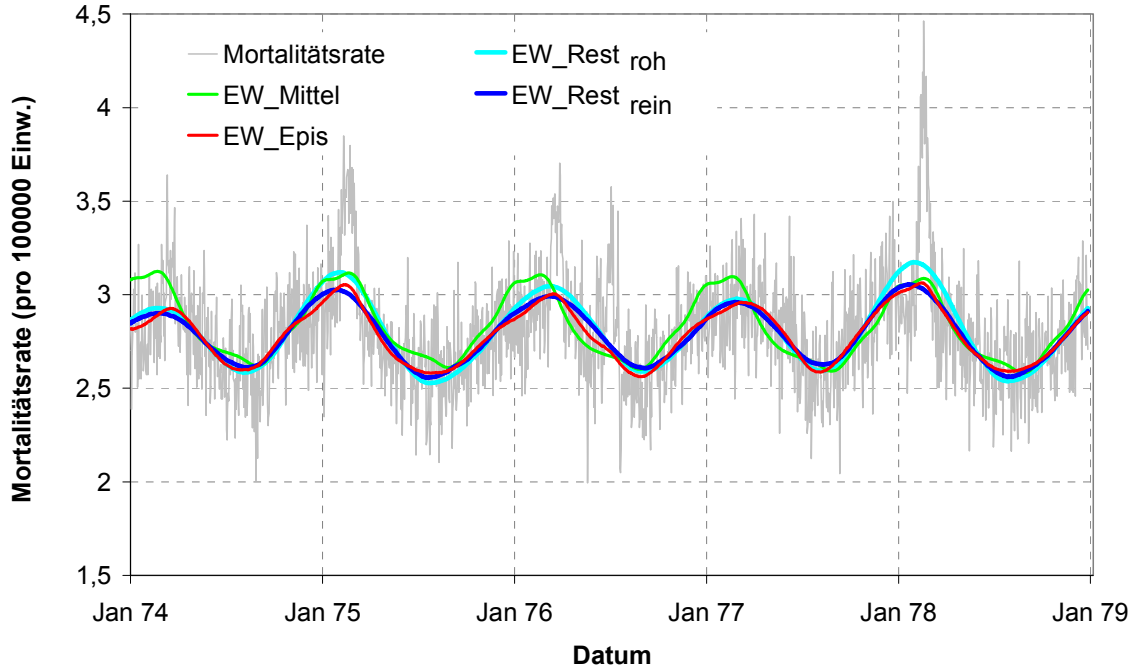


Abb. 5.15: **Vergleich der verschiedenen Verfahren zur Ermittlung des Erwartungswertes**. *EW_Mittel: Erwartungswert (EW) basierend auf mittlerem Jahresgang; EW_Epis: EW basierend auf Elimination von Episoden; EW_Rest$_{roh}$: EW basierend auf Restauration der Rohdaten; EW_Rest$_{rein}$: EW basierend auf Restauration der bereinigten Werte*

Ein Vergleich der Abweichungen der Mortalitätsraten vom Erwartungswert während verschiedener Stufen thermischer Belastung zeigt (Abb. 5.16), dass sich die Ansätze für Erwartungswertbestimmung bei Wärmebelastung nicht signifikant voneinander unterscheiden. Einen signifikanten Unterschied gibt es lediglich bei „*leichtem Kältestress*“. Hier unterscheiden sich die beiden Ansätze, die mit einer Elimination von Extremereignissen arbeiten (EW_Epis und EW_Rest$_{rein}$), von denen, bei welchen derartige Extremereignisse den Erwartungswert beeinflussen, insofern, dass sie bei „*leichtem Kältestress*“ signifikant höhere Abweichungen der Mortalitätsrate vom Erwartungswert ermitteln.

Insgesamt passt sich der auf Basis der bereinigten Mortalitätsdaten mittels des Restaurationsverfahrens ermittelte Erwartungswert am besten an die Rohdaten der Mortalität an und wird daher bevorzugt. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Filterlänge von 365 Tagen mit dem Jahresgang begründet ist. Im Gegensatz zum Erwartungswert, welcher auf dem mittleren Jahresgang beruht, kann es auch auf Zeitreihen von wenigen Jahren angewendet werden, die zusätzlich weder die Bedingung der Stationarität erfüllen müssen, noch muss die Mortalitätsrate bekannt oder errechenbar sein.

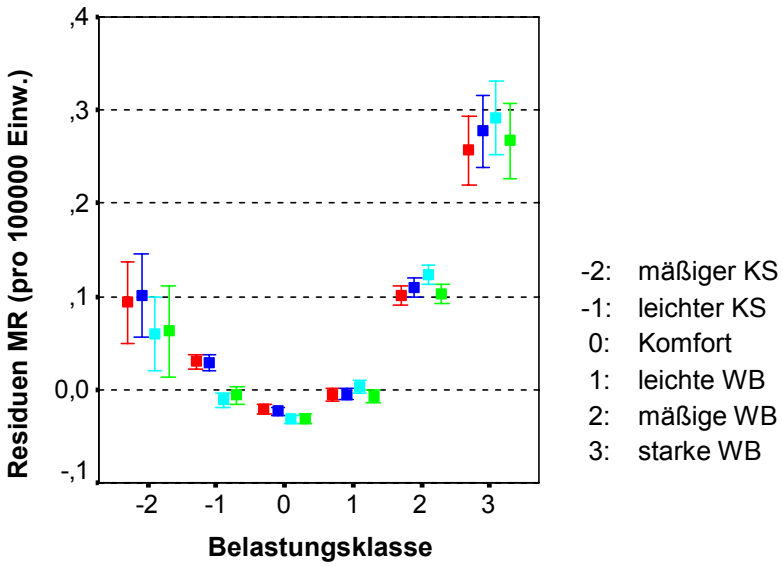


Abb. 5.16: Mittelwert der Residuen der Mortalitätsrate (MR) für unterschiedliche Klassen thermischer Belastung (Baden-Württemberg, 1968-2003). *KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung; Rot: Erwartungswert (EW) basierend auf Elimination von Episoden; Dunkelblau: EW basierend auf Restauration der bereinigten Werte; Hellblau: EW basierend auf Restauration der Rohdaten; Grün: EW basierend auf mittlerem Jahresgang; Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes*

5.2.4 Abschätzung der thermisch bedingten Mortalität

Die thermisch bedingte Mortalität (M_{therm}) ist als Differenz zwischen wirklich aufgetretener Mortalität (M_{roh}) und jener Mortalität, welche ohne Einwirkung des thermischen Stresses aufgetreten wäre, definiert. In der Differenz (ResM) zwischen Mortalität (M_{roh}) und dem Erwartungswert (EW)

$$\mathbf{ResM = M_{roh} - EW} \qquad \textbf{Gl. 5.7}$$

sind jedoch auch Komponenten enthalten, welche keine thermischen Ursachen haben, jedoch in der Regel nicht kontrolliert werden können. Derartige Komponenten können beispielsweise Grippewellen sein (z.B. Kunst et al., 1993). Im Rahmen dieser Arbeit lagen nur für einen Teil der Datensätze Informationen über das Auftreten von Grippewellen vor. Angaben über andere, nicht thermisch bedingte Epidemien, die zu einer Erhöhung der Morta-

litätsrate führen, waren nicht vorhanden. Daher konnten diese Faktoren nicht berücksichtigt werden. Es wird deshalb angenommen, dass sich diese nicht-thermisch bedingten Epidemien zufällig über alle Belastungsklassen verteilen und somit zu keinen signifikanten Unterschieden in den Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert zwischen den jeweiligen Belastungsklassen führen.

Aus diesen Gründen wird ResM gleich der thermisch bedingten Mortalität (M_{therm}) gesetzt:

$$\mathbf{M_{therm} = ResM} \qquad \textbf{Gl. 5.8}$$

Die unterschiedlichen zeitlichen Verschiebungen zwischen thermischem Stress (Ursache) und Änderung der Mortalität (Wirkung) (Kapitel 3.3.4) deuten auf eine nicht tagesscharfe zugrunde liegende Ursache-Wirkungsbeziehung hin. Daher basieren alle hier durchgeführten Analysen auf einem 2-Tagesmittelwert der Mortalitätsdaten beziehungsweise dessen Abweichung vom Erwartungswert (Abb. A 3, S. 195). Dieses 2-Tagesmittel wird mit der Belastungsklasse verglichen, welche dem ersten der beiden Tage zugeordnet wird.

5.2.5 Relative Mortalität, Sensitivität und Vulnerabilität

Um die Beziehung zwischen thermischer Umwelt und Mortalität zu veranschaulichen, wird im Folgenden die mittlere Mortalität relativ zum Erwartungswert *(„relative Mortalität*“) für die unterschiedlichen thermischen Belastungsklassen dargestellt. Mit Hilfe dieser Relation kann die Sensitivität einer Population für eine bestimmte thermische Belastungsstufe beurteilt werden. Die gewählte Darstellungsart ermöglicht den Vergleich von Populationen, die unterschiedlich sensitiv auf thermische Belastung reagieren, und ist zudem unabhängig von Unterschieden und Trends in der Mortalitätsrate.

Die Sensitivität einer Population ist von verschiedenen sozioökonomischen und demografischen Faktoren abhängig. Die Sensitivität eines Individuums hängt des Weiteren von individuellen Faktoren, wie zum Beispiel mangelnde Fitness, Alter, Bettlägerigkeit, Übergewicht, instabiler Gesundheitszustand, soziale Isolation oder schlechte Wohnsituation ab (Koppe et al., 2004). Ein Großteil dieser Faktoren kann auf Populationsebene nicht gesondert untersucht werden.

Signifikante Unterschiede der relativen Mortalität zwischen den einzelnen thermischen Belastungsklassen zeigen einen statistischen Zusammenhang zwischen der thermischen Belastung und der Sterblichkeit auf. Gäbe es diesen Zusammenhang nicht, würden sich

auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppenmittelwerten ergeben und die Abweichungen der Mortalitätsmittelwerte wären zufällig verteilt. Eine relative Mortalität über 100% zeigt dabei eine mittlere „*Übersterblichkeit*“ an. Entsprechend steht eine relative Mortalität unter 100% für eine „*Untersterblichkeit*“ in dieser Belastungsklasse. Als signifikant werden im Folgenden, sofern nicht extra erwähnt, Unterschiede auf einem Signifikanzniveau von mindestens 0,05 bezeichnet.

Die Auswirkungen des Klimas auf die Gesundheit bestimmen sich durch eine Kombination aus Exposition (hier die Häufigkeit von thermischen Belastungen) und Sensitivität der Bevölkerung. Durch eine Kombination dieser beiden Faktoren ergibt sich die Vulnerabilität einer Population (Abb. 5.17). Unter Vulnerabilität wird der Grad an Belastung verstanden, ab welchem Systeme oder Individuen für negative Auswirkungen der Klimaänderung einschließlich Klimavariabilität sowie Extremereignissen anfällig sind (McMichael et al., 1996).

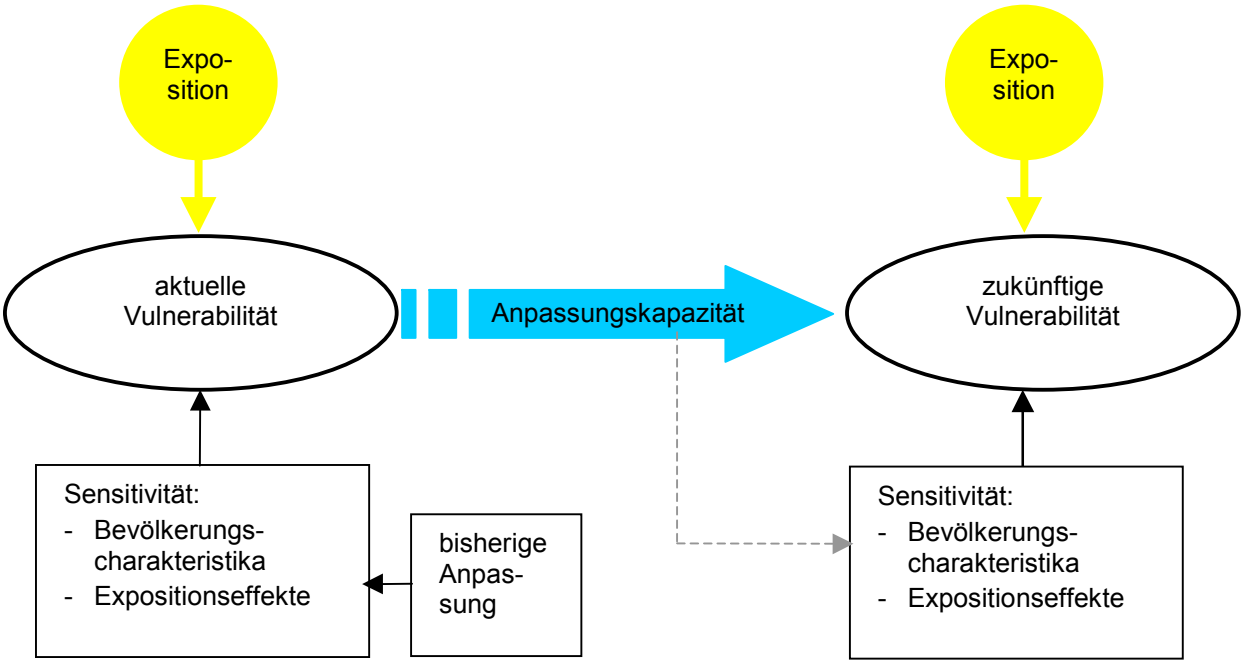


Abb. 5.17: Schematische Darstellung der Beziehungen zwischen Vulnerabilität, Anpassungskapazität und potenziellen Auswirkungen auf die Gesundheit

Die Exposition ist abhängig vom jeweiligen Klima einer Region und daher für alle Individuen, welche in dieser Region leben, in erster Näherung gleich. Die Auswirkung der Exposition wird jedoch durch verschiedene Effekte (Expositionseffekte), welche der Sensitivität

zuzurechnen sind, modifiziert. Das Bewohnen von schlecht isolierten Dachgeschosswohnungen kann beispielsweise die individuelle Sensitivität beeinflussen. In der hier durchgeführten Untersuchung wird die Exposition über die Häufigkeit der thermischen Belastungsstufen bewertet.

5.2.6 Wochengang der Mortalität

In einigen Untersuchungen, wurde ein Wochengang in den Mortalitätsdaten gefunden (z.B. Michelozzi et al., 2000; Hajat et al., 2002; Kyselý, 2004). Auch für Baden-Württemberg konnte ein Wochengang mit teilweise signifikanten Unterschieden zwischen den Wochentagen ermittelt werden. Dieser Wochengang änderte sich jedoch im Laufe des untersuchten Zeitraums (Abb. 5.18).

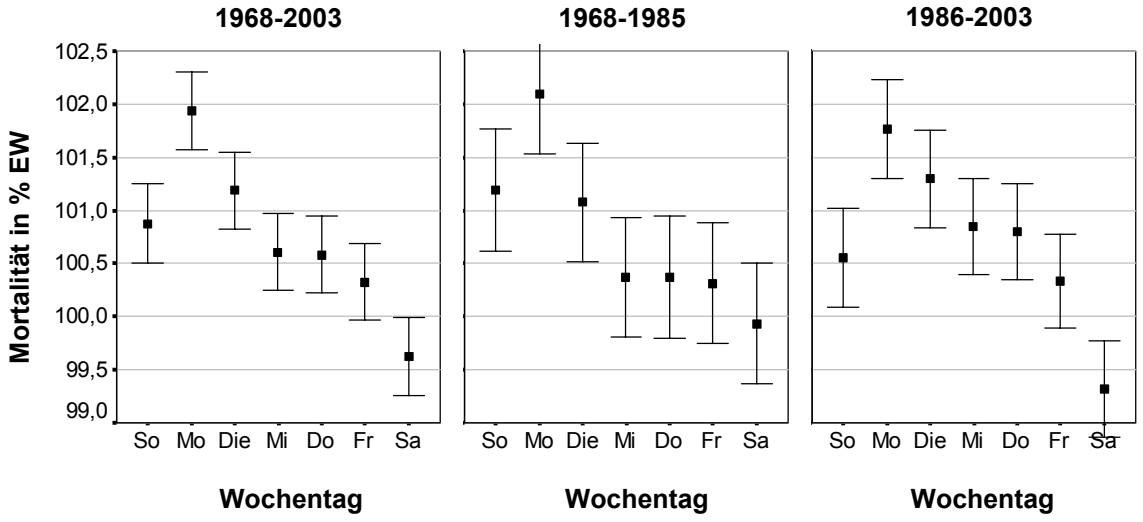


Abb. 5.18: Wochengang der mittleren relativen Mortalität (Baden-Württemberg, 1968-2003). *Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes*

Zudem ist der Wochengang auch im Verlauf des Jahres nicht konstant (Abb. 5.19). Besonders stark ist er im Juli und in den Monaten Februar und März ausgeprägt. Flachere Wochengänge finden sich vor allem im April und Mai sowie von September bis zum Jahresende.

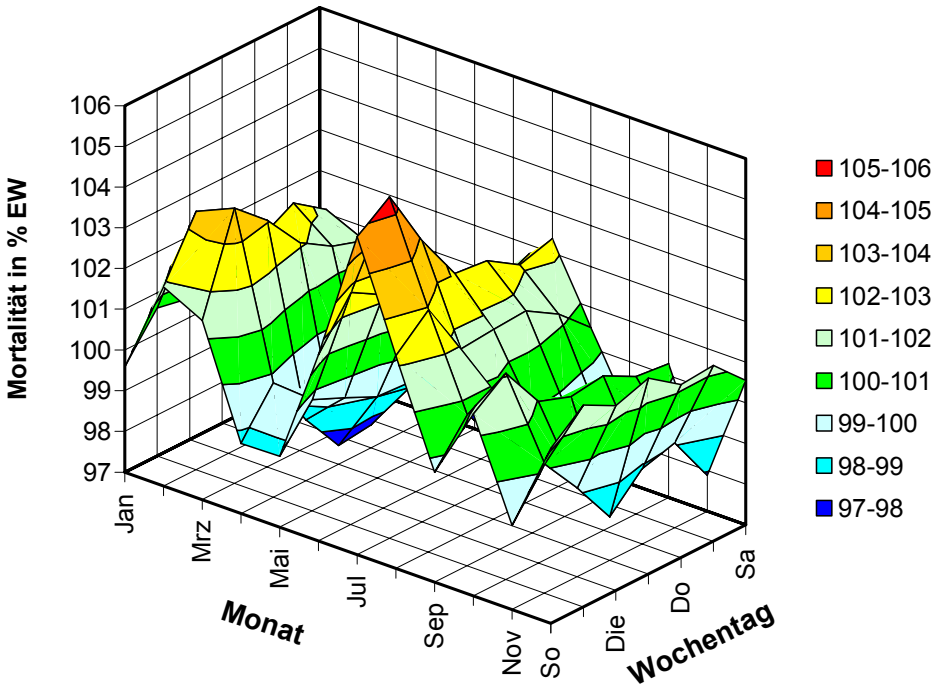


Abb. 5.19: Wochengang der relativen Mortalität (%) für einzelne Monate (Baden-Württemberg, 1968-2003)

Da sich der Wochengang sowohl im Jahresverlauf als auch im langjährigen Mittel ändert, müsste beides bei einer Korrektur der Zeitreihendaten bezüglich des Wochenganges berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass für jeden einzelnen Monat eines Jahres der Wochengang separat bestimmt werden müsste. Für einzelne Monate sind die Wochengänge der Mortalität in der Regel jedoch nicht signifikant (Abb. 5.20). Unter der Annahme, dass sich die unterschiedlichen thermischen Belastungssituationen zufällig über die einzelnen Wochentage verteilen, wurde in dieser Arbeit auf eine Korrektur der Mortalitätsdaten bezüglich des Wochenganges verzichtet.

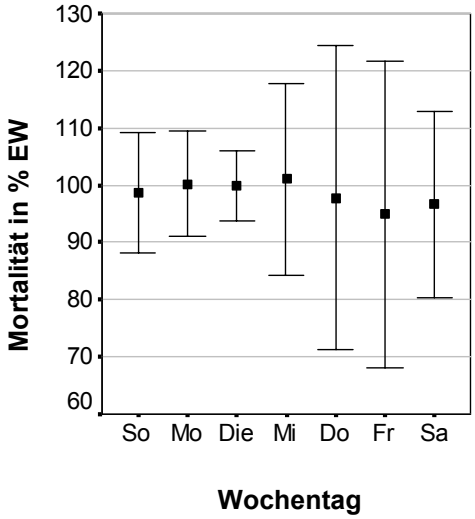


Abb. 5.20: Beispiel für den Wochengang der relativen Mortalität (Baden-Württemberg, Juni 1985). *Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes*

5.2.7 Fazit

Die Abschätzung des Erwartungswertes der Mortalität wurde bisher meist mit Verfahren vorgenommen, die entweder auf einem Mittelwert vergleichbarer Perioden oder auf numerischen Filterverfahren beruhen. Beide Verfahren sind mit Nachteilen behaftet. Daher wurden hier Verfahren vorgestellt und miteinander verglichen, die zwar auf den Ansätzen „*Mittelwert*“ und „*Filterverfahren*“ basieren, jedoch modifiziert wurden, um deren Nachteile auszugleichen.

Ein Vergleich der vorgestellten Verfahren zur Bestimmung des Erwartungswertes ergibt für Komfort- und Wärmebelastungssituationen keine signifikanten Unterschiede in den 2-Tages Mittelwerten der Residuen der Mortalität. Für weitere Analysen wird daher die Methode verwendet, welche auf der Restauration der bereinigten Mortalitätsdaten beruht. Sie hat gegenüber dem Verfahren der Elimination von Episoden einen geringeren Rechenaufwand und ist weniger stark von Mortalitätsepisoden beeinflusst als das Restaurationsverfahren, welches sich auf Rohdaten stützt. Im Vergleich zur Methode, welche auf dem mittleren Jahresgang basiert, hat es, wie auch die anderen Verfahren, den Vorteil, dass es auch auf kurze Zeitreihen angewendet werden kann und dass sich die Lage der Minima und Maxima den aktuellen Begebenheiten anpasst.

Da sich der Wettereinfluss nie vollständig aus den Mortalitätsdaten herausrechnen lässt, sind alle Verfahren zur Erwartungswertbestimmung nur Näherungsverfahren. Dass die hier ausgewählte auf dem Restaurationsansatz beruhende Methode den Erwartungswert prinzipiell überschätzt, äußert sich in der Tatsache, dass bei „*Komfortbedingungen*“ in der Regel mittlere relative Mortalitäten unter 100% gefunden werden. Theoretisch wäre es jedoch auch möglich, dass „*Komfortbedingungen*“ nicht für „*keinen Wettereinfluss*“, was eine relative Mortalität von 100% zur Folge haben müsste, sondern für einen „*günstigen*“, also lebensverlängernden, Wettereinfluss stehen. Letzterer könnte durchaus mit einer Untersterblichkeit, wie sie hier gefunden wurde, einhergehen.

Die ermittelten Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert werden im Folgenden als „*thermisch bedingte Mortalität*“ bezeichnet. Dabei muss die vereinfachende Annahme gemacht werden, dass sich die nicht-thermisch bedingte Mortalität zufällig über alle Klassen thermischer Belastung verteilt und die relative Mortalität daher nicht durch weitere, nicht-thermisch bedingte Einflüsse verändert wird. Dies ist grundsätzlich eine Schwachstelle aller Verfahren zur Abschätzung der hitzebedingten Mortalität. Bei einer Untersuchung von langen Zeitreihen einer großen Anzahl von Todesfällen ist es jedoch ohnehin nicht möglich, alle nicht-thermischen Einflüsse herauszufiltern.

Unter Anwendung des neuen Verfahrens zur Bewertung der thermischen Umwelt ergibt die Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert während einer bestimmten thermischen Belastungsklasse die Sensitivität der Bevölkerung für diese Belastung. Die Sensitivität ist wiederum ein wichtiger Parameter zur Abschätzung der Vulnerabilität der Bevölkerung für thermische Belastung und daher von Bedeutung bei der Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen und bei der Entwicklung von langfristigen Anpassungsstrategien.

5.3 Datengrundlage

5.3.1 Mortalität

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen standen tägliche Daten der Gesamtmortalität für London, die Niederlande, Baden-Württemberg, Budapest, Lissabon und Madrid aus dem europäischen **cCASHh** Projekt (**c**limate **C**hange and **A**daptation **S**trategies for **H**uman **h**ealth in Europe) zur Verfügung (Tab. 5.3). Die nach Alter und Geschlecht aufgeschlüsselten Daten aus Baden-Württemberg wurden im Rahmen des Verbundprojektes **KLARA** (**Kl**imawandel – **A**uswirkungen, **R**isiken, **A**npassung) des Landes Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt. Auch für die Niederlande und Madrid waren die Mortalitätsdaten weiter nach Altersklassen aufgeteilt. Für Lissabon und Madrid standen des Weiteren Informationen über das Geschlecht der Verstorbenen zur Verfügung. Für die Niederlande, Lissabon und Madrid wurde jedoch nur die Gesamtmortalität analysiert.

Tab. 5.3: Liste der vorhandenen Mortalitätsdaten

Ort / Region	Zeitraum	Aufschlüsselung der Daten
London	1976-2000	
Niederlande	1979-1997	Altersklassen unter und über 65 Jahren
Baden-Württemberg*	1968-2003	Altersklassen in 5 Jahresschritten; Geschlecht
Budapest	1970-2000	
Lissabon	1980-1998	Geschlecht
Madrid	1986-1997	Altersklassen unter und über 75 Jahren; Geschlecht

* *Fehlbuchungen Anfang der 80er Jahre zum Monatswechsel → Mittelung der betroffenen Tage; Daten bis 30.09.2003*

In Baden-Württemberg waren am 31. Dezember der Jahre 1980 und 1981 die Todesfallzahlen auffallend niedrig. Im Gegensatz dazu waren die Sterbefallzahlen am 1. Januar der Jahre 1981 und 1982 relativ hoch. Daher wurden die Todesfallzahlen am 31. Dezember und am 1. Januar des Folgejahres für diese beiden Jahre gemittelt. Ähnliche offensichtliche „*Buchungsfehler*“ traten bei den altersspezifischen Daten in den Jahren 1980-1986 zum Monatswechsel auf und wurden ebenfalls durch entsprechende Mittelung bereinigt. Die

Tage, an denen offensichtlich Fehlbuchungen vorlagen, die Ursache aber nicht gefunden werden konnte, wurden bei den Analysen nicht berücksichtigt.

Aufgrund der geringen Anzahl an Todesfällen jüngerer Menschen sind die Häufigkeitsverteilungen der 5-Jahres Klassen in den Altersgruppen unter 45 Jahren in Baden-Württemberg nicht normal verteilt (Tab. A 1, S. 196). Für viele statistische Analysen ist jedoch eine Normalverteilung der Daten eine Vorraussetzung. Diese wird bei Mortalitätsdaten mit großen Grundgesamtheiten in der Regel erreicht. Um eine möglichst große Anzahl von Todesfällen je Altersklasse zu bekommen und gleichzeitig noch altersdifferenzierte Aussagen treffen zu können, erfolgt eine Zusammenfassung der Daten zu folgenden Altersklassen: 0-39 Jahre, 40-59 Jahre, 60-69 Jahre, 70-74 Jahre, 75-79 Jahre, 80-84 Jahre, 85-90 Jahre und über 90 Jahre.

5.3.2 Gefühlte Temperatur

Für die oben genannten Regionen wurde die Gefühlte Temperatur auf Basis der Synopdaten des Deutschen Wetterdienstes berechnet (Tab. 5.4). Diese Daten enthielten Fehlwerte und fehlerhafte Werte. Da für die Filterung vollständige Datenreihen notwendig sind, mussten diese Datenlücken aufgefühlt werden. Datenlücken von wenigen Tagen wurden durch lineare Interpolation zwischen erstem und letztem vorhanden Wert aufgefüllt. Das Auffüllen von längeren Datenlücken wurde auf Basis des Monatsmittelwertes vorgenommen. Diese Datenlücken wurden gekennzeichnet und für die weiteren Analysen aus dem Datensatz herausgenommen.

Neben dem Vervollständigen der Zeitreihe war eine Untersuchung auf Ausreißer notwendig. Hierfür wurden alle Werte, bei welchen der Testwert T größer als 3,351 (99%-Signifikanzniveau) war (Sachs, 1984), markiert und einer anschließenden Plausibilitätsprüfung unterzogen. Der Testwert wird wie folgt berechnet:

$$\mathbf{T} = \frac{\left|\mathbf{x_n} - \boldsymbol{\mu}\right|}{\varphi} \qquad \textbf{Gl. 5.9}$$

x_n: getesteter Wert
μ: zentrierter gleitender Mittelwert der 15 Werte vor und nach dem getesteten Wert
φ: Standardabweichung

Die Ausreißer wurden aus der Zeitreihe herausgenommen und analog zu den Datenlücken ersetzt.

In der Regel standen Werte der Gefühlten Temperatur um 00, 06, 12 und 18 UTC zur Verfügung. Nur für die Niederlande musste jedoch auf die Gefühlte Temperatur um 01, 07, 13 und 19 UTC zurückgegriffen werden (Tab. 5.4).

Tab. 5.4: Datenbasis für die Berechnung der Gefühlten Temperatur

Ort / Region	Zeitraum	Station	Bemerkung
London	1976-2000	London Heathrow	Datenlücke: 01.08.2000-31.08.2000
Niederlande	1979-1997	Mittelwert: Gilze Volkel	GT um 07 UTC und 13 UTC Datenlücken: 25.09.1979-15.11.1979 23.12.1983-26.01.1984 12.08.1984-23.08.1984
Baden-Württemberg	1968-2003	Mittelwert: Freiburg Karlsruhe Konstanz Stuttgart	Datenlücken wurden über Regressionsbeziehungen zu anderen Stationen aufgefüllt (siehe Laschewski und Jendritzky, 2002)
Budapest	1971-2000	Budapest	Datenlücken: 21.07.1984-01.09.1984 01.08.2000-31.08.2000
Lissabon	1980-1998	Lissabon	Datenlücke: 09.06.1989-16.06.1989
Madrid	1986-1997	Madrid	

Um Aussagen über den Mortalitätsdatensatz von Baden-Württemberg treffen zu können, war es nötig, die thermische Situation auf Landesebene zu bewerten. Dafür wurde für die Gefühlte Temperatur ein Mittel aus den Stationen Karlsruhe, Konstanz, Freiburg und Stuttgart (Echterdingen) gewählt. Der Mittelwert dieser vier Stationen wird als repräsentativ für die Populationszentren des Landes angesehen (Laschewski und Jendritzky, 2002).

Auch für die Niederlande musste eine Gefühlte Temperatur berechnet werden, die als repräsentativ für die Populationszentren angesehen wird. Viele der niederländischen Synop-Stationen wiesen größere Datenlücken auf. Daher wurde die Gefühlte Temperatur nur auf Basis der beiden Stationen Volkel und Gilze, welche relativ vollständige Zeitreihen auf-

wiesen, berechnet. Die dadurch entstehenden Fehler dürften relativ klein sein, da die Niederlande orographisch gering gegliedert sind und eine relative geringe Flächenausdehnung haben (Tab. 5.5).

Tab. 5.5: Lage der untersuchten Gebiete

Ort	Georgr. Breite	Georgr. Länge	Höhe über NN (m)	Klimaklassifikation	
				Troll Paffen	Köppen
London	51°1‘ N	0° 1‘ W	62	III, 2	Cfb
Niederlande	50° - 52°5‘ N	3° - 6°5‘ E	4 - 114	III, 3	Cfb
Baden-Württemberg	47°5‘ - 49°5‘ N	7°5‘ - 10°5‘ E	96 - 1486	III, 3	Cfb
Budapest	47°3‘ N	19°5‘ E	130	III, 3	Cfb
Lissabon	38°4‘ N	9°1‘ W	95	IV, 1	Csa
Madrid	40°3‘ N	3°4‘ W	667	IV, 1	Csa

III, 2: kühlgemäßigte Zone: ozeanische Klimate mit milden Wintern, Herbst- und Wintermaximum der Niederschläge und mäßig warmen Sommern

III, 3: kühlgemäßigte Zone: subozeanische Klimate mit milden bis mäßig kalten Wintern; Herbst- bis Sommerniederschlagsmaximum, mäßig warmen und warmen langen Sommern

IV, 1: warmgemäßigte Zone: winterfeucht-sommertrockene Klimate vom mediterranem Typ

Cfb: Cfb: feuchtgemäßigtes Klima mit warmen Sommern

Csa Csa: warmes sommertrockenes Klima mit heißen Sommern

Die untersuchten Gebiete gehören alle der gemäßigten Klimazone an (Müller, 1983; Heyer, 1998). Die beiden südlichsten Städte Lissabon und Madrid besitzen hierbei ein warmes, sommertrockenes Klima mit heißen Sommern. Den restlichen untersuchten Gebieten kann ein feuchtgemäßigtes Klima mit warmen Sommern zugeordnet werden (Tab. 5.5). Entsprechend werden auch für Madrid und Lissabon gefolgt von Budapest und Baden-Württemberg die höchsten 95%-Perzentilwerte für die Gefühlte Temperatur um 12 UTC berechnet (Tab. 5.6).

Tab. 5.6: Charakteristische Perzentilwerte der Gefühlten Temperatur um 06 UTC (GT06) und 12 UTC (GT12)

	GT06 (°C)			GT12 (°C)		
Perzentil	5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
London	-7,6	1,9	13,9	0,9	11,3	26,6
Niederlande*	-11,0	6,0	19,5	-2,6	11,3	28,5
Baden-Württemberg	-9,7	5,8	21,8	-2,5	12,8	31,5
Budapest	-14,3	6,7	26,1	-5,3	14,2	32,9
Lissabon	0,7	9,0	15,0	9,0	19,3	33,6
Madrid	-10,5	4,5	17,8	6,0	19,1	35,0

* *GT07 und GT13*

6 ERGEBNISSE

Die neue Methodik zur Bewertung der thermischen Umwelt **HeRATE** wurde entwickelt, um ein einheitliches Verfahren zur Verfügung zu stellen, welches auf eine Vielzahl von Fragestellungen angewendet werden kann. Zu diesen Fragestellungen gehören:

- die Untersuchung längerer, auch nicht stationärer Mortalitätszeitreihen;
- der Vergleich von Auswirkungen thermischer Belastung in unterschiedlichen klimatischen Regionen;
- die Abschätzung der Auswirkungen von Klimaänderungen;
- die Verwendung der Bewertungsfunktion für Hitzebelastungsvorhersagen.

In den folgenden Unterkapiteln werden diese Fragestellungen exemplarisch abgehandelt. Für die Untersuchung einer längeren Zeitreihe und der Auswirkungen von Klimaänderungen werden die Daten aus Baden-Württemberg verwendet. Die anderen vorhandenen Datensätze dienen dem Vergleich der Auswirkungen thermischer Belastung in unterschiedlichen klimatischen Regionen Europas.

Die Abschätzung der Auswirkungen thermischer Belastung auf die Gesundheit erfolgt auf der Basis von Daten über die Gesamtmortalität. Dies hat folgende Gründe:

a) Durch die relativ hohe Priorität des Thermoregulationssystems im menschlichen Organismus werden in der Regel gute Zusammenhänge zwischen Gesamtmortalität und thermischer Umwelt gefunden (Jones et al., 1982; Kunst et al.; 1993; Laschewski und Jendritzky, 2002; Parsons, 2003).

b) Die Daten über die gesamte Anzahl von Sterbefällen sind „härter“ als die nach Ursachen aufgeschlüsselten Datenreihen, da hier immer die Möglichkeit einer Fehlklassifikation besteht.

6.1 Auswirkungen thermischer Belastung auf die Mortalität in Baden-Württemberg

6.1.1 Gesamtmortalität

6.1.1.1 Auswirkung thermischer Belastung auf die relative Mortalität

Ohne die Berücksichtigung einer zeitlichen Verschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalität ergeben sich für „*leichten Kältestress*“ bis „*starke Wärmebelastung*“ in Baden-Württemberg im Zeitraum 1968-2003 signifikante Unterschiede zwischen den mittleren relativen Mortalitäten von jeweils benachbarten Belastungsklassen (Abb. 6.1; Tab. A 2; Tab A 3, S.196). Die geringsten relativen Mortalitäten treten während „*Komfortbedingungen*“ auf. Mit zunehmender Wärmebelastung erhöht sich die relative Abweichung vom Erwartungswert und somit auch die Sensitivität der Bevölkerung. Sterben bei „*leichter Wärmebelastung*“ im Mittel etwa 1% mehr Menschen als erwartet, sind dies bei mäßiger bereits 6% und bei starker Belastung über 13%.

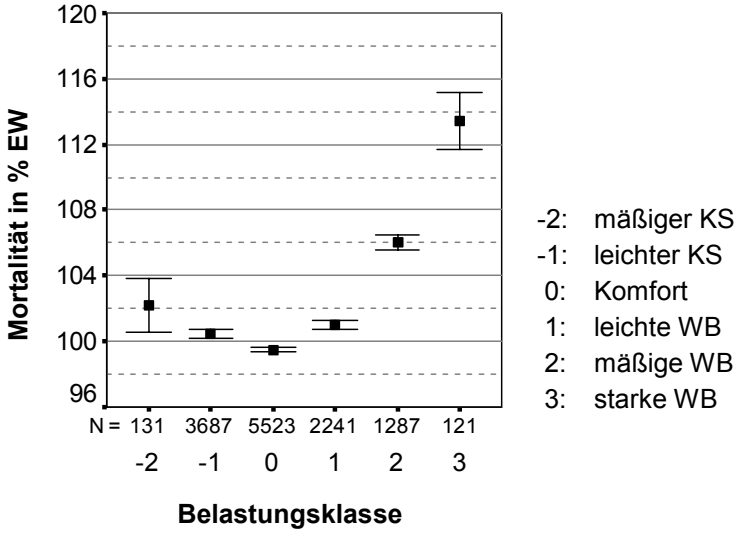


Abb. 6.1: Mittlere relative Mortalität ohne Berücksichtigung einer zeitlichen Verschiebung (Baden-Württemberg, 1968-2003). *N: Anzahl der Fälle; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung; Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes*

In Baden-Württemberg sind „*Komfortbedingungen*“ und „*leichter Kältestress*“ die beiden häufigsten Belastungsklassen. „*Starke Wärmebelastung*“ kam im Zeitraum 1968-2003 im Schnitt an 3 Tagen pro Jahr vor. Ähnlich häufig trat „*mäßiger Kältestress*“ auf.

Die hier gewählte zeitliche Verschiebung von 0 Tagen ist geeignet für die Untersuchung von Wärmebelastung (Kapitel 3.3.4). Schon für eine zeitliche Verschiebung von einem Tag geht die mittlere relative Mortalität für „*starke*“ und „*mäßige Wärmebelastung*“ deutlich, wenn auch nicht signifikant, zurück. Ab einer Zeitverschiebung von drei Tagen ist dieser Unterschied signifikant. „*Mäßige*“ und „*starke Wärmebelastung*“ beeinflussen die Mortalität im Mittel noch 7 bis 13 Tage nach ihrem Auftreten (Abb. 6.2; Abb. A 4, S.198).

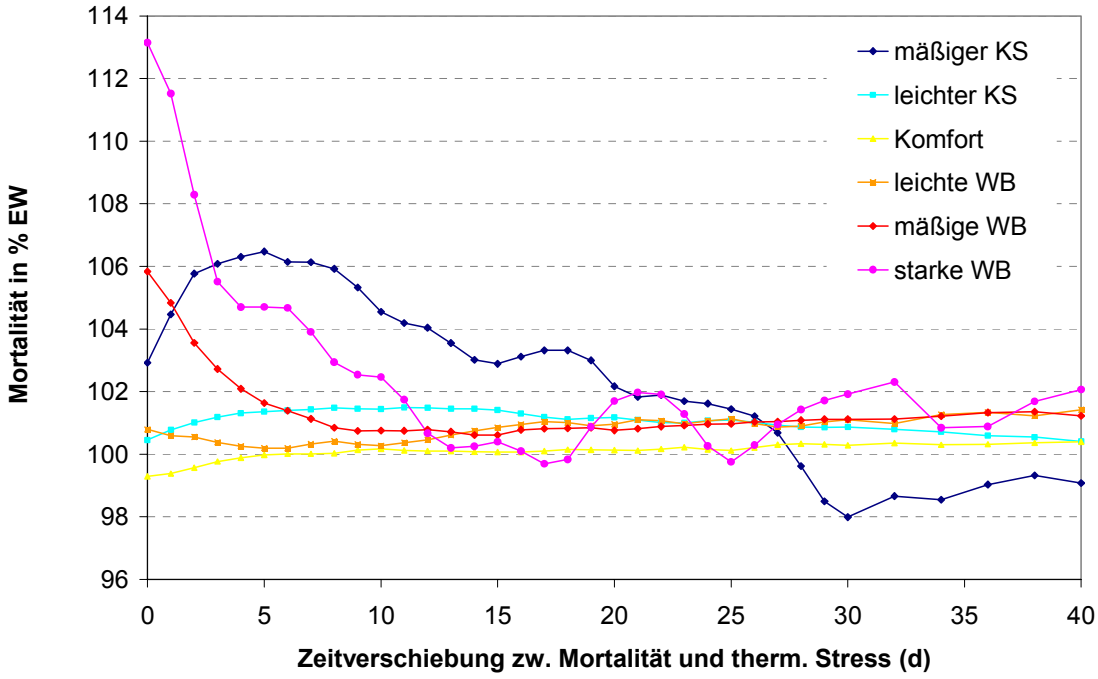


Abb. 6.2: **Mittlere relative Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Baden-Württemberg, 1968-2003).** *EW: Erwartungswert;* KS: *Kältestress; WB: Wärmebelastung*

Die Auswirkungen von „*mäßigem Kältestress*“ auf die Mortalität sind in Baden-Württemberg für Zeitverschiebungen von 3-7 Tagen am stärksten. Das Verhältnis zwischen Mortalität und der erwarteten Mortalität wird nach einem Tag mit dieser Belastungsklasse für eine zeitliche Verschiebung von 5 Tagen maximal. „*Mäßiger Kältestress*“ geht gut 3 Wochen lang mit Sterbfallzahlen über dem Erwartungswert einher.

Die Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert ist bei „*leichter Wärmebelastung“,* „*leichtem Kältestress*“ sowie bei „*Komfortbedingungen*“ für alle Zeitverschiebungen gering. Bei thermischem Komfort tritt in den ersten vier Tagen eine leichte „*Untersterblichkeit*“ auf.

Werden jeweils die Zeitverschiebungen berücksichtigt, für welche das Verhältnis zwischen Mortalität und erwarteter Mortalität maximal wird, so ergeben sich in Baden-Württemberg ähnliche relative Mortalitäten für die entsprechenden Stufen von Kältestress und Wärmebelastung (Tab. 6.1).

Tab. 6.1: Mittlere relative Mortalität unter Berücksichtung der jeweils mit den stärksten Auswirkungen auf die Mortalität einhergehenden Zeitverschiebungen (Baden-Württemberg, 1968-2003). *In Klammern ist der Standardfehler des Mittelwertes angegeben*

thermische Belastung	Gesamtmortalität (%)	Zeitverschiebung (d)
mäßiger Kältestress	105,9 (± 1,1)	5
leichter Kältestress	101,4 (± 0,2)	5-13
Komfortbedingungen	99,5 (± 0,1)	0
leichte Wärmebelastung	101,0 (± 0,2)	0
mäßige Wärmebelastung	106,0 (± 0,2)	0
starke Wärmebelastung	113,4 (± 0,9)	0

6.1.1.2 VORVERLEGUNG DES STERBEZEITPUNKTES

Unter dem Harvesting-Effekt versteht man eine Vorverlegung des Todeszeitpunktes um wenige Tage oder Wochen (Kapitel 3.3.9). Nach einem Ereignis mit „*starker Wärmebelastung*“ liegt die Mortalität in Baden-Württemberg 13 Tage signifikant über dem Erwartungswert (Tab. 6.2). Im Mittel sterben während dieser Periode pro Tag 4,8% mehr Menschen als erwartet. Im Anschluss daran gibt es eine kurze Periode mit leichter Untersterblichkeit. Diese kompensiert etwa 3% der zuvor aufgetretenen Übersterblichkeit. Im Gegensatz dazu konnte infolge „*mäßiger Wärmebelastung*“ überhaupt keine Vorverlegung des Todeszeitpunktes festgestellt werden.

Nach einem Ereignis mit „*mäßigem Kältestress*“ ist die Mortalität noch 26 Tage erhöht und liegt während dieser Phase im Mittel 3,1% über dem Erwartungswert. Die sich an-

schließende Phase mit Untersterblichkeit dauert 13 Tage an und kompensiert knapp 30% der Übersterblichkeit (Tab. 6.2).

Tab. 6.2: Harvesting-Effekte nach „*starker Wärmebelastung*“ und „*mäßigem Kältestress*“ (Baden-Württemberg, 1968-2003)

Baden-Württemberg	Starke Wärmebelastung	Mäßiger Kältestress
mittlere Übersterblichkeit pro Tag (%)	4,8	3,1
an den Tagen (Anzahl Tage) (d)	0-13 (14)	0-26 (27)
Übersterblichkeit · Anzahl Tage	**66,9**	**82,6**
mittlere Untersterblichkeit pro Tag (%)	-1,0	-1,9
an den Tagen (Anzahl Tage) (d)	19-20 (2)	28-40 (13)
Untersterblichkeit · Anzahl Tage	**-1,9**	**-24,5**
Untersterblichkeit relativ zur Übersterblichkeit (%)	**2,8**	**29,7**

6.1.1.3 Auswirkung der Andauer thermischer Belastung

Hitzebelastung mit einer Andauer von einigen Tagen wurde vielerorts eine höhere hitzebedingte Mortalität zugeordnet als einzelnen heißen Tagen (Saez et al., 1995; Smoyer et al., 2000; Diaz et al., 2002). In Baden-Württemberg hat die Persistenz der thermischen Belastung vor allem bei „*mäßiger*“ und „*starker Wärmebelastung*“ einen starken Einfluss auf die thermisch bedingte Mortalität (Abb. 6.3). Für diese beiden Belastungsklassen unterscheiden sich die Mittelwerte der relativen Mortalität der Bevölkerung für eine Andauer von einem Tag signifikant von denen für drei Tagen und mehr. Daher ist es notwendig, bei der Bewertung von Wärmebelastungssituation nicht nur die Intensität, sondern auch die Andauer zu berücksichtigen. Die Andauer von Kältestress scheint dagegen keine Auswirkung auf die Mortalität zu haben.

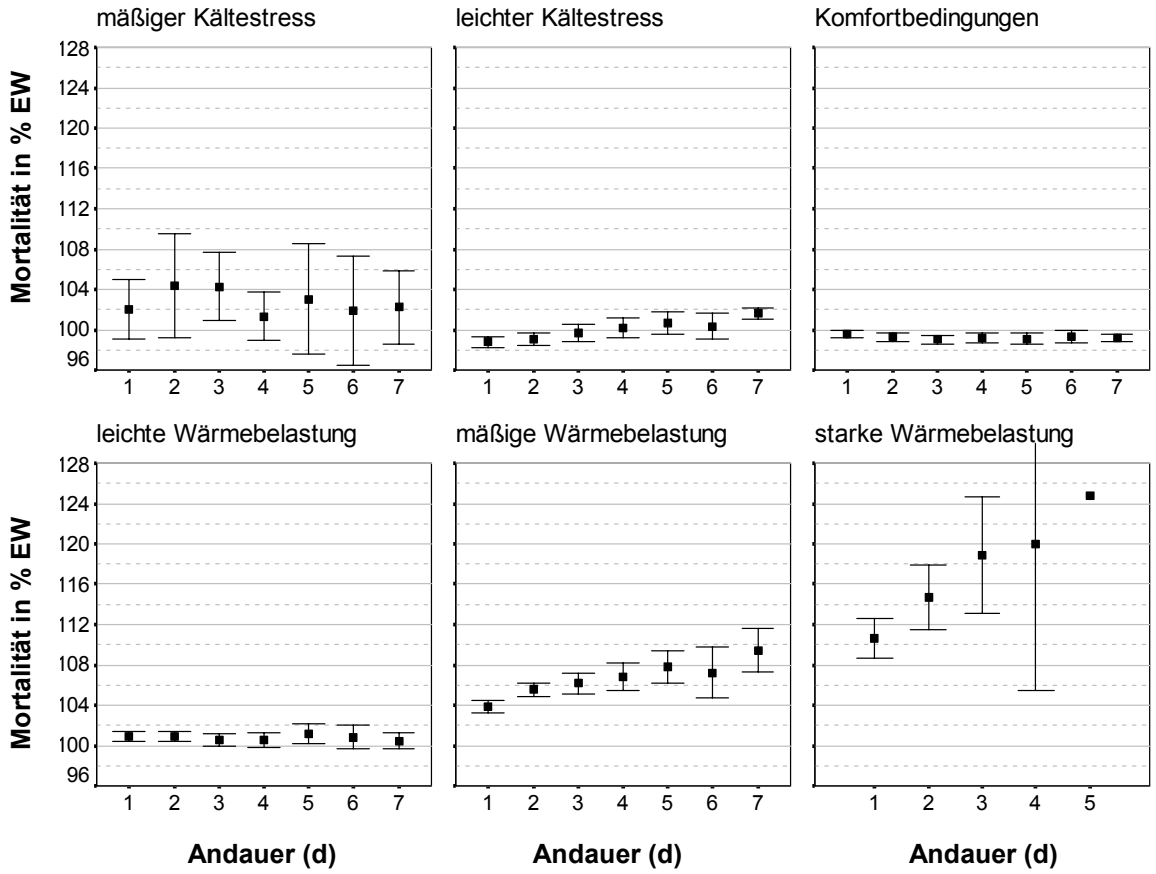


Abb. 6.3: **Auswirkung der Andauer thermischer Belastung auf den Mittelwert der relativen Mortalität (Baden-Württemberg, 1968-2003).** *Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes; keine Zeitverschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalität*

6.1.1.4 TRENDS IN SENSITIVITÄT UND VULNERABILITÄT

Der Vergleich der relativen Mortalität einer Periode am Anfang und einer Periode am Ende der vorhandenen Zeitreihe lässt Rückschlüsse auf Änderungen in der Sensitivität der Bevölkerung zu. Bei gleichzeitiger Betrachtung von Änderungen in der Häufigkeit können Trends in der Vulnerabilität gegenüber thermischer Belastung identifiziert werden.

Für die Trenduntersuchungen der Sensitivität und der Vulnerabilität in Baden-Württemberg wurden die beiden 15 Jahre umfassenden Zeiträume 01.01.1969 bis 31.12.1983 und 01.01.1988 bis 31.12.2002 untersucht. Die Zeitfenster wurden so ausgewählt, dass möglichst lange Zeiträume miteinander verglichen werden konnten, um möglichst viele Fälle pro Belastungsklasse zu erhalten. Dabei wurde zusätzlich darauf geachtet, dass diese Zeitfenster nicht direkt aneinander angrenzen.

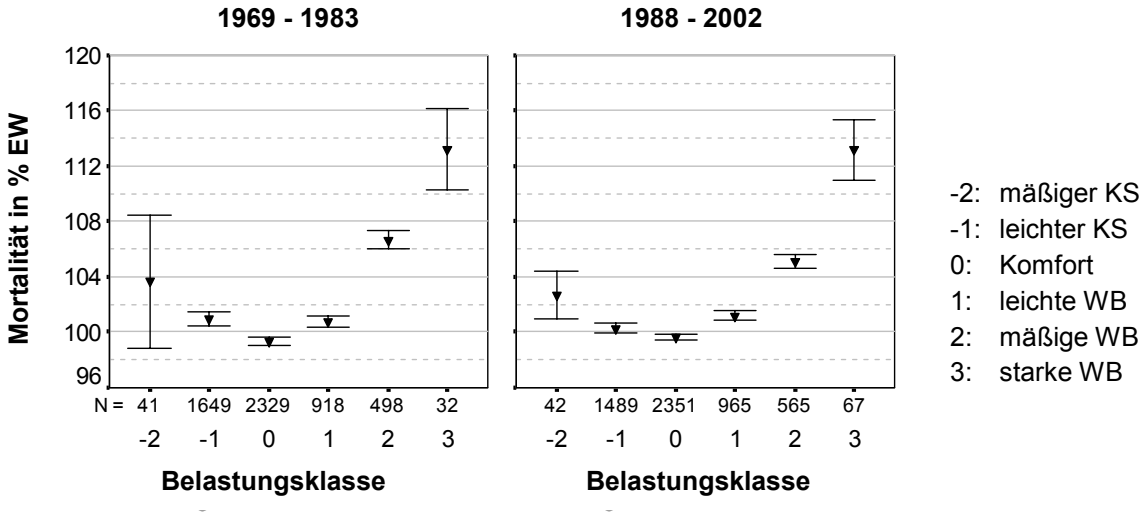


Abb. 6.4: **Änderung der mittleren relativen Mortalität der einzelnen thermischen Belastungsklassen (Baden-Württemberg, 1968-2002).** *KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung; Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes; N: Anzahl der Fälle; keine Zeitverschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalität*

Für „*starke Wärmebelastung*“ lassen sich zwischen den betrachten Zeiträumen keine signifikanten Änderungen in der Sensitivität feststellen (Abb. 6.4). An Tagen mit „*mäßiger Wärmebelastung*“ ging die Sensitivität hingegen signifikant zurück. Gleichzeitig erhöhte sich die Anzahl der Tage mit „*mäßiger Wärmebelastung*“ von 498 (= 33 Tage pro Jahr) auf 565 (= 38 Tage pro Jahr) und die Zahl der Tage mit „*starker Wärmebelastung*“ verdoppelte sich von 32 auf 67 Tage (= 2 bzw. 4 Tage pro Jahr).

Aus Kenntnis der Auftretenshäufigkeit eines thermischen Stresses und der relativen Mortalität für diese Belastungsklasse lässt sich die relative Vulnerabilität der Bevölkerung für einen Zeitraum ($rV_{Z,BK}$) berechnen:

$$\mathbf{rV_{Z,BK} = (rM_{Z,BK} - 100) \cdot H_{Z,BK}} \qquad \textbf{Gl. 6.1}$$

rV: *relative Vulnerabilität (%)*
rM: *relative Mortalität (%)*
H: *Anzahl der Tage pro Jahr (d)*
Z: *Zeitraum*
BK: *thermische Belastungsklasse*

Da die relative Vulnerabilität das Produkt aus relativer Mortalität und Auftretenshäufigkeit eines Ereignisses ist, überwiegt für „*mäßige Wärmebelastung*“ der Effekt des Sensitivitätsrückganges. Daher sank die relative Verwundbarkeit für diese Belastungsklasse leicht. Für „*starke Wärmebelastung*“ kam es zu einer deutlichen Erhöhung der relativen Vulnerabilität durch die Verdoppelung der Häufigkeit ohne Änderung der Sensitivität (Tab. 6.3). Durch einen Sensitivitätsrückgang bei relativ unveränderten Häufigkeiten ging die relative Verwundbarkeit für „*leichten*“ und „*mäßigen Kältestress*“ zurück.

Tab. 6.3: Änderung der relativen Vulnerabilität für thermische Belastung unter Berücksichtigung der mit den stärksten Mortalitätsauswirkungen einhergehenden zeitlichen Verschiebungen in Baden-Württemberg

	1969-1983			1988-2002			Änderung Vulnerabilität	
	Sensitivität (%)	Anzahl Tage/Jahr (d)	Vulnerabilität	Sensitivität (%)	Anzahl Tage/Jahr (d)	Vulnerabilität	rel. (%)	abs.
mäßiger KS	8,5	2,7	23,3	7,1	2,8	19,7	-15,2	-3,6
leichter KS	2,0	110,1	219,1	0,8	99,2	81,3	-62,9	-137,8
Komfort	-0,8	155,5	-119,7	-0,6	156,6	-89,3	25,4	30,5
leichte WB	0,5	61,3	33,1	1,3	64,3	80,4	142,8	47,3
mäßige WB	6,4	33,3	212,5	5,2	37,6	195,7	-7,9	-16,8
starke WB	12,6	2,1	26,8	13,0	4,5	57,9	115,7	31,1

KS: Kältestress
WB: Wärmebelastung

Für eine Betrachtung der Verwundbarkeit der Bevölkerung insgesamt ist die relative Vulnerabilität ungeeignet, da sie auf den relativen Abweichungen von der erwarteten Mortalität beruht. Letztere ist sowohl jahreszeitlichen Schwankungen als auch langfristigen Trends durch Änderungen in der Bevölkerungszahl und der Lebenserwartung unterworfen. Ist die Populationsgröße bekannt, kann daher basierend auf der Abweichung der Sterbefallzahlen vom Erwartungswert pro 100.000 Einwohner (absolute Änderung der Mortalität) die absolute Vulnerabilität berechnet werden.

Abgesehen von „*Komfortbedingungen“* sowie „*leichter*“ und „*starker Wärmebelastung*“ ging die absolute Vulnerabilität der Bevölkerung in Baden-Württemberg für thermische Belastung zurück. Im Zeitraum 1969-1983 traten mit 6,6 Todesfällen pro Jahr und 100.000 Einwohnern die meisten thermisch bedingten Sterbefälle während „*leichtem Kältestress*“ auf (Tab. 6.4). Im Gegensatz dazu war im zweiten Zeitraum die Klasse „*mäßige Wärme-*

belastung“ diejenige mit der höchsten Anzahl thermisch bedingter Sterbefälle (4,6 pro Jahr und 100.000 Einwohner).

Tab. 6.4: Änderung der absoluten Vulnerabilität für thermische Belastung unter Berücksichtigung der mit den stärksten Mortalitätsauswirkungen einhergehenden zeitlichen Verschiebungen (Baden-Württemberg)

	1969-1983			1988-2002			Änderung Vulnerabilität	
	abs. Sensitivität*	Anzahl Tage/Jahr (d)	Vulnerabilität*	abs. Sensitivität*	Anzahl Tage/Jahr (d)	Vulnerabilität*	rel. (%)	abs.*
mäßiger KS	0,21	2,7	0,58	0,20	2,8	0,55	-5,49	-0,03
leichter KS	0,06	110,1	6,61	0,03	99,2	2,58	-60,96	-4,03
Komfort	-0,02	155,5	-3,11	-0,01	156,6	-2,19	29,49	0,92
leichte WB	0,01	61,3	0,86	0,03	64,3	1,93	124,77	1,07
mäßige WB	0,17	33,3	5,52	0,12	37,6	4,55	-17,48	-0,97
starke WB	0,32	2,1	0,69	0,30	4,5	1,36	95,55	0,67
gesamt			**11,15**			**8,78**	**-21,28**	**-2,37**

* *Sterbefälle pro 100.000 Einwohner*
KS: Kältestress
WB: Wärmebelastung

Insgesamt ging die absolute Vulnerabilität um 21% oder 2,37 Sterbefälle pro Jahr und 100.000 Einwohner zurück. Dieser Rückgang ist vor allem durch eine Abnahme der kältebedingten Mortalität (mindestens „*leichter Kältestress*“) von 7,2 auf 3,1 Sterbefälle pro 100.000 Einwohner und Jahr zurückzuführen. Bei der wärmebedingten Mortalität (mindestens „*leichte Wärmebelastung*“) kam es hingegen zu einer leichten Zunahme der absoluten Vulnerabilität von jährlich 7,1 auf 7,8 Sterbefällen pro 100.000 Einwohner.

6.1.1.5 Trends der relativen Mortalität im Jahresverlauf

Da bei der Abschätzung der thermischen Belastung die kurzfristige Anpassung an die lokalen Witterungsverhältnisse der letzten Tage und Wochen bereits berücksichtigt wurde und die Vorverlegung des Sterbezeitpunktes in Baden-Württemberg für Wärmebelastung eine untergeordnete Rolle spielt, sollten Trends der relativen Mortalität im Jahresverlauf nicht auftreten.

Für „*mäßige*“ und „*starke Wärmebelastung*“ zeichnen sich leichte positive Trends im Jahresverlauf ab (Abb. 6.5). Diese sind jedoch nicht signifikant. Dabei fallen die ungewöhnlich hohen relativen Mortalitäten um den 220. Tag des Jahres bei „*mäßiger Wärmebelastung*“ auf. Diese traten ausnahmslos im August 2003 auf. Der August 2003 war durch eine ungewöhnlich lange Periode heißer, trockener Witterung geprägt, die zu langanhaltender „*mäßiger*“ und „*starker Wärmebelastung*“ führte.

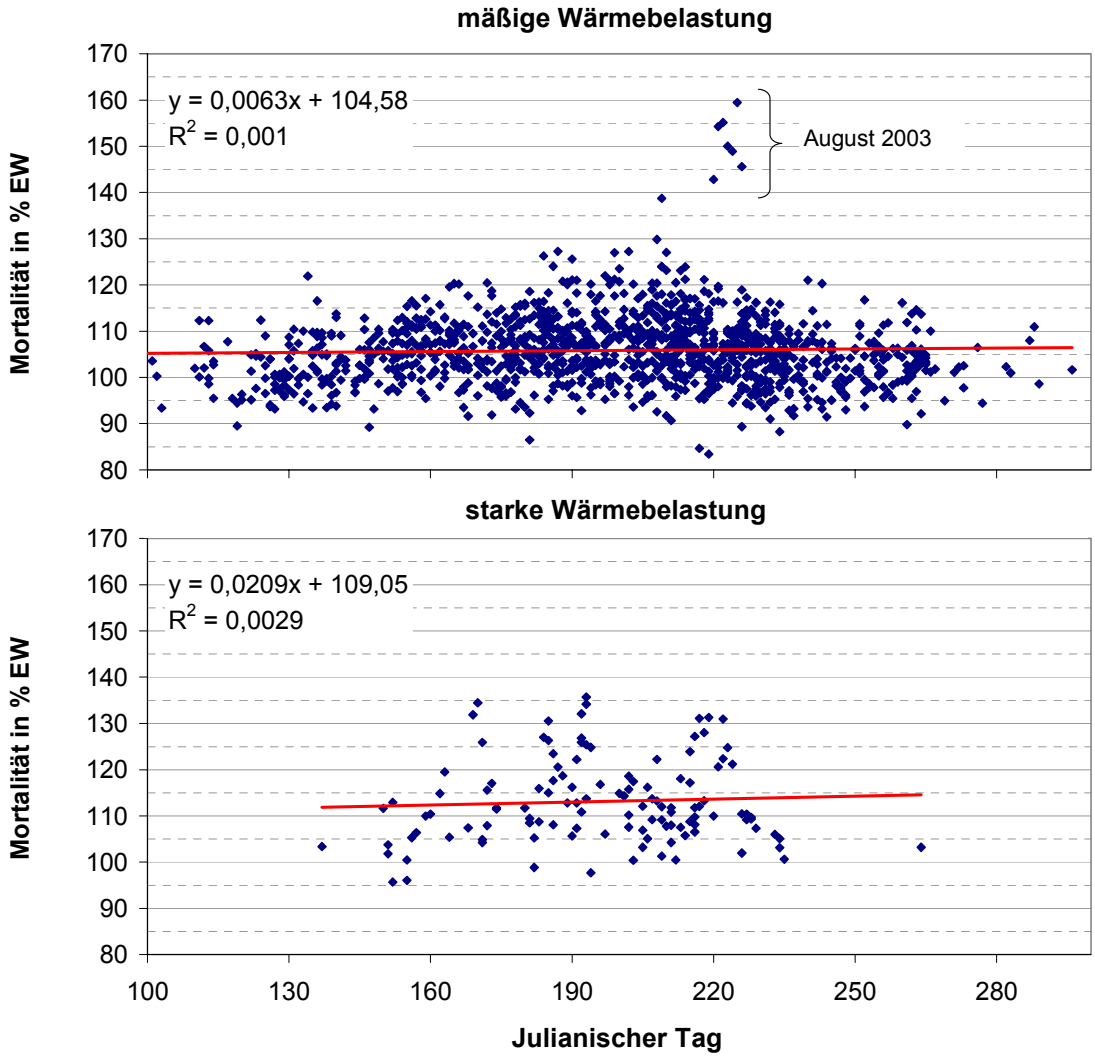


Abb. 6.5: Trends der relativen Mortalität im Jahresverlauf (Baden-Württemberg, 1968-2003). *R^2: Bestimmtheitsmaß*

6.1.2 Altersspezifische Mortalität

6.1.2.1 Auswirkungen thermischer Belastung auf die relative Mortalität

Alle Altersgruppen zeigen einen Anstieg der relativen Mortalität mit zunehmender Wärmebelastung (Abb. 6.6). Die Unterschiede in der Mortalität zwischen benachbarten Belastungsklassen sind in der Regel signifikant. Ausgenommen hiervon ist die Altersklasse der „*unter 40-Jährigen*“ und die mittlere relative Mortalität zwischen den Belastungsklassen „*mäßiger Kältestress*“ und „*leichter Kältestress*“ in allen Altersklassen.

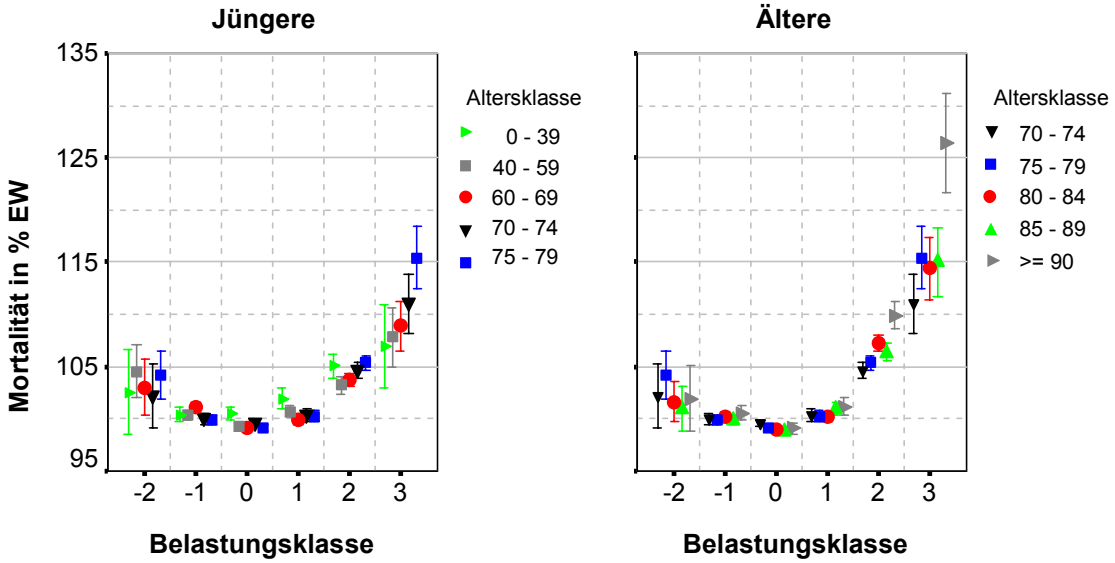


Abb. 6.6: Relative Mortalität nach Altersklassen ohne Berücksichtigung der Zeitverschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalität (Baden-Württemberg). *Die Altersklassen 70-74 Jahre und 75-79 Jahre sind für Vergleichszwecke in beiden Diagrammen aufgeführt. EW: Erwartungswert; -2: mäßiger Kältestress (KS); -1: leichter KS; 0: Komfortbedingungen; 1: leichte Wärmebelastung (WB); 2: mäßige WB; 3: starke WB; Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes*

Der Anstieg in der Mortalität mit zunehmender Wärmebelastung verläuft für die Altersklassen bis 70 Jahre ähnlich, wobei der Trend erkennbar ist, dass sich mit zunehmendem Alter die Sensitivität für Wärmebelastung erhöht. Deutlich höhere Sensitivitäten zeigt die Altersklasse der „*über 90-Jährigen*“. Ein weiterer „*Sprung*“ ist beim Übergang zu den „*über 75-Jährigen*“ zu erkennen. Daher werden für weitere Untersuchungen aus Gründen der Übersichtlichkeit die Altersklassen zu den „*unter*“ und den „*über 75-Jährigen*“ zusammengefasst. Diese Zusammenfassung hat zudem den Vorteil, dass in beiden durch die

Aggregation entstandenen Gruppen im Zeitraum 1968-2003 jeweils über 1,5 Millionen Todesfälle aufgetreten sind. Dies ist eine ausreichend hohe Anzahl, um stabile Schätzungen zu erhalten.

Die Unterschiede zwischen den mittleren Sensitivitäten für die einzelnen thermischen Belastungsklassen der Altersgruppen der über und der „*unter 75-Jährigen*“ sind bis auf „*leichten Kältestress*“ und „*leichte Wärmebelastung*“ signifikant (Tab. 6.5). Besonders deutlich sind die Unterschiede zwischen jung und alt bei mindestens „*mäßiger Wärmebelastung*“ beziehungsweise „*mäßigem Kältestress*“.

Tab. 6.5: Mittelwert der relativen Mortalität für die thermischen Belastungsklassen unter Berücksichtigung der mit den stärksten Mortalitätsauswirkungen einhergehenden zeitlichen Verschiebungen (Baden-Württemberg, 1968-2003). *In Klammern ist der Standardfehler des Mittelwertes angegeben; fett: signifikante Unterschiede zwischen den Klassenmittelwerten*

thermische Belastung	unter 75-Jährige (%)		über 75-Jährige (%)	
	relative Mortalität	Zeitverschiebung (d)	relative Mortalität	Zeitverschiebung (d)
mäßiger Kältestress	**104,0 (± 1,2)**	3	**108,4 (± 1,0)**	5
leichter Kältestress	101,3 (± 0,2)	6	101,6 (± 0,2)	6
Komfortbedingungen	**99,6 (± 0,1)**	0	**99,0 (± 0,1)**	0
leichte Wärmebelastung	100,8 (± 0,2)	0	100,7 (± 0,2)	0
mäßige Wärmebelastung	**104,2 (± 0,3)**	0	**107,2 (± 0,3)**	0
starke Wärmebelastung	**108,7 (± 0,9)**	0	**117,8 (± 1,3)**	0

Wie auch in den Daten der Gesamtbevölkerung erkennbar, ergibt sich für die beiden Altersgruppen während Wärmebelastungssituationen keine zeitliche Verschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalitätsanstieg (Abb. 6.7). Für Kältestress weisen die „*über 75-Jährigen*“ dieselbe Zeitverschiebung wie die Gesamtdaten auf (5-6 Tage). In der Altersgruppe unter 75 Jahren ist die zeitliche Verschiebung zwischen „*mäßigem Kältestress*“ und maximaler Mortalität etwas geringer als bei den über 75-Jährigen und beträgt nur noch 3-5 Tage, wobei das „*Optimum*“ bei drei Tagen liegt (Tab. 6.5).

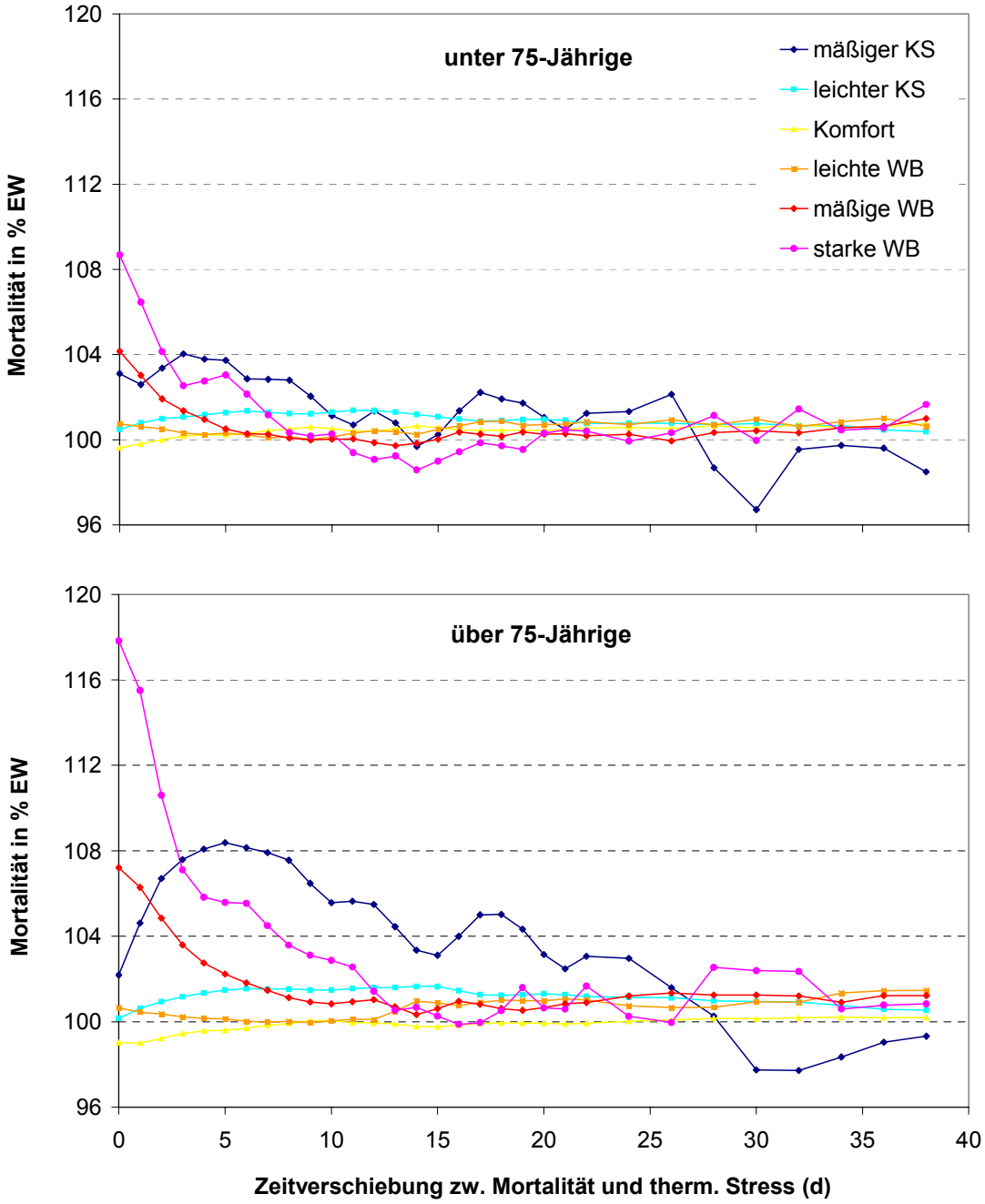


Abb. 6.7: Relative Mortalität nach Altersgruppen unterteilt für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Baden-Württemberg, 1968 - 2003). *EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

6.1.2.2 VORVERLEGUNG DES STERBEZEITPUNKTES

Im Gegensatz zur Gesamtbevölkerung kompensiert die Vorverlegung des Sterbezeitpunktes nach „*starker Wärmebelastung*“ in der Altersklasse der „*unter 75-Jährigen*“ etwa die Hälfte der zuvor aufgetretenen Übersterblichkeit (Tab. 6.6). Dieser Harvesting-Effekt ist nach ungefähr 20 Tagen abgeschlossen. Nach „*mäßiger Wärmebelastung*“ tritt bei den jüngeren Personen eine Vorverlegung des Sterbezeitpunktes von rund 36% der Übersterblichkeit auf (nicht dargestellt). Der infolge „*mäßigen Kältestresses*“ auftretende Harvesting-Effekt beträgt in der Altersklasse unter 75 Jahren rund 85% der Übersterblichkeit.

Tab. 6.6: Harvesting-Effekte nach „*starker Wärmebelastung*“ und „*mäßigem Kältestress*“ für die Altersgruppen der unter und über 75-Jährigen (Baden-Württemberg, 1968-2003)

Baden-Württemberg	unter 75-Jährige	über 75-Jährige	unter 75-Jährige	über 75-Jährige
	starke Wärmebelastung		mäßiger Kältestress	
mittlere Übersterblichkeit pro Tag (%)	3,1	5,9	1,9	4,3
an den Tagen (Anzahl Tage) (d)	0-7 (8)	0-12 (13)	0-12 (13)	0-26 (27)
Übersterblichkeit · Anzahl Tage	**25,1**	**76,5**	**24,9**	**117,2**
mittlere Untersterblichkeit pro Tag (%)	-1,4	-0,8	-1,9	-2,3
an den Tagen (Anzahl Tage) (d)	11-19 (9)	16-17 (2)	28-38 (11)	30-38 (9)
Untersterblichkeit · Anzahl Tage	**-12,7**	**-1,6**	**-21,2**	**-20,7**
Untersterblichkeit relativ zur Übersterblichkeit (%)	**50,7**	**2,1**	**85,4**	**17,7**

In der Altersgruppe der Menschen über 75 Jahren wird der Sterbezeitpunkt durch „*mäßigen Kältestress*“ um 4-5 Wochen nach vorne verlegt. Durch diese Vorverlegung werden rund 18% der Übersterblichkeit kompensiert (Tab. 6.6). Für „*mäßige*“ und „*starke Wärmebelastung*“ kann in der Altersklasse der „*über 75-Jährigen*“ hingegen der Harvesting-Effekt vernachlässigt werden (Abb. 6.7).

6.1.2.3 Auswirkung der Andauer thermischer Belastung

Die Andauer thermischer Belastung wirkt sich in beiden Altersgruppen unterschiedlich auf die Mortalität aus. Während in der Altersgruppe der „*unter 75-Jährigen*“ im Laufe einer länger andauernden Periode mit „*starker Wärmebelastung*“ erst langsam, dann stärker steigende Mortalität beobachtet wird, pendelt sich die Abweichung der Anzahl der Sterbefälle vom Erwartungswert bei den älteren Menschen nach 4 Tagen ein (Abb. 6.8). Durch die geringe Anzahl von Situationen mit einer mindestens 4 Tage andauernden „*starken Wärmebelastung*“ sind diese Ergebnisse jedoch nur beschränkt aussagekräftig.

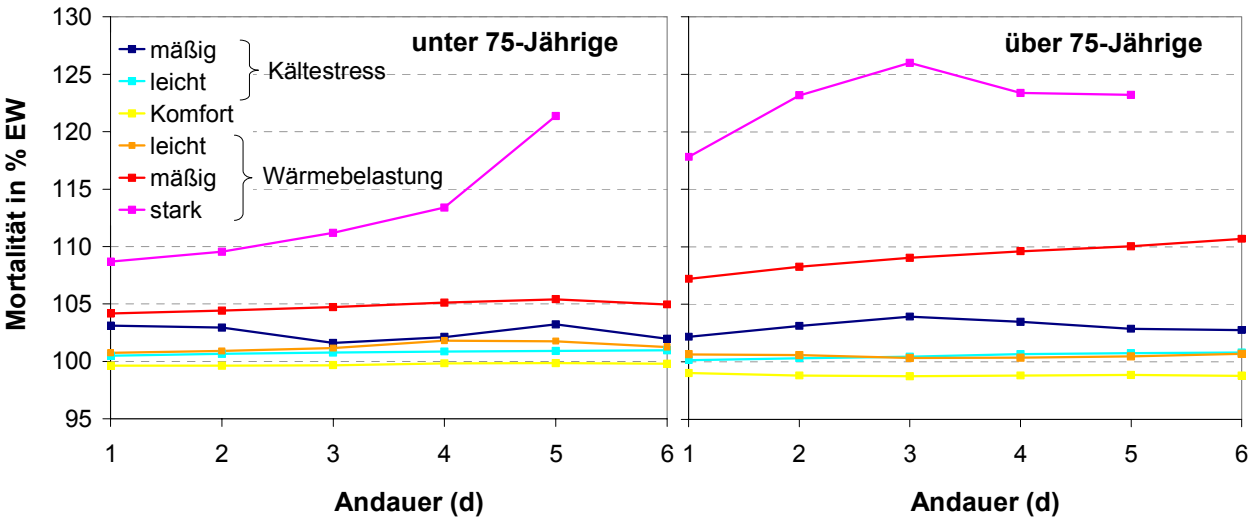


Abb. 6.8: Auswirkung der Andauer thermischer Belastung auf die mittlere relative Mortalität (Baden-Württemberg, 1968 - 2003). *EW: Erwartungswert*

In der Altersgruppe der „*unter 75-Jährigen*“ geht lange andauernde „*mäßige Wärmebelastung*“ nur mit einer geringen Erhöhung der Mortalität einher. Bei den Personen über 75 Jahren macht sich hingegen eine längere Andauer dieser Belastungsklasse in einem deutlichen Anstieg der Sterbefallzahlen bemerkbar. So verursacht bei „*mäßiger Wärmebelastung*“ eine Andauer von 6 Tagen eine Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert von etwa 11%, was ungefähr dem 1,5-fachen eines eintägigen Ereignisses entspricht.

6.1.3 Geschlechtsspezifische Mortalität

Im Zeitraum 1968-2003 reagierten Frauen in der Regel etwas sensitiver auf thermische Belastung als Männer (Tab. 6.7). Diese Unterschiede sind für „*Komfortbedingungen*“ und „*mäßige*“ sowie „*starke Wärmebelastung*“ signifikant. Dass Frauen empfindlicher auf eine Abweichung vom Optimum reagieren, steht in Einklang mit Fanger (1972).

Tab. 6.7: Mittlere relative Mortalität der einzelnen thermischen Belastungsklassen für Männer und Frauen unter Berücksichtigung der mit den stärksten Mortalitätsauswirkungen einhergehenden zeitlichen Verschiebungen (Baden-Württemberg, 1968-2003). *In Klammern ist der Standardfehler des Mittelwertes angegeben, fett: signifikante Unterschiede zwischen den Klassenmittelwerten*

thermische Belastung	Männer		Frauen	
	relative Mortalität (%)	Zeitverschiebung (d)	relative Mortalität (%)	Zeitverschiebung (d)
mäßiger Kältestress	105,6 (± 1,2)	4	106,3 (± 1,1)	5
leichter Kältestress	101,3 (± 0,2)	5	101,5 (± 0,2)	5
Komfortbedingungen	**99,2 (± 0,1)**	0	**99,7 (± 0,1)**	0
leichte Wärmebelastung	101,1 (± 0,2)	0	100,9 (± 0,2)	0
mäßige Wärmebelastung	**105,3 (± 0,2)**	0	**106,7 (± 0,3)**	0
starke Wärmebelastung	**111,7 (± 0,8)**	0	**114,8 (± 1,1)**	0

Die zeitliche Verschiebung zwischen thermischer Belastung und maximaler Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert unterscheidet sich für beide Geschlechter in der Regel nicht und entspricht somit der für die Gesamtdaten gefundenen zeitlichen Verschiebung (Tab. 6.7). Auch bei der Vorverlegung des Sterbezeitpunktes um wenige Tage oder Wochen gibt es zwischen Männern und Frauen keine signifikanten Unterschiede (Abb. 6.9; Tab. A 4, S.199). Lediglich die Auswirkung der Andauer ist bei Frauen etwas stärker ausgeprägt als bei Männern (Abb. 6.10). Die Unterschiede sind in der Regel jedoch nicht signifikant.

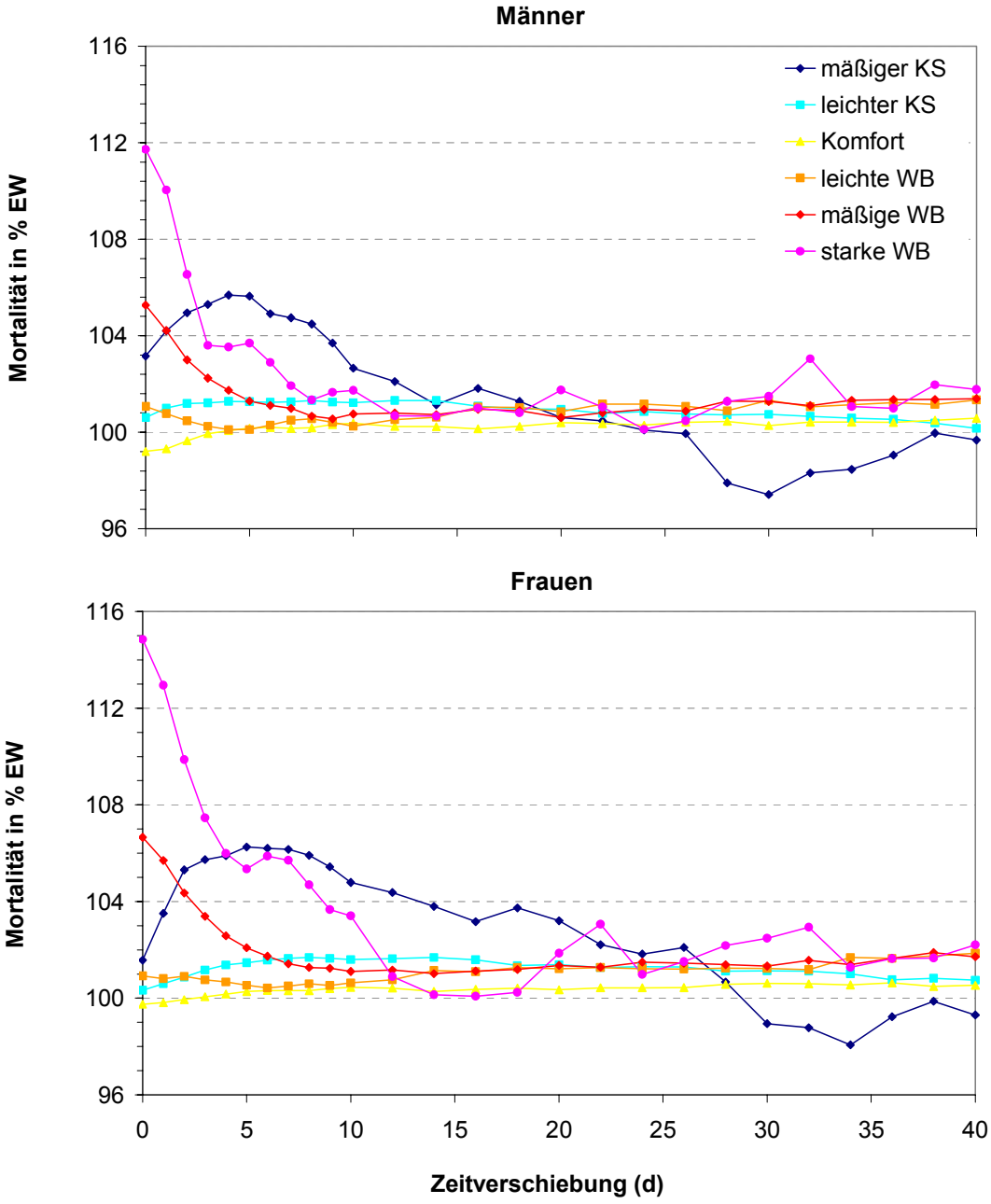


Abb. 6.9: Relative Mortalität von Männern und Frauen für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Baden-Württemberg, 1968 - 2003). *EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

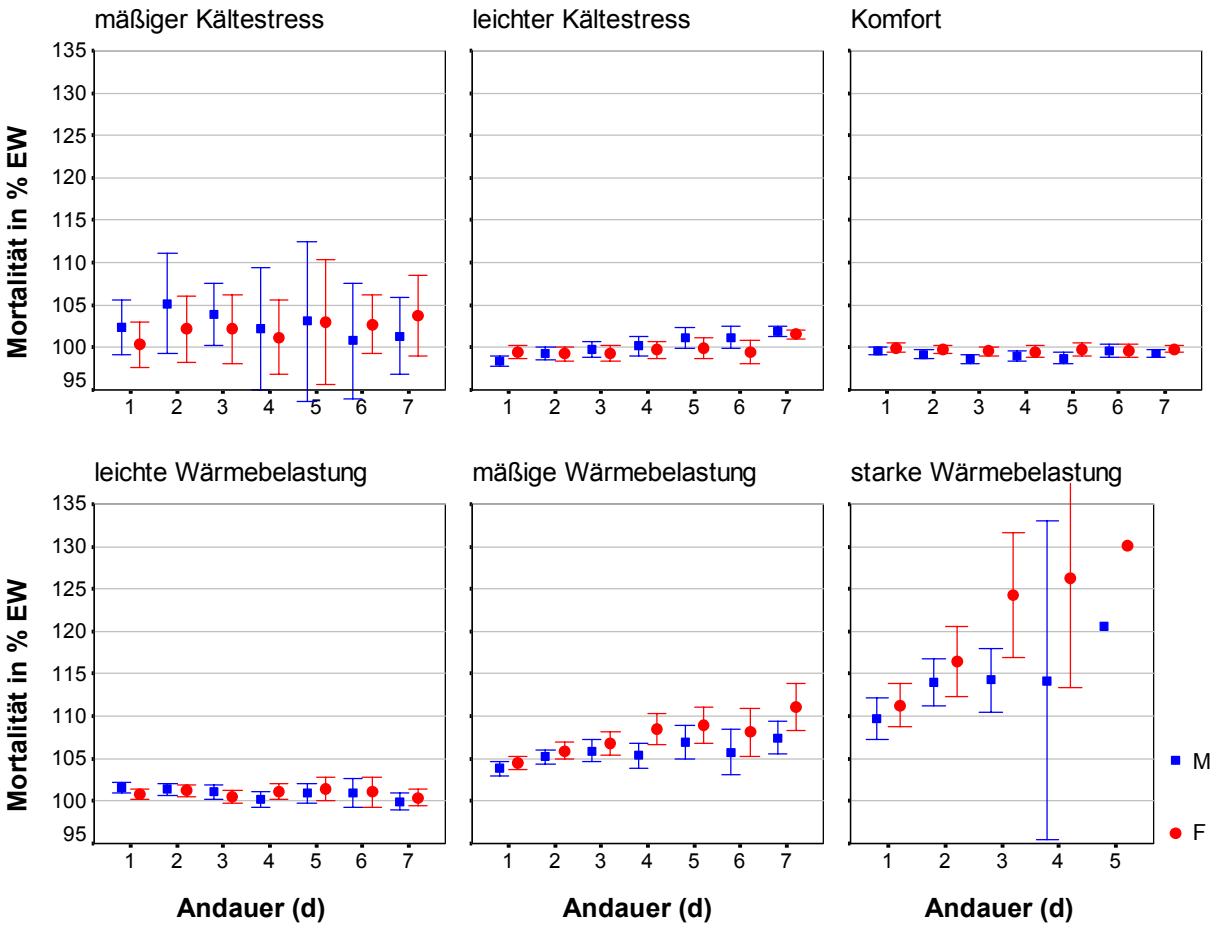


Abb. 6.10: Auswirkung der Andauer thermischer Belastung auf die mittlere relative Mortalität für Männer (M) und Frauen (F) (Baden-Württemberg, 1968 - 2003). *EW: Erwartungswert; Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes*

6.2 Vergleich verschiedener Regionen in Europa

6.2.1 Auswirkung thermischer Belastung auf die relative Mortalität

HeRATE lässt sich auch für den Vergleich von Zeitreihen aus unterschiedlichen klimatischen Regionen verwenden. Für diese Studie standen Daten der Gefühlten Temperatur und der Mortalität aus London, den Niederlanden, Baden-Württemberg, Budapest, Lissabon und Madrid zur Verfügung. Die Zeitreihen hatten jedoch unterschiedliche Längen. Für den Zeitraum vom 01. Januar 1986 bis zum 31. Dezember 1996 waren für alle Orte beziehungsweise Regionen Daten vorhanden. Daher werden die meisten der vergleichenden Analysen für diesen Zeitraum durchgeführt. Die entsprechenden Tabellen und Abbildungen für die kompletten vorhandenen Zeitreihen befinden sich im Anhang.

Thermisch neutrale Bedingungen sind in allen untersuchten Regionen die Klasse mit der größten Auftretenswahrscheinlichkeit. In den feucht-gemäßigten Gebieten dominiert daneben die Belastungsklasse „*leichter Kältestress*“ und in den Gebieten mit warmen, sommertrockenem Klima dominieren neben den „*Komfortbedingungen*“ „*leichte*“ und „*mäßige Wärmebelastung*“. In Madrid ist zusätzlich der „*leichte Kältestress*“ von Bedeutung. Ursache hiervon ist die relativ hohe Lage von Madrid (667 m über NN) (Tab. 6.8; Tab. A 5, S.199). Situationen mit „*extremem Kältestress*“ kamen in den untersuchten Regionen gar nicht und Situationen mit „*starkem Kältestress*“ und „*extremer Wärmebelastung*“ nur sehr selten vor.

Die zeitliche Verschiebung zwischen dem Auftreten einer thermischen Belastungssituation und den stärksten Auswirkungen auf die Mortalität beträgt für thermischen Komfort und Wärmbelastungsbedingungen in allen untersuchten Gebieten in der Regel 0-1 Tag. Für Kältestress liegt die Zeitverschiebung meist zwischen 2 und 8 Tagen. Die Anstiege der Mortalität für Madrid bei „*mäßigem*“ und „*leichtem Kältestress*“ zeigen zwei fast gleichberechtigte Spitzen: eine am Tag der Belastung und eine 3 Tage danach (Tab. 6.9).

Tab. 6.8: Relative Häufigkeiten der thermischen Belastungsklassen (1986-1996)

Belastungsklasse	London (%)	Niederlande (%)	Baden-Württemberg (%)	Budapest (%)	Lissabon (%)	Madrid (%)
starker Kältestress	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
mäßiger Kältestress	0,20	1,89	0,95	3,11	0,00	0,18
leichter Kältestress	26,85	24,76	26,95	30,29	5,33	26,80
Komfortbedingungen	54,85	53,26	43,53	32,03	47,93	29,41
leichte Wärmebelastung	13,94	13,44	17,10	19,29	27,50	18,98
mäßige Wärmebelastung	4,06	6,17	10,05	13,49	17,37	22,17
starke Wärmebelastung	0,10	0,47	1,42	1,77	1,87	2,44
extreme Wärmebelastung	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03

Tab. 6.9: Zeitverschiebung zwischen thermischer Belastung und stärksten Auswirkungen auf die Mortalität

Belastungsklasse	London 1976-1996 (d)	Niederlande 1979-1997 (d)	Baden-Württemberg 1968-2003 (d)	Budapest 1971-2000 (d)	Lissabon 1980-1998 (d)	Madrid 1986-1997 (d)
starker Kältestress				3		
mäßiger Kältestress	2	6	5	2-3		0 + 3[4]
leichter Kältestress	2-3	7-8	5-13[4]	3-4[4]	5-6	0 + 3
Komfortbedingungen	0	0[1]	0[1]	0[1]	1[1]	0[1]
leichte Wärmebelastung	0	0	0	0[1]	2-3[1]	1[1]
mäßige Wärmebelastung	0	0	0	0	0-1	0
starke Wärmebelastung	0	0	0	0	1	0
extreme Wärmebelastung					1[2]	10[2,3]

[1] *keine erhöhte Mortalität*

[2] *singuläres Ereignis*

[3] *ging anfangs mit relativen Mortalitäten unter dem Erwartungswert einher*

[4] *nur geringe Änderungen im Zeitverlauf*

In allen untersuchten Regionen ist „*starke Wärmebelastung*“ mit der größten Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert verbunden (Abb. 6.11; Abb. A 5, S.200). Besonders hohe relative Mortalitäten gab es in dieser Belastungsklasse in London, den Niederlanden sowie Lissabon mit 128, 120 beziehungsweise 118%. In den anderen untersuchten Regionen betrug die relative Mortalität während „*starker Wärmebelastung*“ 112-114% des Erwartungswertes. Dies veranschaulicht die hohe Sensitivität der Bevölkerung in allen untersuchten Gebieten für „*starke Wärmebelastung*“.

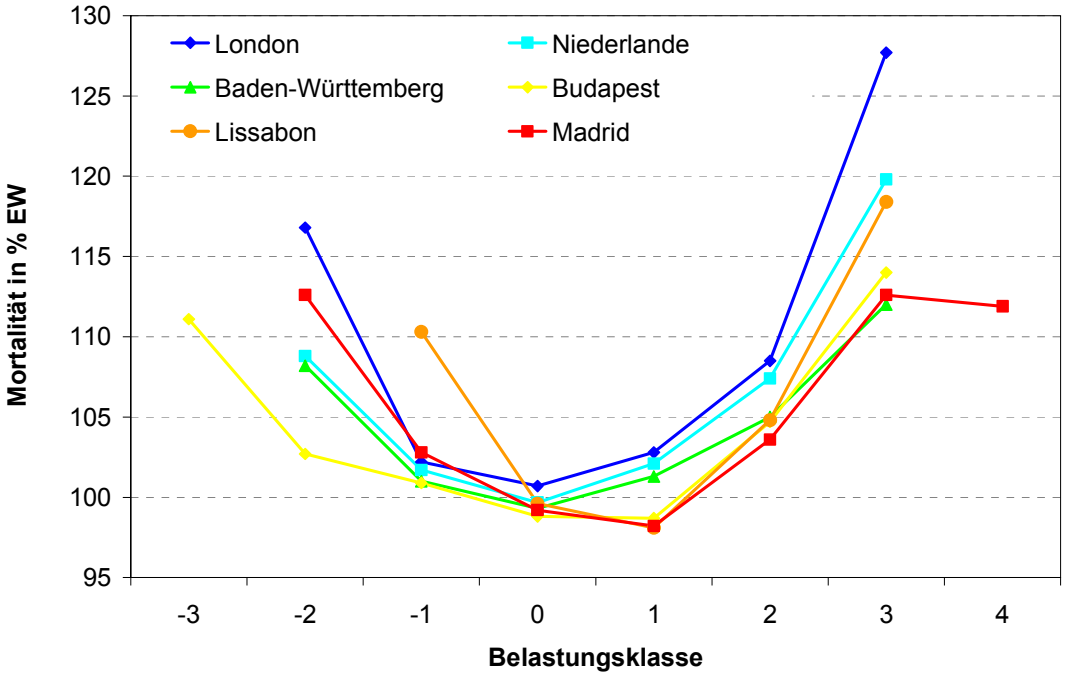


Abb. 6.11: Mittlere relative Mortalität für die unterschiedlichen thermischen Belastungsklassen unter Berücksichtigung der Zeitverschiebung mit den stärksten Auswirkungen auf die Mortalität (1986-1996). *EW: Erwartungswert; -3: starker Kältestress (KS); -2: mäßiger KS; -1: leichter KS; 0: Komfortbedingungen; 1: leichte Wärmebelastung (WB); 2: mäßige WB; 3: starke WB; 4: extreme WB*

Im Zeitraum 1986-1996 gab es in Madrid einen Tag mit „*extremer Wärmebelastung*“. Dieser ging unter der Berücksichtigung der Zeitverschiebung von 10 Tagen, für welche die stärksten Mortalitätsauswirkungen festgestellt werden konnte, mit einer Übersterblichkeit von 12% einher. Anfangs war er allerdings mit Untersterblichkeit verbunden (Abb. A 11, S. 204). Dieses Ergebnis sollte jedoch nicht überbewertet werden, da bei einem Einzelereignis immer die Möglichkeit besteht, dass es zufällig zustande gekommen ist. Im konkre-

ten Fall gingen dem Tag mit „*extremer Hitzebelastung*“ (02.08.1989) bereits zwei Perioden mit anhaltender „*starker Wärmebelastung*“ (17.07.-22.07.89 sowie 28.07.-01.08.89) und mittleren Übersterblichkeiten von 14% beziehungsweise 9% voraus.

Die Unterschiede zwischen den untersuchten Gebieten in der Sensitivität für „*mäßige Wärmebelastung*“ bis „*leichten Kältestress*“ sind mit Ausnahme von Lissabon bei „*leichtem Kältestress*“ gering. In Lissabon, Budapest und Madrid ist „*leichte Wärmebelastung*“ die Belastungsklasse mit der geringsten relativen Mortalität im Zeitraum 1986-1996. In den übrigen Regionen und bei Betrachtung der kompletten Zeitreihe (1971-2000) auch in Budapest treten während „*Komfortbedingungen*“ die wenigsten Todesfälle auf (Tab. 6.10; Abb A 5, S.200; Tab. A 6, S.201).

Tab. 6.10: Relative Mortalität für die Zeitverschiebungen mit den stärksten Auswirkungen auf die Mortalität (1986-1996)

Belastungsklasse	London (%)	Niederlande (%)	Baden-Württemberg (%)	Budapest (%)	Lissabon (%)	Madrid (%)
starker Kältestress				111,1		
mäßiger Kältestress	116,8	108,8	108,2	102,7		112,6
leichter Kältestress	102,2	101,7	101,0	100,9	110,3	102,8
Komfortbedingungen	100,7	99,7	99,3	98,8	99,6	99,2
leichte Wärmebelastung	102,8	102,1	101,3	98,7	98,1	98,2
mäßige Wärmebelastung	108,5	107,4	105,0	104,7	104,8	103,6
starke Wärmebelastung	127,7	119,8	112,0	114,0	118,4	112,6
extreme Wärmebelastung						111,9

Die Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert in den einzelnen Regionen während „*mäßigem Kältestress*“ unterscheiden sich hingegen wieder stark voneinander und liegen zwischen 3% in Budapest und 17% in London. In Budapest trat zudem noch ein Tag mit „*starkem Kältestress*“ auf, welcher mit einer Übersterblichkeit von 11% einherging. Auch dieses Ergebnis kann zufällig entstanden sein.

Insgesamt scheint die Sensitivität der Bevölkerung für eine thermische Belastung von der Häufigkeit der Belastungsklasse abhängig zu sein. Der Erklärungsanteil der relativen Häufigkeit einer Belastungsklasse an der relativen Mortalität beträgt für den Zeitraum 1986-1996 für alle untersuchten Zeitreihen zusammen gut 80% (Abb. 6.12).

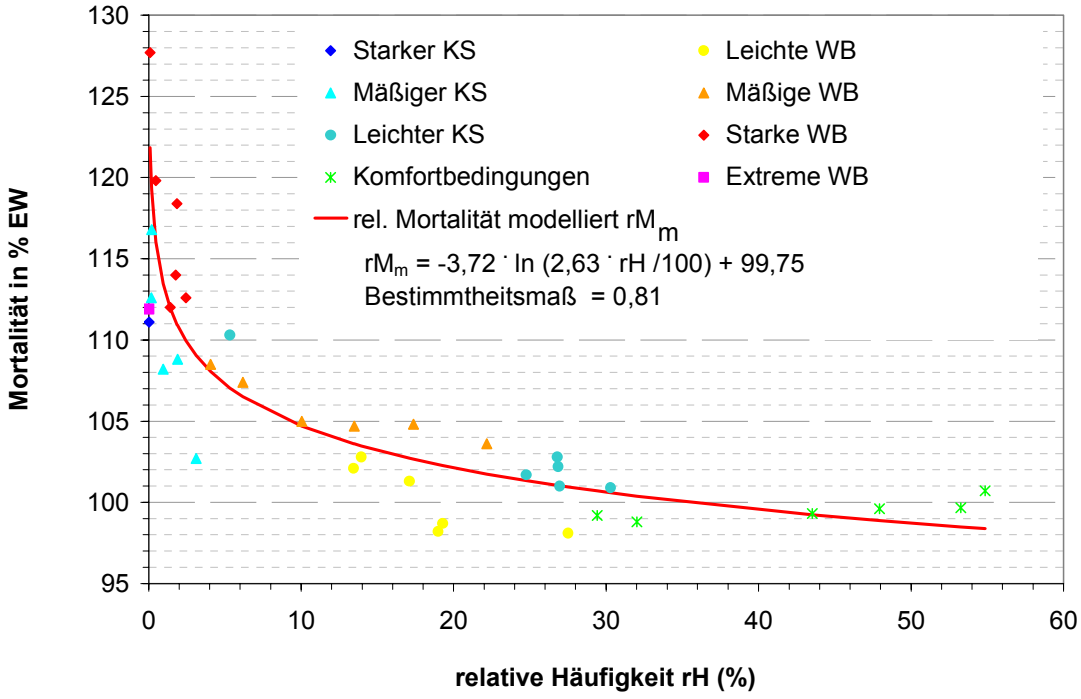


Abb. 6.12: Mittlere relative Mortalität in Bezug zur relativen Auftretenshäufigkeit einer Belastungsklasse (1986-1996). *EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

6.2.2 Vorverlegung des Sterbezeitpunktes

Nach „*starker Wärmebelastung*“ liegt die Mortalität in der Regel zwei bis drei Wochen signifikant über dem Erwartungswert. Im Schnitt ist die Anzahl der Sterbefälle pro Tag während dieser Periode um 5-8% erhöht. Im Anschluss tritt meist eine Phase mit Untersterblichkeit auf, während der pro Tag 1-3% weniger Menschen als erwartet sterben. Mit Ausnahme der Niederlande ist der Harvesting-Effekt nach „*starker Wärmebelastung*“ in allen untersuchten Gebieten feststellbar und nimmt Größenordungen zwischen 3% und 34% der Übersterblichkeit an. Die Phase mit Untersterblichkeit dauert zwischen 2 und 12 Tagen an. Der Todeszeitpunkt wird bis maximal 38 Tage „*vorverlegt*“ (Tab. 6.11; Abb. A 6 bis Abb. A 11, S. 202-204).

Tab. 6.11: Vorverlegung des Todeseintrittsdatums während „*starker Wärmebelastung*“ für die gesamten vorhandenen Zeiträume

starke Wärmebelastung	**London 1976-1996**	**Niederlande 1979-1997**	**Baden-Württemberg 1968-2003**	**Budapest 1971-2000**	**Lissabon 1980-1998**	**Madrid 1986-1997**
mittlere Übersterblichkeit pro Tag (%)	6,0	5,2	4,8	6,9	8,2	5,2
an den Tagen (Anzahl Tage) (d)	0-22 (23)	0-11 (12)	0-13 (14)	0-3 (4)	0-14 (15)	0-16 (17)
Übersterblichkeit · Anzahl Tage	**137,1**	**62,1**	**66,9**	**27,4**	**136,8**	**88,6**
mittlere Untersterblichkeit pro Tag (%)	-2,8		-1,0	-1,3	-1,2	-2,3
an den Tagen (Anzahl Tage) (d)	24-32 (9)		19-20 (2)	5-9 (5)	16-26 (11)	26-38 (13)
Untersterblichkeit · Anzahl Tage	**-25,3**		**-1,9**	**-6,7**	**-12,8**	**-30,3**
Untersterblichkeit relativ zur Übersterblichkeit (%)	**18,5**	**0,0**	**2,9**	**24,4**	**10,4**	**34,2**

Besonders stark ist der Harvesting-Effekt nach „*starker Wärmebelastung*“ in Madrid, Budapest und London ausgeprägt (Tab. 6.11). In Baden-Württemberg ist mit 3% eine sehr geringe Vorverlegung des Sterbezeitpunktes feststellbar und in den Niederlande trat nach Tagen mit „*starker Wärmebelastung*“ überhaupt keine Untersterblichkeit auf. Während nach „*mäßiger Wärmebelastung*“ in Lissabon und Budapest eine Vorverlegung des Sterbezeitpunktes 55% bzw. 35% der Übersterblichkeit ausmacht, ist in den restlichen untersuchten Gebieten kein Harvesting-Effekt in dieser Belastungsklasse feststellbar (Abb. A 6 bis Abb. A 11, S. 202-204).

Auch nach „*mäßigem Kältestress*“ sind mit Ausnahme von Madrid Harvesting-Effekte erkennbar (Tab. 6.12). In London liegt das Ausmaß dieser Vorverlegung des Todeszeitpunktes nach „*mäßigem Kältestress*“ mit knapp 20% in der gleichen Größenordnung wie nach „*starker Wärmebelastung*“. Während in den Niederlanden und in Baden-Württemberg die Vorverlegung des Todeszeitpunktes nach „*mäßigem Kältestress*“ wesentlich ausgeprägter als nach „*starker Wärmebelastung*“ ist, ist sie in Budapest deutlich geringer.

Tab. 6.12: Vorverlegung des Todeseintrittsdatums während „*mäßigem Kältestress*“ für die gesamten vorhandenen Zeiträume

mäßiger Kältestress	**London 1976-1996**	**Niederlande 1979-1997**	**Baden-Württemberg 1968-2003**	**Budapest 1971-2000**	**Lissabon 1980-1998**	**Madrid 1986-1997**
mittlere Übersterblichkeit pro Tag (%)	6,2	3,9	3,1	2,0		7,3
an den Tagen (Anzahl Tage) (d)	0-21 (22)	0-28 (29)	0-26 (27)	0-17 (18)		0-40 (41)
Übersterblichkeit · Anzahl Tage	**136,9**	**114,4**	**82,6**	**36,7**		**298,9**
mittlere Untersterblichkeit pro Tag (%)	-2,9	-1,4	-1,9	-1,4		
an den Tagen (Anzahl Tage) (d)	32-40 (9)	34-40 (7)	28-40 (13)	24-26 (3)		
Untersterblichkeit · Anzahl Tage	**26,2**	**-9,9**	**-24,5**	**-4,1**		
Untersterblichkeit relativ zur Übersterblichkeit (%)	**19,1**	**8,7**	**29,7**	**11,2**		**0,0**

6.2.3 Auswirkung der Andauer thermischer Belastung

Eine „*starke Wärmebelastung*“ wirkt sich in der Regel mit um so höheren Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert aus, je länger die belastende Situation andauert. Nur in Budapest scheint die Andauer in dieser Belastungsklasse ohne große Bedeutung zu sein (Abb. 6.13). In Lissabon steigt nach „*starker Wärmebelastung*“ die Mortalität erst an und fällt dann nach dem dritten Tag stark ab. In den Niederlanden, in Baden-Württemberg, Lissabon und Madrid steigen die täglichen Todesfallzahlen auch mit zunehmender Andauer „*mäßiger Wärmebelastung*“ leicht an. Bei „*leichter Wärmebelastung“* und neutralen Bedingungen spielt die Andauer in keinem der untersuchten Gebiete eine Rolle. Während die Anzahl der Tage in Folge mit „*leichtem Kältestress*“ vor allem in Lissabon und London von Bedeutung ist, wirkt sich die Andauer von „*mäßigem Kältestress*“ vor allem in Madrid negativ auf die Mortalität aus.

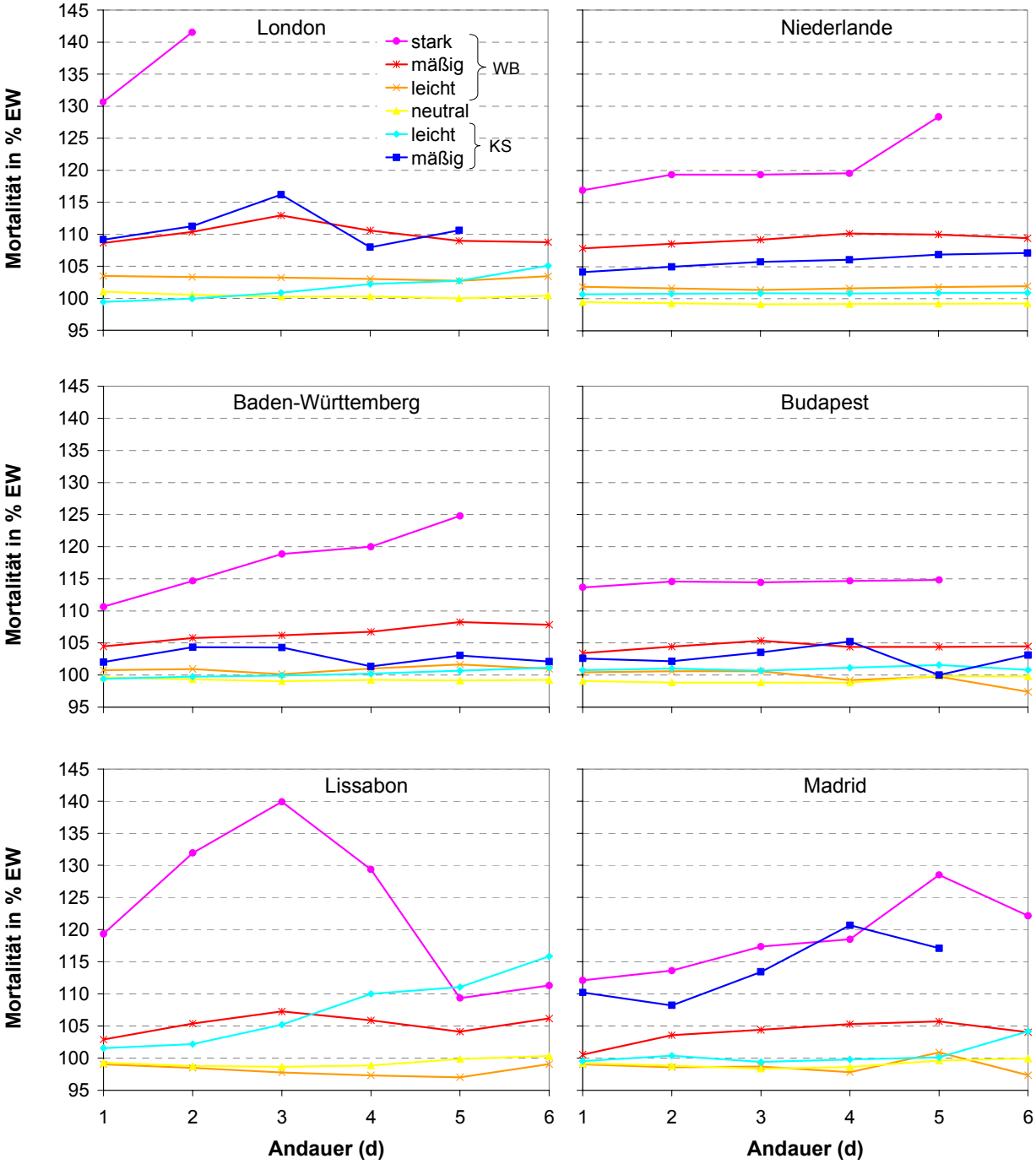


Abb. 6.13: Auswirkung der Andauer thermischer Belastungsklasse auf die mittlere relative Mortalität. *EW: Erwartungswert; WB: Wärmebelastung; KS: Kälte-stress*

6.2.4 Trends der relativen Mortalität im Jahresverlauf

In keiner der untersuchten Regionen zeigt sich eine signifikante Abhängigkeit der relativen Mortalität vom Tag des Jahres. Diese Abhängigkeit müsste sich in einem signifikanten Trend der Regressionsgeraden zwischen julianischem Tag und relativer Mortalität manifestieren (Tab. 6.13).

Tab. 6.13: Abhängigkeit der relativen Mortalität rM vom julianischen Tag JD (rM = a · JD + b) an Tagen mit starker Wärmebelastung für die gesamten Zeitreihenlängen. *R^2: Bestimmtheitsmaß*

Region	Trend (a)	Signifikanzniveau	Konstante (b)	Signifikanzniveau	R^2
London	0,10	0,77	114,36	0,10	0,010
Niederlande	-0,03	0,57	122,84	0,00	0,008
Baden-Württemberg	0,02	0,56	109,07	0,00	0,003
Budapest	-0,03	0,47	119,43	0,00	0,003
Lissabon	-0,04	0,51	126,23	0,00	0,004
Madrid	-0,01	0,84	117,34	0,00	0,000

6.2.5 Vulnerabilitätsvergleich

Aus Kenntnis der Auftretenshäufigkeit eines thermischen Stresses und der relativen Mortalität für diese Belastungsklasse lässt sich die relative Vulnerabilität der Bevölkerung in den einzelnen Gebieten ($rV_{G,BK}$) analog zu Gl. 6.1 berechnen.

$$\mathbf{rV_{G,BK} = (rM_{G,BK} - 100) \cdot rH_{G,BK}} \qquad \textbf{Gl. 6.2}$$

rV: *relative Vulnerabilität*
rM: *relative Mortalität (%)*
rH: *relative Häufigkeit einer Belastungsklasse (%)*
G: *Gebiet*
BK: *thermische Belastungsklasse*

Die so berechnete relative Vulnerabilität dient dem Vergleich von Zeitreihen. Sie hat den Vorteil, dass sie im Gegensatz zur absoluten Vulnerabilität nicht von der Höhe der Morta-

litätsrate beeinflusst ist. Dadurch, dass nicht für alle Regionen die Populationsgrößen ermittelt werden konnten, wurde auf eine Berechnung der jährlichen Anzahl der Sterbefälle pro Belastungsklasse und 100.000 Einwohner verzichtet. Dies hat auch zur Folge, dass ein Vergleich der absoluten Bedeutung der einzelnen thermischen Belastungsklassen nicht möglich ist.

Relativ gesehen ist für London der „*leichte Kältestress*“ und für die anderen Regionen die „*mäßige Wärmebelastung*“ mit den höchsten Mortalitätsauswirkungen verbunden. Im Vergleich der Orte untereinander ergibt sich kein einheitliches Bild. Während die Niederlande für „*mäßigen Kältestress*“ mit Abstand die stärkste Vulnerabilität aufweisen, ist dies für „*leichten Kältestress*“ Madrid gefolgt von London und Lissabon und für „*leichte Wärmebelastung*“ London. Für „*mäßige Wärmebelastung*“ und „*starke Wärmebelastung*“ haben Lissabon und Madrid verglichen mit den anderen Orten die höchsten relativen Vulnerabilitäten (Tab. 6.14).

Tab. 6.14: Relative Vulnerabilität ($rV_{G,BK}$) unter Berücksichtigung der zeitlichen Verschiebung mit den stärksten Auswirkungen auf die Mortalität (1986-1996)

Belastungsklasse	London	Niederlande	Baden-Württemberg	Budapest	Lissabon	Madrid
starker Kältestress	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
mäßiger Kältestress	12,3	60,7	28,4	30,6	0,0	8,3
leichter Kältestress	215,6	153,6	98,4	99,5	200,4	273,9
Komfortbedingungen	140,1	-64,2	-111,2	-140,3	-70,0	-85,9
leichte Wärmebelastung	142,5	103,0	81,1	-91,5	-190,7	-124,7
mäßige Wärmebelastung	126,0	166,7	183,4	231,4	304,3	291,3
starke Wärmebelastung	10,1	34,0	62,2	90,4	125,6	112,2
extreme Wärmebelastung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3

6.3 Auswirkungen von Klimaänderungen

6.3.1 Bestimmung der thermischen Belastung

Im Rahmen des KLARA Projektes (**Kl**imawandel, **A**uswirkungen, **R**isiken, **A**npassungen) der Landesanstalt für Umweltschutz in Baden-Württemberg wurden vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) Klimaszenarien für die Zeiträume 1951-2000 (Basisszenario) und 2001-2055 (Zukunftsszenario) für 245 Stationen in Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt. Die Berechnung dieser Szenarien für Baden-Württemberg erfolgte auf Basis eines statistischen Downscaling-Verfahrens analog zu dem von Gerstengarbe et al. (2003) vorgestellten Ansatz. Die Modelldaten des PIK umfassen folgende Informationen: Tagesmaximum, Tagesmittel und Tagesminimum der Lufttemperatur; Tagessummen des Niederschlags, der Sonnenscheindauer sowie der kurzwelligen Einstrahlung; Tagesmittel der relativen Luftfeuchtigkeit, des Luftdrucks in Stationshöhe, des Dampfdrucks, der Gesamtbedeckung und der Windgeschwindigkeit. Auf Basis dieser Daten wurden von Holst (2004) nach Parametrisierung der mittleren Strahlungstemperatur die Zeitreihen der Gefühlten Temperatur für den 12 UTC und den 06 UTC Termin ermittelt.

Ein Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der auf Basis dieser Modelldaten bestimmten Gefühlten Temperatur zeigt, dass für das Zukunftsszenario eine Verschiebung zu höheren GT-Werten stattfinden wird (Abb. 6.14). Es stellt sich daher die Frage, ob und in wie weit diese Verschiebung durch die kurzfristige Anpassung ausgeglichen werden kann. Bei einer vollständigen Kompensation der höheren Gefühlten Temperatur im Zukunftsszenario durch die kurzfristige Anpassung dürften sich die Häufigkeiten der einzelnen thermischen Belastungsklassen nicht ändern.

Die Bewertung der thermischen Situation in Baden-Württemberg erfolgte auf Basis der aus den Szenariendaten berechneten Gefühlten Temperatur auf Landkreisebene, um räumlich differenzierte Aussagen treffen zu können. Des Weiteren wurden die Landkreise in drei Höhenstufen (bis 399 m, 400-799 m und über 800 m über NN) unterteilt, um den unterschiedlichen thermischen Bedingungen in den verschiedenen Höhenlagen Rechnung zu tragen (Tab. A 7, S.205). Dafür wurde aus den Werten der Gefühlten Temperatur um 06 UTC und 12 UTC für jede Station die thermische Belastungsklasse ermittelt. Anschließend erfolgte die Berechnung der mittleren relativen Häufigkeiten der einzelnen thermischen Belastungsklassen für jede Höhenlage eines Landkreises.

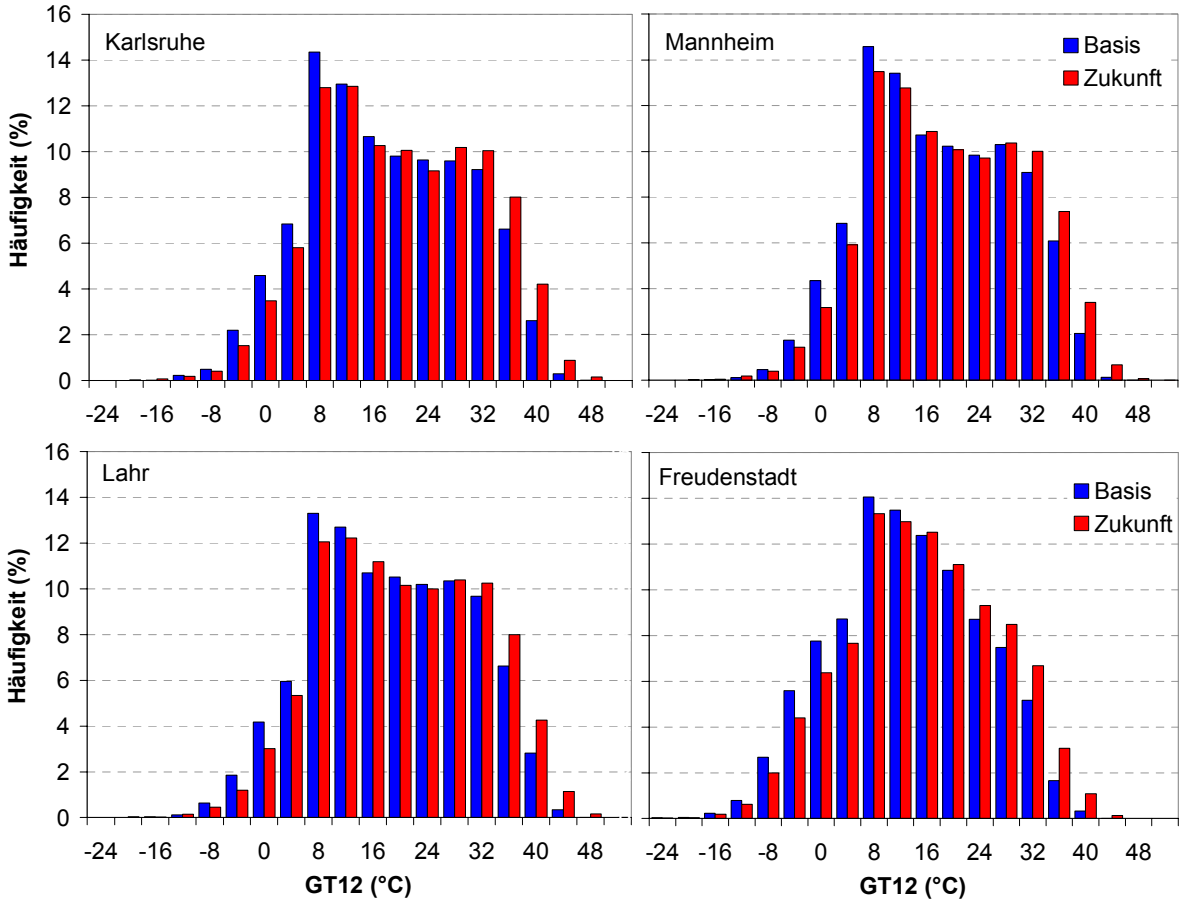


Abb. 6.14: Häufigkeitsverteilungen der Gefühlten Temperatur um 12 UTC (GT12) für das PIK-Basisszenario (1951-2000) und das PIK-Zukunftsszenario (2001-2055)

Relativ zum Basisszenario erhöht sich im gesamten Bundesland Baden-Württemberg in allen Höhenstufen die Zahl der Tage mit „*mäßiger*“ bis „*extremer Wärmebelastung*“ um 5 - 30% (Abb. 6.15). In den unteren und mittleren Höhenlagen kommt es vor allem im nördlichen Teil Baden-Württembergs und in den Landkreisen südlich von Ulm zu einer starken relativen Zunahme (> 20%) der Anzahl der Tage mit mindestens „*mäßiger Wärmebelastung*“. In den größeren Höhenlagen sind alle Landkreise mit Ausnahme von Lörrach von einem Anstieg der Häufigkeit der Wärmebelastung um mindestens 20% betroffen. Ein Teil dieses verhältnismäßig starken relativen Anstiegs ist in einigen Landkreisen auf das nicht allzu häufige Vorkommen von mindestens „*mäßiger Wärmebelastung*“ im Basiszeitraum zurückzuführen (Abb. A 12, S.206).

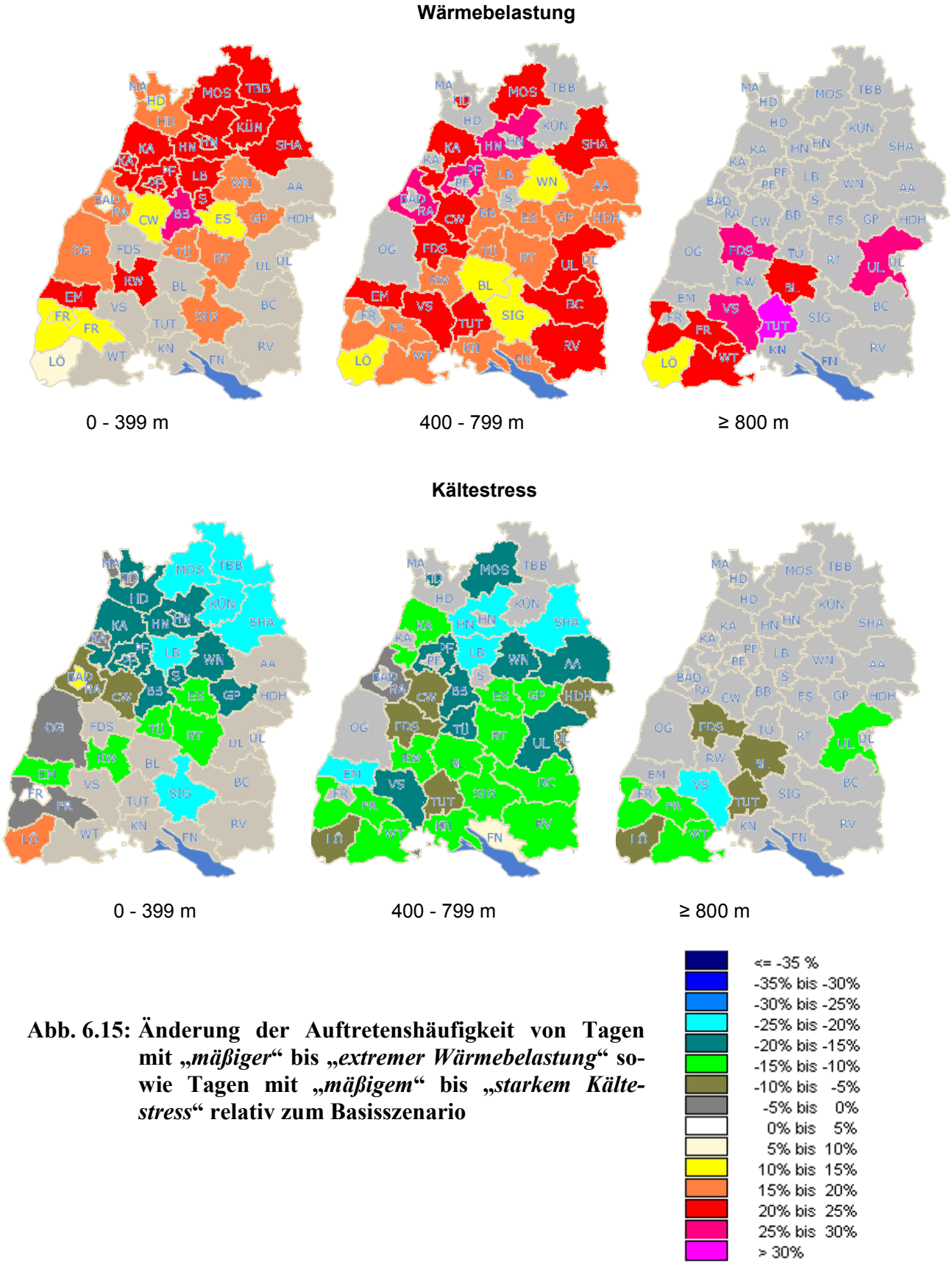


Abb. 6.15: Änderung der Auftretenshäufigkeit von Tagen mit „*mäßiger*“ bis „*extremer Wärmebelastung*“ sowie Tagen mit „*mäßigem*“ bis „*starkem Kältestress*“ relativ zum Basisszenario

Wird nur „*starke*“ und „*extreme Wärmebelastung*“ betrachtet, so erhöht sich die Anzahl der Tage in diesen Belastungsklassen relativ stärker als unter der oben vorgenommenen Betrachtung, welche auch die mäßige Belastung mit einschließt (Abb. 6.16). Durch die geringere Anzahl von Tage mit „*starker*“ und „*extremer Wärmebelastung*“ in den höheren Lagen fallen die Änderungen hier relativ gesehen stärker aus als in den tieferen Lagen.

Im Gegensatz zur Wärmebelastung geht die Anzahl der Tage mit Kältestress zurück. Der Anstieg der Zahl der Tage mit Wärmebelastung fällt jedoch relativ gesehen stärker aus, als der Rückgang des Kältestresses (Abb. 6.15).

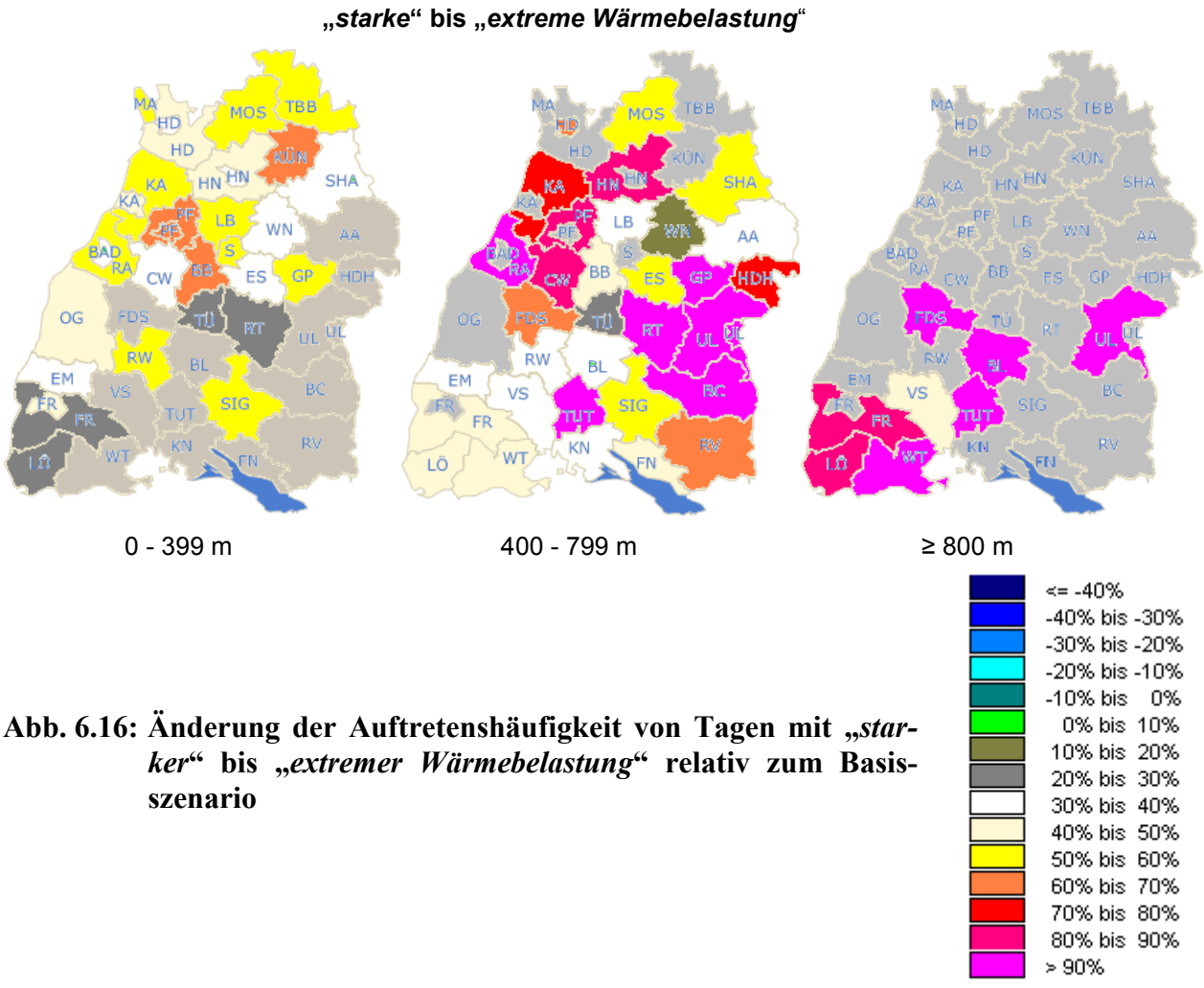


Abb. 6.16: Änderung der Auftretenshäufigkeit von Tagen mit „*starker*“ bis „*extremer Wärmebelastung*“ relativ zum Basisszenario

6.3.2 Bestimmung der Vulnerabilität der Bevölkerung

Um die Anfälligkeit der Bevölkerung für die Zunahme der relativen Häufigkeit von Wärmebelastung in Folge einer Klimaänderung abschätzen zu können, müssen Annahmen über die Sensitivität der Bevölkerung für die unterschiedlichen Belastungsstufen gemacht werden. Die Sensitivität hängt neben langfristigen Anpassungsmaßnahmen von der Altersstruktur der Bevölkerung ab. Diese kann als repräsentativ für verschiedene die Sensitivität bestimmenden Faktoren angesehen werden (Havenith, 1999). In Kapitel 6.1.2 konnte gezeigt werden, dass Personen über 75 Jahre wesentlich anfälliger auf mindestens mäßige thermische Belastung reagieren als jüngere Menschen. Da zudem Informationen über die Altersstruktur in den Landkreisen gut verfügbar sind und auch Vorrausrechnungen für den Anteil der „*über 75-Jährigen*“ an der Gesamtbevölkerung bis 2050 vorliegen, wurde die Alterstruktur als Indikator für die Sensitivität der Bevölkerung auf Landkreisebene ausgewählt. Die Abschätzungen über die Altersstruktur in den einzelnen Landkreisen während des Basis- sowie des Zukunftsszenarios wurden daher basierend auf Daten und Bevölkerungsvorausrechnungen des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg vorgenommen (Cornelius, I., 2003; Stein, U., 2003).

Für das gesamte Bundesland Baden-Württemberg wurde für den Zeitraum 1968-2003 die Sensitivität der Bevölkerung über und unter 75 Jahren für thermische Belastung bestimmt (Kapitel 6.1.2, S. 111). Unter der stark vereinfachenden Annahme, dass die Sensitivität in den einzelnen Kreisen nur von der Altersstruktur abhängig ist, wurden die Sensitivitäten auf Basis der auf Landesebene gefundenen Information auf die einzelnen Stadt- und Landkreise übertragen.

Als Maß für die Sensitivität der Bevölkerung wird die mittlere relative Mortalität herangezogen. Die relative Mortalität der Gesamtbevölkerung (rM_{ges}) für die unterschiedlichen Stufen thermischer Belastung in den einzelnen Stadt- und Landkreisen kann folgendermaßen bestimmt werden:

$$\mathbf{rM_{ges,LK} = A_{ü\,75,LK} \cdot rM_{ü\,75,BW} + A_{u\,75,LK} \cdot rM_{u\,75,BW}} \qquad \textbf{Gl. 6.3}$$

rM: *relative Mortalität*
A: *Anteil*
ges: *Gesamtbevölkerung*
u75: *unter 75-Jährige*
ü75: *über 75-Jährige*
LK: *Landkreis*
BW *Baden-Württemberg, gesamtes Bundesland*

In den 70er- und 90er-Jahren zeigten sich bei getrennter Betrachtung der beiden Altersgruppen keine signifikanten Trends der relativen Mortalität. Lediglich in den 80er-Jahren ergab sich für die Altersklasse der „*unter 75-Jährigen*“ während „*leichter Wärmebelastung*“ ein positiver Trend. Da die relative Mortalität der einzelnen Altersklassen nur sehr gering von Trends beeinflusst ist, wird hier angenommen, dass die Sensitivität für die unterschiedlichen thermischen Belastungsklassen im Zeitraum 1951-2000 sowie 2001-2055 im Mittel jener des Zeitraums 1968-2003 für die jeweilige Altersklasse entspricht. Durch den starken Anstieg des Anteils der über 75-Jährigen ist jedoch bis zum Jahr 2055 mit einer Zunahme der Sensitivität der Gesamtbevölkerung aufgrund der höheren Sensitivität der älteren Menschen für Wärmebelastung und Kältestress zu rechnen (Tab. 6.15). Für die unterschiedlichen Stadt- und Landkreise sind die relativen Mortalitäten in Tabelle A 8 und A 9 (S. 207 - S. 208) des Anhangs aufgelistet.

Tab. 6.15: Relative Mortalität für das gesamte Bundesland Baden-Württemberg für Basis- und Zukunftsszenario

thermische Belastung	relative Mortalität (%)	
	1951-2000	2001-2055
extremer Kältestress*	106,0	107,2
starker Kältestress*	106,0	107,2
mäßiger Kältestress	106,0	107,2
leichter Kältestress	101,4	101,4
Komfortbedingungen	99,4	99,2
leichte Wärmebelastung	100,7	100,7
mäßige Wärmebelastung	105,7	106,5
starke Wärmebelastung	113,1	115,5
extreme Wärmebelastung*	113,1	115,5

* *keine Abschätzung der relativen Mortalität auf Basis der vorhandenen Daten möglich*

Da während des Zeitraums, für den Mortalitätsdaten vorhanden sind (1968-2003), die Belastungsklassen „*extreme Wärmebelastung*“ sowie „*mäßiger*“ und „*starker Kältestress*“ nicht auftraten, werden für diese die gleichen relativen Mortalitäten wie für die nächsthöhere beziehungsweise nächstniedrigere Belastungsklasse angenommen. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass die relative Mortalität für die extremeren Belastungsklassen kleiner ist als für die bekannten. Dadurch wird bewusst konservativ der Einfluss der thermischen Umwelt auf die Sensitivität unterschätzt.

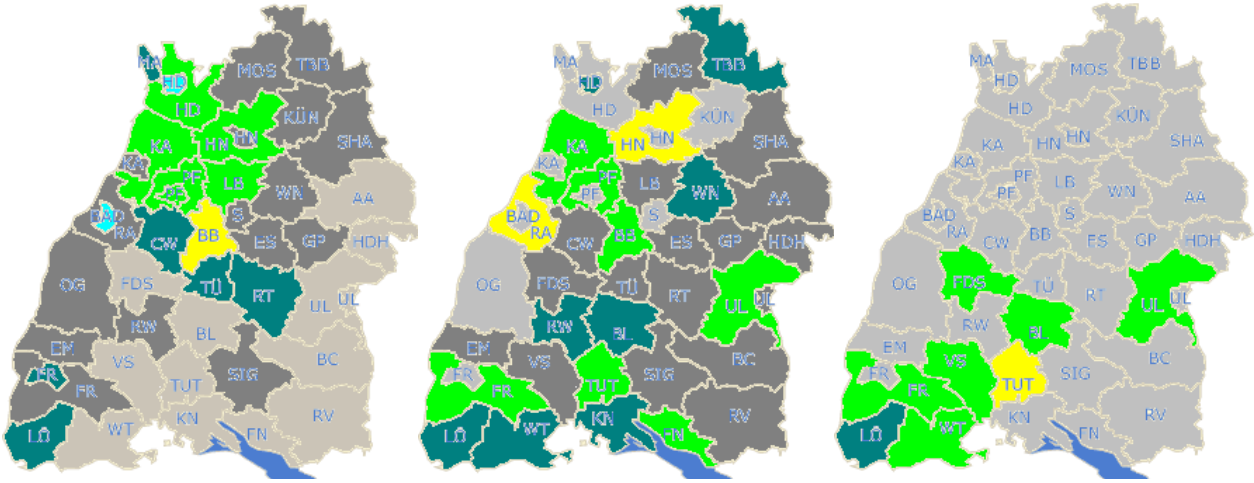
Die relative Vulnerabilität der Bevölkerung in den einzelnen Landkreisen ergibt sich wie oben beschrieben aus dem Produkt der relativen Mortalität und der Auftretenshäufigkeit einer thermischen Belastungsklasse (Gl. 6.3). Durch den Vergleich von Basis- und Zukunftsszenario lassen sich Änderungen in der Anfälligkeit der Bevölkerung für thermische Belastung aufdecken.

Für „*mäßige*“ bis „*extreme Wärmebelastung*“ ist in allen Landkreisen und allen Höhenlagen eine Zunahme der relativen Vulnerabilität um mindestens 20% zu erkennen (Abb. 6.17, oben). Am stärksten ist diese Zunahme in den tieferen Lagen der Landkreise Karlsruhe, Heidelberg, Heilbronn, Ludwigsburg und Böblingen sowie im Stadt- und Landkreis Pforzheim mit einem Anstieg der relativen Vulnerabilität um mindestens 50% ausgeprägt.

Werden nur die Belastungsklassen „*starke*“ und „*extreme Wärmebelastung*“ betrachtet (Abb. 6.17, unten), so fallen die Anstiege der relativen Vulnerabilität im Verhältnis zum Basisszenario wesentlich stärker aus als bei der Betrachtung von „*mäßiger*“ bis „*extremer Wärmebelastung*“. In den meisten Landkreisen erhöht sich die Verwundbarkeit für „*starke*“ und „*extreme Wärmebelastung*“ um mindestens 60%. Für mittlere und höhere Höhenlagen ist für einige Kreise sogar mit einer Verdoppelung der Vulnerabilität für diese beiden Belastungsklassen zu rechnen.

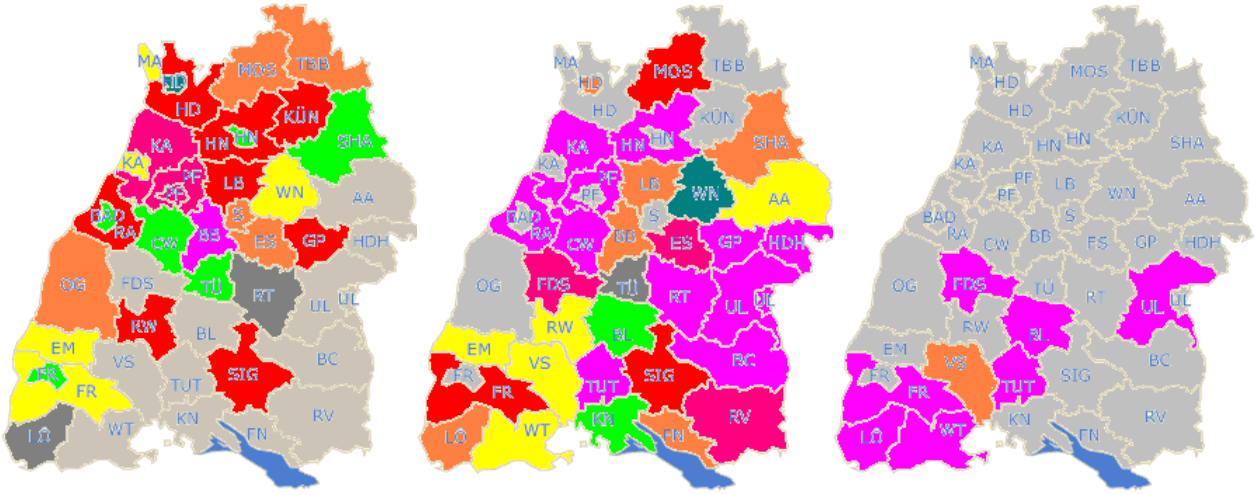
Über eine Abschätzung der erwarteten Mortalitätsraten ist es möglich, die absolute Vulnerabilität zu bestimmen. Hier werden zwei verschiedene Ansätze zur Bestimmung der erwarteten Mortalitätsraten verfolgt. Zum einen werden für den Anfang und das Ende der vorhanden Zeitreihe die Trends in den monatlichen Mortalitätsraten bestimmt und diese für die fehlenden Zeiträume fortgeschrieben (Ansatz „*Trend*“, Tab. 6.16). Der zweite Ansatz besteht darin anzunehmen, dass die mittlere monatliche Mortalitätsrate in den Zeiträumen vor und nach der vorhandenen Zeitreihe jener der ersten beziehungsweise der letzten fünf vorhandenen Jahre entspricht (Ansatz „*Mittel*“, Tab. 6.16).

„*mäßige*“ bis „*extreme Wärmebelastung*“



0 - 399 m | 400 - 799 m | ≥ 800 m

„*starke*“ und „*extreme Wärmebelastung*“



0 - 399 m | 400 - 799 m | ≥ 800 m

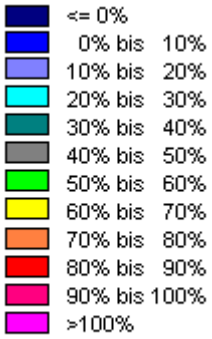


Abb. 6.17: Änderung der relativen Vulnerabilität im Zeitraum 2001-2055 für „*mäßige*“ bis „*extreme Wärmebelastung*“ sowie „*starke*“ und „*extreme Wärmebelastung*“ verglichen mit dem Basisszenario (1951-2000)

Tab. 6.16: Differenz der absoluten Vulnerabilität (pro 100.000 Einwohner und Jahr) zwischen Zukunfts- und Basisszenario für „*leichte*“ bis „*extreme Wärmebelastung*“ (Wärme) und „*leichten*“ bis „*extremen Kältestress*“ (Kälte) für die Ansätze „*Trend*“ und „*Mittel*“ zur Abschätzung der erwarteten Mortalitätsrate in Baden-Württemberg

Höhenstufe (m)	Trend			Mittel		
	Wärme	Kälte	Gesamt	Wärme	Kälte	Gesamt
< 400	2,20	-2,05	0,15	3,56	-1,03	2,53
400 – 799	1,47	-2,28	-0,81	2,52	-1,06	1,47
>= 800	1,45	-2,42	-0,97	2,24	-1,03	1,21

Beide Ansätze zur Abschätzung der erwarteten Mortalitätsrate prognostizieren einen Anstieg der wärmebedingten Mortalität („*leichte*“ bis „*extreme Wärmebelastung*“) und einen Rückgang der kältebedingten Mortalität („*leichter*“ bis „*extremer Kältestress*“). Das „*Trend*“-Verfahren schätzt höhere Mortalitätsraten für den Anfang des Basisszenarios (1951-1968) und niedrigere Mortalitätsraten für das Zukunftsszenario (2004-2055) (negativer Trend). Dadurch werden mit ihm die Änderungen der Anzahl der jährlichen Sterbefälle pro 100.000 Einwohner für Wärmebelastung geringer und für Kältestress höher eingeschätzt, als mit dem Verfahren, welches eine konstante Mortalitätsrate für den Basis- und Zukunftsszenarien-Zeitraum annimmt. Entsprechend ergibt das „*Trend*“-Verfahren eine Erhöhung der absoluten Vulnerabilität für thermische Belastung um 0,15 Sterbefälle pro Jahr und 100.000 Einwohnern nur für die tiefer gelegenen Gebiete Baden-Württembergs. Für die höher gelegenen Regionen prognostiziert es einen Rückgang der thermisch bedingten Sterbefälle. Im Gegensatz dazu sagt das „*Mittel*“-Verfahren, welches von konstant bleibenden Mortalitätsraten ausgeht, für alle Höhenstufen einen Anstieg der absoluten Vulnerabilität für thermische Belastung im Zukunftsszenarien-Zeitraum um jährlich 1,21 bis 2,53 Sterbefälle pro 100.000 Einwohner vorher.

6.4 Hitzebelastungsvorhersage

Das Verfahren zur Bewertung der thermischen Umwelt **HeRATE** kann auch für eine Hitzebelastungsvorhersage eingesetzt werden.

In allen untersuchten Gebieten ist eine mindestens „*starke Wärmebelastung*“ mit einer deutlichen Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert gekoppelt (Kapitel 6.2). Ohne Berücksichtigung der „*extremen Wärmebelastung*“, die insgesamt nur zweimal (einmal in Madrid und einmal in Lissabon) vorkam, war die „*starke Wärmebelastung*“ sogar diejenige Belastungsklasse, welche mit den stärksten Auswirkungen auf die Mortalität einherging. Daher kann für eine europaweite Vorhersage der Hitzebelastung das Kriterium „*mindestens starke Wärmebelastung*“ als Indikator für die Warnung verwendet werden.

Mittels seines lokalen Vorhersagemodells (LM) wird vom Deutschen Wetterdienst täglich die Gefühlte Temperatur für einen großen Teil West-, Mittel- und Südeuropas berechnet. Basierend auf diesen Daten lassen sich die thermischen Belastungsklassen wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben einen Tag im Voraus ermitteln (Abb. 6.18).

Für die Vorhersage ist keine Kalibrierung der Schwellenwerte mittels Mortalitätsdaten erforderlich, da durch die Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung die Belastungsstufen gemäß der regionalen Witterungsverhältnisse der letzten Wochen automatisch angepasst werden und eine „*starke Wärmebelastung*“ überall mit einer stark erhöhten Mortalität einhergeht. Es besteht jedoch die Möglichkeit, das System mittels Mortalitätsdaten weiter an die lokalen Gegebenheiten und an die Sensitivitätsmuster der Bevölkerung anzupassen. Für Baden-Württemberg konnte beispielsweise gezeigt werden, dass eine länger andauernde „*mäßige Wärmebelastung*“ die gleichen Auswirkungen auf die Mortalität hat wie ein Tag mit „*starker Wärmebelastung*“ (siehe Kapitel 6.1.1.3). Diese Information kann als zusätzliches Warnkriterium verwendet werden.

Um die Güte eines Vorhersagekriteriums zu testen, werden in der Medizin und der Umweltepidemiologie die Begriffe „*Sensitivität*“, „*Spezifität*“ sowie „*positiver*“ und „*negativer Vorhersagewert*“ verwendet. Die Berechnung dieser Größen lässt sich anhand einer Vierfeldertafel verdeutlichen (Abb. 6.19). Hierbei ist die Sensitivität des Testergebnisses nicht mit der Sensitivität der Bevölkerung für thermische Belastung zu verwechseln.

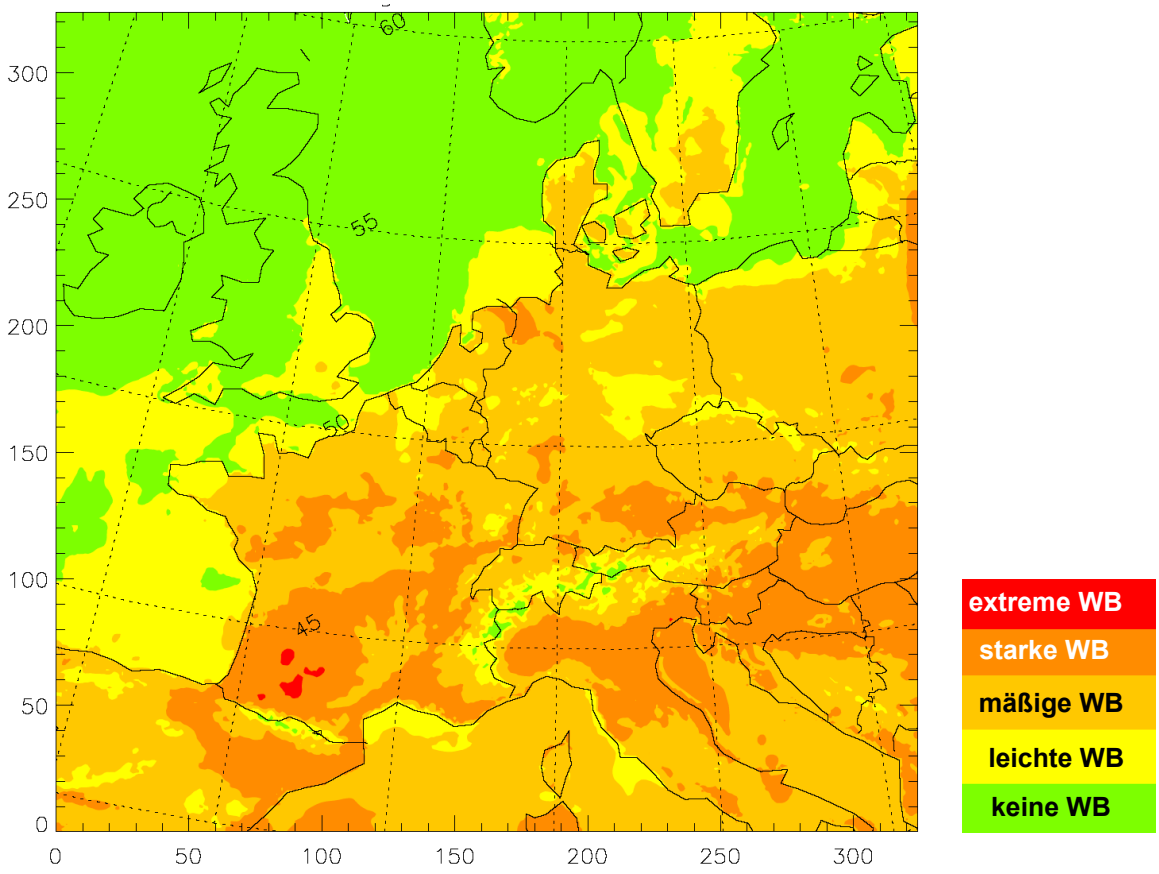


Abb. 6.18: Wärmebelastungsvorhersage für den 23.07.2004 ausgegeben vom Deutschen Wetterdienst am 22.07.2004. *WB: Wärmebelastung*

Mortalitätsanstieg

Warnung	JA	NEIN	
JA	**richtige Entscheidung A**	falsch positiv B	positiver Vorhersagewert $= \frac{A}{A+B}$
NEIN	falsch negativ C	**richtige Entscheidung D**	negativer Vorhersagewert $= \frac{D}{D+C}$
	Sensitivität $= \frac{A}{A+C}$	Spezifität $= \frac{D}{D+B}$	

Abb. 6.19: Vierfeldertafel zur Berechnung von Sensitivität, Spezifität sowie Vorhersagewert für ein positives bzw. negatives Testergebnis (nach Harms, 1998)

Unter der Sensitivität des Testergebnisses wird die Wahrscheinlichkeit verstanden, bei der eine erhöhte Sterbefallzahl auch mit einer Warnung einhergeht. Die Spezifität bezeichnet wiederum die Wahrscheinlichkeit, bei welcher eine „*normale*“ Anzahl von Todesfällen mit einem Fehlen einer Hitzewarnung verknüpft ist. Der positive Vorhersagewert sagt aus, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Hitzewarnung mit einer „*erhöhten*“ Mortalität einhergeht. Analog verhält es sich mit dem Vorhersagewert für das negative Testergebnis.

Die auf Basis dieser Vierfeldertafel berechneten Größen hängen unter anderem davon ab, wo die Grenze zwischen „*normaler*“ und „*erhöhter*“ Mortalität gezogen wird. Ein weiteres Problem ist, dass nicht jeder Mortalitätsanstieg ausschließlich auf „*starke Wärmebelastung*“ zurückzuführen ist. Es wurden daher für die Auswertung folgende Annahmen gemacht:

a) „*Hitzebedingte*“ Mortalität geht mit einer hohen Gefühlten Temperatur einher; daher wurden nur Tage, die über dem 90%-Perzentilwert der Gefühlten Temperatur um 12 UTC lagen, berücksichtigt.

b) Die „*erhöhte*“ Mortalität wurde auf zwei Arten definiert: einmal als signifikante positive Abweichung vom Erwartungswert (Tab. 6.17, oben) und einmal als signifikante Abweichung von der mittleren relativen Mortalität für „*mäßige Wärmebelastung*“ (Tab. 6.17, unten).

Für die Sensitivität des Testergebnisses ergeben sich sehr kleine Werte. Die Werte für die Spezifität liegen hingegen alle über 0,87. Hohe Werte werden auch für den Vorhersagewert für ein positives Testergebnis berechnet. Der Vorhersagewert für ein negatives Testergebnis liegt jedoch deutlich unter diesem und nimmt Werte zwischen 0,2 und 0,8 an.

Tab. 6.17: Sensitivität, Spezifität sowie Vorhersagewert für ein positives bzw. negatives Testergebnis (1986-1996). *GT12: Gefühlte Temperatur um 12 UTC*

	London	**Niederlande**	**Baden-Württemberg**	**Budapest**	**Lissabon**	**Madrid**
Bedingungen: Mortalität > Erwartungswert; GT12 > 90%-Perzentil						
Sensitivität	0,02	0,08	0,17	0,20	0,22	0,32
Spezifität	1,00	1,00	0,95	0,95	0,90	0,90
positiver Vorhersagewert	1,00	1,00	0,93	0,86	0,81	0,86
negativer Vorhersagewert	0,36	0,42	0,23	0,42	0,36	0,41
Bedingungen: Mortalität > Mortalität für „*mäßige Wärmebelastung*“; GT12 > 90%-Perzentil						
Sensitivität	0,03	0,19	0,22	0,36	0,25	0,32
Spezifität	0,87	0,99	0,95	0,92	0,90	0,87
positiver Vorhersagewert	0,78	0,84	0,84	0,80	0,75	0,78
negativer Vorhersagewert	0,47	0,83	0,50	0,62	0,50	0,47

7 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

7.1 Analyse der Daten aus Baden-Württemberg

Die signifikanten Unterschiede in der relativen Mortalität zwischen den einzelnen thermischen Belastungsklassen machen deutlich, dass mittels des neuen Verfahrens **HeRATE** eine gesundheitsrelevante Bewertung der thermischen Umwelt möglich ist. Die mittlere Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert steigt mit zunehmender thermischer Belastung an. Werden die mit den jeweils stärksten Auswirkungen verbundenen Zeitverschiebungen zwischen thermischem Stress und Mortalität berücksichtigt, ergeben sich in Baden-Württemberg ähnlich hohe Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert für die entsprechenden Stufen von Kältestress und Wärmebelastung. Die gesundheitliche Relevanz von leichter thermischer Belastung ist in Baden-Württemberg sehr gering und wird daher nicht weiter diskutiert.

Analog zur Literatur (z.B. Kunst et al., 1993; Dessai, 2002; Laschewski und Jendritzky, 2002; Kyselý und Huth, 2004; Michelozzi et al, 2004) wird in Baden-Württemberg keine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auftreten von Wärmebelastung und dem Anstieg der Mortalität gefunden. Für Kältestress ergeben sich Verzögerungen von 3-7 Tagen. Andere Untersuchungen über zeitliche Verschiebungen bei Kältestress in Mitteleuropa fanden Verzögerungen zwischen 3 und 14 Tagen (z.B. Kunst et al., 1993; Keatinge et al., 2000; Huynen et al., 2001; Laschewski und Jendritzky, 2002).

Die stärkere zeitliche Verzögerung bei Kältestress deutet auf weniger „*zeitscharfe*“ Beziehungen zwischen thermischer Umwelt und Mortalität hin (Díaz et al., 2005) und könnte mit unterschiedlichem Expositionsverhalten in der kalten und warmen Jahreszeit begründet sein (Laschewski und Jendritzky, 2002). Im Winter halten sich die Menschen beispielsweise längere Zeit in Innenräumen auf als im Sommer. Die Innenräume sind häufig beheizt und in der Regel wird nur kurz gelüftet. Daraus ergibt sich in der kalten Jahreszeit eine

größere Differenz zwischen der thermischen Situation in Innenräumen und im Freien. Es ist daher davon auszugehen, dass im Winter in Innenräumen in der Regel kein thermischer Stress herrscht. Im Sommer ist hingegen ein Aufheizen der Gebäude bei anhaltender Hitze nicht immer zu vermeiden. Dadurch können auch Personen, die sich hauptsächlich in unklimatisierten Innenräumen aufhalten, von Wärmebelastung betroffen sein. Dies macht sich unter anderem in der Erhöhung der Sterbefallzahlen bei länger andauernder Wärmebelastung bemerkbar. In Baden-Württemberg gehen „*mäßige*“ und „*starke Wärmebelastungen*“ mit längeren Andauern im Mittel mit einer höheren Sterblichkeit einher als einzelne warme oder heiße Tage. Dies steht im Einklang mit anderen umweltepidemiologischen Untersuchungen in Europa (z.B. Saez et al., 1995; Smoyer et al., 2000; Díaz et al., 2002; Hajat et al., 2002).

Eine weitere Erklärung für den weniger „*zeitscharfen*“ Zusammenhang zwischen Kältestress und Mortalität sind unterschiedliche Erkrankungsbilder. Während im Winter beispielweise Atemwegserkrankungen, Thrombosen sowie Grippe dominieren (Donaldson und Keatinge, 2002; Makie et al., 2002; Díaz et al., 2005), sind nach Wärmebelastung vor allem Herz-Kreislauferkrankungen und cerebrovaskuläre Erkrankungen von Bedeutung (Michelozzi et al., 2000; Davis et al., 2002; Díaz et al., 2005).

Mit zunehmendem Alter steigt in Baden-Württemberg wie auch in anderen Regionen Europas die Sensitivität für Wärmebelastung (Montero et al., 1997; Pajares et al., 1997; Michelozzi et al., 2000; Huynen et al., 2002; Díaz et al., 2002; Hajat et al., 2002). Zwischen den Altersklassen 70-74 Jahren und 75-79 Jahren ist in Baden-Württemberg ein deutlicher Anstieg der relativen Mortalität während „*starker Wärmebelastung*“ zu erkennen. Daher wurde die Gesamtbevölkerung in die Altersgruppen unter und über 75 Jahre unterteilt. Für „*Komfortbedingungen*“ und mindestens „*mäßige Wärme-*„ beziehungsweise „*Kältebelastung*“ sind die Unterschiede zwischen den beiden Altersklassen signifikant. Die negativen Auswirkungen von Wärmebelastung und Kältestress in der älteren Altersgruppe sind um so ausgeprägter, je stärker die thermische Belastung ist. Dies deutet darauf hin, dass ältere Menschen sehr viel sensibler auf die Einflüsse der Witterung reagieren als jüngere.

Studien wie jene von Havenith et al. (1995) zeigen, dass das Alter als Indikator für andere Faktoren, welche die Sensitivität für Wärmebelastung erhöhen, wie mangelnde Fitness, Bettlägerigkeit, Medikamenteneinnahme, Demenz oder Vorerkrankungen angesehen werden kann. Zudem wird im Alter die thermische Umgebung häufig falsch wahrgenommen und die Thermoregulation funktioniert schlechter (Hori, 1995; Havenith, 2001; Inoue, 2004).

Im Gegensatz zum Alter hat das Geschlecht nur einen geringen Einfluss auf die thermisch bedingte Mortalität in Baden-Württemberg. Dies steht im Einklang mit den von Bull und Morton (1978) veröffentlichten Ergebnissen für die Niederlande. Wie auch in anderen Studien (Alberdi et al., 1998; Rooney et al., 1998; Díaz et al., 2002; Kyselý und Huth, 2004; Michelozzi, 2004) konnte für Baden-Württemberg jedoch festgestellt werden, dass Frauen insgesamt geringfügig sensitiver auf Wärmebelastung reagieren als Männer. Die etwas höhere Sensitivität von Frauen für Wärmebelastung dürfte zum einen mit der Tatsache zusammenhängen, dass der Frauenanteil in den älteren und auch sensitiveren Altersgruppen deutlich über dem Männeranteil liegt, zum anderen weisen Frauen aufgrund von geschlechtsspezifischen Unterschieden bei der Thermoregulation eine geringere Hitzetoleranz auf als Männer (Fanger, 1972).

Für die Bewertung der volkswirtschaftlichen Auswirkungen thermischer Belastung auf die Gesellschaft wäre es von Bedeutung, die durch den thermischen Stress hervorgerufene Verminderung der Lebensdauer abschätzen zu können. Es ist dabei schwierig, aus den Zeitreihendaten Schlüsse über den Verlust an Lebenszeit zu ziehen. Da es bei langfristigen Betrachtungen zu einer Überlagerung verschiedener Einflüsse auf die Mortalität kommt und sich zudem über lange Zeiträume Probleme bei der Bestimmung der Erwartungswerte der Sterbefallzahlen ergeben, sind Schlüsse über die Vorverlegung des Sterbezeitpunktes (Harvesting-Effekt) nur auf einer kurzfristigen Zeitskala möglich (Rabl, 2003). Aus diesem Grund und weil sich signifikante Auswirkungen von thermischem Stress nur etwa ein Monat lang ergeben (Kunst et al., 1993), werden die Auswirkungen der Vorverlegung des Todeszeitpunktes in einem zeitlichen Rahmen von 40 Tagen untersucht.

In Baden-Württemberg nimmt der Harvesting-Effekt im Zeitraum 1968-2003 eine Größenordnung von rund 3% der Übersterblichkeit nach „*starker Wärmebelastung*“ an. Dies steht im Gegensatz zu einer Studie von Laschewski und Jendritzky (2002), welche sich im Wesentlichen auf dieselbe Datenbasis stützt, und verdeutlicht, dass die angewandte Methodik zur Bestimmung des Erwartungswertes der Mortalität und zur Bewertung der thermischen Umwelt einen großen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Die Autoren der älteren Studie wendeten sowohl für die Bestimmung der erwarteten Mortalität als auch für die Identifizierung der Wärmebelastung ein anderes Verfahren an. Die von Laschewski und Jendritzky (2002) erwartete Anzahl von Sterbefällen dürfte während „*Mortalitätsepisoden*“ zu hoch ausfallen, was zu einer zu geringen Anzahl von hitzebedingten Sterbefällen führt (siehe auch Kapitel 3.3.1). Ein weiterer Unterschied zu den hier durchgeführten Analysen ist, dass die Autoren dieser Studie nur die 35 extremsten Hitzeereignisse im Zeitraum 1968-1997 betrachten, wobei ein Hitzeereignis in Abhängigkeit von der „*erwarteten*“ Gefühlten Temperatur definiert wurde.

Im Gegensatz zur „*starken Wärmebelastung*“ kann nach „*mäßigem Kältestress*“ in Baden-Württemberg ein deutlicher Harvesting-Effekt festegestellt werden. Nach letzterem findet eine Vorverlegung des Todeszeitpunktes in einer Größenordnung von etwa 30% der Übersterblichkeit statt. Auch hier widersprechen die Ergebnisse der Studie von Laschewski und Jendriztky (2002), die nach „*Kältewellen*“ keinen Harvesting-Effekt in Baden-Württemberg finden konnten. Die Unterschiede sind vermutlich wieder auf die oben genannten Gründe zurückzuführen. Bei „*mäßigem Kältestress*“ hält sowohl die Phase mit erhöhter Mortalität relativ lang an (fast 4 Wochen) als auch die sich anschließende Phase mit Untersterblichkeit (mindestens 2 Wochen). Daher wird mit der von Laschweski und Jendritzky verwendeten Methode zur Bestimmung des Erwartungswertes vermutlich sowohl ein Teil der Übersterblichkeit als auch ein Teil der Untersterblichkeit in den Erwartungswert hinein gerechnet.

Im Gegensatz zu der Gesamtbevölkerung und der Altergruppe der „*über 75-Jährigen*“ ist für die Altersgruppe der „*unter 75-Jährigen*“ jedoch auch bei „*starker*“ und „*mäßiger Wärmebelastung*“ sowie bei „*mäßigem Kältestress*“ ein ausgeprägter Harvesting-Effekt zu erkennen. Ein ähnliches Phänomen wurde auch von Huynen et al. (2001) in den Niederlanden gefunden. Die stärkere Ausprägung des Harvesting-Effektes in der jüngeren Altersgruppe könnte damit begründet sein, dass von den jüngeren Menschen hauptsächlich jene an Wärmebelastung sterben, die durch Krankheit schon sehr vorgeschwächt und dem Tode sehr nahe sind. Bei älteren Menschen ist der Gesundheitsstatus insgesamt labiler und ohne die thermische Belastung hätte in dieser Altersgruppe vermutlich keine akute Gefahr für das Leben bestanden.

Bei der Berechnung der Größenordnung des Harvesting-Effekts werden aufeinander folgende Tage mit gleicher thermischer Belastung nicht berücksichtigt. Da Phasen mit „*starker Wärmebelastung*“ beziehungsweise „*mäßigem Kältestress*“ selten länger als 3 Tage andauern, beeinflusst diese Vereinfachung die Größenordnung der Vorverlegung von Sterbefällen nur unwesentlich.

Analog zum Harvesting-Effekt lässt sich unter günstigen thermischen Bedingungen ein sogenannter „*Seeding-Effekt*“ feststellen. Diese Verzögerung des Sterbezeitpunktes ist im Mittel allerdings nur sehr schwach ausgeprägt und zeichnet sich dadurch aus, dass in den ersten vier Tagen nach einem Ereignis mit thermischer Behaglichkeit die Mortalität leicht unter dem Erwartungswert und ab dem 9. Tag geringfügig über dem Erwartungswert liegt.

Um Trends in der Anfälligkeit der Bevölkerung für die unterschiedlichen Stufen thermischer Belastung aufzudecken, wurden die Zeiträume 1969-1983 und 1988-2002 miteinander verglichen. Zwischen den beiden Zeiträumen kam es zu einer Verschiebung der Be-

deutung der thermisch bedingten Mortalität für die Vulnerabilität der Bevölkerung. Während im ersten Zeitraum die kältebedingte Mortalität die meisten Menschenleben forderte, war im zweiten Zeitraum die hitzebedingte Mortalität von größerer Bedeutung. Das stärkere relative Gewicht der Vulnerabilität für Wärmebelastung im zweiten Zeitraum wurde jedoch hauptsächlich durch den Rückgang der kältebedingten Mortalität verursacht. Durch diesen Rückgang kam es zu einer Reduktion der absoluten Vulnerabilität für thermische Belastung um etwa 21%.

Auf den ersten Blick scheinen sich in der Zeitskala von wenigen Wochen zwei gegenläufige Effekte auf die Mortalität auszuwirken: die Anpassung an die aktuelle Witterung und die Andauer einer belastenden Situation. Ausgehend von der Hypothese, welche hinter dem konzeptionellen Modell für die Anpassung steckt, dürften sich bei dem hier verwendeten Bewertungsverfahren längere Andauern nicht negativ auf die Mortalität auswirken. Durch die Berücksichtigung der Anpassung müssen jedoch zur Überschreitung einer Schwelle an Folgetagen höhere Werte der Gefühlte Temperatur erreicht werden als am ersten Tag einer Periode mit Wärmebelastung. Als weiteren Grund für die Bedeutung der Andauer kann auch die Änderung im Expositionsmuster angesehen werden. Infolge andauernder Wärmebelastung kann sich beispielsweise die Bausubstanz aufheizen, was zu höheren Innenraumtemperaturen führt. Daher steht die Tatsache, dass sich länger andauernde Wärmebelastungen stärker auf die Mortalität auswirken als Wärmebelastungen kurzer Andauer durchaus im Einklang mit dem konzeptionellen Modell für die kurzfristige Anpassung.

7.2 Vergleich der Europadaten

Durch die Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung und die daraus resultierende Verschiebung der Schwellenwerte für die einzelnen thermischen Belastungsklassen kann **HeRATE** in unterschiedlichen Regionen Europas ohne Modifikation angewendet werden. Im Gegensatz zu den in Tab. 3.6 (Kapitel 3.3.2, S.45) aufgelisteten unterschiedlichen Schwellenwerte der Lufttemperatur für das Mortalitätsminimum wird mit **HeRATE** durch die Einbeziehung der kurzfristigen Anpassung und die thermophysiologisch relevante Bewertung der Umwelt das Mortalitätsminimum meist während thermischen „*Komfortbedingungen*“ gefunden.

In der Regel sind die Unterschiede der mittleren relativen Mortalitäten zwischen benachbarten thermischen Belastungsklassen in allen untersuchten Gebieten signifikant. *„Starke Wärmebelastung*“ ist überall die Belastungsklasse mit der größten Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert. Die signifikanten Unterschiede zeigen, dass die Verteilung der Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert auf die einzelnen Belastungsklassen nicht rein zufällig ist und dass **HeRATE** ohne weitere Modifikation auf Zeitreihen aus unterschiedlichen klimatischen Regionen Europas angewendet werden kann.

Die Sensitivität für „*starke Wärmebelastung*“ ist besonders hoch in den maritim beeinflussten Gebieten (London, Niederlande und Lissabon) und deutlich geringer in den kontinentaler gelegenen Regionen (Madrid, Baden-Württemberg, Budapest). Die Bevölkerung in den untersuchten Gebieten reagiert mit unterschiedlich hohen Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert auf gleiche thermische Belastung. Besonders deutlich wird dies ab „*mäßigem Kältestress*“ beziehungsweise „*mäßiger Wärmebelastung*“. Da bei der Bewertung der thermischen Umwelt kurzfristige Anpassungsprozesse bereits berücksichtigt wurden, könnte die unterschiedliche Sensitivität als Hinweis auf unterschiedliche langfristige Anpassungsmechanismen (z.B. bauliche Maßnahmen, langfristige Akklimatisation) gedeutet werden.

Insgesamt ist der Verlauf der Kurven für die relative Mortalität in Bezug auf die unterschiedlichen Klassen thermischer Belastung für Budapest, Baden-Württemberg und die Niederlande „*flacher*“ als für die anderen Gebiete (Abb. 6.11, S. 121). Dieser „*flachere*“ Verlauf geht mit einer größeren Spanne der normalerweise auftretenden Werte der Gefühlten Temperatur (Differenz zwischen 95%-Perzentilwert und dem 5%-Perzentilwert) einher (Tab. 7.1). Dies deutet darauf hin, dass Populationen, die an eine große Spannbreite

thermischer Verhältnisse gewöhnt sind, auch besser an die stärkeren Belastungen angepasst sind. Solche Anpassungen können beispielsweise in einer solideren Bauweise mit höherer spezifischer Wärmekapazität oder guter Isolierung der Gebäude bestehen.

Tab. 7.1: Differenz zwischen 95%- und 5%-Perzentilwert der Gefühlten Temperatur um 12 UTC (1986-1996)

	London	**Niederlande***	**Baden-Württemberg**	**Budapest**	**Lissabon**	**Madrid**
5%-Perzentil (°C)	0,9	-2,6	-2,5	-5,3	9,0	8,3
95%-Perzentil (°C)	26,6	28,5	31,0	32,9	33,6	35,0
Temperaturspanne (K)	25,7	31,0	33,5	38,2	24,6	29,0

* *13 UTC*

Neben langfristigen Anpassungsmaßnahmen besteht die Möglichkeit, dass die unterschiedliche Sensitivität in den einzelnen untersuchten Regionen auf unterschiedliche Altersstrukturen in der Bevölkerung zurückzuführen ist. Da hierüber jedoch nicht für alle Regionen Informationen vorlagen, konnte dies im Rahmen dieser Studie nicht untersucht werden.

Dass langfristige Anpassungsmechanismen eine Rolle spielen könnten, zeigt sich auch in der Tatsache, dass die Auftretenshäufigkeit der einzelnen Belastungsklassen einen Einfluss auf die Sensitivität hat. Der Erklärungsanteil der Häufigkeit einer Belastungsklasse an der mittleren relativen Mortalität beträgt für alle untersuchten Zeitreihen zusammen ungefähr 80% (Abb. 6.12, S. 123).

Die langfristige Anpassung könnte des Weiteren eine Erklärung dafür sein, dass in Lissabon und Madrid nicht die Belastungsklasse 0 („*thermischer Komfort*“) mit dem Minimum der relativen Mortalität einhergeht, sondern die Belastungsklasse 1 („*leichte Wärmebelastung*“). Die Unterschiede in der mittleren relativen Mortalität zwischen diesen beiden Belastungsklassen sind jedoch nur minimal.

Ein Grund für dieses Phänomen könnte auch darin liegen, dass das Verfahren zur Ableitung der variablen Schwellenwerte nicht optimal ist. Dagegen spricht jedoch, dass die Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert für die anderen Klassen thermischer Belas-

tung in allen untersuchten Regionen ein einheitliches Muster aufweist. Zusätzlich scheint die kurzfristige Anpassung an die lokalen Witterungsverhältnisse auch im Jahresverlauf in angemessener Weise berücksichtigt zu werden. Durch diese Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung bei der Bewertung der thermischen Umwelt können für „*starke Wärmebelastung*“ keine vom Tag des Jahres abhängigen signifikanten Trends der relativen Mortalität gefunden werden. Im Gegensatz dazu wurden allerdings in verschiedenen Studien für Hitzewellen, welche im Frühjahr oder Frühsommer auftreten, stärkere Auswirkungen auf die Mortalität gefunden als für Hitzewellen im Hochsommer (Smoyer, 1998; Kalstein, 2001; Basu und Samet, 2002; Dessai, 2002; Kyselý, 2004). Dies kann folgende Gründe haben:

1. In den oben genannten Studien wird die kurzfristige Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse der letzten Wochen nicht berücksichtigt.

2. Die geringere Auswirkung späterer Hitzewellen kann mit dem „*Abernten*“ der für Hitze empfindlichen Bevölkerung (Harvesting-Effekt) während vorangegangener Hitzewellen begründet sein (Basu und Samet, 2002; Dessai, 2002).

Harvesting-Effekte treten vor allem im Anschluss an „*starke Wärmebelastung*“ und „*mäßigen Kältestress*“ auf. Die Ausprägung des Harvesting-Effektes ist in den untersuchten Gebieten unterschiedlich stark. Während in London die Vorverlegung des Sterbezeitpunktes nach „*mäßigem Kältestress*“ und „*starker Wärmebelastung*“ ungefähr die gleiche Größenordnung annimmt, ist in Madrid und Budapest der Harvesting-Effekt nach „*starker Wärmebelastung*“ und in Baden-Württemberg und den Niederlanden jener nach „*mäßigem Kältestress*“ stärker ausgeprägt. Die Vorverlegung des Todeszeitpunktes scheint daher in den Gebieten mit relativ warmen Sommern vor allem bei „*starker Wärmebelastung*“ und in den etwas kühleren Gebieten hauptsächlich bei „*mäßigem Kältestress*“ eine Rolle zu spielen. Dies reduziert die Auswirkungen der mit der Vorverlegung des Sterbezeitpunktes einhergehenden Belastungsklassen.

Im Gegensatz zu Kunst et al. (1993) und Huynen et al. (2001) kann in der hier durchgeführten Studie keine Vorverlegung des Sterbezeitpunktes nach „*starker Wärmebelastung*“ in den Niederlanden gefunden werden. Auch für Baden-Württemberg wird in Folge dieser Belastungsklasse nur ein sehr geringer Harvesting-Effekt festgestellt, was der Untersuchung von Laschewski und Jendritzky (2002) widerspricht. Die Gründe dieser Unterschiede liegen wahrscheinlich in den unterschiedlichen Verfahren, welche sowohl zur Bestimmung von thermisch belastenden Situationen als auch zur Abschätzung der erwarteten Mortalität verwendet wurden. In den Untersuchungen von Huynen et al. (2001) sowie Laschweski und Jendritzky (2002) wurde jeweils die Vorverlegung des Todeszeitpunktes

nach wenigen extremen Situationen untersucht. Im Falle der Niederlande wurden beispielsweise in 19 Jahren 6 Hitzewellen analysiert. Mit **HeRATE** werden in den Niederlanden im selben Zeitraum 43 Tage mit „*starker Wärmebelastung*“ berücksichtigt. Ähnlich verhielt es sich mit der untersuchten Zeitreihe aus Baden-Württemberg (Kapitel 7.1).

Es wäre jedoch voreilig, hieraus zu schließen, dass seltenere „*extremere*“ Ereignisse mit einer stärkeren Neigung zur Vorverlegung des Todeszeitpunktes einhergehen. Zum einen sind die Verfahren zur Bewertung der thermischen Umwelt nicht miteinander vergleichbar und zum anderen ist bei „*seltenen*“ Ereignissen die Wahrscheinlichkeit größer, dass die Ergebnisse „*zufällig*“ entstanden sind. Es wäre daher notwendig, längere Zeitreihen zu analysieren.

Die Andauer thermischer Belastung spielt in den untersuchten Gebieten eine unterschiedlich starke Rolle. Länger andauernde Phasen mit „*starker Wärmebelastung*“ gehen fast überall mit höheren Sterbefallzahlen einher. Die Andauer von Kältestress ist vor allem dort von Bedeutung, wo die Menschen schlecht an diesen angepasst sind. In den südlicheren Regionen Europas sind die Innenräume häufig relativ schlecht beheizt (Keatinge et al., 1997). Daher ist die Abkoppelung der thermischen Bedingungen der Innenräume von den Außenbedingungen nicht im gleichen Maße gegeben wie in den Gebieten, die auf kalte Winter eingestellt sind.

Die im Rahmen dieser Studie ermittelten zeitlichen Verschiebungen zwischen dem Auftreten der thermischen Belastung und deren stärksten Auswirkungen auf die Mortalität entsprechen im Wesentlichen denen anderer Untersuchungen (z.B. Kunst et al., 1993; Montero et al., 1997; Huynen et al., 2001; Dessai, 2002; Hajat et al., 2002; Laschewski und Jendritzky, 2002). Diese gute Übereinstimmung deutet darauf hin, dass die zur Abschätzung der hitzebedingten Mortalität und zur Bewertung der thermischen Umwelt angewandte Methodik die ermittelte zeitliche Verschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalitätsanstieg nur in geringem Maß beeinflusst.

Bis auf London weisen alle untersuchten Gebiete für „*mäßige Wärmebelastung*“ die höchste relative Vulnerabilität auf. Da die relative Mortalität der Bevölkerung für diese Belastungsklasse mit 4-9% über dem Erwartungswert deutlich unter der relativen Mortalität für „*starke Wärmebelastung*“ beziehungsweise „*mäßigem Kältestress*“ liegt, ist die hohe Vulnerabilität während „*mäßiger Wärmebelastung*“ vor allem auf die große Häufigkeit dieser Belastungsklasse zurückzuführen. Lissabon zeigt gefolgt von Madrid und Budapest die höchste Vulnerabilität für „*mäßige Wärmebelastung*“ und London gefolgt von den Niederlanden und Baden-Württemberg die niedrigste. Es besteht demnach ein Nord-Süd-Gefälle und innerhalb dessen ein Ost-West-Gefälle der Anfälligkeit für hitzebedingte

Mortalität. Dieses Muster ist sehr stark von den Auftretenshäufigkeiten dieser Belastungsklassen in den einzelnen untersuchten Regionen geprägt.

Da nicht für alle untersuchten Gebiete Daten über die Populationsgröße vorlagen, konnten keine auf Basis der Mortalitätsrate pro 100.000 Einwohnern bestimmten absoluten Vulnerabilitäten berechnet werden. Die absolute Vulnerabilität ermöglicht erst die Bewertung der Auswirkungen von thermischer Belastung insgesamt, da aufgrund des Jahresganges der Mortalitätsrate gleiche prozentuale Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert mit unterschiedlichen absoluten Todesfallzahlen einhergehen. Daher können bei den hier durchgeführten Untersuchungen nur die Verwundbarkeiten für die thermischen Belastungsklassen, die in der Regel in der gleichen Jahreszeit auftreten (also beispielsweise „*mäßige*“ und „*starke Wärmebelastung*“ oder „*leichter*“ und „*mäßiger Kältestress*“), miteinander verglichen werden.

7.3 Auswirkungen von Klimaänderungen

Eine weitere Einsatzmöglichkeit von **HeRATE** besteht in der Abschätzung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Gesundheit. Gegenüber anderen Verfahren hat **HeRATE** den Vorteil, dass es nicht an sich ändernde Gegebenheiten angepasst werden muss, da eine kurzfristige Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse bereits berücksichtigt wurde. Die langfristige Anpassung bleibt von **HeRATE** jedoch unberücksichtigt, da sie, abgesehen von der langfristigen Akklimatisation, zum großen Teil aus „*geplanten*“ Anpassungsmaßnahmen besteht.

Ein Vergleich der auf Basis der PIK-Szenarien (Gerstengarbe et al., 2003) ermittelten thermischen Belastung der Zeiträume 1951-2000 und 2001-2055 zeigt in ganz Baden-Württemberg eine Zunahme der Häufigkeit von „*mäßiger*“ bis „*extremer Wärmebelastung*“ um 15-30%. Werden nur Tage mit mindestens „*starker Wärmebelastung*“ betrachtet, fällt diese Änderung noch etwas stärker aus. Gleichzeitig nimmt der Häufigkeit von Tagen mit mindestens „*mäßigem Kältestress*“ um bis zu 25% ab. Die Zunahme von Wärmebelastung und die Abnahme von Kältestress im 21. Jahrhundert steht im Einklang mit anderen aktuellen Klima-Prognosen (z.B. Meehl und Tebaldi, 2004; Räisänen et al., 2004; Schär et al., 2004).

Um nun Abschätzungen über die Auswirkung von Klimaänderungen auf die „*Gesundheit*“ (hier die Mortalität) machen zu können, ist es erforderlich, Szenarien für die Sensitivität der Bevölkerung zu entwickeln. Da das Alter als Indikator für die Sensitivität angesehen werden kann, wird für die Abschätzung der Sensitivität in den einzelnen Kreisen der Anteil der Personen über 75 Jahren heran gezogen. Diese Annahme ist stark vereinfachend. Es liegen jedoch keine Informationen darüber vor, wie sich die anderen Faktoren, welche die Sensitivität der Bevölkerung beeinflussen, im Laufe der Zeit ändern werden. Zu diesen Faktoren gehören alle autonomen und geplanten langfristigen Anpassungsmaßnahmen an die thermische Umwelt sowie Änderungen in sozioökonomischen Faktoren, welche sich unabhängig davon ergeben. Es hat jedoch auch Vorteile, diese langfristigen Anpassungsmaßnahmen unberücksichtigt zu lassen, da sogenannte Vulnerabilitätskarten Politikern als Entscheidungsgrundlage dienen können, um effektive Maßnahmen einzuleiten.

Während der Vergleich zwischen Basis- und Zukunftsszenario deutliche Zunahmen der relativen Vulnerabilität in allen Landkreisen und Höhenlagen ergibt, zeigt eine Untersuchung der absoluten Vulnerabilität kein derart einheitliches Bild. Da bei der Bestimmung

der absoluten Vulnerabilität ein zusätzlicher Unsicherheitsfaktor, nämlich die Abschätzung der erwarteten Mortalitätsraten, hinzukommt, ist diese stark von dem Verfahren abhängig, welches für die Abschätzung des Erwartungswertes herangezogen wird. Hier werden zwei Ansätze miteinander verglichen. Während das Verfahren, welches von Trends in den Mortalitätsraten beeinflusst ist, nur für die unteren Höhenlagen eine Zunahme der thermisch bedingten Todesfälle um 0,15 pro Jahr und 100.000 Einwohner ergibt, werden mit dem Verfahren, das von konstant bleibenden Mortalitätsraten ausgeht, in allen Höhenlagen mit 1,2 bis 2,5 zusätzlichen thermisch bedingten Todesfällen deutlich höhere Zunahmen ermittelt.

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass durch die Unsicherheiten, die sich bei der Abschätzung zukünftiger Mortalitätsraten ergeben, auch die Abschätzung der absoluten Vulnerabilität stark beeinflusst wird. Eine relative Betrachtung hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Annahmen über die Entwicklung der Mortalitätsrate, welche unter anderem von sozioökonomischen Faktoren abhängig ist, getroffen werden müssen.

Der Anstieg der absoluten Vulnerabilität in Baden-Württemberg für thermische Belastung insgesamt, wie er mit beiden Verfahren zur Abschätzung der erwarteten Mortalitätsrate für die tieferen Lagen ermittelt wurde, steht im Widerspruch zu Davis et al. (2004) und Guest et al. (1999). Die Autoren dieser beiden Studien stellten fest, dass der Rückgang der kältebedingten Mortalität den Anstieg der hitzebedingten Mortalität in den USA beziehungsweise in Australien kompensieren wird. Es ist allerdings nicht klar, ob Trends in den Mortalitätsraten berücksichtigt wurden. Zudem sind die betrachteten Zeiträume unterschiedlich. Davis et al. (2004) beschränken sich auf die Betrachtung „*historischer*“ Daten. Aus diesem Blickwinkel stehen die von ihnen gefundenen Ergebnisse mit der Untersuchung des Trends in der Vulnerabilität in Baden-Württemberg im Zeitraum 1969-1983 und 1988-2002 in Einklang (Kapitel 6.1.1.4). In Australien wurde hingegen das Jahr 2030 mit dem Zeitraum 1979-1990 und in der hier durchgeführten Untersuchung die Zeiträume 1951-2000 und 2001-2055 miteinander verglichen.

Ein weiterer Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse könnte sein, dass unterschiedliche Methoden zur Bewertung der thermischen Umwelt angewendet wurden und somit auch die als thermisch belastend eingestuften Situationen nicht identisch sind. Während in der amerikanischen Studie die Einschätzung der thermischen Situation allein auf Basis der Lufttemperatur um 7:00 LST vorgenommen wurde, wurde bei der australischen Untersuchung ein synoptisches Verfahren angewendet und mit **HeRATE** ein Ansatz verfolgt, welcher auf einem kompletten Wärmehaushaltsmodell beruht und die kurzfristige Anpassung an die aktuelle Witterung vor Ort mit einschließt.

Auch hier wird wieder deutlich, wie wichtig eine einheitliche Untersuchungsmethodik für die vergleichende Interpretation der Ergebnisse ist.

7.4 Hitzebelastungsvorhersage

Alle untersuchten Gebiete zeigen die höchste relative Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert während „*starker Wärmebelastung*“. Diese hohe Sensitivität für „*starke Wärmebelastung*“ macht langfristige geplante Anpassungsmaßnahmen zur Absenkung der Sensitivität erforderlich. Zu solchen geplanten (im Gegensatz zu individuellen) Anpassungsmaßnahmen zählen unter anderem gesundheitsbezogene Hitzewarnsysteme. Diese Systeme verknüpfen die Information über das Eintreffen einer Wärmebelastungssituation mit einer Reihe von Interventionen des Gesundheitswesens (Koppe et al., 2004). Oftmals zielen die Interventionsmaßnahmen auf die Reduktion des thermischen Stresses von älteren Menschen ab. Diese Personengruppe ist einerseits relativ anfällig für Wärmebelastung, andererseits ist bei den älteren Menschen der „Harvesting-Effekt“ nur gering ausgeprägt, so dass über die bessere Versorgung dieser Personengruppe effektiv Leben gerettet werden können.

Da gezeigt werden konnte, dass „*starke Wärmebelastung*“ in allen untersuchten Gebieten mit der höchsten relativen Mortalität aller thermischer Belastungsklassen einhergeht, ist es nicht unbedingt erforderlich, das Verfahren auf Basis der Mortalitätsdaten der Orte, für die eine Vorhersage operationell durchgeführt werden soll, zu kalibrieren. Dies ist ein Vorteil gegenüber den bereits existierenden gesundheitsbezogenen Hitzewarnsystemen, welche sämtlich anhand von Mortalitätsdaten kalibriert werden müssen (Kalkstein, 1991; Nogueira et al., 1999; Michelozzi et al., 2000). Es wird weiterhin die Annahme gemacht, dass sich die hohe Sensitivität für mindestens „*starke Wärmebelastung*“ auch in Gebieten, für die keine Mortalitätszeitreihen existieren, abzeichnet. Daher wurde das Auftreten oder Überschreiten der Belastungsklasse 3 „*starke Wärmebelastung*“ als europaweites Warnkriterium gewählt.

Dabei stellt sich die Frage, ob das ausgewählte Kriterium für die Hitzewarnung begründet ist. In der Medizin und Epidemiologie werden für solche Fragestellungen die Begriffe Sensitivität, Spezifität und Vorhersagewert für ein positives oder negatives Testergebnis gebraucht. In allen Gebieten, für die Mortalitätsdaten vorhanden waren, sind die Werte für die Sensitivität, also für die Wahrscheinlichkeit, mit der eine erhöhte Mortalität mit einer Hitzewarnung einhergeht, sehr klein. Auch wenn der Schwellenwert für die „*erhöhte*“ Mortalität auf das Niveau der mittleren Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert bei „*mäßiger Wärmebelastung*“ gesetzt wird, erhöht sich in der Regel die Sensitivität nur geringfügig. Dies steht in Einklang mit den Ergebnisses aus der Bewertung des Hitzewarn-

systems in Rom (Koppe et al., 2004). Die Sensitivität eines Hitzewarnsystems ist weiterhin von der Häufigkeit der Hitzewarnung abhängig und nimmt daher in Gebieten, in denen „*starke Wärmebelastung*“ relativ selten auftritt oder überschritten wird, geringere Werte an als in Gebieten mit häufigerem Auftreten von „*mindestens starker Wärmebelastung*“. Dies ist dadurch begründet, dass bei häufiger auftretender „*richtiger Hitzewarnung“* auch die Wahrscheinlichkeit eines Auftretens einer hohen Mortalität ohne Warnung zurückgeht.

Die geringen Werte für die Sensitivität hängen auch damit zusammen, dass nicht alle positiven Abweichungen der Mortalität durch eine „*starke Wärmebelastung*“ begründet sind. Mortalitätsanstiege aufgrund von Kältestress wurden umgangen, indem nur Tage in Betracht gezogen wurden, an denen die Gefühlte Temperatur um 12 UTC mindestens dem 90%-Perzentilwert entsprach. Dadurch lassen sich zwar kältebedingte Mortalitätsanstiege ausschließen, nicht aber die entsprechend starken positiven Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert, die auch aufgrund von „*leichter*“ und „*mäßiger Wärmebelastung*“ sowie nicht-thermischen, d.h. zufälligen Ursachen auftreten können. Es ist sinnvoll, nur „selten“ zu warnen, damit die Warnung von der Bevölkerung ernst genommen wird. „*Mäßige Wärmebelastung*“ kommt hingegen relativ häufig vor und eignet sich aus diesem Grund nicht als Warnkriterium.

Ein weiterer Grund für die niedrigen Werte der Sensitivität ist die nicht ganz „zeitscharfe“ Beziehung zwischen „*starker Wärmebelastung*“ und Mortalitätsanstieg. Nach einem Tag mit „*starker Wärmebelastung*“ liegt die relative Mortalität im Mittel noch 2-7 Tage über der maximalen mittleren relativen Mortalität für „*mäßige Wärmebelastung*“. Daher folgen auf einen Tag mit „*starker Wärmebelastung*“ in der Regel 2 bis 7 Tage, welche ebenfalls den Wert für die Sensitivität verschlechtern, obwohl eine „*richtige Warnung*“ gegeben wurde.

Für die hier relevante Fragestellung ist daher mehr der positive Vorhersagewert von Bedeutung. Dieser besagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Warnung mit einer Mortalitätserhöhung einhergeht, also, der Anteil der richtigen Warnung an der Gesamtzahl der Warnungen. In allen untersuchten Regionen liegt der positive Vorhersagewert über 87%. Auch die Spezifität, also der Anteil der richtigen Nichtwarnungen an den Nichtwarnungen liegt mit über 75% sehr hoch, ist jedoch wie auch der positive Vorhersagewert stark vom Definitionskriterium für die „*erhöhte*“ Mortalität abhängig. Je schärfer dieses gewählt wird, desto geringer sind die Werte für Spezifität und positiven Vorhersagewert.

Die Problematik der Eingrenzung der für eine Hitzewarnung überhaupt in Frage kommenden Tage und der Festlegung einer Schwelle, ab welcher von einer erhöhten Mortalität gesprochen werden kann, ergibt sich bei allen Evaluationsversuchen von Hitzebelastungs-

vorhersagen. Insgesamt scheint die Verwendung dieses Verfahrens jedoch sinnvoll, da die Anzahl der „*Fehlwarnungen*“ mit 0-13% gering ist. Verglichen mit anderen Hitzewarnsystemen hat die hier vorgestellte Vorgehensweise die Vorteile, dass sie flächendeckend angewendet werden kann und dass keine weitere Kalibrierung mit Mortalitätsdaten nötig ist. Dies macht die Warnungen für verschiedene Regionen miteinander vergleichbar.

Wenn Mortalitätsdaten vorhanden sind, kann das Verfahren jedoch an die lokalen Gegebenheiten angepasst werden. Ein Beispiel für eine derartige Anpassung wäre das Hinzunehmen von länger andauernden Situationen mit „*mäßiger Wärmeb*elastung“, welche mit den gleichen Auswirkungen auf die Mortalität einhergehen können, wie ein einzelner Tag mit „*starker Wärmebelastung*“.

8 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Anhand des Vergleichs von Ergebnissen aus dieser Studie mit denen älterer Untersuchungen ergeben sich teilweise Unterschiede in der Bewertung einzelner Einflüsse auf die thermisch bedingte Mortalität. Beispielsweise wird der Einfluss des Harvesting-Effektes unterschiedlich eingeschätzt. Beim Vergleich von Studien, welche sich mit den Auswirkungen von thermischer Belastung oder Umwelteinflüssen allgemein beschäftigen, sollte daher beachtet werden, dass unterschiedliche Ergebnisse nicht unbedingt auf unterschiedliche Sensitivitäten oder Vulnerabilitäten zurückzuführen sind. Die Anwendung einer einheitlichen Methodik für die Bewertung der thermischen Umwelt und für die Bestimmung der thermisch bedingten Mortalität macht daher erst einen Vergleich unterschiedlicher Studien und Fragestellungen möglich.

Bisher wurden unterschiedliche Methoden zur Bewertung der thermischen Umwelt angewendet, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die gesundheitlichen Auswirkungen von der Anpassung an die lokalen Witterungsverhältnisse der letzten Wochen abhängen. Zudem gab es kein einheitliches Verfahren für die Abschätzung der hitzebedingten Mortalität, da beispielsweise kurze Zeitreihen den Einsatz von Mittelwerten des gleichen Zeitraums aus Vorjahren erschwerten oder Trends in der Populationsgröße oder der Mortalitätsrate aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt werden konnten. Daher war es erforderlich, Verfahren für die Bewertung der thermischen Umwelt und für die Abschätzung der hitzebedingten Mortalität zu entwickeln, die auf unterschiedliche Fragestellungen und Datengrundlagen angewendet werden können.

In der vorliegenden Studie wird erstmalig versucht, kurzfristige Anpassungsprozesse an die lokalen Witterungsverhältnisse der letzten Wochen bei der Bewertung der thermischen Umwelt zu berücksichtigen. Obwohl in verschiedenen Untersuchungen festgestellt wurde, dass die Gesundheitsauswirkungen thermischer Belastung sowohl von den aktuellen meteorologischen Bedingungen als auch von den Witterungsbedingungen der vorangegangenen

Wochen abhängen und dass sowohl absolute als auch relative Schwellenwerte bei der Bewertung der thermischen Situation eine Rolle spielen (Zhang et al., 2001; Dessai, 2002; Kyselý, 2004; Kyselý und Huth, 2004), wurde nie der Versuch unternommen, diese Erkenntnis in ein thermophysiologisch relevantes Bewertungsverfahren zu integrieren.

Die kurzfristige Anpassung an die lokalen Witterungsbedingungen setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: der Anpassung der Bekleidung und der kurzfristigen Akklimatisation. Für die Anpassung der Bekleidung wurde von Morgan und de Dear (2003) ein empirisches Modell entwickelt. Zur Beschreibung der kurzfristigen Akklimatisation muss in dieser Arbeit auf ein konzeptionelles Modell zurückgegriffen werden, da das Versuchsdesign der von verschiedenen Autoren durchgeführten Studien über die einzelnen physiologischen Veränderungen während des Akklimatisationsprozesses keine Entwicklung eines deterministischen oder empirischen Modells zuließ. Eine Zusammenfassung dieser beiden Modelle ergibt eine auf einem halbseitigen Gaußfilter beruhende Gewichtungsfunktion für die kurzfristige Anpassung.

Es wäre zwar wünschenswert, auch die kurzfristigen Akklimatisationsprozesse auf Basis eines empirischen oder deterministischen Modells zu berücksichtigen; dies lässt die vorhandene Datenlage allerdings nicht zu. Um ein sinnvolles empirisches Modell für die Akklimatisation entwickeln zu können, wäre ein sehr aufwendiges Versuchsdesign notwendig. Durch die hierfür erforderliche große Probandenzahl und deren lange Aufenthaltsdauer in einer kontrollierten thermischen Umgebung wären derartige Untersuchungen sehr teuer. Ein ähnliches Problem dürfte sich bei der Aufstellung eines deterministischen Modells ergeben. Hier ist zwar die notwendige Probandenzahl geringer, allerdings dürften für ein deterministisches Modell individuelle Parameter von großer Bedeutung sein, was eine Anwendung auf Populationsebene erschwert.

Eine Arbeitshypothese dieser Studie war, dass unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung die Gesundheitsauswirkungen einer bestimmten Stufe thermischer Belastung im Jahresverlauf konstant sind. Signifikante positive Trends der Auswirkungen von „*starker Wärmebelastung*“ auf die Gesundheit im Jahresverlauf würden beispielsweise auf eine zu starke Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung hindeuten, da im Spätsommer nur noch Situationen mit sehr hohen Auswirkungen auf die Mortalität bei der Ausweisung als „*starke Wärmebelastung*“ berücksichtigt würden. Entsprechend wären negative signifikante Trends ein Hinweis auf eine zu schwache Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung.

Unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung können derartige Muster weder in Baden-Württemberg noch in den anderen untersuchten Gebieten gefunden werden. Die

sich ergebenden Trends der relativen Auswirkungen von „*starker Wärmebelastung*“ in Abhängigkeit des julianischen Tages sind zum Teil leicht positiv zum Teil leicht negativ, jedoch in keinem Fall signifikant. Dies ist als Hinweis zu verstehen, dass die gewählten Gewichte für den absoluten und den variablen Anteil bei der Bewertung der thermischen Umwelt sinnvoll sind.

Bei der hier vorgestellten Methode zur Bewertung der thermischen Umwelt **HeRATE** bleibt die langfristige Anpassung unberücksichtigt. Basierend auf der durchgeführten Literaturstudie zum Thema Akklimatisation ist es nicht möglich, die Größenordnung der langfristigen Akklimatisation abzuschätzen und in ein konzeptionelles Modell zu integrieren. Neben den langfristigen physiologischen Anpassungsprozessen ist auch die nicht-physiologische langfristige Anpassung von Bedeutung. Diese ist hauptsächlich durch sozioökonomische und kulturelle Faktoren bedingt und äußert sich in unterschiedlich hohen Sensitivitäten der Populationen unterschiedlicher Regionen für eine thermische Belastungsstufe. In vielen Fragestellungen ist es allerdings wichtig, diese Faktoren separat betrachten zu können, um beispielsweise Anpassungsstrategien an ein sich änderndes Klima zu entwickeln. Daher wird in der vorliegenden Untersuchung bewusst der Versuch unterlassen, die langfristige Anpassung in das Modell zur Bewertung der thermischen Situation zu integrieren.

HeRATE basiert auf der Gefühlten Temperatur. Diese beruht auf einem kompletten Wärmehaushaltmodell des menschlichen Körpers und ist somit thermophysiologisch relevant. Des Weiteren hat die Gefühlte Temperatur den Vorteil, dass für sie über die PMV-Gleichung von Fanger (1972) eine von ASHRAE (1997) und VDI (1998) anerkannte Bewertungsskala existiert, auf deren Basis die neue Methodik aufgesetzt werden kann. Die Gefühlte Temperatur wird routinemäßig vom Deutschen Wetterdienst für einen Großteil Europas berechnet und vorhergesagt. Daher ist es möglich, verschiedene Fragestellungen zu bearbeiten.

Die Berechnung der Gefühlte Temperatur erfolgt mittels des Klima-Michel-Modells. Die Bewertung der thermischen Umwelt wird dabei für einen 35-jährigen Mann mit bestimmten körperlichen Charakteristika vorgenommen. Dieser „*Klima-Michel*“ kann – vor allem in Hinblick auf eine älter werdende Bevölkerung – nicht immer als repräsentativ angesehen werden. Des Weiteren gibt es Unterschiede in der Hitzetoleranz von Männern und Frauen, die auf der Populationsebene nicht berücksichtigt werden können. Daher wäre es zu überdenken, die Charakteristika des Klima-Michels an geänderte Bevölkerungsstrukturen anzupassen. Dieses Problem ergibt sich jedoch auch bei allen anderen gesundheitsrelevanten Bewertungsverfahren der thermischen Umwelt für die Bewertung auf Populationsebene.

Grund hierfür ist, dass die Wärmebilanzmodelle des menschlichen Körpers für die individuellen körperlichen Charakteristika, welche den Wärmeaustausch mit der Umgebung beeinflussen, immer mit Verallgemeinerungen arbeiten müssen, wenn eine Bewertung auf Populationsebene erfolgen soll.

Für spezielle Anwendungszwecke wie beispielsweise die Bewertung der thermischen Umgebung von einzelnen Individuen (z.B. **MEMI**, Höppe, 1984) oder für den Fall, dass fortgeschrittenere Wärmehaushaltsmodelle entwickelt werden (z.B. **UTCI**, Jendritzky et al., 2001), kann die Idee der Einbeziehung der thermischen Situation der letzten Wochen mittels eines konzeptionellen Modells auch mit anderen thermischen Bewertungsverfahren kombiniert werden.

In der hier durchgeführten Studie wird zur Abschätzung der Exposition der Bevölkerung die Gefühlte Temperatur, welche die thermische Situation im Freien wiedergibt, verwendet. In den meisten entwickelten Ländern verbringen die Menschen – vor allem die als besonders empfindlich eingestufte Gruppe der Älteren – allerdings einen Großteil ihrer Zeit in Innenräumen. Die thermischen Verhältnisse von Innenräumen entsprechen nicht immer den Außenbedingungen und sind sehr stark vom Gebäudedesign und den verwendeten Baumaterialien abhängig (Givoni, 1986; Nieuwolt, 1986). Die Außenbedingungen können daher nur als Indikator für die thermischen Verhältnisse in Gebäuden gelten. Die thermischen Verhältnisse im Freien geben zwar nicht das Expositionsverhalten eines Individuums wieder, jedoch ist das Gewicht eines Individuums bei großen untersuchten Grundgesamtheiten sehr gering. Je stärker Anpassungsmaßnahmen wie beispielsweise die Verwendung von Klimaanlagen in einer Bevölkerung verbreitet sind, desto stärker differiert auch die Exposition der Gesamtbevölkerung von den Außenbedingungen. Derartige langfristige Anpassungsmaßnahmen machen sich in den unterschiedlich hohen Sensitivitäten der Populationen für thermische Belastung bemerkbar.

HeRATE kann auf unterschiedliche Fragestellungen der Human-Biometeorologie beziehungsweise der Umweltepidemiologie angewendet werden. Beim Vergleich von verschiedenen Regionen in Europa gingen stärkere Abweichungen vom Komfortbereich in der Regel mit höheren Auswirkungen auf die Mortalität einher. Eine Ausnahme bilden hier die beiden südeuropäischen Städte Lissabon und Madrid, in welchen eine „*leichte Wärmebelastung*“ im Mittel mit den geringsten Sterbefallzahlen assoziiert ist. Eine Erklärung hierfür könnten langfristige Anpassungsmechanismen sein, die bei der Bewertung der thermischen Umwelt unberücksichtigt bleiben. Gerade in Südeuropa sind die Städte oft so angelegt, dass relativ wenig Sonnenlicht in die Straßenschluchten fällt, um ein Aufheizen im Sommer zu vermeiden (Pearlmutter et al., 1999). Dies könnte jedoch auch dazu führen, dass

dort auch dann noch thermischer Komfort herrscht, wenn für eine Freifläche bereits „*leichte Wärmebelastung*“ ermittelt wird.

In allen untersuchten Regionen ist die Sensitivität der Bevölkerung für „*starke Wärmebelastung*“ am größten. Gleichzeitig übersteigt die Häufigkeit dieser Belastungsklasse nirgendwo 9 Tage pro Jahr (Mittelwert 5 Tage pro Jahr). Dies lässt den Schluss zu, dass die „*starke Wärmebelastung*“ die beiden Kriterien für eine „*Hitzewelle*“, nämlich eine starke negative Auswirkung auf die Bevölkerung und eine geringe Auftretenswahrscheinlichkeit, erfüllt. Zusätzlich erfüllt die mit **HeRATE** bestimmte thermische Belastung auch die beiden Hauptbedingungen, welche von Folland et al., 1999 an einen Index zum Monitoring klimatischer Extreme gestellt werden. Diese sind: „*eine Relevanz für die Wirtschaft, Gesellschaft oder für Ökosysteme*“ und „*eine Anwendbarkeit auf kontinentaler oder globaler Ebene*“. Bisher wurde davon ausgegangen, dass es nicht möglich bzw. sehr schwierig ist, diese beiden Aspekte in einem Index zu vereinen (Zhang et al., 2001).

Unter der Annahme, dass die untersuchten Gebiete einigermaßen repräsentativ für Europa sind, kann eine „*mindestens starke Wärmebelastung*“ als Kriterium für eine europaweite Hitzewarnung verwendet werden. Durch die Verwendung der Gefühlten Temperatur, welche mittels des LM des Deutschen Wetterdienstes für einen Großteil Europas im 7 km Raster für die nächsten 48 Stunden vorhergesagt wird, ist es auch möglich, die thermisch belastenden Situationen für diese räumliche und zeitliche Skala vorher zu sagen.

Die retrospektive Bewertung der Eignung der „*mindestens starken Wärmebelastung*“ als Warnkriterium ergibt in allen untersuchten Gebieten eine geringe Quote von Fehlwarnungen, also Warnungen, die nicht mit einem Anstieg der Mortalität einher gehen. Da es jedoch zusätzlich nicht-thermische Ursachen für Mortalitätsanstiege gibt und auch weniger starke Hitzebelastung bereits mit einer Übersterblichkeit einhergeht, ist die für das Modell berechnete Sensitivität sehr gering. Dieses Problem ergibt sich allerdings auch bei Hitzewarnsystemen, welche speziell für einen Ort entwickelt und mit entsprechenden Mortalitätsdaten kalibriert wurden, wie beispielsweise dem Hitzewarnsystem in Rom (Koppe et al., 2004). Im Gegensatz zu diesen speziell für einen Ort entwickelten Systemen hat **HeRATE** den Vorteil, dass eine europaweite, flächendeckende Anwendung möglich ist, ohne dass für jeden Ort eine Kalibrierung durch Mortalitätsdaten vorgenommen werden muss. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit eine zusätzliche Kalibrierung des Systems mit Mortalitätsdaten vorzunehmen und somit das Hitzewarnsystem an besondere Anforderungen anzupassen (*Fine-Tuning*).

Durch die Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung ist es bei der Untersuchung von langen Zeitreihen oder von Klimaszenarien möglich, Änderungen in der Vulnerabilität der

Bevölkerung für die einzelnen thermischen Belastungsklassen aufzudecken. Hierbei kann die Vulnerabilität absolut oder relativ abgeschätzt werden. Eine absolute Abschätzung der Änderung der Verwundbarkeit ergibt die Anzahl von zusätzlichen Sterbefällen pro 100.000 Einwohnern. Die relative Vulnerabilität bezieht sich wie die relative Mortalität auf den Erwartungswert der Mortalität. Die Verwendung der relativen Größe hat den Vorteil, dass sie nicht von Trends in der Mortalitätsrate beeinflusst ist. Allerdings ist es mittels der relativen Vulnerabilität nicht möglich, Änderungen der Anfälligkeiten der einzelnen Belastungsklassen untereinander zu vergleichen, da sich der Erwartungswert, auf welchen die relative Vulnerabilität Bezug nimmt, einen Jahresgang aufweist. Problematisch ist die Verwendung der relativen Vulnerabilität daher vor allem bei Fragestellungen wie beispielsweise, ob ein Rückgang der kältebedingten Mortalität den Anstieg der hitzebedingten Mortalität kompensiert. Dies kann nur auf Basis der absoluten Vulnerabilität ermittelt werden.

Für die Berechnung der absoluten Vulnerabilität ist allerdings sowohl die Kenntnis der Populationsgröße als auch die Kenntnis der Höhe des Erwartungswertes der Mortalitätsrate erforderlich. Letzteres ist vor allem bei der Bewertung der gesundheitlichen Auswirkungen von Klimaänderungen problematisch, da die Abschätzung des Erwartungswertes der zukünftigen Mortalitätsrate eine zusätzliche Unsicherheitsquelle darstellt. Je nach Szenario für die Entwicklung der erwarteten Mortalitätsrate über den „*bekannten Bereich*“ hinaus ist beispielsweise in Baden-Württemberg für die Höhenlagen über 400 m mit einer Kompensation der höheren Anzahl von hitzebedingten Sterbefällen durch den Rückgang der kältebedingten Mortalität zu rechnen oder aber mit einer Zunahme der Gesamtzahl der thermisch bedingten Todesfälle. Für die tieferen Lagen ergeben jedoch beide Szenarien für die Entwicklung der erwarteten Mortalitätsrate einen Anstieg der thermische bedingten Mortalität.

Eine weitere Unsicherheitsquelle bei der Abschätzung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Gesundheit ist neben der Unsicherheit der Klimamodelle, die zukünftige Sensitivität der Bevölkerung für thermische Belastung. Diese hängt sowohl vom Grad der Anpassung als auch von verschiedenen Bevölkerungscharakteristika ab. In der hier durchgeführten Studie wird die stark vereinfachende Annahme einer allein von der Alterstruktur der Bevölkerung abhängigen Sensitivität gemacht. Angaben über die Alterstruktur der Bevölkerung waren im Gegensatz zu den anderen die Sensitivität beeinflussenden Faktoren wie langfristige Anpassungsmaßnahmen oder sozioökonomische Faktoren sowohl für den Zeitraum des Basis- als auch für den Zeitraum des Zukunftsszenarios erhältlich. Der Vorteil langfristige Anpassungsmaßnahmen nicht in den Sensitivitätsszenarien zu berücksich-

tigen, liegt darin, dass die daraus resultierenden Vulnerabilitätskarten Politikern als Entscheidungsgrundlage dienen können, um effektive Anpassungsmaßnahmen einzuleiten.

Ob sich **HeRATE** auch als Basis für den zu entwickelnden **UTCI** (***U**niversal **T**hermal **C**limate **I**ndex*) eignet, konnte noch nicht getestet werden. Allerdings wird **UTCI** sich von der Gefühlten Temperatur auf Basis des Klima-Michel-Modells nur im Wärmehaushaltskern unterscheiden. Die meteorologischen Eingangsgrößen sind die gleichen. Dies gilt nach bisherigem Stand der Diskussion bei der **UTCI**-Entwicklung bis auf eine veränderte Bekleidungsisolation bei Kälte auch für die Referenzbedingungen (Jendritzky et al., 2004).

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen standen nur von 6 europäischen Regionen Mortalitätsdaten zur Verfügung. Um jedoch Aussagen, wie:

- das gefundene Nord-Süd- beziehungsweise Ost-West-Gefälle der Vulnerabilität für hitzebedingte Mortalität;
- die bessere Anpassung an stärkere thermische Belastung von Populationen, die an eine größere Spannweite thermischer Situationen gewöhnt sind;
- die Abhängigkeit der Sensitivität für eine bestimmte Stufe thermischer Belastung von deren Häufigkeit;
- die stärkere Bedeutung der Andauer von Kältestress in den Regionen mit milderen Wintern
- oder die Abhängigkeit des Harvesting-Effektes von den klimatischen Gegebenheiten

bestätigen und absichern zu können, wäre eine Untersuchung weiterer Regionen in Europa erforderlich.

Durch die Einbeziehung der kurzfristigen Anpassung der Menschen an die lokalen Witterungsbedingungen der letzten Wochen konnte ein Verfahren entwickelt werden, welches sich ohne Modifikation auf unterschiedlichste Fragestellungen der Biometeorologie und der Umweltepidemiologie in unterschiedlichen klimatischen Regionen Europas anwenden lässt. Daher stellt **HeRATE** einen Fortschritt bei der Bewertung der thermischen Umwelt dar. Es ist jedoch noch zu prüfen, ob sich **HeRATE** auch in nicht gemäßigten Klimaten sinnvoll einsetzen lässt. Dass in den untersuchten europäischen Gebieten „*extremer Kältestress*“ gar nicht und „*extreme Wärmebelastung*“ und „*starker Kältestress*“ nur sehr selten aufgetreten sind, deutet allerdings auf einen noch vorhandenen Spielraum bei der Bewertung extremerer Klimate hin.

LITERATURVERZEICHNIS

Alberdi, J.C.; Díaz, J.; Montero, J.C.; Mirón, I., 1998: Daily mortality in Madrid community 1986-1992: Relationship with meteorological variables. Eur. J. Epidemiol. **14**, 571-578.

Anderson, G.S., 1999: Human morphology and temperature regulation. Int. J. Biometeorol. **43**, 99-109.

Armstrong, L.E.; Dziados, J.E., 1986: Effects of heat exposure on the exercising adult. In: Sports physical therapy (Hrsg.: Bernhardt, D.B.). New York, Churchill Livingstone.

Armstrong, L.E., 1998: Heat acclimatisation. In: Encyclopedia of sports medicine and science (Hrsg.: Fathey, D.B.). Internet Society for Sport Science. http://sportsci.org/encyc/heataccl/heataccl.html.

ASHRAE, 1992: Thermal environment conditions for human occupancy. ANSI/ASHRAE Standard 55-1992.

ASHRAE, 1997: Chapter 8: Thermal Comfort. In: ASHRAE Handbook: Fundamentals, 8.1 – 8.28.

Ballester, F.; Corella, D.; Pérez-Hoyos, S.; Sáez, M.; Hervás, A., 1997: Mortality as a function of temperature. A study in Valencia, Spain, 1991-1993. Int. J. Epidemiol. **26**, 551-561.

Basu, R.; Samet, J.M., 2002: Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. Epidemiol. Rev. **24**, 190-202.

Beniston, M., 2004: The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. Geophys. Res. Letters **31**, L02202 1-4.

Besancenot, J.-P., 2002: Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. Environnement, Risques & Santé **1**, 229-240.

Braga, A.L.; Zanobetti, A.; Schwartz, J., 2001: The time course of weather-related deaths. Epidemiology **12**, 662-667.

Bull, G.M.; Morton, J., 1978: Environment, temperature and death rates. Age and Aging **7**, 210-224.

Cornelius, I., 2003: Zur Bevölkerungsentwicklung in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2050. In: Statistisch Prognostischer Bericht 2003 (Hrsg.: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg). Stuttgart, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 69-88.

Curriero, F.C.; Heiner, K.S.; Samet, J.M.; Zeger, S.L.; Strug, L.; Patz, J.A., 2002: Temperature and mortality in eleven cities of the eastern United States. Am. J. Epidemiol. **155**, 80-87.

Davis, R.E.; Knappenberger, P.C.; Novicoff, W.M.; Michaels, P.J., 2002: Decadal changes in heat-related human mortality in the eastern United States. Clim. Res. **22**, 176-184.

Davis, R.E.; Knappenberger, P.C.; Michael, P.J.; Novicoff, P.C., 2004: Seasonality of climate-human mortality relationships in US cities and impacts of climate change. Clim. Res. **26**, 61-76.

De Dear, R.; Pickup, J., 1999: An outdoor human thermal comfort index (OUT_SET*) – Part II – Applications. In: Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology (Hrsg.: de Dear, R.; Potter, J.), Sydney, Macquane University, ICB 10.2.1-6.

Dessai, S., 2002: Heat stress and mortality in Lisbon. Part I. Model construction and validation. Int. J. Biometeorol. **47**, 6-12.

Díaz, J.; García, R.; Veláquez de Castro, F.; Hernández, E.; López, C.; Otero, A., 2002: Effects of extremely hot days on people older than 65 years in Seville (Spain) from 1986 to 1997. Int. J. Biometeorol. **46**, 145-149.

Díaz, J.; García, R.; López, C.; Limares, C.; Tobías, A.; Prieto, L., 2005: Mortality impact of extreme winter temperatures. Int. J. Biometeorol. **49**, 179-183.

DIN 1946 Teil 2, 1994: Raumlufttechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen. Berlin, Beuth-Verlag.

Donaldson, G.C.; Keatinge, W.R., 2002: Excess winter mortality: influenza or cold stress? Observational Study. BMJ **324**, 89-90.

Driscoll, D.M., 1971: The relationship between weather and mortality in ten major metropolitan areas in the United States, 1962-1965. Int. J. Biometeorol. **15**, 23-39.

Expert Group on Climate Change and Health in the UK, 2001: Health effects of climate change in the UK. An expert review for comment. London, Department of Health. http://www.dh.gov.uk/PublicationsAndStatistics/Publications/PublicationsPolicyAndGuidance/PublicationsPolicyAndGuidanceArticle/fs/en?CONTENT_ID=4002809&chk=OrqGI7.

Fanger, P.O., 1972: Thermal Comfort. New York, McGraw-Hill.

Fischer, P.H.; Brunekreef, B.; Libret, E., 2004: Air pollution deaths during the 2003 heat wave in the Netherlands. Atm. Environ. **38**, 1083-1085.

Folland, C.K.; Miller, C.; Bader, D.; Crown, M.; Jones, P.; Plummer, N.; Richman, M.; Parker, D.E.; Rogers, J.; Scholefield, P., 1999: Workshop on indices and indicators for climate extremes, Ashville, N.C., U.S.A., 3-6 June 1997, Breakout Group C: Temperature Indices for Climate Extremes. Clim. Change **42**, 31-43.

Friedrich, M.; Grätz, A.; Jendritzky, G., 2001: Further development of the urban bioclimate model UBIKLIM, taking local wind systems into account. Meteorol. Z. **10**, 267-272.

Frisancho, R., 1991: Human adaptation: a functional interpretation. Ann Arbor, University of Michigan Press.

Gagge, A.P.; Stolwijk, A.J.; Nishi, Y., 1971: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. ASHRAE Trans. **77**, 246-262.

Gagge, A.P.; Fobelets, A.P.; Berlund, L.G., 1986: A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Transactions **92**, 702-731.

Gemmell, I.; McLoone, P.; Boddy, F.A.; Dickinson, G.J.; Watt, G.C.M., 2000: Seasonal variation in mortality in Scotland. Int. J. of Epidemiol. **29**, 274-279.

Gerstengarbe, F.-W.; Badeck, F.; Hattermann, F.; Krysanova, V.; Lahmer, W.; Lasch, P.; Stock, M.; Suckow, F.; Wechsung, F.; Werner, C., 2003: Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie Ableitung erster Perspektiven. Potsdam, PIK-Report Nr. 83.

Givoni, B., 1986: Design for climate in hot dry cities. In: Urban climatology and its applications with special regard to tropical areas (Hrsg.: Oke, T.R.). Proceedings of the Technical Conference, Mexico D.F., 20-30 November 1984, Genf, WMO **652**, 487-513.

Griefahn, B., 1997: Acclimation to three different hot climates with equivalent wet bulb globe temperatures. Ergonomics **40**, 223-234.

Guest, C.S.; Willson, K.; Woodward, A.J.; Hennessy, K.; Kalkstein, L.S.; Skinner, C.; McMichael, A.J., 1999: Climate and mortality in Australia: retrospective study, 1979-1990, and predicted impacts in five major cities in 2030. Clim. Res. **13**, 1-15.

Hajat, S.; Kovats, R.S.; Atkinson, R.W.; Haines, A., 2002: Impact of hot temperatures on death in London: a time series approach. J. Epidemiol. Community Health **56**, 367-372.

Harms, V., 1998: Biomathematik, Statistik und Dokumentation. Kiel, Harms-Verlag.

Havenith, G.; Luttikholt, V.G.M.; Vrijkotte, T.G.M., 1995: The relative influence of body characteristics on humid heat stress response. Eur. J. Appl. Physiol. **70**, 270-279.

Havenith, G.; Coenen, J.M.L.; Kistemaker, L.; Kenney, W.L., 1998: Relevance of individual characteristics for human heat stress response is dependent on exercise intensity and climate type. Eur. J. Appl. Physiol. **77**, 231-241.

Havenith, G., 1999: Climate, Heat Balance, Heat Tolerance and Individual Differences. In: The Industrial and Occupational Users‘ Encyclopedia (Hrsg.: Mital, A.; Ayoub, M.; Kumar, S.). International Journal of Industrial Engineering.

Havenith, G., 2001: Temperature regulation and technology. Gerontechjournal **1**, 41-49.

Hennessy, E., 2002: Air pollution and short term mortality. BMJ **324**, 691-692.

Hensel, H., 1973: Temperaturregulation. In: Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie (Hrsg.: Keidel, W.D.). Stuttgart, Thieme-Verlag, 224-235.

Heyer, E, 1998: Witterung und Klima. Stuttgart-Leibzig, Teubner.

Hildebrandt, H.; Dornblüth, O.; Pschyrembel, W. (Hrsg), 1998: Pschyrembel Klinisches Wörterbuch, 258. Auflage, Berlin, de Gruyter.

Holst, T., 2004: Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur aus Daten eines regionalen Klimamodells für Baden-Württemberg. Bericht erstellt im Rahmen eines Werkvertrages mit dem Deutschen Wetterdienst.

Höppe, P., 1984: Die Energiebilanz des Menschen. Wiss. Mitt. Meteorolog. Inst. Uni München Nr. 49.

Höppe P.; Mayer H., 1987: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. Landschaft & Stadt **19**, 22-30.

Höppe, P., 1993: Heat balance modelling. Experimentia **49**, 741-747.

Hori, S.; Inouye, A.; Ihzuka, H.; Yamada, T., 1974: Study on seasonal variations of heat tolerance in young Japanese males and effects of physical training thereon. Jap. J. Physiol. **24**, 463-474.

Hori, S, 1995: Adaptation to heat. Jap. J. Physiol. **45**, 921-946.

Huynen, M.M.T.E.; Martens, P.; Schram, D.; Weijenberg, M.P.; Kunst, A.E., 2001: The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. Environ. Health Perspect. **109**, 463-470.

Inoue, Y., 2004: Prevention of heat illness in children and the elderly. Jpn. J. Biometeorol. **41**, 61-66.

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC-TGCIA, 1999: Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Version 1. Prepared by Carter, T.R.; Hulme, M.; Lal, M., Task group on Scenarios for Climate Impact Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, 2001: Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.: Houghton, J.T.; Ding, V.; Griggs, D.J.; Noguer, M.; van der Linden, P.J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C.A.). Cambridge, UK – New York, NY, USA, Cambridge University Press.

Jendritzky, G.; Sönning, W.; Swantes, H.J., 1979: Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung („Klima-Michel-Modell“). Beitr. Akademie f. Raumforsch. u. Landschaftsplanung **28**, 1-85.

Jendritzky, G.; Nuebler, W., 1981: A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol. Ser. B **29**, 313-326.

Jendritzky, G., 1990: Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen – Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell. Beitr. Akademie f. Raumforsch. u. Landschaftsplanung **114**, 7-69.

Jendritzky, G.; Grätz, A., 1999: Das Bioklima des Menschen in der Stadt. In: Stadtklima und Luftreinhaltung (Hrsg.: Helbig, A.; Baumüller, J.; Kerschgens, M.J.). Berlin, Springer-Verlag, 126-158.

Jendritzky, G.; Staiger, H.; Bucher, K.; Grätz, A.; Laschewski, G., 2000: The Perceived Temperature. The method of the Deutscher Wetterdienst for the assessment of cold stress and heat load for the human body. Internet workshop on Windchill, April 3 to 7, 2000, hosted by the Meteorological Service of Canada, Environment Canada.

Jendritzky, G.; Maarouf, A.; Staiger, H., 2001: Looking for an universal thermal climate index UTCI for outdoor applications. In: Conference Proceedings: Moving thermal comfort standards into the 21th century, 5.-8. April 2001, Windsor, UK.

Jendritzky, G.; Bessemoulin, P.; Blazejczyk, K.; Cegnar, T.; Dittmann, E.; Fiala, D.; Havenith, G.; Hassi, J.; Höppe, P.; Holmér, I.; Laschewski, G.; McGregor, G.; Nicol, F.; Orlandini, S.; Weis, P., 2004: Towards a universal thermal climate index UTCI for assessing the thermal environment of a human being. Memorandum of Understanding, COST-Action 730. http://www.dwd.de/en/wir/Geschaeftsfelder/Medizin/UTCI/UTCI_COST/documents/MoU_UTCI_Draft_October_06.pdf.

Jones, T.S.; Liang, A.P.; Kilbourne, E.M.; Griffin, M.R.; Patriarca, P.A.; Wassilak, S.G.; Mullan, R.J.; Herrick, R.F.; Donnell Jr., H.D.; Choi, K.; Thacker, S.B., 1982: Morbidity and mortality associated with the July 1980 heat wave in St Louis and Kansas City, Mo. JAMA **247**, 3327-3331.

Kalkstein, L.S., 1991: A new approach to evaluate the impact of climate on human health. Environ. Health Perspect. **96**, 145-150.

Kalkstein, L.S., 2001: Biometeorology – looking for the links between weather, climate and health. WMO-Bulletin **2**, 136-142.

Katsouyanni, K. Touloumi, G.; Spix, C.; Schwartz, J.; Balducci, F.; Medina, S.; Rossi, G.; Wojtyniak, B.; Sunyer, J.; Bacharova, L.; Schouten, J.P.; Ponka, A.; Anderson, H.R., 1997: Short term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: Results from time series data from the APHEA project. BMJ **314**, 1658–1683.

Katsouyanni, K.; Touloumi, G., 1998: Health effects of heat waves and recent trends in temperature changes: the example of Athens. Background Document: Early Human Health Effects of Climate Change in Europe. World Health Organization, Regional Office for Europe, European Centre for Environment and Health. 21-23 May 1998, Rome, Italy.

Keatinge, W.R.; Donaldson, G.C.; Bucher, K.; Cordioli, E.; Dardanoni, L.; Jendritzky, G.; Katsouyanni, K.; Kunst, A.E.; Mackenbach, J.P.; Martinelli, M.; McDonald, C.; Nayha, S.; Vuori, I., 1997: Cold exposure and winter mortality from ischaemic heart, cerebrovascular, and respiratory disease, and all causes, in warm and cold regions of Europe. Lancet **349**, 1341-1346.

Keatinge, W.R.; Donaldson, G.C.; Cordioli, E.; Martinelli, M.; Kunst, A.E.; Mackenbach, J.P.; Nayha, S.; Vuori, I., 2000: Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: observational study. BMJ **321**, 670-673.

Kenney, W.L., 1985: A review of comparative responses of men an women to heat stress. Environ. Res. **37**, 1-11.

Khosla, R.; Guntupalli, K.K., 1999: Heat related illness. Critical Care Clinics **15,** 251-263.

Kilbourne, E.M., 1997: Heat waves and hot environments. In: The Public Health Consequences of Disaster (Hrsg.: Noji, E.K.), New York, Oxford, Oxford University Press, 245-269.

Koppe, C.; Kovats, S.; Jendritzky, G.; Menne, B.; Baumüller, J.; Bitan, A.; Díaz, J; Ebi, K.L.; Havenith, G.; López, C.; Michelozzi, P.; Nicol, F.; Matzarakis, A.; McGregor, G.; Nogueira, P.J.; Sheridan, S.; Wolf, T., 2004: Heat-waves: risks and responses. World Health Organization. Regional Office for Europe. Health and Global Environmental Change, Series No. 2. Kopenhagen, Dänemark.

Kunst, A.E.; Looman, C.W.N.; Mackenbach, J.P., 1993: Outdoor air temperture and mortality in the Netherlands: A time-series analysis. Am. J. Epidemiol. **137**, 331-341.

Kyselý, J., 2004: Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic. Int. J. Biometorol. **49**, 91-97.

Kyselý, J.; Huth, R., 2004: Heat-related mortality in the Czech Republic examined through synoptic and 'traditional' approaches. Clim. Res. **25**, 265-274.

Larsen, J., 2003: Record heat wave in Europe takes 35,000 lives – Far greater losses may lie ahead. Washington, Earth Policy Institute. http://www.earth-policy.org/Updates/Update29.html.

Laschewski, G.; Jendritzky, G., 2002: Effects of the thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany. Clim. Res. **21**, 91-103.

Lerchl, A., 1998: Changes in the seasonality of mortality in Germany from 1946 to 1995: the role of temperature. Int. J. Biometeorol. **42**, 84-88.

Madsen, T.L., 1979: Measurement of thermal comfort and discomfort. In: Indoor Climate (Hrsg.: Fanger, P.O.; Valbjørn, J.O.), Kopenhagen, Danish Building and Research Institute, 491-502.

Makie, T.; Harada, M.; Kinikawa, N.; Toyoshiba, H.; Yamanaka, T.; Nakamura, T.; Sakamoto, M.; Nose, Y., 2002: Association of meteorological and day-of-the-week factors with emergency hospital admissions in Fukuoka, Japan. Int. J. Biometeorol. **46**, 38-41.

Mammarella, A.; Paoletti, V., 1989: Malattie associate ad alte temperature ambientali. Clim. Ter. **131**, 195-201.

Matsumoto, T.; Lee, J.-B.; Taimura, A.; Yamauchi, M.; Kosaka, M.; Pongchaidecha, A.; Praputpittaya, C.; Nishimura, M.; Nishiyama, T.; Sungenoya, J., 1999: Long-term heat-acclimatization through permanent residents in Tropics. In: Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, Wesley Conference Centre, Sydney, Australia, 8-12 November 1999.

Mayer, H.; Höppe, P.R., 1987: Thermal comfort of man in different urban environments. Theor. Appl. Climatol. **38**, 43-49.

McGregor, G.R.; Watkin, H.A.; Cox, M., 2004: Relationships between the seasonality of temperature and ischaemic heart disease mortality: implications for climate based health forecasting. Clim. Res. **25**, 253-263.

McMichael A.J.; Haines, A.; Slooff, R.; Kovats, R.S. (Hrsg.), 1996: Climate change and human health: an assessment by a task group on behalf of the World Health Organization, the World Meteorological Organization and the United Nations Environment Programme. Genf, WHO.

Meehl, A.G.; Tebaldi, C., 2004: More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. Science **305**, 994-997.

Michelozzi, P.; Fano, V.; Forastiere, F.; Barca, A.; Kalkstein, L.S.; Perucci, C.A., 2000: Weather conditions and elderly mortality in Rome during summer. WMO Bulletin **49**, 348-355.

Michelozzi, P.; de Donato, F.; Forastiere, F.; D'Ovido, M.; Perucci, C., 2004: Impact of heat waves on mortality – Rome, Italy, June - August 2003. JAMA **291**, 2537-2538.

Montero Rubio, J.C.; Mirón Pérez, I.J.; Díaz Jiménez, J.; Alberdi Odriozola, J.C., 1997: Influencia de variables atmosféricas sobre la motralidad por enfermededes respiratorias y cardiovasculares en los mayores de 65 anos de la Comunidad de Madrid. Gac. Sanit. **11**, 164-170.

Morgan, C. und DeDear, R., 2003: Weather, clothing and thermal adaptation to indoor climate. Clim. Res. **24**, 267-284.

Müller, M.J., 1983: Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde. Heft 5, Trier, Forshungstelle Bodenerosion der Universität Trier.

Nafstad, P.; Skrondal, A.; Bjertness, E., 2002: Mortality and temperature in Oslo, Norway, 1990-1995. Eur. J. Epidemiol. **17**, 621-627.

Nielson, B., 1998: Heat acclimation – Mechanisms of adaptation to exercise in the heat. Int. J. Sports Med. **19**, 154-156.

Nieuwolt, S., 1986: Design for climate in hot humid cities. In: Urban climatology and its applications with special regard to tropical areas (Hrsg.: Oke, T.R.). Proceedings of the Technical Conference, Mexico D.F., 20-30 November 1984, Genf, WMO **652**, 514-534.

Nogueira, P.J.; Nunes, B.; Dias, C.M.; Falcao, J.M., 1999: Um sistema de vigilância e alterta de ondas de calor com efeitos na mortalidade: o índice Ícaro. Revista de Saúde Pública Portuguesa **1**, 79-84.

OFCM Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, 2003: Report on the Wind Chill Temperature and Extreme Heat Indices: Evaluation and Improvement Projects. Washington DC, USA, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Pajares Ortíz, M.S.; Díaz Jiménez, J.; Montero Rubio, J.C.; Alberdi Odrizola, J.C.; Mirón Pérez, I.J., 1997: Mortalidad diaria en la comunidad de Madrid durante el periodo 1986-1991 para el grupo de edad de 45 a 64 anos: su relacíon con la temperatura del aire. Rev. Esp. Salud. Pública **71**, 149-160.

Pandolf, K.B., 1991: Aging and heat tolerance at rest and work. Experim. Aging Res. **17**, 189-204.

Pandolf, K.B., 1998: Time course of heat acclimatisation and its decay. Int. Sports Med. **19**, 157-160.

Parsons, K.C., 2003: Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. 2. Ausgabe. London, Taylor & Francis.

Pearlmutter, D.; Bitan, A.; Berliner, P., 1999: Microclimatic analysis of “compact” urban canyons in an arid zone. Atm. Environ. **33**, 4143-4150.

Pickup, J.; de Dear, R., 1999: An outdoor human thermal comfort index (OUT_SET*) – Part I – The model and its assumptions. In: Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology (Hrsg.: de Dear, R.; Potter, J.), Sydney, Macquane University, ICB 9.4.1-6.

Rabl, A., 2003: Interpretation of air pollution mortality: Number of deaths or years of life lost. J. Air & Waste Manage. Assoc. **53**, 41-50.

Räisänen, J.; Hansson, U.; Ullerstig, A.; Döscher, R.; Graham, L.P.; Jones, C.; Meier, H.E.M.; Samuelsson, P.; Willén, U., 2004: European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. Clim. Dynamics **22**, 13-31.

Rein, H., 1948: Einführung in die Physiologie des Menschen. 9. Auflage, Berlin-Heidelberg, Springer.

Robinson, P.J., 2001: On the definition of a heat wave. J. Appl. Meteorol. **40**, 762-775.

Rooney, C.; McMichael, A.J.; Kovats, R.S.; Coleman, M.P., 1998: Excess mortality in England and Wales, and in Greater London, during the 1995 heatwaves. J. Epidemiol. Community Health **52**, 482-486.

Rothfusz, L. P., 1990: The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index). Fort Worth, TX, NWS Southern Region Technical Attachment, SR/SSD 90-23.

Sachs, L., 1984: Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. Berlin, Springer Verlag.

Saez, M.; Sunyer, J.; Castellsague, J.; Murillo, C.; Antó, J.M., 1995: Relationship between weather temperature and mortality: a time series analysis approach in Barcelona. Int. J. Epidemiol. **24**, 876-882.

Saez, M.; Sunyer, J.; Tobías, A.; Ballester, F.; Antó, J.M., 2000: Ischaemic heart disease mortality and weather temperature in Barcelona, Spain. Eur. J. Pub. Health **10**, 58-63.

Sartor, F.; Snacken, R.; Demuth, C.; Walckiers, D., 1995: Temperature, ambient ozone levels, and mortality during summer 1994, in Belgium. Environ. Res. **70**, 105-113.

Sakamoto-Momiyama, M., 1977: Seasonality in human mortality. Tokyo, University of Tokyo Press.

Schär, C.; Vidale, P.L.; Lüthi, D.; Frei, C.; Häberli, C.; Liniger, M.A.; Appenzeller, C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature **427**, 332-336.

Schönwiese, C.D., 1992: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. 2. Auflage, Berlin, Stuttgart, Gebrüder Borntraeger.

Shapiro, Y; Moran, D.; Epstein, Y., 1998: Acclimatization strategies – Preparing for exercise in the heat. Int. J. Sports Med. **19**, 161-163.

Sheridan, S.C.; Dolney, T.J., 2003: Heat, mortality, and level of urbanization: measuring vulnerability across Ohio, USA. Clim. Res. **24**, 255-265.

Smith, J.B.; Pitts, G.J., 1997: Regional climate change scenarios for vulnerability and adaptation assessments. Clim. Change **36**, 3-21.

Smoyer, K.E., 1998: A comparative analysis of heat waves and associated mortality in St. Louis, Missouri – 1980 and 1995. Int. J. Biometeorol. **42**, 44-50.

Smoyer, K.E.; Rainham, D.G.C.; Hewko, J.N., 2000: Heat-stress-related mortality in five cities in Southern Ontario: 1980-1996. Int. J. Biometeorol. **44**, 190-197.

Staiger, H.; Bucher, K.; Jendritzky, G., 1997: Gefühlte Temperatur. Die thermophysiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestress beim Aufenthalt im Freien in der Maßzahl Grad Celsius. Ann. Meteorol. **33**, 100-107.

Steadman, R.G., 1979a: The assessment of sultriness I. A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. J. Appl. Meteorol. **18**, 861-873.

Steadman, R.G., 1979b: The assessment of sultriness II. Effects of wind, extra radiation, and barometric pressure on apparent temperature. J. Appl. Meteorol. **18**, 874-885.

Stedman, J.R., 2004: The predicted number of air pollution related deaths in the UK during the August 2003 heatwave. Atm. Environ. **38**, 1087-1090.

Stein, U., 2003: Voraussichtliche Bevölkerungsentwicklung in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs bis 2020. In: Statistisch Prognostischer Bericht 2003 (Hrsg.: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg). Stuttgart, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 89-119.

Taubenheim, J., 1969: Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. In: Geographische Monographien, Band 5 (Hrsg.: Buchheim, W.; Fanselau, G.; Hiller, W.; Menzel, H.). Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Pertig.

Vandentorren, S.; Suzan, F.; Pascal, M.; Maulpoix, A.; Medina, S., 2003: Données météorologiques et enquetes sur la mortalité dans 13 grandes villes françaises. Bulletin épidémiologique hebdomadaire, Numéro spécial **45-46**, 219-220.

Verein Deutscher Ingenieure VDI, 1998: Umweltmeteorologie – Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima. VDI-Richtlinien 3787, Blatt 2, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b. Berlin, Beuth-Verlag.

Watts, J.D.; Kalkstein, L.S., 2004: The development of a warm-weather relative stress index for environmental applications. J. Appl. Meteorol. **43**, 503-513.

Williams, C.G.; Wyndham, C.H.; Morrison, J.P., 1967: Rate of loss of acclimatisation in summer and winter. J. Appl. Physiol. **22**, 21-26.

Williams, C.G.; Heyns, A.J., 1969: Differential acclimatisation as a function of duration of exposure. Int. Z. Angewandte Physiol. **27**, 198-211.

Yousef, M.K.; Sagawa, S.; Shiraki, K., 1986: Heat stress: A threat to health and safety. J. UOEH **8**, 355-364.

Zanobetti, A.; Schwartz, J.; Samoli, E.; Gryparis, A.; Touloumi, G.; Atkinson, R.; Le Terre, A.; Bobros, J.; Celko, M.; Goren, A.; Forsberg, B.; Michelozzi, P.; Rabzenko, D.; Aranguez Ruiz, E.; Katsouyanni, K., 2002: The temporal pattern of mortality responses to air pollution: A multicity assessment of mortality displacement. Epidemiology **13**, 87-93.

Zhang, X.; Hogg, W.D.; Bonsal, B.R., 2001: A cautionary note on the use of seasonally varying thresholds to assess temperature extremes. Clim. Change **50**, 505-507.

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN SYMBOLE

A_{Du}:	Oberfläche eines Einheitskörpers (Mensch)	*(m²)*
aKb_O:	Obergrenze des Komfortbereichs mit Berücksichtigung der Anpassung	*(°C)*
aKb_U:	Untergrenze des Komfortbereichs mit Berücksichtigung der Anpassung	*(°C)*
AT:	Apparent Temperature	*(°C; °F)*
BK:	thermische Belastungsklasse	
BW:	Baden-Württemberg	
e:	Wasserdampfdruck der Luft	*(hPa)*
E_{rein}:	Reinepisoden	
E_{roh}:	Rohepisoden	
E_{roh}*:	bereinigte Rohepisoden	
ET:	Effektivtemperatur	*(°C; °F)*
EW:	Erwartungswert	
Fxx:	Gaußscher Tiefpassfilter mit einer Länge von xx Tagen	
G:	Gebiet	
Ges:	Gesamtbevölkerung	
GT:	Gefühlte Temperatur	*(°C)*
GTzz:	Gefühlte Temperatur um zz UTC	*(°C)*
$GTzz_{Fxx}$:	Mit den Filtergewichten des Fxx gefilterte Gefühlte Temperatur um zz UTC	*(°C)*

H:	= M-W. innere Wärmeproduktion: überschüssige Energie, welche als Wärme freigesetzt wird; abhängig von der Aktivität einer Person	*(W)*
	Häufigkeit, Anzahl der Tage pro Jahr	*(d)*
HI:	Heat Index	*(°F)*
HSI:	Heat Stress Index	
I_{cl}:	Wärmeisolation der Bekleidung (*1clo = 0,155 m²K/W*)	*(clo; m²K/W)*
JD:	julianischer Tag	*(d)*
Kb_O:	Obergrenze des Komfortbereichs ohne Berücksichtigung der Anpassung	*(°C)*
Kb_U:	Untergrenze des Komfortbereichs ohne Berücksichtigung der Anpassung	*(°C)*
KS:	Kältestress	
LK:	Landkreis	
M:	Gesamtenergieumsatz (metabolische Rate)	*(W)*
M_{therm}:	thermisch bedingte Mortalität	
MR:	Mortalitätsrate pro 100.000 Einwohner	
MR_{roh}:	Rohdaten der Mortalitätsrate pro 100.000 Einwohner	
MR_{Fxx}:	Mit den Filtergewichten des Fxx gefilterte Mortalitätsrate	
Out_SET*:	Outdoor Standard Effective Temperture	*(°C; °F)*
PET:	Physiologisch Äquivalente Temperatur	*(°C)*
PMV:	Predicted Mean Vote	
PMV*:	Predicted Mean Vote einschließlich der Korrektur von Gagge et al., 1986	
Q*:	Strahlungsbilanz	*(W)*
$Q_{H:}$	turbulenter Fluss fühlbarer Wärme	*(W)*
Q_{Ls}:	Fluss latenter Wärme durch Wasserdampfdiffusion	*(W)*
Q_{Re}:	Wärmetransport über die Atmung	*(W)*
Q_{Sw}:	turbulenter Fluss latenter Wärme durch die Verdunstung von Schweiß	*(W)*
R^2:	Bestimmtheitsmaß	

ResM:	Residuen der Mortalität	
rH:	relative Häufigkeit	*(%)*
rM:	relative Mortalität	*(%)*
rM_m:	relative Mortalität, modelliert	*(%)*
S_R:	Reststreuung	
SET:	Standard Effective Temperature	*(°C; °F)*
T*:	Filterlänge	*(d)*
T_a:	Lufttemperatur	*(°C)*
T_{mrt}:	mittlere Strahlungstemperatur	*(°C)*
u75	Altersgruppe der unter 75-Jährigen	
ü75	Altersgruppe der über 75-Jährigen	
v	Windgeschwindigkeit	*(m/s)*
v_r:	relative Windgeschwindigkeit (relativ zum Körper des Menschen)	*(m/s)*
w:	Filtergewicht	
W:	mechanische Leistung	*(W)*
WB:	Wärmebelastung	
WCT:	Wind Chill Temperature	*(°C; °F)*
RV:	Relative Vulnerabilität	*(%)*
Z:	Zeitraum	
x_n:	getesteter Wert	
μ:	zentrierter gleitender Mittelwert	
φ:	Standardabweichung	

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abb. 3.1	Zusammenstellung einiger Verfahren zur Bewertung der thermischen Umwelt	32
Abb. 3.2	Hypothetischer Verlauf des Korrelationskoeffizienten zwischen thermischer Belastung und Mortalität beim Auftreten eines Harvesting-Effektes	53
Abb. 5.1	Mittelwert der relativen Mortalität (Mortalität in % EW) in Abhängigkeit von der Gefühlten Temperatur um 12 UTC für London (1976-2000) und Madrid (1986-1997)	65
Abb. 5.2	Perzentilwerte der Gefühlten Temperatur um 12 UTC für verschiedene Zeiträume (Baden-Württemberg)	66
Abb. 5.3	Konzeptionelles Modell für die Gewichtungsfunktionen für kurzfristige Akklimatisation und empirisches Modell für die kurzfristige, verhaltensgesteuerte Anpassung	68
Abb. 5.4	Filtergewichte des halben Gaußfilters F41 und Summe der Filtergewichte	70
Abb. 5.5	Verlauf der mit dem halben Gaußfilter gefilterten Werte (GT12 F41) der Gefühlten Temperatur um 12 UTC (GT12) (Baden-Württemberg)	70
Abb. 5.6	Verlauf der Schwellenwerte für die thermischen Belastungsstufen (Baden-Württemberg, 1984)	73
Abb. 5.7	Mittlerer Jahresgang der Mortalitätsrate durch Mittelung der Julianischen Tage (Baden-Württemberg, 1968-2003)	78
Abb. 5.8	Trendbereinigter Erwartungswert basierend auf dem geglätteten mittlerem Jahresgang (Baden-Württemberg, 1968-2003)	78
Abb. 5.9	Bestimmung der Mortalitätsepisoden (Baden-Württemberg)	81

Abb. 5.10	Bereinigung der Rohepisoden (Eroh) und Bestimmung des Jahresgangs (MRF181) der bereinigten Rohepisoden (Eroh*)	82
Abb. 5.11	Zeitreihe zerlegt in Reinepisoden (Erein), Erwartungswert (EW) und Reststreuung + Erwartungswert (EW+SR)	83
Abb. 5.12	Restaurationsverfahren basierend auf Rohdaten (Baden-Württemberg, 1968-1977).	85
Abb. 5.13	Erwartungswerte basierend auf bereinigter Mortalitätsrate mittels Restaurationsverfahren (Baden-Württemberg, 1968-1977)	86
Abb. 5.14	Vergleich der Werte der Filterfunktion für die Original-Mortalitätsraten (MRF365) mit den auf Basis des 5-Jahres Mittelwertes der letzten 5 vorhandenen Jahre berechneten Werten der Filterfunktion (MRF365_ergänzt) (Baden-Württemberg, 1977)	87
Abb. 5.15	Vergleich der verschiedenen Verfahren zur Ermittlung des Erwartungswertes	88
Abb. 5.16	Mittelwert der Residuen der Mortalitätsrate (MR) für unterschiedliche Klassen thermischer Belastung (Baden-Württemberg, 1968-2003).	89
Abb. 5.17	Schematische Darstellung der Beziehungen zwischen Vulnerabilität, Anpassungskapazität und potenziellen Auswirkungen auf die Gesundheit	91
Abb. 5.18	Wochengang der mittleren relativen Mortalität (Baden-Württemberg, 1968-2003)	92
Abb. 5.19	Wochengang der relativen Mortalität für einzelne Monate (Baden-Württemberg, 1968-2003)	93
Abb. 5.20	Beispiel für den Wochengang der relativen Mortalität (Baden-Württemberg, Juni 1985)	94
Abb. 6.1	Mittlere relative Mortalität ohne Berücksichtigung einer zeitlichen Verschiebung (Baden-Württemberg, 1968-2003)	102
Abb. 6.2	Mittlere relative Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Baden-Württemberg, 1968-2003)	103
Abb. 6.3	Auswirkung der Andauer thermischer Belastung auf den Mittelwert der relativen Mortalität (Baden-Württemberg, 1968-2003)	106
Abb. 6.4	Änderung der mittleren relativen Mortalität der einzelnen thermischen Belastungsklassen (Baden-Württemberg, 1969-2002)	107
Abb. 6.5	Trends der relativen Mortalität im Jahresverlauf (Baden-Württemberg, 1968-2003)	110
Abb. 6.6	Relative Mortalität nach Altersklassen ohne Berücksichtigung der Zeitverschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalität (Baden-Württemberg)	111

Abb. 6.7 Relative Mortalität nach Altersgruppen unterteilt für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Baden-Württemberg, 1968 - 2003) 113

Abb. 6.8 Auswirkung der Andauer thermischer Belastung auf die mittlere relative Mortalität (Baden-Württemberg, 1968 - 2003) 115

Abb. 6.9 Relative Mortalität von Männern und Frauen für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Baden-Württemberg, 1968 - 2003) 117

Abb. 6.10 Auswirkung der Andauer thermischer Belastung auf die mittlere relative Mortalität für Männer (M) und Frauen (F) (Baden-Württemberg, 1968 - 2003) 117

Abb. 6.11 Mittlere relative Mortalität für die unterschiedlichen thermischen Belastungsklassen unter Berücksichtigung der Zeitverschiebung mit den stärksten Auswirkungen auf die Mortalität (1986-1996) 121

Abb. 6.12 Mittlere relative Mortalität in Bezug zur relativen Auftretenshäufigkeit einer Belastungsklasse (1986-1996) 123

Abb. 6.13 Auswirkung der Andauer thermischer Belastungsklasse auf die mittlere relative Mortalität 126

Abb. 6.14 Häufigkeitsverteilungen der Gefühlten Temperatur um 12 UTC (GT12) für das PIK-Basisszenario (1951-2000) und das PIK-Zukunftsszenario (2001-2055) 130

Abb. 6.15 Änderung der Auftretenshäufigkeit von Tagen mit „*mäßiger*“ bis „*extremer Wärmebelastung*“ sowie Tagen mit „*mäßigem*“ bis „*starkem Kältestress*“ relativ zum Basisszenario 131

Abb. 6.16 Änderung der Auftretenshäufigkeit von Tagen mit „*starker*“ bis „*extremer Wärmebelastung*“ relativ zum Basisszenario 132

Abb. 6.17 Änderung der relativen Vulnerabilität im Zeitraum 2001-2055 für „*mäßige*“ bis „*extreme Wärmebelastung*“ sowie „*starke*“ und „*extreme Wärmebelastung*“ verglichen mit dem Basisszenario (1951-2000 136

Abb. 6.18 Wärmebelastungsvorhersage für den 23.07.2004 ausgegeben vom Deutschen Wetterdienst am 22.07.2004 139

Abb. 6.19 Vierfeldertafel zur Berechnung von Sensitivität, Spezifität sowie Vorhersagewert für ein positives bzw. negatives Testergebnis 139

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abb. A 1 Verlauf der Filtergewichte (durchgezogenen Linien) und der Summe der Filtergewichte (gestrichelte Linien) für das exponentielle Filter (exp(1/3) = exp(d/6)), das lineare Filter mit 29 Filtergewichten (lin_29 = (29-d)/29) und das Gaußfilter 194

Abb. A 2 Mittlere relative Mortalität für die auf Basis unterschiedlicher Filterfunktionen bestimmten thermischen Belastungsklassen (Baden-Württemberg, 1968-1997). 194

Abb. A 3 Mittlere relative Mortalität für verschiedene Belastungsklassen (Baden-Württemberg, 1968-2003). 195

Abb. A 4 Mittelwerte der relativen Mortalität für die Klassen thermischer Belastung für Zeitverschiebungen von 0 bis 17 Tagen (Baden-Württemberg, 1968-2003) 198

Abb. A 5 Relative Mortalität für die verschiedenen Belastungsklassen und die jeweils komplett vorhandenen Zeiträume; ohne Zeitverschiebung 200

Abb. A 6 Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (London, 1976-1996) 202

Abb. A 7 Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (die Niederlande, 1979-1997) 202

Abb. A 8 Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Baden-Württemberg, 1968-2003) 203

Abb. A 9 Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Budapest, 1971-2000) 203

Abb. A 10 Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Lissabon, 1980-1998) 204

Abb. A 11 Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Madrid, 1986-1997) 204

Abb. A 12 Anzahl der Tage pro Jahr mit mäßiger bis extremer Wärmebelastung 206

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tab. 3.1	Arten des Energieaustauschs und dazugehörige meteorologische Elemente	18
Tab. 3.2	Direkt hitzebedingte Beschwerden und deren Ursachen und Symptome	21
Tab. 3.3	Untersuchungen zum zeitlichen Einsetzen und zum Verlust von physiologischen Veränderungen im Rahmen der kurzfristigen Akklimatisation	25
Tab. 3.4	Bewertung der PMV Werte	36
Tab. 3.5	Zusammenstellung der diskutierten Studien zum Zusammenhang zwischen thermischer Belastung und Mortalität	40
Tab. 3.6	Schwellenwerte für das Mortalitätsminimum und „starke“ Anstiege der Mortalität	45
Tab. 3.7	Zeitverschiebung zwischen thermischer Belastung und Mortalität unter warmen und kalten Bedingungen	47
Tab. 3.8	Andauer und Ausmaß des Harvesting-Effektes nach Wärmebelastung	54
Tab. 5.1	Gefühlte Temperatur, PMV, thermisches Empfinden und Belastungsstufe	64
Tab. 5.2	Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle in Baden-Württemberg als Differenz zwischen der Summe der Todesfälle im August 2003 und der mittleren Summe der Todesfälle der Vergleichsperioden	77
Tab. 5.3	Liste der vorhandenen Mortalitätsdaten	96
Tab. 5.4	Datenbasis für die Berechnung der Gefühlten Temperatur	98
Tab. 5.5	Lage der untersuchten Gebiete	99

Tab. 5.6	Charakteristische Perzentilwerte der Gefühlten Temperatur um 06 UTC (GT06) und 12 UTC (GT12)	100
Tab. 6.1	Mittlere relative Mortalität unter Berücksichtung der jeweils mit den stärksten Auswirkungen auf die Mortalität einhergehenden Zeitverschiebungen (Baden-Württemberg, 1968-2003)	104
Tab. 6.2	Harvesting-Effekte nach „*starker Wärmebelastung*“ und „*mäßigem Kältestress*“ (Baden-Württemberg, 1968-2003)	105
Tab. 6.3	Änderung der relativen Vulnerabilität für thermische Belastung unter Berücksichtigung der mit den stärksten Mortalitätsauswirkungen einhergehenden zeitlichen Verschiebungen (Baden-Württemberg)	108
Tab. 6.4	Änderung der absoluten Vulnerabilität für thermische Belastung unter Berücksichtigung der mit den stärksten Mortalitätsauswirkungen einhergehenden zeitlichen Verschiebungen (Baden-Württemberg)	109
Tab. 6.5	Mittelwert der relativen Mortalität für die thermischen Belastungsklassen unter Berücksichtigung der mit den stärksten Mortalitätsauswirkungen einhergehenden zeitlichen Verschiebungen (Baden-Württemberg, 1968-2003)	112
Tab. 6.6	Harvesting-Effekte nach „starker Wärmebelastung“ und „mäßigem Kältestress“ für die Altersgruppen der unter und über 75-Jährigen (Baden-Württemberg, 1968-2003)	114
Tab. 6.7	Mittlere relative Mortalität der einzelnen thermischen Belastungsklassen für Männer und Frauen unter Berücksichtigung der mit den stärksten Mortalitätsauswirkungen einhergehenden zeitlichen Verschiebungen (Baden-Württemberg, 1968-2003)	116
Tab. 6.8	Relative Häufigkeiten der thermischen Belastungsklassen (1986-1996)	120
Tab. 6.9	Zeitverschiebung zwischen thermischer Belastung und stärksten Auswirkungen auf die Mortalität	120
Tab. 6.10	Relative Mortalität für die Zeitverschiebungen mit den stärksten Auswirkungen auf die Mortalität (1986-1996)	122
Tab. 6.11	Vorverlegung des Todeseintrittsdatums während „*starker Wärmebelastung*“ für die gesamten vorhandenen Zeiträume	124
Tab. 6.12	Vorverlegung des Todeseintrittsdatums während „*mäßigem Kältestress*“ für die gesamten vorhandenen Zeiträume	125
Tab. 6.13	Abhängigkeit der relativen Mortalität rM vom julianischen Tag JD ($rM = a \cdot JD + b$) für die gesamten Zeitreihenlängen	127
Tab. 6.14	Relative Vulnerabilität (rVG,BK) unter Berücksichtigung der zeitlichen Verschiebung mit den stärksten Auswirkungen auf die Mortalität (1986-1996)	128

Tab. 6.15 Relative Mortalität für das gesamte Bundesland Baden-Württemberg für Basis- und Zukunftsszenario 134

Tab. 6.16 Differenz der absoluten Vulnerabilität (pro 100.000 Einwohner und Jahr) zwischen Zukunfts- und Basisszenario für „*leichte*“ bis „*extreme Wärmebelastung*“ (Wärme) und „*leichten*“ bis „*extremen Kältestress*“ (Kälte) für die Ansätze „*Trend*“ und „*Mittel*“ zur Abschätzung der erwarteten Mortalitätsrate in Baden-Württemberg 137

Tab. 6.17 Sensitivität, Spezifität sowie Vorhersagewert für ein positives bzw. negatives Testergebnis (1986-1996) 141

Tab. 7.1 Differenz zwischen 95%- und 5%-Perzentilwert der Gefühlten Temperatur um 12 UTC (1986-1996)

149

Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Tab. A 1	Statistische Kennzahlen der Sterbefallzahlen in den einzelnen Altersklassen (Baden-Württemberg, 1968-2003)	196
Tab. A 2	Mittelwert der Mortalität relativ zum Erwartungswert während unterschiedlicher thermischer Belastungsstufen (Baden-Württemberg, 1968-2003)	197
Tab. A 3	Signifikanzniveau (2-seitig) der Unterschiede in den mittleren Mortalitäten relativ zum Erwartungswert für die unterschiedlichen thermischen Belastungsklassen (Baden-Württemberg, 1968-2003)	197
Tab. A 4	Harvesting-Effekte nach „*starker Wärmebelastung*“ und „*mäßigem Kältestress*“ für Männer und Frauen (Baden-Württemberg, 1968-2003)	199
Tab. A 5	Relative Häufigkeiten der thermischen Belastungsklassen für die jeweils kompletten vorhandenen Zeiträume	199
Tab. A 6	Relative Mortalität für die jeweils optimalen Zeitverschiebungen für die gesamte Zeitreihenlänge	201
Tab. A 7	Abkürzungsverzeichnis der Stadt- und Landkreise in Baden-Württemberg und mittlere Höhe der Stationen	205
Tab. A 8	Relative Mortalität in den einzelnen Landkreisen (1951-2000)	207
Tab. A 9	Relative Mortalität in den einzelnen Landkreisen (2001-2055)	208

ANHANG

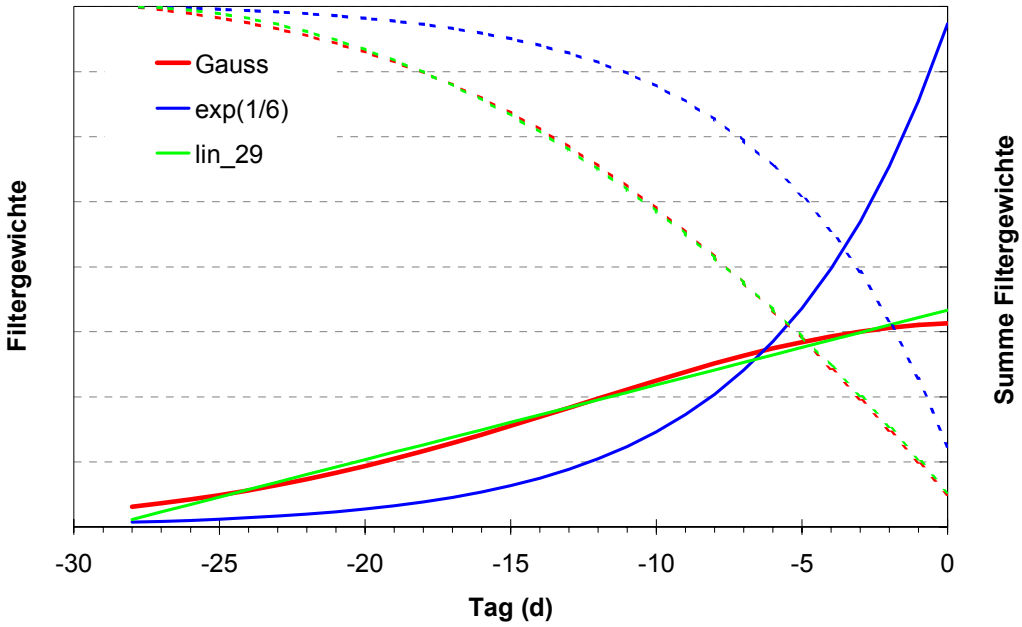


Abb. A 1: Verlauf der Filtergewichte (durchgezogenen Linien) und der Summe der Filtergewichte (gestrichelte Linien) für das exponentielle Filter (exp(1/3) = exp(d/6)), das lineare Filter mit 29 Filtergewichten (lin_29 = (29-d)/29) und das Gaußfilter

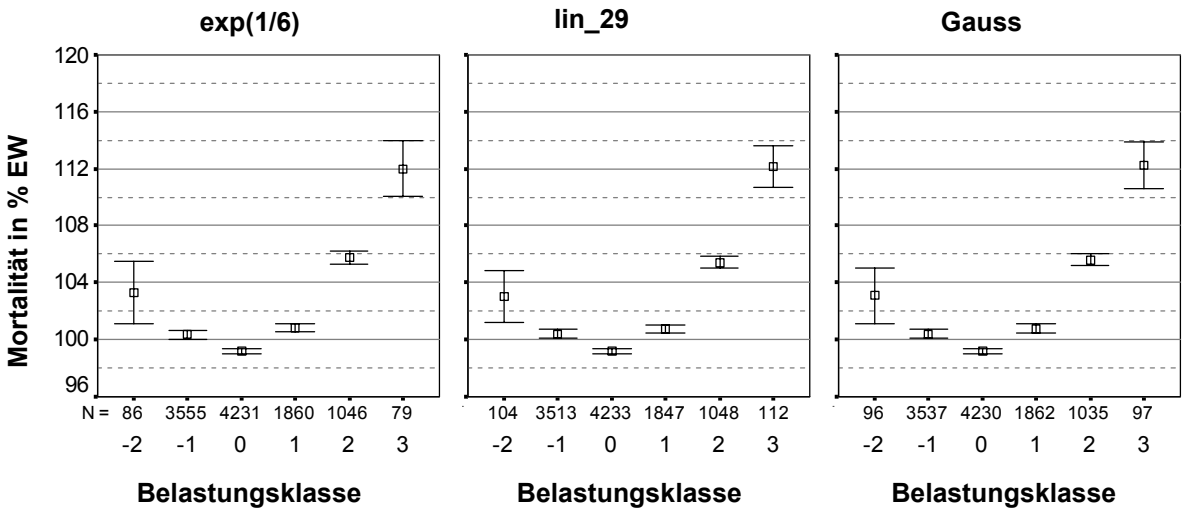


Abb. A 2: Mittlere relative Mortalität für die auf Basis unterschiedlicher Filterfunktionen bestimmten thermischen Belastungsklassen (Baden-Württemberg, 1968-1997). *exp(1/6): exponentielles Filter; lin_29: lineares Filter; Gauss: Gaußfilter; EW: Erwartungswert; -2: mäßiger Kältestress (KS); -1: leichter KS; 0: thermischer Komfort; 1: leichte Wärmebelastung (WB); 2: mäßige WB; 3: starke WB; Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes*

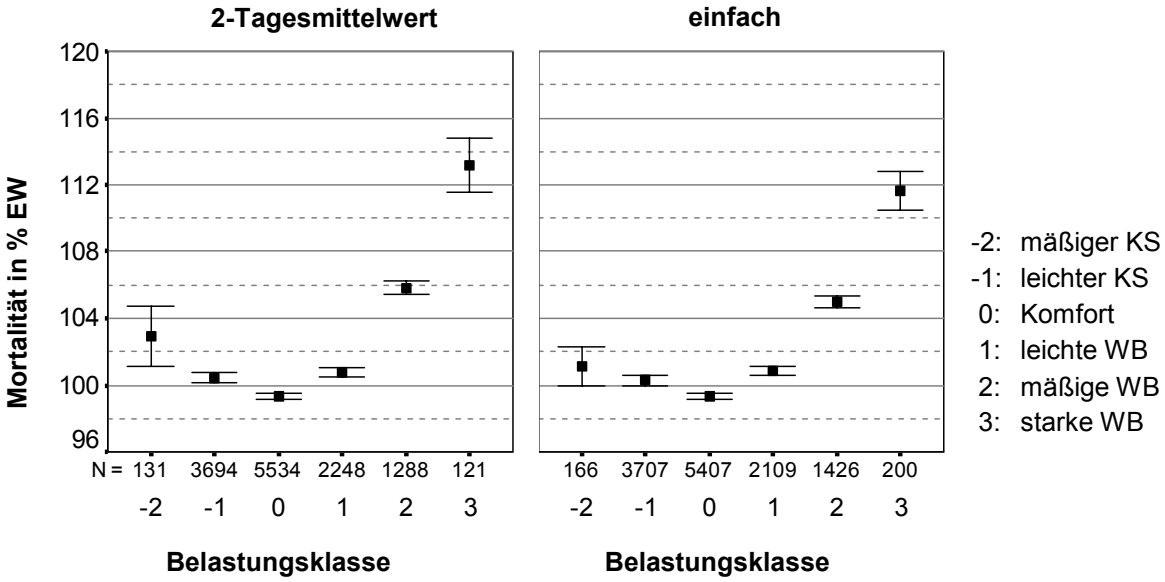


Abb. A 3: Mittlere relative Mortalität für verschiedene Belastungsklassen (Baden-Württemberg, 1968-2003). *EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung; Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes*

Tab. A 1: Statistische Kennzahlen der Sterbefallzahlen in den einzelnen Altersklassen (Baden-Württemberg, 1968-2003)

Altersgruppe (Jahre)	Minimum	Maximum	Summe	Mittelwert	Standardabweichung
0 - 1	0	21	38710	2,96	2,78
1 - 4	0	8	7918	0,61	0,88
5 - 9	0	5	5519	0,42	0,72
10 - 14	0	5	4915	0,38	0,65
15 - 19	0	13	16447	1,26	1,34
20 - 24	0	11	20374	1,56	1,36
25 - 29	0	8	19732	1,51	1,27
30 - 34	0	10	24674	1,89	1,44
35 - 40	0	11	34171	2,62	1,73
40 - 44	0	17	49828	3,82	2,09
45 - 49	0	23	73497	5,63	2,53
50 - 54	0	29	103308	7,91	3,03
55 - 59	0	40	150655	11,54	3,97
60 - 64	2	65	223156	17,09	5,48
65 - 69	2	105	322477	24,70	8,16
70 - 74	7	113	444501	34,04	9,99
75 - 79	8	134	548077	41,98	10,49
80 - 84	10	116	573228	43,90	11,22
85 - 89	5	101	451855	34,61	13,06
90 - 94	0	70	213818	16,38	9,82
über 95	0	27	53267	4,08	3,60

Tab. A 2: Mittelwert der Mortalität relativ zum Erwartungswert während unterschiedlicher thermischer Belastungsstufen (Baden-Württemberg, 1968-2003).

	Kätestress (%)		Komfort (%)	Wärmebelastung (%)		
	mäßig	leicht		leicht	mäßig	stark
Gesamt	102,2	100,5	99,5	101,0	106,0	113,4
Männer	103,2	100,6	99,2	101,1	105,3	111,7
Frauen	101,6	100,3	99,7	100,9	106,7	114,8

Tab. A 3: Signifikanzniveau (2-seitig) der Unterschiede in den mittleren Mortalitäten relativ zum Erwartungswert für die unterschiedlichen thermischen Belastungsklassen in (Baden-Württemberg, 1968-2003). *-2: mäßiger Kältestress (KS); -1: leichter KS; 0: Komfortbedingungen; 1: leichte Wärmebelastung (WB); 2:mäßige WB; 3: starke WB; keine Zeitverschiebung*

	-2 / -1	-1 / 0	0 / 1	1 / 2	2 / 3
Gesamt	0,420	0,000	0,000	0,000	0,000
Männer	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000
Frauen	0,125	0,002	0,000	0,000	0,000

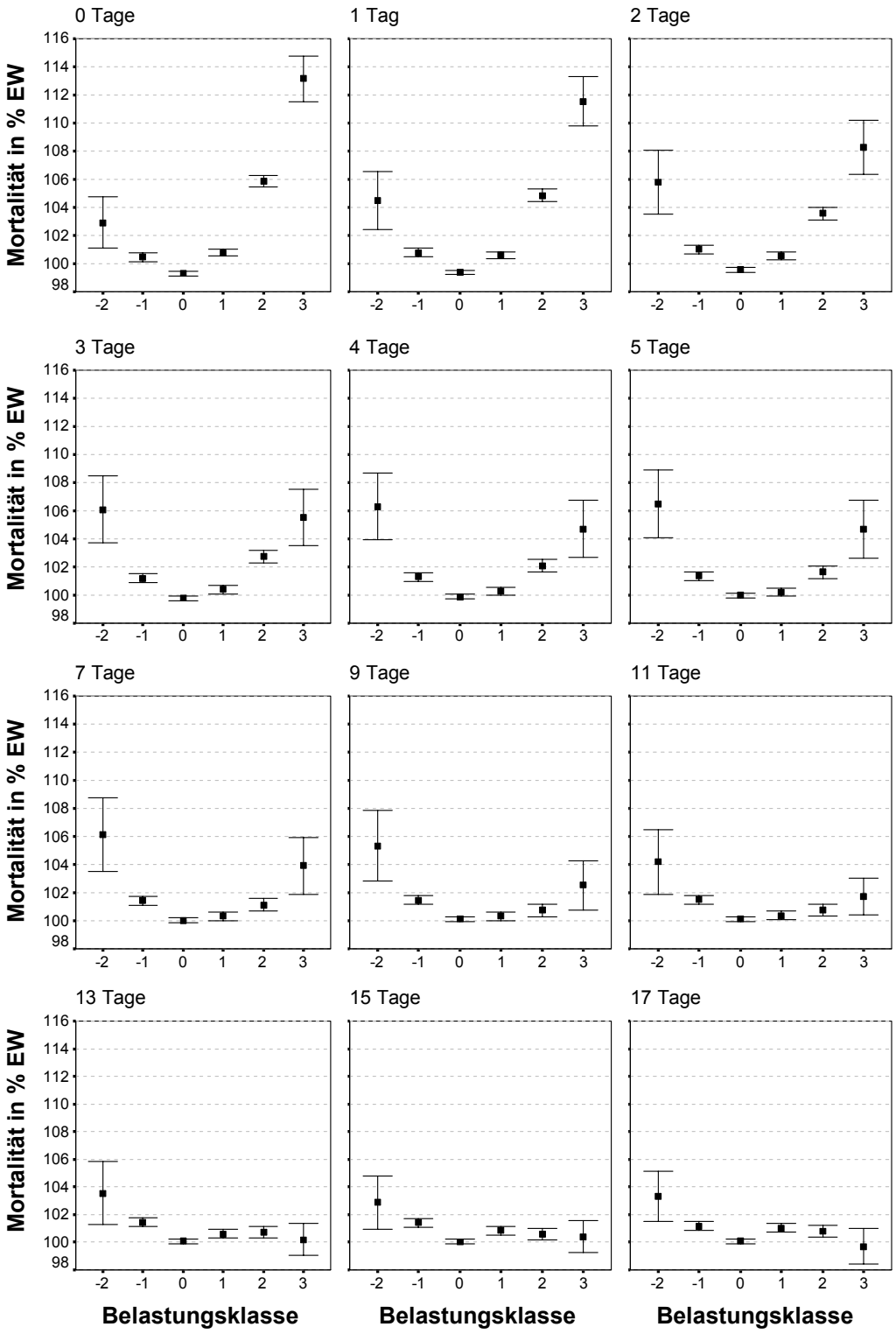


Abb. A 4 Mittelwerte der relativen Mortalität für die Klassen thermischer Belastung für Zeitverschiebungen von 0 bis 17 Tagen (Baden-Württemberg, 1968-2003). *EW: Erwartungswert -2: mäßiger Kältestress (KS); -1: leichter KS; 0: Komfortbedingungen; 1: leichte Wärmebelastung (WB); 2: mäßige WB; 3: starke WB; Balken: 95%-Konfidenzintervall*

Tab. A 4: Harvesting-Effekte nach „*starker Wärmebelastung*“ und „*mäßigem Kältestress*“ für Männer und Frauen (Baden-Württemberg, 1968-2003)

Baden-Württemberg	Männer	Frauen	Männer	Frauen
	starke Wärmebelastung		mäßiger Kältestress	
mittlere Übersterblichkeit pro Tag (%)	4,35	7,13	3,03	1,66
an den Tagen (Anzahl Tage) (d)	0-8 (9)	0-8 (8)	0-18 (19)	0-26 (27)
Übersterblichkeit · Anzahl Tage	**39,2**	**64,1**	**57,6**	**44,8**
mittlere Untersterblichkeit pro Tag (%)			-1,8	-1,92
an den Tagen (Anzahl Tage) (d)			26-40 (15)	30-40 (11)
Untersterblichkeit · Anzahl Tage			**-27,6**	**-21,2**
Untersterblichkeit relativ zur Übersterblichkeit (%)	**0**	**0**	**47,9**	**47,2**

Tab. A 5: Relative Häufigkeiten der thermischen Belastungsklassen für die jeweils kompletten vorhandenen Zeiträume

Belastungsklasse	London 1976-1996 (%)	Niederlande 1979-1997 (%)	Baden-Württemberg 1968-2003 (%)	Budapest 1971-2000 (%)	Lissabon 1980-1998 (%)	Madrid 1986-1997 (%)
Starker Kältestress	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Mäßiger Kältestress	0,28	2,18	1,01	2,85	0,00	0,16
Leichter Kältestress	27,12	25,67	28,39	31,46	5,52	25,90
Komfortbedingungen	55,30	52,50	42,51	32,61	48,41	30,09
Leichte Wärmebelastung	13,19	12,89	17,27	18,08	27,67	19,18
Mäßige Wärmebelastung	4,00	6,13	9,89	13,47	16,77	22,31
Starke Wärmebelastung	0,12	0,63	0,93	1,50	1,62	2,33
Extreme Wärmebelastung	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02

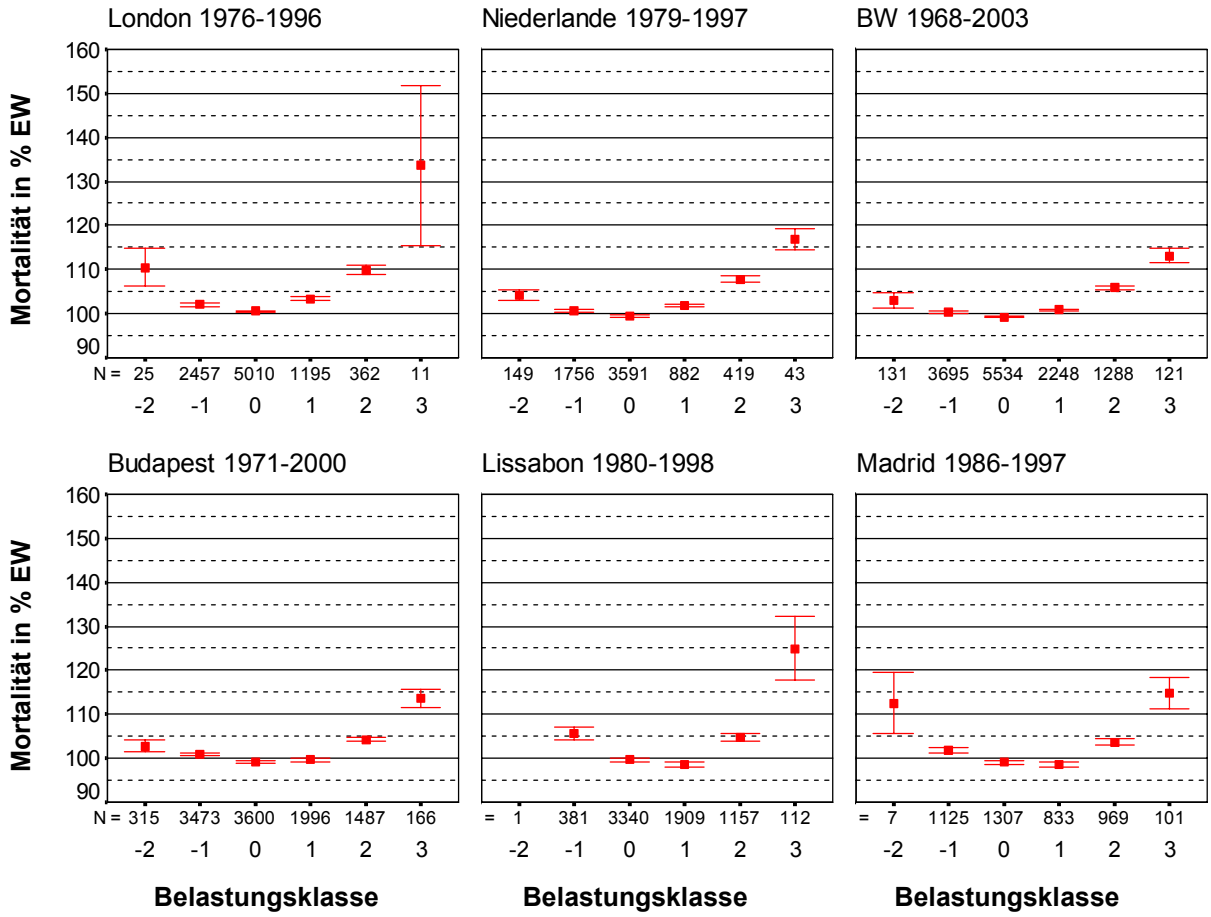


Abb. A 5: Relative Mortalität für die verschiedenen Belastungsklassen und die jeweils komplett vorhandenen Zeiträume; ohne Zeitverschiebung. *BW: Baden-Württemberg; N: Anzahl der Tage; -2: mäßiger Kältestress (KS); -1: leichter KS; 0: Komfortbedingungen; 1: leichte Wärmebelastung (WB); 2: mäßige WB; 3: starke WB; Balken: 95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Belastungsklassen starke Kältebelastung und extreme Wärmebelastung nicht dargestellt*

Tab. A 6: Relative Mortalität für die jeweils optimalen Zeitverschiebungen für die gesamte Zeitreihenlänge. *KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

Belastungsklasse	**London 1976-1996 (%)**	**Niederlande 1979-1997 (%)**	**Baden-Württemberg 1968-2003 (%)**	**Budapest 1971-2000 (%)**	**Lissabon 1980-1998 (%)**	**Madrid 1986-1997 (%)**
Starker Kältestress				106,2		
Mäßiger Kältestress	113,6	107,2	105,9	104,4		112,6
Leichter Kältestress	102,6	101,2	101,4	101,2	111,8	102,6
Komfortbedingungen	100,5	99,45	99,5	99,2	99,4	99,1
Leichte Wärmebelastung	103,3	101,8	101,0	99,6	98,3	98,3
Mäßige Wärmebelastung	109,9	107,8	106,0	104,3	104,8	103,6
Starke Wärmebelastung	133,6	116,9	113,4	113,6	126,2	114,8
Extreme Wärmebelastung					369,0	111,9

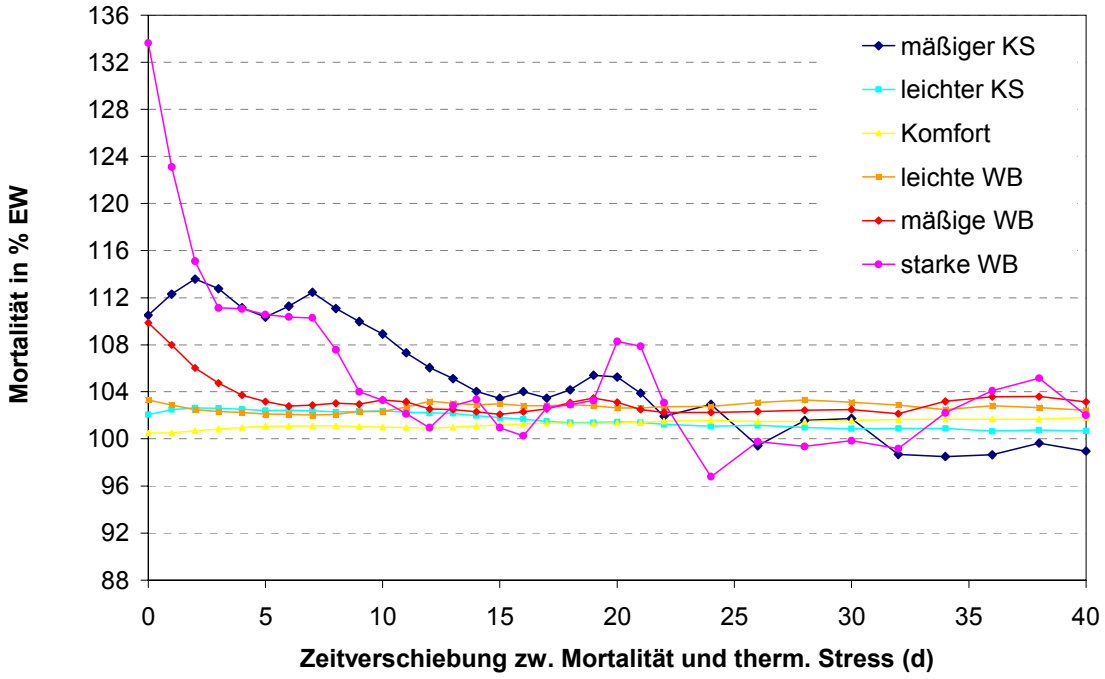


Abb. A 6: **Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (London, 1976-1996).** *EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

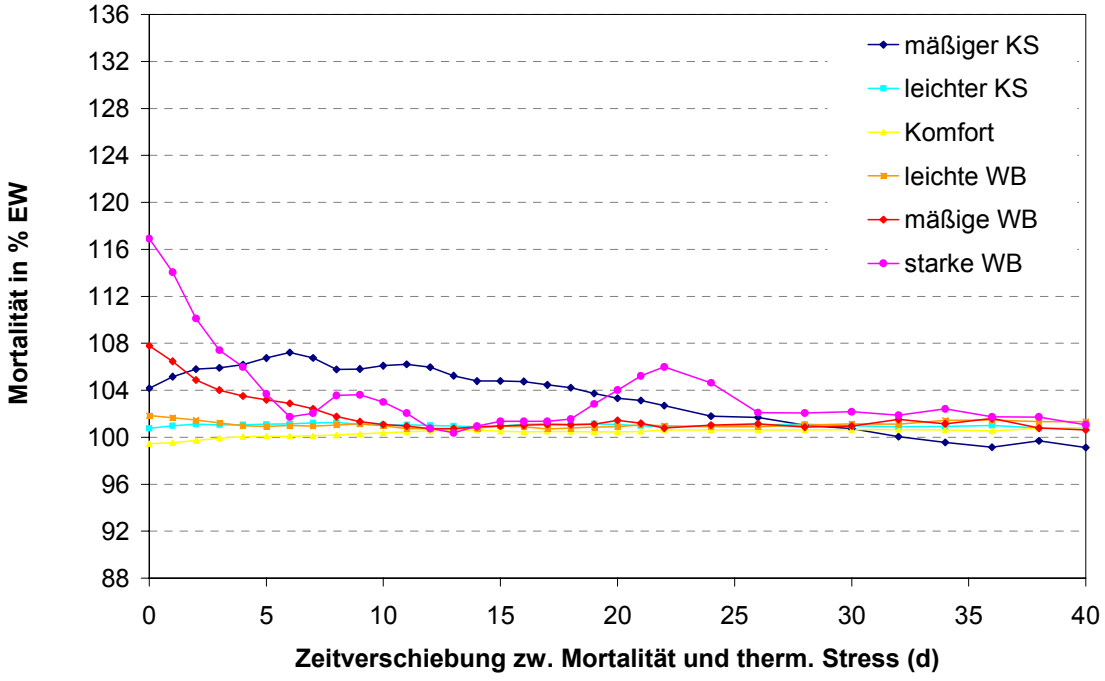


Abb. A 7: **Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (die Niederlande, 1979-1997).** *EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

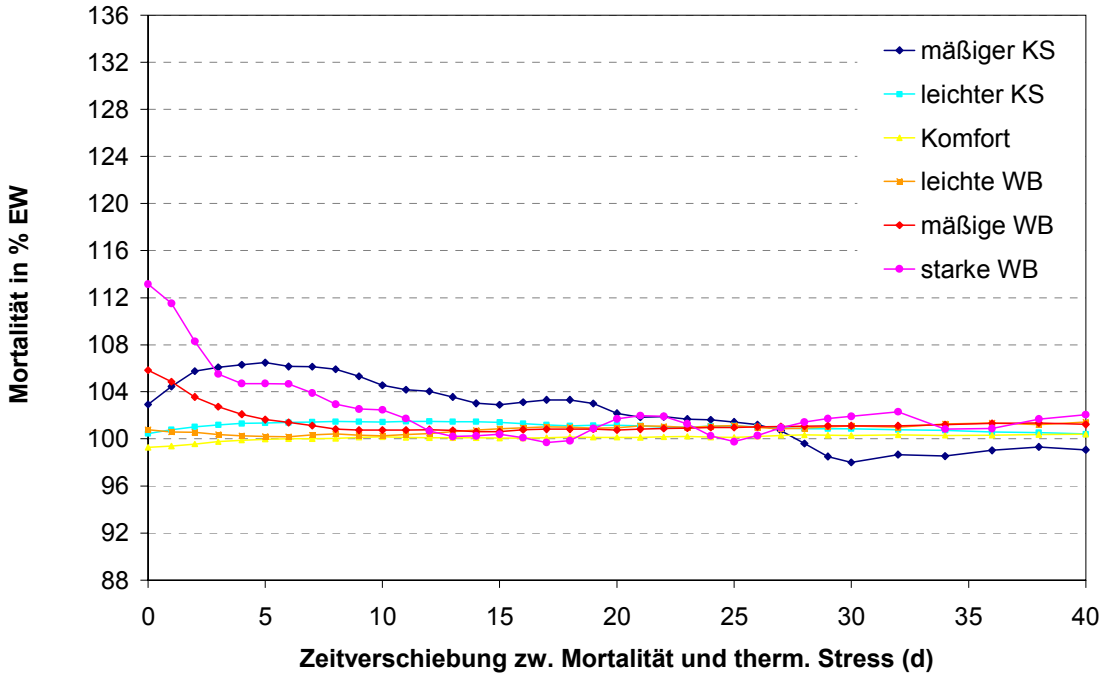


Abb. A 8: **Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Baden-Württemberg, 1968-2003).** *EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

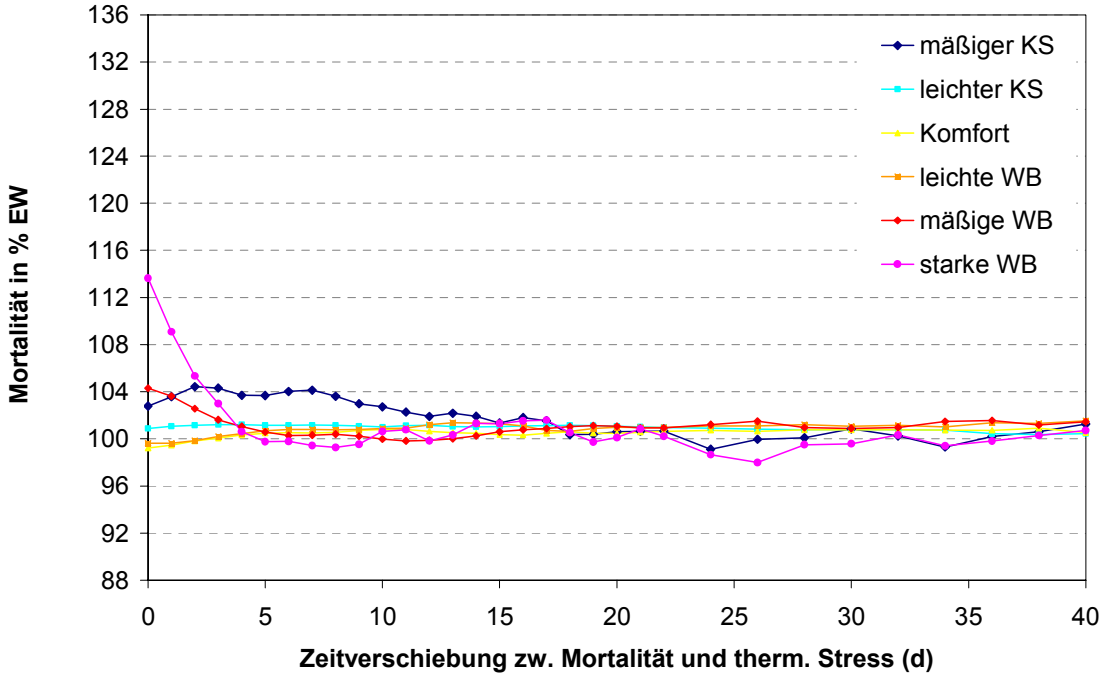


Abb. A 9: **Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Budapest, 1971-2000).** *EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

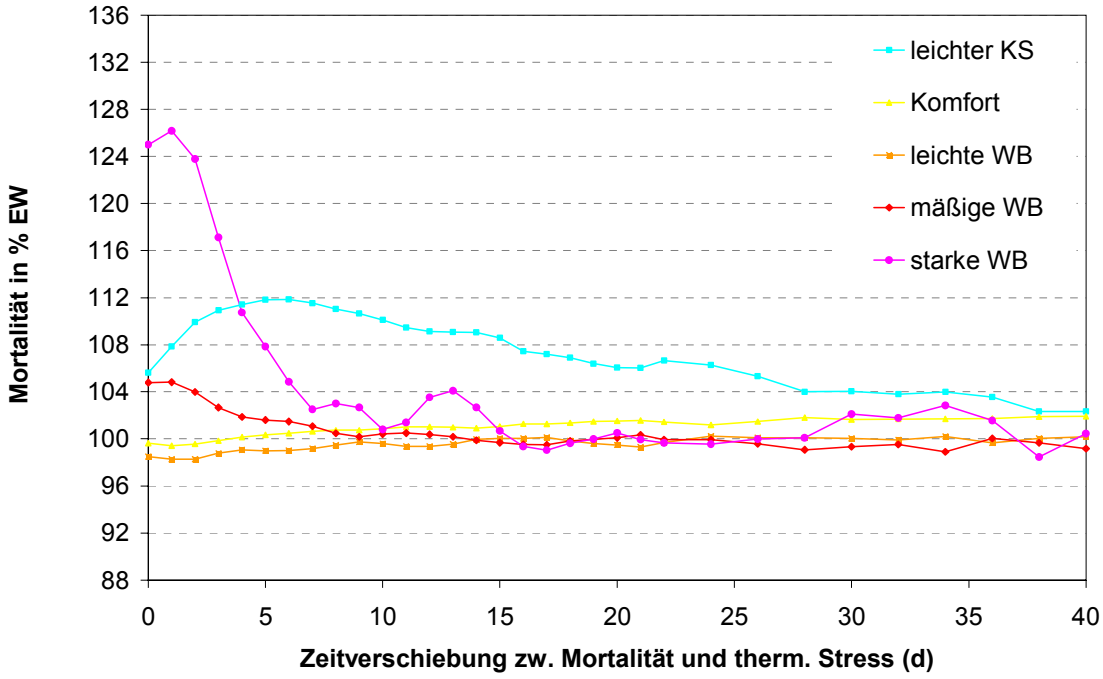


Abb. A 10: **Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Lissabon, 1980-1998).** *EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

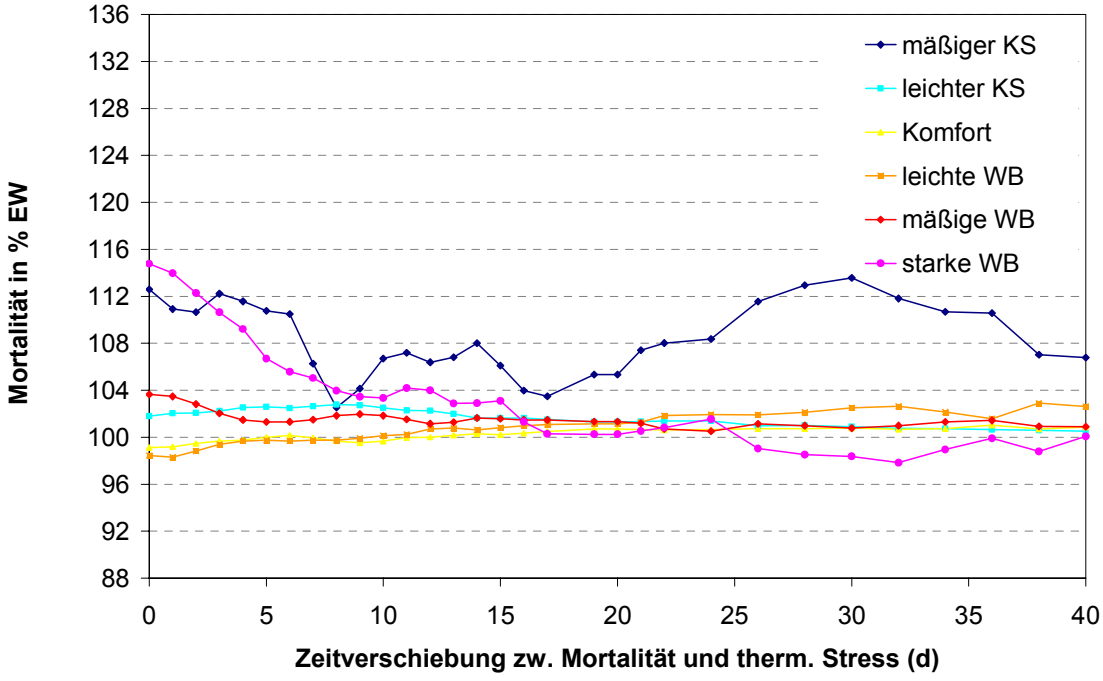
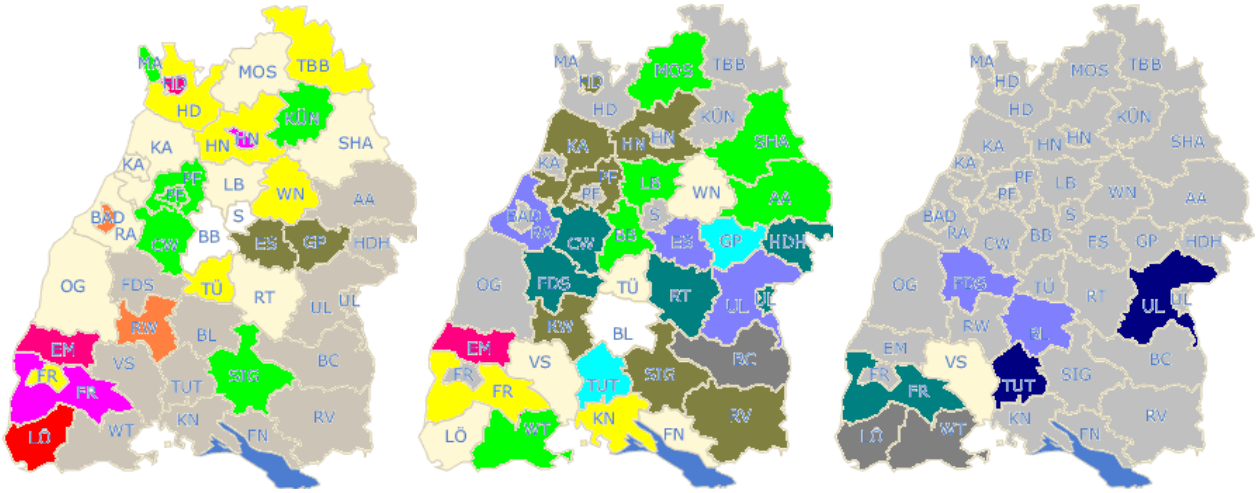
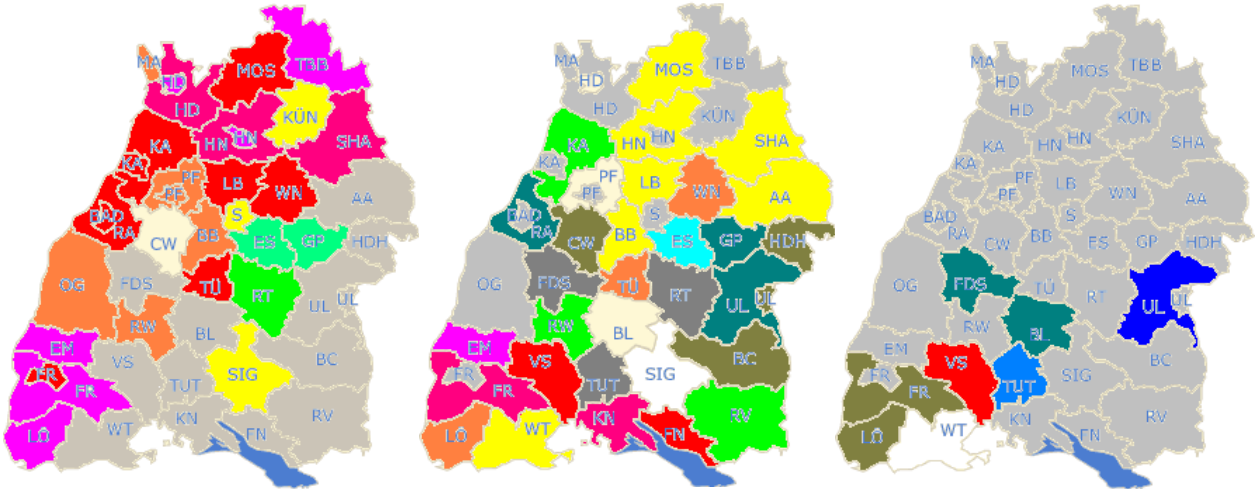


Abb. A 11: **Mittelwert der relativen Mortalität für Zeitverschiebungen zwischen thermischer Belastung und Mortalität von 0 bis 40 Tagen (Madrid, 1986-1997).** *EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

Tab. A 7: Abkürzungsverzeichnis der Stadt- und Landkreise in Baden-Württemberg und mittlere Höhe der Stationen. *In Klammern ist die Anzahl der Stationen angegeben*

Abk.	Name	Mittlere Höhe (m)			
		bis 400 m	400–799 m	ab 800 m	gesamt
AA	Landkreis Ostalbkreis		480 (6)		480 (6)
BAD	Stadtkreis Baden-Baden	240 (1)			240 (1)
BB	Landkreis Böblingen	389 (1)	444 (6)		437 (7)
BC	Landkreis Biberach		551 (3)		551 (3)
BL	Landkreis Zollernalbkreis		554 (4)	882 (2)	663 (6)
CW	Landkreis Calw	375 (2)	645 (8)		591 (10)
EM	Landkreis Emmendingen	289 (2)	450 (2)		369 (4)
ES	Landkreis Esslingen	326 (3)	567 (3)		447 (6)
FDS	Landkreis Freudenstadt		667 (5)	803 (1)	690 (6)
FN	Landkreis Bodenseekreis		447 (2)		447 (2)
FR-Land	Kreis Breisgau-Hochschwarzwald	252 (8)	569 (4)	1012 (10)	641 (22)
FR-Stadt	Stadtkreis Freiburg	294 (1)			294 (1)
GP	Landkreis Göppingen	361 (1)	534 (5)		506 (6)
HD-Land	Landkreis Rhein-Neckar-Kreis	175 (12)	464 (1)		191 (13)
HD-Stadt	Stadtkreis Heidelberg	110 (1)	465 (1)		282 (2)
HDH	Landkreis Heidenheim		500 (3)		500 (3)
HN-Land	Landkreis Heilbronn	167 (8)	479 (1)		230 (9)
HN-Stadt	Stadtkreis Heilbronn	207 (1)			207 (1)
KA-Land	Landkreis Karlsruhe	167 (9)	433 (1)		174 (10)
KA-Stadt	Stadtkreis Karlsruhe	112 (1)			112 (1)
KN	Landkreis Konstanz		443 (1)		442 (1)
KÜN	Landkreis Hohenlohekreis	294 (1)			293 (1)
LB	Landkreis Ludwigsburg	258 (7)	467 (1)		284 (8)
LÖ	Landkreis Lörrach	318 (2)	645 (4)	1016 (1)	605 (7)
MA	Stadtkreis Mannheim	96 (1)			95 (1)
MOS	Landkreis Neckar-Odenwald-Kreis	288 (6)	481 (3)		352 (9)
OG	Landkreis Ortenaukreis	211 (14)			211 (14)
PF-Land	Landkreis Enzkreis	268 (4)	430 (1)		292 (5)
PF-Stadt	Stadtkreis Pforzheim	246 (1)			246 (1)
RA	Landkreis Rastatt	158 (3)	749 (1)		306 (4)
RT	Landkreis Reutlingen	361 (2)	737 (3)		586 (5)
RV	Landkreis Ravensburg		592 (6)		592 (6)
RW	Landkreis Rottweil	360 (1)	616 (6)		580 (7)
S	Stadtkreis Stuttgart	332 (1)			331 (1)
SHA	Landkreis Schwäbisch-Hall	358 (2)	443 (5)		419 (7)
SIG	Landkreis Sigmaringen	250 (1)	638 (5)		574 (6)
TBB	Landkreis Main-Tauber-Kreis	319 (5)			319 (5)
TÜ	Landkreis Tübingen	350 (2)	442 (2)		394 (4)
TUT	Landkreis Tuttlingen		649 (2)	951 (2)	800 (4)
UL-Land	Landkreis Alb-Donau-Kreis		656 (5)	806 (1)	665 (6)
UL-Stadt	Stadtkreis Ulm		567 (1)		567 (1)
VS	Landkreis Schwarzwald-Baar-Kreis		708 (6)	870 (1)	731 (7)
WN	Landkreis Rems-Murr-Kreis	299 (4)	483 (3)		378 (7)
WT	Landkreis Waldshut		688 (4)	913 (6)	823 (10)





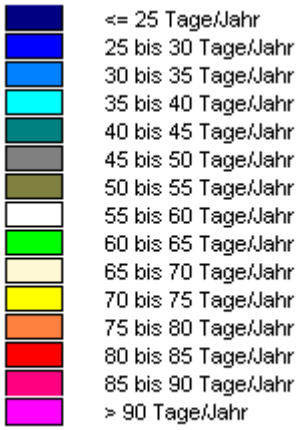


Abb. A 12: Anzahl der Tage pro Jahr mit mäßiger bis extremer Wärmebelastung (oben: Basisszenario; unten: Zukunftsszenario)

Tab. A 8: Relative Mortalität in den einzelnen Landkreisen (1951-2000). *KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

1951-2000	Mäßiger KS (%)	Leichter KS (%)	Komfort (%)	Leichte WB (%)	Mäßige WB (%)	Starke WB (%)
BW	106,0	101,4	99,4	100,7	105,7	113,1
AA	106,0	101,4	99,4	100,7	105,7	113,1
BAD	107,3	101,5	99,2	100,7	106,5	115,7
BB	105,6	101,4	99,4	100,7	105,4	112,4
BC	105,9	101,4	99,4	100,7	105,6	112,9
BL	106,0	101,4	99,4	100,7	105,6	113,1
CW	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,2
EM	105,9	101,4	99,4	100,7	105,6	113,0
ES	105,8	101,4	99,4	100,7	105,6	112,8
FDS	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,4
FN	106,0	101,4	99,4	100,7	105,7	113,2
FR-Land	106,0	101,4	99,4	100,7	105,7	113,2
FR-Stadt	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,3
GP	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,3
HD-Land	105,9	101,4	99,4	100,7	105,6	113,0
HD-Stadt	106,2	101,4	99,3	100,7	105,8	113,4
HDH	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,3
HN-Land	105,9	101,4	99,4	100,7	105,6	112,9
HN-Stadt	106,2	101,4	99,4	100,7	105,8	113,5
KA-Land	105,8	101,4	99,4	100,7	105,5	112,7
KA-Stadt	106,4	101,4	99,3	100,7	105,9	113,9
KN	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,3
KÜN	106,0	101,4	99,4	100,7	105,7	113,2
LB	105,7	101,4	99,4	100,7	105,5	112,6
LÖ	106,0	101,4	99,4	100,7	105,6	113,1
MA	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,4
MOS	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,4
OG	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,3
PF-Land	105,9	101,4	99,4	100,7	105,6	112,9
PF-Stadt	106,4	101,4	99,3	100,7	106,0	113,9
RA	106,0	101,4	99,4	100,7	105,6	113,1
RT	106,0	101,4	99,4	100,7	105,7	113,1
RV	106,0	101,4	99,4	100,7	105,6	113,1
RW	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,3
S	106,2	101,4	99,3	100,7	105,8	113,5
SHA	106,2	101,4	99,4	100,7	105,8	113,5
SIG	105,9	101,4	99,4	100,7	105,6	113,0
TBB	106,3	101,4	99,3	100,7	105,9	113,8
TÜ	105,6	101,4	99,4	100,7	105,4	112,4
TUT	106,0	101,4	99,4	100,7	105,6	113,1
UL-Land	105,9	101,4	99,4	100,7	105,6	113,0
UL-Stadt	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,3
VS	106,1	101,4	99,4	100,7	105,7	113,2
WN	105,9	101,4	99,4	100,7	105,6	112,9
WT	106,0	101,4	99,4	100,7	105,7	113,2

Tab. A 9: Relative Mortalität in den einzelnen Landkreisen (2001-2055). *KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung*

2001-2055	Mäßiger KS (%)	Leichter KS (%)	Komfort (%)	Leichte WB (%)	Mäßige WB (%)	Starke WB (%)
BW	107,2	101,4	99,2	100,7	106,5	115,5
AA	107,2	101,4	99,2	100,7	106,5	115,5
BAD	108,5	101,5	99,0	100,6	107,3	118,0
BB	107,3	101,5	99,2	100,7	106,5	115,7
BC	107,0	101,4	99,2	100,7	106,3	115,1
BL	107,2	101,4	99,2	100,7	106,4	115,4
CW	107,2	101,4	99,2	100,7	106,4	115,5
EM	107,2	101,4	99,2	100,7	106,5	115,5
ES	107,3	101,5	99,2	100,7	106,6	115,8
FDS	107,3	101,4	99,2	100,7	106,5	115,7
FN	107,8	101,5	99,1	100,7	106,9	116,6
FR-Land	107,7	101,5	99,1	100,7	106,8	116,4
FR-Stadt	106,8	101,4	99,3	100,7	106,2	114,7
GP	107,2	101,4	99,2	100,7	106,5	115,5
HD-Land	107,5	101,5	99,2	100,7	106,6	116,1
HD-Stadt	106,8	101,4	99,3	100,7	106,1	114,6
HDH	107,3	101,4	99,2	100,7	106,5	115,7
HN-Land	107,3	101,4	99,2	100,7	106,5	115,6
HN-Stadt	107,4	101,4	99,2	100,7	106,5	115,8
KA-Land	107,4	101,5	99,2	100,7	106,6	115,8
KA-Stadt	107,2	101,4	99,2	100,7	106,5	115,6
KN	107,2	101,4	99,2	100,7	106,4	115,4
KÜN	107,0	101,4	99,2	100,7	106,3	115,2
LB	107,2	101,5	99,2	100,7	106,5	115,5
LÖ	107,2	101,4	99,2	100,7	106,4	115,4
MA	106,8	101,4	99,2	100,7	106,2	114,8
MOS	107,4	101,4	99,2	100,7	106,6	115,8
OG	107,3	101,4	99,2	100,7	106,5	115,6
PF-Land	107,3	101,4	99,2	100,7	106,5	115,6
PF-Stadt	107,7	101,5	99,1	100,7	106,7	116,4
RA	107,3	101,4	99,2	100,7	106,5	115,7
RT	107,2	101,4	99,2	100,7	106,5	115,5
RV	107,2	101,4	99,2	100,7	106,5	115,6
RW	107,3	101,4	99,2	100,7	106,5	115,8
S	107,2	101,4	99,2	100,7	106,4	115,4
SHA	107,2	101,4	99,2	100,7	106,4	115,4
SIG	107,3	101,4	99,2	100,7	106,5	115,6
TBB	107,2	101,4	99,2	100,7	106,4	115,4
TÜ	106,7	101,4	99,3	100,7	106,1	114,5
TUT	107,1	101,4	99,2	100,7	106,4	115,3
UL-Land	107,1	101,4	99,2	100,7	106,4	115,3
UL-Stadt	107,1	101,4	99,2	100,7	106,4	115,4
VS	107,4	101,4	99,2	100,7	106,6	115,9
WN	107,4	101,5	99,2	100,7	106,6	115,8
WT	107,2	101,4	99,2	100,7	106,4	115,4