



Universität der Bundeswehr München

Klimatische Temperatureinwirkungen und Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken

Ulf Lichte

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

Baumechanik – Baustatik – Ingenieurinformatik – Holzbau – Massivbau – Stahlbau



Universität der Bundeswehr München

**Klimatische Temperatureinwirkungen
und Kombinationsregeln bei
Brückenbauwerken**

Ulf Lichte

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

Baumechanik – Baustatik – Ingenieurinformatik – Holzbau – Massivbau – Stahlbau

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema der Dissertation: **Klimatische Temperatureinwirkungen und
Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken**

Verfasser: **Dipl.-Ing. Ulf Lichte**

Promotionsausschuss

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Anton Heinen
1. Berichterstatter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig
2. Berichterstatter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gert Albrecht, TU München
3. Berichterstatter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Holzer

Tag der Prüfung 12. November 2004

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Neubiberg, den 12. November 2004

Zusammenfassung

Zur Erfassung klimatischer Temperaturbeanspruchungen von Brückentragwerken werden auf der Basis gemessener Klimadaten nicht-lineare instationäre Temperaturfelder numerisch simuliert. Deren Zerlegung in mehrere idealisierte Anteile liefert mechanisch deutbare Ersatztemperaturfelder. Durch eine Zeitreihenanalyse können Extremwerte mit unterschiedlichen Wiederkehrperioden bestimmt werden. Da die Ersatztemperaturverteilungen gleichzeitig auftreten, ist ein Verfahren zur Bestimmung von Temperatur-Kombinationsregeln erarbeitet worden. Für zweistegige Plattenbalken wird das kombinierte Auftreten von Temperaturschwankung und vertikalem Temperaturunterschied analysiert.

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1998 bis 2003 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München. Idee und Konzept der Arbeit entwickelten sich im Umfeld der Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Temperaturbeanspruchungen für Brückentragwerken.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig gilt mein besonderer Dank für die Förderung dieser Arbeit, der fachlichen Diskussion und die Übernahme des Hauptreferates. Für die Übernahme des Koreferates möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan M. Holzer und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Albrecht herzlich danken. Univ.-Prof. Dr.-Ing. A.H. Heinen sei für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission gedankt.

Nicht zuletzt möchte die konstruktive Unterstützung meiner Eltern würdigen. Das entgegengebrachte Verständnis, die große Geduld und stete Unterstützung meiner Frau hat zum Gelingen dieser Arbeit außerordentlich beigetragen, wofür ich ihr von Herzen Dank sage.

München, 2004

Ulf Lichte

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Allgemeines und Stand des Wissens	1
1.2	Problemstellung und Ziel der Arbeit	4
2	BESTIMMUNG DER TEMPERATURVERTEILUNGEN.....	6
2.1	Allgemeines.....	6
2.2	Temperaturfeldberechnung.....	6
2.3	Beschreibung des Verfahrens	10
2.4	Wärmeaustausch an den Bauwerksoberflächen	14
2.4.1	Allgemeines	14
2.4.2	Wärmeübergang durch Konvektion.....	14
2.4.3	Wärmestrahlung.....	19
2.4.4	Bildung der ideellen Oberflächentemperatur.....	27
2.4.5	Berechnung der Lufttemperatur in geschlossenen Kastenträgern	28
2.5	Klimatische Temperatureinwirkungen auf Bauwerke	29
2.5.1	Sonnenstrahlung.....	30
2.5.2	Intensität der extraterrestrischen Sonnenstrahlung	33
2.5.3	Globalstrahlung.....	35
2.5.4	Direkte Sonnenstrahlung.....	39
2.5.5	Diffuse Sonnenstrahlung.....	40
2.5.6	Reflektierte Sonnenstrahlung am Untergrund.....	41
2.5.7	Strahlung der Atmosphäre.....	45
2.6	Strahlung des Untergrundes	48
2.7	Lufttemperatur	49
2.8	Windgeschwindigkeit.....	51
2.9	Verwendung von Klimamessdaten	53
2.10	Resamplingverfahren.....	56
3	ZERLEGUNG NICHTLINEARER TEMPERATURFELDER.....	59
3.1	Allgemeines.....	59
3.2	Aufstelltemperatur.....	61
3.3	Konzept der Formfunktion	62
3.4	Basis-Formfunktionen	66
3.4.1	Temperaturbezogene Temperaturanteile DT_A , DT_Y , DT_Z	66
3.4.2	Dehnungsbezogene Temperaturanteile $DT_{\epsilon A}$, $DT_{\epsilon Y}$, $DT_{\epsilon Z}$	66
3.4.3	Schnittgrößen-bezogene Temperaturanteile DT_N , DT_{MY} , DT_{MZ} und $DT_{M\omega}$	68
3.4.4	Ableitung weiterer Temperaturfelder.....	71
3.4.5	Variabilität von Wärmeausdehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul	71

4	KOMBINATION VON IDEALISIERTEN TEMPERATURFELDERN	72
4.1	Allgemeines.....	72
4.2	Einwirkung und Auswirkung.....	76
4.3	Positive und negative Extremwerte der Ein- und Auswirkungen.....	77
4.4	Systemnormierung.....	77
4.5	Bestimmung der Kombinations-Temperaturkennwerte	80
4.6	Kombinationsfläche und Systemreaktion.....	82
4.7	CAF-Kombinationsregel für zwei Temperaturanteile	83
4.7.1	Stufe 1 - Kombinationsregel mit Unterscheidung der Vorzeichenkombination und für positive und negative Temperaturlasten	84
4.7.2	Stufe 2 - Kombinationsregel mit Unterscheidung positive und negative Temperaturlasten	86
4.7.3	Stufe 3 – Allgemeine Kombinationsregel ohne jegliche Unterscheidung	87
4.7.4	Stufe 4 – Kombination ohne Abminderung	88
4.7.5	Kombinationsregel in der gegenwärtigen Normung.....	88
4.7.6	Grenze des CAF-Regel-Formates	89
5	DER ZUFALLSPROZESS DER TEMPERATURBEANSPRUCHUNGEN	90
5.1	Allgemeines.....	90
5.2	Variabilität der Rahmenbedingungen	91
5.3	Wiederkehrperiode von Temperatureinwirkungen	91
5.4	Repräsentative Beanspruchungsniveaus.....	93
5.5	Verfahren zur Ermittlung repräsentativer Werte.....	95
5.5.1	Verwendung idealisierter Klimadaten.....	95
5.5.2	Auswertung partieller Zeitreihen	96
5.5.3	Komponentenzerlegung und Generierung einer Zeitreihe.....	97
5.5.4	Weitere Verfahren.....	97
5.6	Extrapolationsverfahren	98
5.6.1	Komponentenmodell.....	99
5.6.2	Trendkomponente	99
5.6.3	Periodische Komponente	101
5.6.4	Zufallsanteil	102
5.6.5	Bestimmung der Überschreitenswahrscheinlichkeit.....	103
5.7	Generierung eines stochastischen Prozesses	106
5.7.1	Autoregression	106
5.7.2	Extremwert-Extrapolation durch Generierung einer Zeitreihe	110
5.8	Ablauf des Verfahrens zur Extremwertbestimmung.....	112
6	ÜBERPRÜFUNG DES BERECHNUNGSVERFAHRENS	114
6.1	Numerische Langzeitsimulation von Temperaturfeldern	114
6.2	Verfahren zur Ermittlung von Extremwerten unterschiedlicher Wiederkehrperiode	117

7	TEMPERATURBEANSPRUCHUNGEN VON PLATTENBALKEN.....	121
7.1	Allgemeines.....	121
7.2	Analyse des Temperaturverhaltens.....	124
7.2.1	Allgemeines zum Temperaturverhalten der Querschnitte.....	124
7.2.2	Einfluss von Querschnittsabstufungen im Brückenlängsverlauf.....	126
7.2.3	Langzeitsimulation der Temperaturfelder.....	129
7.2.4	Extrapolation von saisonaler und jährlicher Extremwerte.....	133
7.2.5	Bildung der Kombinationsfläche $\Delta T_N \oplus \Delta T_{MY}$ der Plattenbalken.....	139
7.2.6	Schlussfolgerung.....	143
8	SCHLUSS.....	144
8.1	Zusammenfassung.....	144
8.2	Ausblick.....	145
9	LITERATUR.....	147
10	BEZEICHNUNGEN.....	157
11	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	161
12	ANHANG.....	165

1 Einleitung

1.1 Allgemeines und Stand des Wissens

Bei der Tragwerksbemessung werden die stets schwankenden Bauwerkstemperaturen als veränderliche Einwirkung berücksichtigt. Dabei treten im Laufe der Errichtung und Nutzungsdauer eines Brückenbauwerkes Temperaturbeanspruchungen verschiedenen Ursprungs auf. Schon während der Brückenmontage rufen thermische Prozesse Verformungen und Spannungen hervor, wie zum Beispiel die Entwicklung von Hydratationswärme des jungen Betons. Bei der Herstellung von Schweißverbindungen im Stahlbau treten Eigenspannungen, Verformungen und Zwangsbeanspruchungen auf, bedingt durch die ungleichmäßige Abkühlung und Erhärtung des Stahls. Auch der Belageinbau auf Brücken stellt eine Montage-Temperaturlast dar, bei der die Brückenfahrbahn einer schockartigen Erhitzung mit dem bis zu 250°C heißen Asphalt ausgesetzt wird. Eine betriebsbedingte Beanspruchung ist die Fahrbahnbeheizung zur Vermeidung von Eisglätte. Als außergewöhnliche Last sei die Wärmeentwicklung im Brandfall genannt.

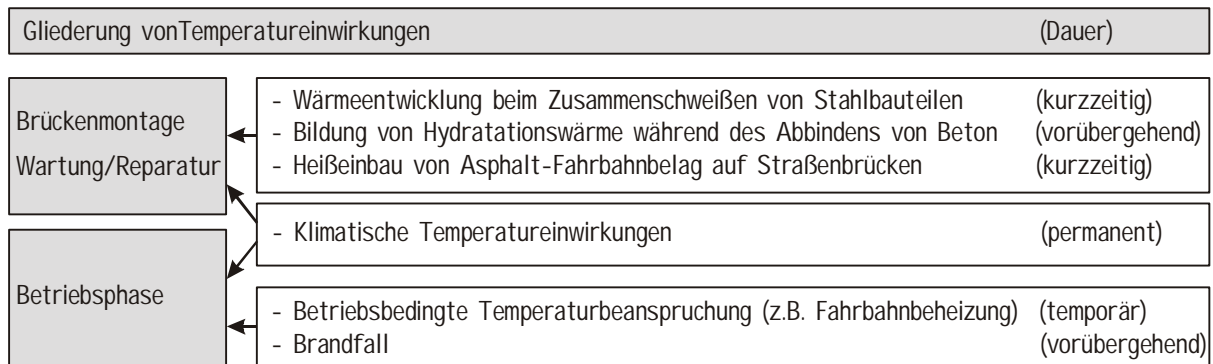


Abbildung 1.1 Gliederung von Temperatureinwirkungen

Die klimatischen Einwirkungen nehmen den bedeutendsten Anteil der Temperaturbeanspruchungen ein, da Außenbauwerke permanent dem Wettergeschehen ausgesetzt sind. Klimatelemente wie Sonnenstrahlung und Lufttemperatur führen ebenfalls zu nichtlinearen Temperaturverteilungen im Bauwerk. Die daraus resultierenden Tragwerksreaktionen müssen in einem Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit berücksichtigt werden [14], [15], [22]. Bei der Bauwerkerrichtung und Wartung können noch weitere Aspekte von Bedeutung sein, wie die Bauwerkstemperierung beim Zusammenfügen von Bauteilen oder beim Einrichten verschieblicher Lager [56], [95], [117].

Das Wettergeschehen ist regional unterschiedlich und kann in Klimazonen gleicher Einwirkungscharakteristik zusammengefasst werden. Deshalb existieren in den europäischen Regelwerken zwangsläufig nationale Werte für Temperatureinwirkungen, die der jeweiligen Klimlage entsprechen [22]. Während in der deutschen Normung die natürlichen veränderlichen Lasten Wind, Schnee und Erdbeben in regionale Lastzonen untergliedert werden, gelten für klimatische Temperaturlasten landeseinheitliche Lastannahmen.

Eine Besonderheit bei der Berücksichtigung der Temperaturlasten stellt die Tatsache dar, dass nicht die Klimatelemente selbst, sondern die Temperaturverteilungen im Bauwerk quantifiziert werden. Die Temperatureinwirkungen sind somit nur indirekte Lastangaben. Sie hängen nicht

allein von den meteorologischen Randbedingungen ab, sondern zusätzlich von der thermophysikalischen Konstitution des Brückenbauwerkes und der Einbettung des Bauwerkes in die Umgebung. Man könnte also von einer Filterung der klimatischen Einwirkungen in eine Temperaturreaktion sprechen.

Als Lasteingangsgrößen werden idealisierte Ersatztemperaturverteilungen verwendet, die die realen ungleichmäßigen Temperaturfelder vereinfacht widerspiegeln. Diese Ersatztemperaturverteilungen sind meist gezielt an Bauwerksreaktionen gekoppelt: Während beispielsweise die mittlere Bauwerkstemperatur eine Brückenlängsausdehnung hervorruft, bewirken lineare Temperaturunterschiede über die Bauwerkshöhe und Bauwerksbreite eine Überbauverkrümmung. Diese Temperaturfeld-Idealisierungen ermöglichen eine universale Anwendung auf eine große Bandbreite von Brückenkonstruktionen.

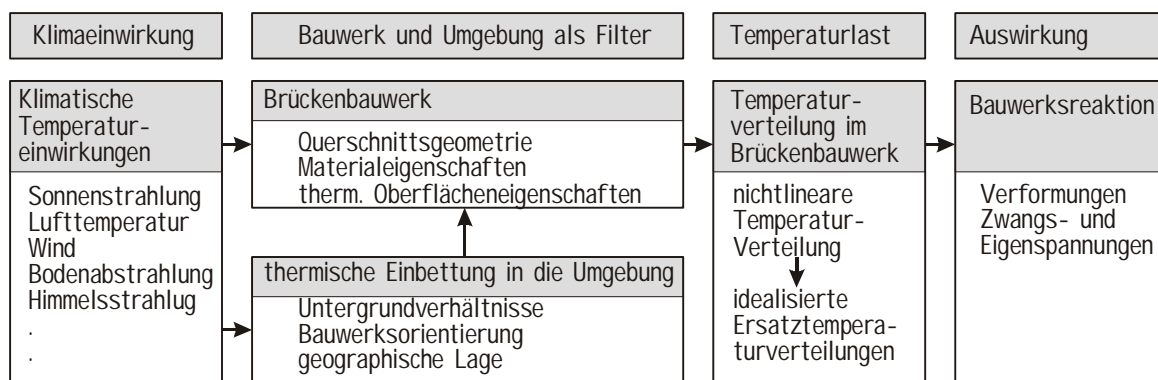


Abbildung 1.2 Wirkungskette der klimatisch bedingten Temperatureinwirkungen

Klimatische Einwirkungen zeichnen sich durch regionale Unterschiede, durch saisonale tägliche Schwankungen aus. Allgemein haben sie Zufallscharakter. Aus diesem Grunde weisen die Bauwerksreaktionen analoge Eigenschaften auf. Zur Bauwerksbemessung werden deshalb unterschiedliche repräsentative Werte verwendet, die mit einer vorgegebenen Wiederkehrperiode auftreten. Leitgröße ist die *charakteristische* Temperatureinwirkung, welche im Mittel nicht öfter als einmal in 50 Jahren erreicht bzw. überschritten wird. Diese Häufigkeitsangabe führt zwangsläufig dazu, dass zur Bestimmung repräsentativer Extremwerte statistische und wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden angewandt werden müssen.

Die Berechnung von charakteristischen Temperatureinwirkungs-Vorgaben ist an eine Vielzahl von Einflussparametern gebunden, weil sich mit jeder Variation von Querschnittsgestaltung, Bauwerksmaterial und thermischer Einbettung in die Umgebung die oben genannte Filterwirkung ändert. Folglich ändert sich aber auch das Temperatur-Langzeitverhalten und damit die statistische Grundlage für eine Extremwertbestimmung.

Für die Ableitung von Bemessungswerten kann das Temperaturverhalten an Brückenbauwerken messtechnisch aufgezeichnet und ausgewertet werden. Die gewonnenen Ergebnisse begrenzen die Aussage auf das untersuchte Bauobjekt in seiner spezifischen lokalen Einbettung in die Umgebung. Die Messung ist i.d.R. mit einem verhältnismäßig hohen Aufwand verbunden und erfordert ggf. zusätzlich die Bestimmung des Erwärmungszustandes zwischen den Messpunkten. Für allgemeingültige Aussagen müssten daher Temperaturmessungen an repräsentativen Bauwerken in einem flächendeckenden Netz über mehrere Jahre hinweg durchgeführt werden.

Um das Temperaturverhalten auch im Sinne ingenieurmäßiger Modellbildung numerisch erfassen zu können, wurden in der Vergangenheit entsprechende deterministische Berechnungsverfahren entwickelt, die den klimatisch bedingten Temperaturverlauf in Brückenquerschnitten nachbilden. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, Extrembeanspruchungen und mechanische Bauwerksreaktionen zu analysieren.

Die Berechnung nichtlinear begrenzter Temperaturfelder gehört zum Standardumfang gängiger Finite-Elemente-Systeme. Für verschiedene Fragestellungen existieren eigenständige Lösungen, die mit Hilfe der FEM das Temperatur-, Feuchtefeld- und das Spannungsproblem behandeln [2], [30], [38]. Das Berechnen klimatisch bedingter Temperaturverteilungen erfordert einerseits die Lösung des Temperaturfeldproblems. Andererseits müssen die verschiedenen Klimakomponenten in ihrem zeitlichen Intensitätsverlauf und der daraus folgende Wärmeaustausch an den Bauwerksoberflächen erfasst werden. Eine geschlossene mathematische Lösung für mehrschichtige Wände wird in [27] entwickelt. Eine erste grundlegende Analyse im Bereich des Brückenbaus stellt die Arbeit [46] dar. Zur Untersuchung des Einflusses der Sonnenstrahlung auf Brückenbauwerke werden darin Massivbau-Brückenquerschnitte durch planparallele Platten vereinfacht und mit Strahlungslufttemperaturen beaufschlagt. Temperaturspannungen werden mit Hilfe der Theorie der elastischen Scheiben bestimmt. Ähnliche Ansätze finden sich in [21], [86], [127]. In [125] wird ein Verfahren vorgestellt, welches die Berechnung zweidimensionaler Temperaturfelder gestattet. Klimatische Randbedingungen werden darin durch flächenweise Energiebilanzierung ermittelt und als „Temperaturlast“ aufgebracht. Schwerpunkt in [125] war, die Beanspruchung von variablen Massivbrückenquerschnitten in der Vertikalebene zu ermitteln sowie Erkenntnisse über die auftretenden Eigenspannungen zu gewinnen.

Auf der Basis einer Lösung des instationären Wärmeleitvorganges aus [93] wird in [58] ein EDV-technisch aufbereitetes Verfahren zur Berechnung zweidimensionaler Temperaturverteilungen vorgestellt. Durch Berücksichtigung des Sonnenlaufs können so u.a. auch Verschattungseinflüsse mit erfasst werden. Für die Berechnung der mechanischen Bauwerksreaktionen wurde der Brückenquerschnitt als Faltwerk idealisiert. Temperaturbedingte Starrkörperreaktionen und Profilverformungen wurden auf der Basis der elasto-statischen Scheibentheorie und hergeleitet und schließlich als Analogieverfahren aufbereitet.

Ein Simulationsverfahren, welches auf dem FE-System ADINA aufbaut, findet sich in [26]. Darin werden die klimatischen Einwirkungen ebenfalls individuell erfasst und die thermische Einwirkungssituation sehr genau berücksichtigt. Darin wird zusätzlich der Strahlungswärmeaustausch zwischen den Oberflächen innerhalb eines Bauwerkes erfasst, ebenso die Lufttemperaturverhältnisse im Inneren von Hohlkastenträgern.

Die vorgenannten Verfahren bauen ihre Temperaturfeldanalysen überwiegend auf idealisierten Tagesgängen der klimatischen Einwirkungen auf. Deren jahreszeitlich bezogene Eckwerte beruhen auf statistisch ausgewertetem Datenmaterial. In einigen Arbeiten werden Berechnungen mit gemessenen Klimamessdaten durchgeführt – in der Regel zum Vergleich von Temperaturmessung und –berechnung, in einigen Fällen aber auch zur Abschätzung repräsentativer Extremwerte.

In [29] sind zur Bestimmung repräsentativer Beanspruchungen Temperaturfeldberechnungen über einen jeweils 3-monatigen Zeitraum fünf aufeinander folgender Jahre durchgeführt worden. Aus den täglichen Extremwerten des konstanten Temperaturanteils und der linearen Temperaturunterschiede sind mittels Extremwertstatistik Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode ermittelt worden. Mit der Kenntnis der statistischen Parameter der Extremwerte konnten in Anlehnung an eine Arbeit zur Kombination der stochastischen Lasten Verkehr und Temperatur [28] entsprechende Kombinationswerte für verschiedene Brückenquerschnitte erarbeitet werden. Eine weitere Arbeit zu diesem Thema, welche einen mehrjährigen Verlauf von Temperaturbeanspruchungen berücksichtigt, findet sich in [126].

Zur Bestimmung repräsentativer Temperatureinwirkungen aus Temperaturmessungen werden in [3] aufbereitete Messdaten in einen saisonalen Anteil und eine normalverteilte Zufallskomponente zerlegt. Anschließend wird mit Berücksichtigung der gewonnenen Perioden- und Zufallsparameter eine 2000-Jahre umfassende Zeitreihe generiert, aus der Temperaturschwankungen unterschiedlicher Wiederkehrperiode abgeleitet werden.

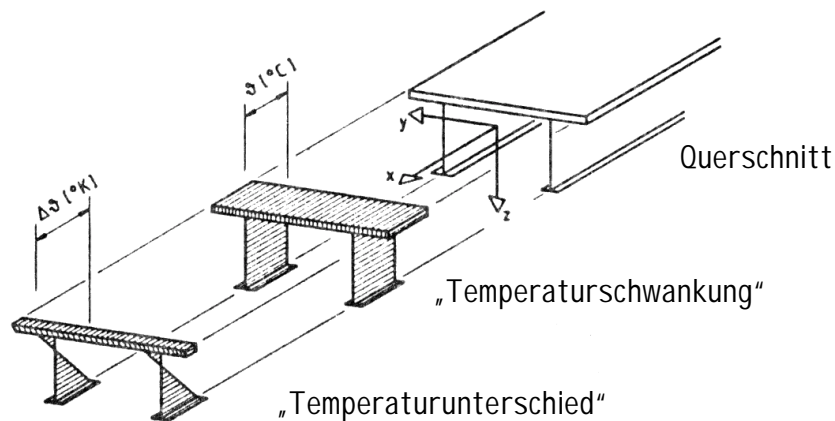


Abbildung 1.3 Linearisierte Ersatztemperaturverteilungen: Temperaturschwankung und vertikaler Temperaturunterschied, [58]

In der gegenwärtigen Normung [15], [14], [22] werden für Brückenquerschnitte repräsentative Lastwerte der Temperaturschwankung und des linearen vertikalen Temperaturunterschiedes angegeben. Eine Kombinationsregel erfasst das gleichzeitige Auftreten dieser beiden Temperaturanteile. Hintergrundliteratur über die Bildung einer Kombinationsregel für idealisierte Temperaturanteile konnte nicht gefunden werden.

1.2 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Wie oben erläutert ist die Grundlage für die Bestimmung und Beschreibung charakteristischer Temperaturbeanspruchungen die Analyse des Temperaturverhaltens der Brückenbauwerke. Dazu existieren die beschriebenen Berechnungsverfahren, die fast ausschließlich auf zeitlich eng begrenzten, idealisierten oder stationär-statistisch aufbereiteten Klimadaten beruhen. Das davon abweichende Berechnen der Temperaturreaktionen mit real gemessenen und damit zufallsbehafteten Klimaeinwirkungen ist tragender Aspekt dieser Arbeit mit der Absicht, einen Beitrag zur numerischen Berechnung von klimatisch bedingten Temperaturbeanspruchungen zu leisten. Der Schwerpunkt liegt in der Erarbeitung eines Berechnungsverfahrens zur

Langzeitsimulation instationärer nichtlinearer Temperaturfelder auf der Basis gemessener Wetterdaten. Ziel ist, aus den Zufallseigenschaften der Temperaturreaktionen saisonale und jahresübergreifende charakteristische Temperaturbeanspruchungen ermitteln zu können. **Entscheidend dabei ist, dass die zufallsbehafteten Klimatelemente wie die Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Sonnenstrahlung zunächst den nichtlinearen Einwirkungs- und Erwärmungsprozess von Umgebung und Bauwerk durchlaufen. Erst die Temperaturreaktion des Brückenquerschnittes bildet die Grundlage der Extrapolation repräsentativer Beanspruchungszustände.** Die zweidimensionalen Temperaturfeldberechnungen bauen auf dem in [58] erarbeiteten, EDV-technisch aufbereiteten Verfahren auf, welches für die zu lösende Fragestellung erweitert wird.

Im Einzelnen richtet sich der Fokus der Arbeit auf folgende Arbeits- und Themenkomplexe:

- Das zugrunde gelegte Verfahren zur Berechnung instationärer nichtlinearer Temperaturfelder aus [58] wird in Detailpunkten durch präzisierete Ansätze der Temperaturrandbedingungen erweitert, um eine Steigerung der Anpassungsgüte von berechneten Temperaturfeldern zu erzielen.
- Zur Berücksichtigung mehrjähriger Klimadatenkollektive wird der komplexe Berechnungsalgorithmus erweitert, so dass eine mehrjährige, kontinuierliche Temperaturfeldberechnung einschließlich der zugehörigen Datenverwaltung erfolgen kann. Zudem ist die Aufbereitung gemessener Klimadatenreihen für die Langzeittemperaturfeldsimulationen notwendig.
- Zur anwendungsorientierten Verwertung der instationären, nichtlinear begrenzten Temperaturfelder ist eine Zerlegung in idealisierte Anteile erforderlich. Hierfür wird eine allgemeingültige Zerlegungs-Regel für alle Reaktionen in prismatischen Brückenquerschnitten mit Hilfe von Formfunktionen erarbeitet. Erst diese idealisierten Temperaturanteile bilden die Datenbasis zur Ermittlung charakteristischer Temperaturbeanspruchungen unterschiedlicher Wiederkehrperioden.
- Durch die Zerlegung nichtlinearer, instationärer Temperaturfelder in mehrere idealisierte Anteile und deren Zusammenfassung zu wenigen charakteristischen Extremwerten geht die Information des zeitlichen Zusammenwirkens verloren, so dass Kombinationsregeln erforderlich werden. Diese müssen so beschaffen sein, dass sie zur Beachtung des gleichzeitigen Auftretens der Temperaturanteile auf jede denkbare Bemessungsposition angewendet werden können.
- Auf der Basis der mehrjährigen Temperaturfeldsimulationen werden mit statistischen und wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden repräsentative Extremwerte der idealisierten Temperaturanteile ermittelt. Zur Berücksichtigung der saisonalen Schwankungen wird ein entsprechendes Komponentenmodell zugrunde gelegt.

Auf der Basis der genannten Punkte wird für Straßenbrücken mit Plattenbalkenquerschnitt das gleichzeitige Auftreten von Temperaturschwankung und vertikalem Temperaturunterschied analysiert werden. Die Verwendung linearisierter Ersatztemperaturverteilungen ist sinnvoll, da damit eine Affinität zu den ebenen Dehnungszuständen infolge Normalkraft- bzw. Biegemomentenbeanspruchung besteht. Mit den gemessenen Klimadaten werden unter Zuhilfenahme der numerischen Langzeitsimulationen Kombinationsflächen für je einen Vertreter des Stahl-, Stahlverbund- und Massivbrückenbaus bestimmt.

2 Bestimmung der Temperaturverteilungen

2.1 Allgemeines

Klimaeinwirkungen wirken als äußere Temperatur-Randbedingungen auf Brückenbauwerke ein, infolge derer sich zeitlich veränderliche Temperaturfelder einstellen. Die Berechnung des instationären Temperaturzustandes setzt zum voraus, dass der zeitliche Verlauf der Klimaeinwirkungen einschließlich des daraus folgenden Wärmestroms an den Bauwerksoberflächen bekannt ist. Andererseits ist es notwendig, die Ausbreitung und Speicherung der Wärme im Bauwerk zu ermitteln. Hierfür existieren auf der Fourier'schen Differenzialgleichung der Wärmeleitung aufbauende Zeitschrittverfahren, welche die Berechnung von Temperaturfeldern erlauben. Grundlage der Temperaturfeldberechnung dieser Arbeit ist das in [58] beschriebene und speziell für die Lösung der Problematik klimatischer Temperatureinwirkungen aufbereitete Verfahren. Dieses Verfahren wurde EDV-technisch für die Berechnung des Temperaturverhaltens von Brücken unter Beaufschlagung mehrjähriger Klimadaten aufbereitet. Für die Ansätze des Wärmeaustauschs an den Bauwerksoberflächen sind z.T. detailliertere Modelle verwendet worden, um eine Erhöhung der Modellgüte zu erreichen. Dies ist z.B. bei dem konvektiven Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft der Fall, oder der detaillierteren Berücksichtigung der Einstrahlungsverhältnisse diffuser Wärmestrahlungsanteile. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Aufbereitung mehrjähriger Klimadaten für die Temperaturfeldberechnung einschließlich der Zusammenstellung geeigneter Ansätze zur Ergänzung unvermeidbarer Messdatenlücken.

2.2 Temperaturfeldberechnung

Der Temperaturzustand eines Bauwerkes wird zu einem beliebigen Zeitpunkt durch das Temperaturfeld $T(x,y,z,t)$ beschrieben. Da grundsätzlich davon auszugehen ist, dass kein einheitliches Temperaturniveau vorliegt, treten in der Tragstruktur Wärmeströme auf. Ausgelöst werden diese Wärmeströmungen durch Temperaturunterschiede innerhalb des Baukörpers: Moleküle an den Stellen höherer Temperatur besitzen mehr kinetische Energie und übertragen diese auf die Nachbarmoleküle geringerer Energie und verringern so ihre eigene Temperatur ϑ . Die Geschwindigkeit dieser Wärmeübertragung wird durch die Wärmeleitfähigkeit λ angegeben. Betrachtet man ein infinitesimales Volumenelement mit den Abmessungen dx , dy und dz , wird die Wärmeenergie, die ein Flächenstück $dy \cdot dz$ senkrecht zur Strömungsrichtung dx je Zeiteinheit dt durchströmt mit der Wärmestromdichte q_x beschrieben (Gleichung (2.1)).

$$q_x = \lambda \cdot \frac{d\vartheta}{dx} \quad (2.1)$$

Damit ist der transportierte Energiebetrag Q_x :

$$Q_x = q_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (2.2)$$

Dieser Energietransport bewirkt folglich in jedem Volumenelement eine Energieänderung. Mit dieser Wärmezufuhr- oder abfuhr ändert sich die Temperatur des Volumenelementes. Charakteristische Kenngröße für das Vermögen eines Körpers, bei einer Wärmezufuhr seine Tempe-

ratur zu verändern, ist die spezifische Wärmekapazität c . Sie gibt das Verhältnis aus zugeführter Wärmeenergie und der Temperaturänderung der erwärmten Masse an:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\vartheta} = \frac{Q}{(\rho \cdot V) \cdot \Delta\vartheta} \quad (2.3)$$

Ausgangspunkt zur Ermittlung zeitlich veränderlicher Temperaturfelder ist die Energiebilanz eines Volumenelementes aus der in einer Zeiteinheit zugeführten bzw. abgeführten und gespeicherten Wärmemenge [38]. Es können vier Anteile unterschieden werden:

1. Wärmespeicherung Q_0 ...
... durch Temperaturänderung des Volumenelementes,
2. im Volumenelement selbst freiwerdende Wärmeenergie Q_I ...
... wie beispielsweise bei der Hydratation von Beton,
3. Wärmeaustausch Q_N ...
... mit benachbarten Volumenelementen infolge von Temperaturgradienten,
4. Wärmetransport Q_R ...
... an den Oberflächen des Baukörpers (Wärmestrahlung oder Konvektion).

Um in einem Volumenelement $dV=dx \cdot dy \cdot dz$ die Temperatur um das Maß $d\vartheta$ zu verändern, ist in der Zeiteinheit dt die Wärmemenge dQ_0 erforderlich:

$$dQ_0 = c \cdot m \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \cdot dt = c \cdot \rho \cdot dV \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \cdot dt \quad (2.4)$$

Wird im Element selbst Wärmeenergie freigesetzt, kann dies als „innere“ Randbedingung aufgefasst werden. Die Wärmemenge beträgt je Zeiteinheit:

$$dQ_I = \frac{dQ_I}{dt} \cdot dt \quad (2.5)$$

Der Energieaustausch des Volumenelementes mit den benachbarten Volumina findet über die sechs Begrenzungsflächen in den Koordinatenrichtungen x , y und z statt. Weisen diese eine andere Temperatur als das betrachtete Volumenelement auf, berechnet sich der ausgelöste Wärmestrom in das Volumenelement hinein mit den Gleichungen (2.1) und (2.2):

$$dQ_{N,x} = \lambda \cdot \frac{d\vartheta}{dx} \cdot \frac{dV}{dx} \cdot dt \quad (\text{für die Richtungen } y \text{ und } z \text{ gilt Analoges}) \quad (2.6)$$

Ändern sich die Temperaturgradienten im Volumenelement entlang den Strecken dx , dy bzw. dz um das Maß:

$$-\frac{d\left(\frac{d\vartheta}{dx}\right)}{dx} dx = -\frac{d^2\vartheta}{dx^2} dx \quad \text{u.s.w.} \quad (2.7)$$

so ist die jeweils auf der gegenüberliegenden Flächenseite austretende Wärmemenge mit Gleichung (2.8) gegeben.

$$-dQ_{N,x+dx} = \lambda \cdot \left(\frac{d\vartheta}{dx} - \frac{d^2\vartheta}{dx^2} dx \right) \cdot \frac{dV}{dx} \cdot dt \quad \text{u.s.w.} \quad (2.8)$$

Die Summe aller dieser Wärmeströme mit den benachbarten Volumenelementen führt zum Bilanzanteil Q_N :

$$\begin{aligned} dQ_N &= dQ_{N,x} + dQ_{N,x+dx} + dQ_{N,y} + dQ_{N,y+dy} + dQ_{N,z} + dQ_{N,z+dz} \\ &= \lambda \cdot \left(\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \frac{d^2\vartheta}{dy^2} + \frac{d^2\vartheta}{dz^2} \right) \cdot dV \cdot dt \end{aligned} \quad (2.9)$$

Für das infinitesimal kleine Volumenelement führt die Energiebilanz aus den zuvor genannten Anteilen zur Fourier'schen Differenzialgleichung des instationären Wärmeleitprozesses in festen Körpern:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda \cdot dV \cdot dt} \cdot (dQ_I + dQ_N) &= \frac{1}{\lambda \cdot dV \cdot dt} \cdot dQ_0 \\ \frac{dQ_I}{\lambda \cdot dV \cdot dt} + \left(\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \frac{d^2\vartheta}{dy^2} + \frac{d^2\vartheta}{dz^2} \right) - \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Zur Lösung dieser Differenzialgleichung (2.10) für einen Brückenquerschnitt müssen räumliche und zeitliche Anfangs- und Randbedingungen eingeführt werden. Die Anfangsbedingungen werden durch Vorgabe eines Temperaturfeldes zum Zeitpunkt $t=0$ festgelegt [38], [58]. Die Randbedingungen an der Oberfläche des Baukörpers können als orts- und zeitabhängige Funktionen im Allgemeinen auf zweierlei Art vorgegeben werden: Entweder werden die Oberflächentemperaturen angesetzt oder die Wärmestromdichte senkrecht zur Körperoberfläche. Im ersteren Fall stellt sich entsprechend den Oberflächentemperaturen ein zugehöriger Wärmestrom an den Oberflächen ein. Im umgekehrten Fall liefert die Lösung der Differenzialgleichung das gesamte Temperaturfeld und somit auch die Temperaturen an der Baukörperoberfläche.

In dem verwendeten Lösungsalgorithmus wird als äußere Randbedingung die Wärmestromdichte eingesetzt. Die zeitlich veränderliche Wärmestromdichte infolge Klimaeinwirkung muss für jeden Oberflächenbereich individuell ermittelt werden, aus der am jeweiligen Oberflächenelement von „außen“ zugeführten Energie und der vom Körper abgehenden Wärmeenergie. Diese Energiebilanz hängt nicht allein von den klimatischen Einwirkungen ab, sondern von der örtlichen Oberflächentemperatur des Baukörpers. Der Wärmetransport Q_R ergibt sich dann nach Gleichung (2.11). Dieser ist in Gleichung (2.10) als zusätzlicher Bilanzanteil einzufügen.

$$dQ_R = Q_{\text{Konvektiver Wärmeübergang}} + dQ_{\text{absorbierte Wärmestrahlung}} - dQ_{\text{Wärme-Eigenabstrahlung}} \quad (2.11)$$

Eine analytische Lösung der Differenzialgleichung bleibt nur einfacheren Strukturen vorbehalten. Die Berechnung der Temperaturfelder in Brückenquerschnitten ist wegen des konturierten Querschnittsaufbaus und den komplexen klimatischen Randbedingungen nur auf nummeri-

schem Wege möglich. Als weiteres spricht für eine numerische Lösung die bessere Anpassungsfähigkeit an spezielle Fragestellungen, wie beispielsweise dem Heißeinbau von Fahrbahnbelag.

In der Fourierschen Differenzialgleichung gehen die thermophysikalischen Materialeigenschaften Wärmekapazität, -leitfähigkeit und die Dichte ein. Entsprechende Kennwerte sind deshalb für die maßgebenden Baumaterialien Stahl, Stahlbeton und Asphalt einzugrenzen.

Wie bereits beschrieben wurde, wird das Vermögen von Baumaterialien, Wärme zu speichern, durch die Wärmekapazität beziffert. In der Regel wird jedoch die massebezogene spezifische Wärmekapazität c tabelliert. Aus dem Produkt mit der Materialdichte ρ ergibt sich das Energiespeichervermögen des Werkstoffes. Beton besitzt gegenüber Stahl zwar ein geringeres Energiespeichervermögen, verhält sich jedoch aufgrund seines massigeren Einsatzes in Brückenquerschnitten deutlich „temperaturträger“ als Stahlbleche. Außerdem beträgt die Wärmeleitfähigkeit von Beton etwa 3% des Wertes von Stahl. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Stahl können große Temperaturunterschiede in benachbarten Bereichen bei ausreichender Übertragungsfläche sehr schnell ausgeglichen werden. Asphalt ist hinsichtlich seiner Wärmekapazität und Dichte mit Beton vergleichbar. Im Hinblick auf die Temperaturbeanspruchungen von Brücken wirkt der als Fahrbahnbelag dienende Baustoff aufgrund seiner niedrigen Wärmeleitfähigkeit wie eine Wärmedämmung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf eine Zusammenstellung in [58] zurückgegriffen, die eine Auswahl der genannten Materialeigenschaften mit Angaben aus verschiedenen Literaturquellen enthält:

Baustoff	Wärmekapazität c [J/kg·K]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K]	Dichte ρ [kg/m ³]
Asphalt	838	0,75	2240
	920	1,13	
Beton	880	0,80 ... 1,40	1900 ... 2300
	922	1,40	2480
	1170	2,30	2400
	960	1,50	2400
	840	1,70	
	920	2,04	
Stahl	460	50,0	7850
	460	46,0	7840
	480	50,0	

Tabelle 2.1 Thermophysikalische Kennwerte der Wärmespeicherung und Wärmeleitung, Zusammenstellung aus verschiedenen Quellen, [58]

Das Produkt $(c \cdot \rho / \lambda)$ in der Fourierschen Differenzialgleichung (2.10) kann für die drei Werkstoffe folgendermaßen eingegrenzt werden:

	Stahl	Stahlbeton	Asphalt
$(c \cdot \rho / \lambda)$ in [s/m ²]	72.200 – 75.300	1.186.000 – 1.633.000	1.823.717 – 2.502.827

Tabelle 2.2 Wertebereich des Quotienten auf Wärmekapazität zu Wärmeleitfähigkeit

2.3 Beschreibung des Verfahrens

In Brückenbauwerken stellen sich sowohl über den Querschnitt als auch in Längsrichtung des Bauwerkes ungleichmäßige Temperaturfelder ein. Eine unterschiedliche Temperierung im Brückenlängsverlauf ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen: Zum Einen können sich die Bestrahlungs- und Verschattungs-Verhältnisse aufgrund der lokalen Umgebungsbedingungen ändern. Andererseits können im Längsverlauf verschiedene Bodenoberflächen auftreten, was wiederum Einfluss auf die untergrundseitige Wärmeabstrahlung und Strahlungsreflexion hat. Weiterhin weisen Brücken in der Regel an die statisch-konstruktiven Erfordernisse angepasste Abstufungen der Querschnittsgeometrie bzw. Abmessungen auf.

Das dreidimensionale Temperaturfeldproblem kann für Fälle eines prismatischen Brückenoberbaus in guter Näherung auf eine ebene Betrachtungsweise reduziert werden, da die Temperaturfelder in Brückenlängsrichtung bereichsweise als konstant vorausgesetzt werden können. Eine Berücksichtigung der vorgenannten Veränderlichkeiten in Brückenlängsrichtung kann durch eine segmentweise Querschnittsbetrachtung erfolgen. Für die vorliegende Arbeit wird auf den in [58], [93] entwickelten Ansätzen und EDV-Verfahren zur Berechnung 2-dimensionaler Temperaturfelder aufgebaut. Hierin wird der Brückenquerschnitt in ein orthogonales System einzelner Elemente unterteilt.

Querschnittsmodell eines Plattenbalkens in Massivbauweise	
<i>Eigenschaften eines Elementes i</i>	
a_i, b_i	Abmessungen des rechteckigen Elementes
λ_i	Wärmeleitfähigkeit
c_i	spezifische Wärmekapazität
ρ_i	Dichte
ϑ_i	Schwerpunktstemperatur
<i>einander benachbarte, in thermischem Kontakt stehende Elemente i und k</i>	
$l_{i,k}$	Kontaktlänge, über den der Wärmeaustausch stattfindet
s_i, s_k	Elementabmessungen in Richtung des Wärmeflusses (= a_i bzw. = b_i)
$q_{i,k}$	Wärmestromdichte des zufließenden Wärmestroms
<i>Randfläche mit Wärmeaustausch zur Umgebung</i>	
$l_{i,O}$	Länge, über den der Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet
$q_{i,O}$	Wärmestromdichte der Wärmeaustauschs mit der Umgebung
<i>Umgebungsbedingungen</i>	
$\vartheta_{Id,i}$	Ideelle Lufttemperatur (Umfasst Lufttemperatur und Strahlungsaustausch)
$\alpha_{K,i}$	Wärmeübergangskoeffizient für den Wärmeaustausch Umgebung \leftrightarrow Element i

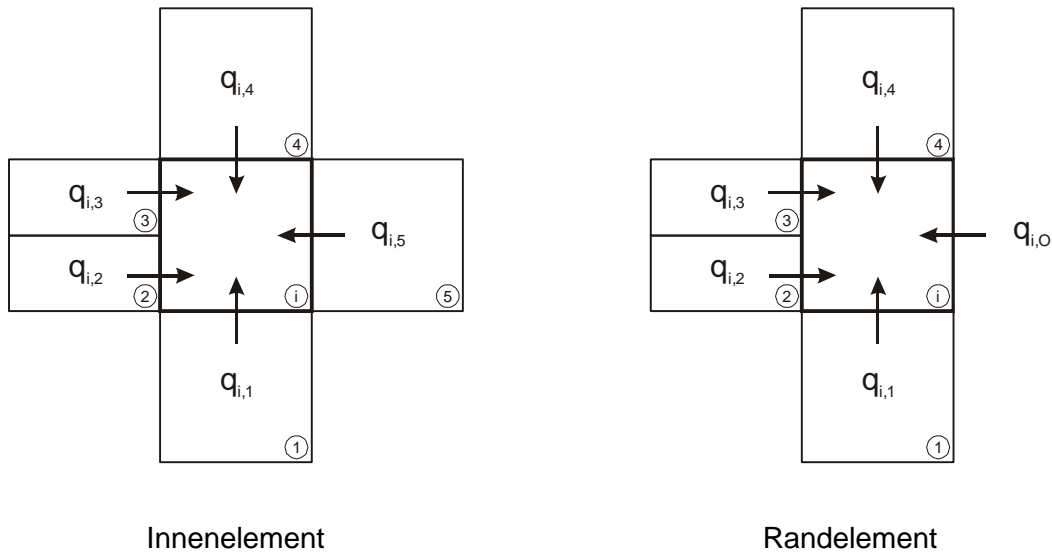


Abbildung 2.1 Element i mit Nachbarelementen k des diskretisierten Systems, [58]

Jedes Element i des aus n Elementen zusammengesetzten Querschnittes steht mit m benachbarten Elementen über die Kantenlänge $l_{i,k}$ in thermischem Kontakt. Falls es sich um ein Element an der Bauwerksoberfläche handelt, findet zudem ein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt. Der Wärmestrom ΔQ_i des Elementes i ist demnach die Summe der im vorangegangenen Abschnitt benannten Einzelwärmeströme und führt in dem Zeitinkrement Δt zu einer Temperaturänderung $\Delta \vartheta_i$. Mit der Wärmestromdichte des querschnittsinternen Energieflusses

$$q_{i,k} = \frac{1}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{s_k/2}{\lambda_k}} \cdot (\vartheta_k - \vartheta_i) \quad (2.12a)$$

und dem Wärmeaustausch mit der Umgebung

$$q_{i,0} = \frac{1}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{K,i}}} \cdot (\vartheta_{id,i} - \vartheta_i) \quad (2.12b)$$

Aus den Gleichungen (2.2) und (2.12) ergibt sich der Wärmestrom je Zeiteinheit $\Delta Q_i/\Delta t$ für das Element i zu:

$$\frac{\Delta Q_i}{\Delta t} = \sum_{k=1}^m q_{i,k} \cdot l_{i,k} + q_{i,0} \cdot l_{i,0} \quad (2.13)$$

Durch Umformung und sinnvolle Zusammenfassung wird Gleichung (2.13) in eine kompakte, matrizielle Systemgleichung überführt, in der die Wärmeleitfähigkeitsmatrix [L] die System-Wärmeleitfähigkeiten zusammenfasst und die Randbedingungsmatrix [R] die Übergangsbedingungen an der Querschnittsoberfläche enthält. Es gilt:

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta Q_i}{\Delta t} &= \sum_{k=1}^m \frac{l_{i,k}}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{s_k/2}{\lambda_k}} \cdot (\vartheta_K - \vartheta_i) + \frac{l_{i,o}}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{K,i}}} \cdot (\vartheta_{Id,i} - \vartheta_i) \\
 &= \sum_{k=1}^m \left[\left(\frac{l_{i,k}}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{s_k/2}{\lambda_k}} \right) \cdot (\vartheta_K) \right] - \left(\sum_{k=1}^m \frac{l_{i,k}}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{s_k/2}{\lambda_k}} + \frac{l_{i,o}}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{K,i}}} \right) \cdot (\vartheta_i) + \left(\frac{l_{i,o}}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{K,i}}} \right) \cdot (\vartheta_{Id,i}) \\
 &= \sum_{k=1}^m [L_{i,k} \cdot \vartheta_K] - L_{i,i} \cdot \vartheta_i + R_{i,i} \cdot \vartheta_{Id,i}
 \end{aligned}$$

Aus der vorangegangenen Umstellung leiten sich für das n Elemente umfassende Querschnittsmodell die Systemmatrizen [L] und [R] mit den Dimension n×n folgendermaßen ab:

$$v_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{falls } i = j \text{ oder Element } i \text{ nicht mit Element } j \text{ in thermischem Kontakt} \\ 1 & \text{falls } i \neq j \text{ und Element } i \text{ mit Element } j \text{ in thermischem Kontakt} \end{cases}$$

$$[L_{i,j}] = \begin{cases} \sum_{k=1}^n \left(v_{i,j} \cdot \frac{l_{i,j}}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{s_j/2}{\lambda_j}} \right) + \frac{l_{i,o}}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{K,i}}} & \text{falls } i = j \\ v_{i,j} \cdot \left(\frac{l_{i,j}}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{s_j/2}{\lambda_j}} \right) & \text{falls } i \neq j \end{cases} \quad (2.14)$$

$$[R_{i,i}] = \frac{l_{i,o}}{\frac{s_i/2}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{K,i}}} \quad \text{und für } i \neq j: \quad [R_{i,j}] = 0 \quad (2.15)$$

Für das Gesamtsystem schreibt sich Gleichung (2.13) nunmehr:

$$\frac{1}{\Delta t} \cdot \{\Delta Q\} = [L] \cdot \{\vartheta\} + [R] \cdot \{\vartheta_{Id}\} \quad (2.16)$$

Der Wärmefluss in oder aus dem Element i bewirkt entsprechend der Wärmekapazität eine Temperaturänderung im Element. Durch Auflösen der Gleichung (2.4) nach der Temperaturänderung Δϑ erhält man für das Einzelement i Gleichung (2.17).

$$\Delta\vartheta_i = \frac{1}{(c_i \cdot \rho_i) \cdot (a_i \cdot b_i)} \cdot \frac{\Delta Q_i}{\Delta t} \cdot \Delta t \quad (2.17)$$

Darin ist das Produkt „ $c \cdot \rho \cdot a \cdot b$ “ das Wärmespeichervermögen des Elementes und ΔQ_i die zu- oder abgeflossene Wärmemenge. Wird Gleichung (2.16) in (2.17) eingesetzt folgt für das Gesamtsystem das Gleichungssystem (2.18)

$$\{\Delta\vartheta(t)\} = \Delta t \cdot [W] \cdot ([L] \cdot \{\vartheta(t)\} + [R] \cdot \{\vartheta_{id}\}) \quad (2.18)$$

mit $[W]$ als Wärmekapazitätsmatrix. Diese fasst das Wärmespeichervermögen des Querschnittes zusammen und baut sich für das Gesamtsystem folgendermaßen auf:

$$[W_{i,i}] = ((c_i \cdot \rho_i) \cdot (a_i \cdot b_i))^{-1} \quad \text{und für } i \neq j: \quad [W_{i,j}] = 0 \quad (2.19)$$

Aus dem Temperaturfeld $\{\vartheta(t)\}$ zum Zeitpunkt t und der Temperaturänderung $\{\Delta\vartheta(t)\}$ kann das Temperaturfeld $\{\vartheta(t+\Delta t)\}$ durch Aufaddieren berechnet werden (Gleichung (2.21)). Es wird im Zeitinkrement Δt eine lineare Änderung des Vektors $\{\vartheta(t)\}$ zu $\{\vartheta(t+\Delta t)\}$ vorausgesetzt, so dass der Vektor $\{\vartheta(t)\}$ in Gleichung (2.18) im gemischten Euler-Verfahren durch den zeitlichen Mittelwert der Vektoren $\{\vartheta(t)\}$ und $\{\vartheta(t+\Delta t)\}$ zu ersetzen ist. Analoges gilt für den Vektor der äußeren Temperatur-Randbedingungen $\{\vartheta_{id}(t)\}$.

Durch Auflösen dieses so modifizierten Gleichungssystems (2.18) ergibt sich das Vektorfeld der Temperaturänderung $\{\Delta\vartheta(t)\}$ zu:

$$\{\Delta\vartheta(t)\} = ([E] - \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot [W] \cdot [L])^{-1} \cdot (\Delta t \cdot [W] \cdot ([L] \cdot \{\vartheta(t)\} + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot [R] \cdot (\{\vartheta_{id}(t)\} + \{\vartheta_{id}(t+\Delta t)\}))) \quad (2.20)$$

mit $[E]$ als die Einheitsmatrix. Die Berechnung des Temperaturfeldes nach dem Zeitinkrement Δt ist dann mit Gleichung (2.21) gegeben:

$$\{\vartheta(t+\Delta t)\} = \{\vartheta(t)\} + \{\Delta\vartheta(t)\} \quad (2.21)$$

Sind die Systemmatrizen $[L]$ und $[W]$ zeitlich veränderlich oder die Materialeigenschaften temperaturabhängig, muss die Lösung der Gleichung (2.20) iterativ erfolgen. Zur Berechnung zeitlich veränderlicher, nichtlinearer Temperaturfelder ist die Vorgabe eines Starttemperaturfeldes $\{\vartheta(t_0)\}$ und der äußeren Randbedingungen $\{\vartheta_{id}(t_0)\}$ und $\{\vartheta_{id}(t_0+\Delta t)\}$ notwendig. Für jeden nachfolgend zu berechnenden Zeitschritt sind die Systemmatrizen $[L]$ und $[R]$ und ggf. $[W]$ entsprechend den klimatischen Randbedingungen und des momentanen Bauwerks-Temperaturzustandes neu aufzustellen.

Die Grundlagen des Wärmeaustauschs an den Bauwerksoberflächen zur Ermittlung der thermischen Randbedingungen werden in Abschnitt 2.4 behandelt. Die klimatischen Einwirkungskomponenten sind Gegenstand der folgenden Abschnitte 2.5ff.

2.4 Wärmeaustausch an den Bauwerksoberflächen

2.4.1 Allgemeines

Der Wärmeaustausch an der Bauwerksoberfläche kann in vier grundsätzliche Anteile unterteilt werden [125]: *a)* den konvektiven Wärmeübergang zur Lufttemperatur, *b)* den Strahlungsaustausch mit der Umgebung *c)* Wärmeabgabe infolge Verdunstung bzw. Schmelzen von Niederschlagswasser und *d)* Kontakt mit anderen Körpern/Medien. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Konvektion mit der Lufttemperatur und der Strahlungsaustausch berücksichtigt, da diese Übertragungswege maßgeblich bei Berechnung klimatisch bedingter Temperaturanteile sind.

2.4.2 Wärmeübergang durch Konvektion

Die Veränderung des Wärmehalts der Luft nahe einer Bauwerksoberfläche verursacht eine Änderung der Luftdichte. Infolge der Erdanziehung wird dadurch eine Strömung hervorgerufen, welche an der Oberfläche innerhalb eines begrenzten Bereiches einen Wärmetransport zwischen Bauwerksoberfläche und Luftraum hervorruft. Dieser Vorgang wird als freie Konvektion bezeichnet.

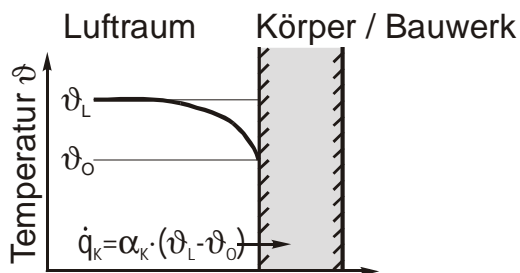


Abbildung 2.2
Wärmeübergang an einer Wand

Weist die angrenzende Luft eine anderweitig initiierte Strömung auf, so erhöht sich der Wärmestrom und damit auch der Wärmeübergang. Denn mit zunehmender Überströmgeschwindigkeit v der Luft verringert sich die Grenzschichtdicke, wodurch der Temperaturgradient zwischen Bauwerksoberfläche und unbeeinflusstem Luftraum vergrößert wird. Diese Form des Wärmeübergangs wird als erzwungene Konvektion bezeichnet.

Die Definition der Wärmestromdichte zwischen einem bewegten Fluid der Temperatur ϑ_L und einer festen Oberfläche mit der Temperatur ϑ_0 ist definiert durch das Produkt aus einem Wärmeübergangskoeffizienten α_K und der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Medien:

$$q_K = \alpha_K \cdot (\vartheta_L - \vartheta_0) \quad (2.22)$$

Wegen der Komplexität der molekular-kinetischen Vorgänge ist die genaue Bestimmung des Wärmeübergangs durch Konvektion sehr stark von den jeweiligen geometrischen, thermischen und materiellen Gegebenheiten abhängig. Für viele technische Fragestellungen, insbesondere der Heizungs- und Klimatechnik, existieren zahlreiche Lösungen für den konvektiven Wärmeaustausch, die zum Teil sehr genau die thermischen Vorgänge beschreiben [42], [90], [118].

Für die Berechnung von Temperaturfeldern in Brückenquerschnitten stehen für eine solch genaue Erfassung des konvektiven Wärmeübergangs nicht ausreichend Eingangsparameter zur Verfügung, die eine ebenso detaillierte Berücksichtigung des Wärmeübergangs zulassen. So sind im Allgemeinen die Strömungsverhältnisse an den Bauwerksoberflächen infolge Wind unbekannt und können daher nur näherungsweise erfasst werden.

Freie Konvektion

Für die freie Konvektion nehmen [46], [58] und [123] einen konstanten Wert an bzw. verwenden die empirische Beziehung (2.23)b.

$$\alpha_{K, frei} = 5,6 \quad (2.23)a$$

$$\alpha_{K, frei} = 2,6 \cdot \sqrt[4]{|\vartheta_L - \vartheta_O|} \quad (2.23)b$$

Wie eingangs erwähnt, wird die freie Konvektion durch Dichteunterschiede und den dadurch ausgelösten schwerkraftbedingten Strömungen hervorgerufen. Für senkrechte Wände, Oberseite und Unterseite waagerechter Flächen wird die Strömung durch die Flächenbegrenzung unterschiedlich beeinträchtigt: Dies kann anschaulich an dem Deckblech einer Straßenbrücke erläutert werden:

Durch Sonnenstrahlung wird dieses Deckblech deutlich über die Lufttemperatur erhitzt. In der Grenzschicht ober- und unterhalb des Deckbleches wird daher die Luft erwärmt und die Dichte gegenüber dem ungestörten Luftraum abnehmen. Dem Gesetz der Schwerkraft folgend kann die erwärmte Luft auf der Oberseite ungehindert aufsteigen, so dass an die Oberfläche erneut kühle Luft herangeführt wird. Auf der Unterseite hingegen kann die erwärmte Luft nicht nach oben steigen, sondern nur seitlich entweichen. Der Wärmeübergang an der Oberseite muss demnach größer sein als auf der Unterseite des Deckbleches.

Horizontale Flächen:	Senkrechte Flächen
<p><i>Oberseite:</i></p> $\alpha_{K, frei} = 14,13 \cdot \sqrt[3]{\frac{ \vartheta_L - \vartheta_O }{\vartheta_L + 273}} \quad (2.23)c$ <p><i>Unterseite:</i></p> $\alpha_{K, frei} = 1,84 \cdot \sqrt[5]{\frac{ \vartheta_L - \vartheta_O \cdot l_A^2}{\vartheta_L + 273}} \quad (2.23)d$ <p><i>(l_A=Anströmlänge in [m])</i></p>	<p><i>Laminare Strömung: (wird nicht verwendet)</i></p> $\alpha_{K, frei} = 5,6 \cdot \sqrt[4]{\frac{ \vartheta_L - \vartheta_O }{(\vartheta_L + 273) \cdot h_{Wand}}} \quad (2.23)e$ <p><i>(h_{Wand}=Wandhöhe in [m])</i></p> <p><i>Turbulente Strömung:</i></p> $\alpha_{K, frei} = 9,7 \cdot \sqrt[3]{\frac{ \vartheta_L - \vartheta_O }{\vartheta_L + 273}} \quad (2.23)f$

In [116], [90] werden Ansätze vorgeschlagen, die diesen Effekt bei unterschiedlich geneigten Flächen berücksichtigen. Sie bilden die realen Vorgänge zutreffender ab, weshalb an Stelle des in [58] verwendeten Ansatzes der Gleichung (2.23)a nachfolgende Beziehungen zu einer Genauigkeitssteigerung in der Temperaturfeldberechnung führen. Zudem geht in diesen Ansätzen (2.23)c bis f die Temperaturen der Luft und der Wandoberfläche ein.

Erzwungene Konvektion

Der Motor der erzwungenen Konvektion ist die Strömungsgeschwindigkeit v der Luft respektive die Windgeschwindigkeit. Der Wärmeübergang verstärkt sich mit zunehmender Überströmungsgeschwindigkeit der Luft. Zur Bestimmung des Konvektionsbeiwertes finden sich in den o.g. Quellen folgende Ansätze:

$$\alpha_{K,erzwungen} = \zeta \cdot v \quad \text{mit } \zeta = 4..5 \quad \text{für } v \leq 5 \text{ m/s} \quad (2.24a)$$

$$\alpha_{K,erzwungen} = 7,15 \cdot v^{0,78} \quad \text{für } v \geq 5 \text{ m/s} \quad (2.24b)$$

Da die Strömungsgeschwindigkeit v an den Bauwerksoberflächen nur abgeschätzt werden kann, wird generell $\alpha_{K,erzwungen} = 4,0 \cdot v$ verwendet.

Gesamtkonvektionsbeiwert aus freier und erzwungener Konvektion

Der Gesamtkonvektionsbeiwert aus freier und erzwungener Konvektion wird in [46], [58] und [123] durch die Summe der beiden Anteile gebildet:

$$\alpha_K = \alpha_{K,frei} + \alpha_{K,erzwungen} \quad (2.25)$$

In [26], [90] wird er als kubisches Mittel nach folgender Beziehung berechnet:

$$\alpha_K = \sqrt[3]{\alpha_{K,frei}^3 + \alpha_{K,erzwungen}^3} \quad (2.26)$$

In [11] und [116] wird ein Komponentensatz aufgeführt, der eine zusätzliche Unterscheidung gleichgerichteter und entgegengerichteter Mischkonvektion vornimmt: Gleichgerichtete Mischkonvektion liegt dann vor, wenn für den freien Konvektionsanteil die Strömung der Grenzschicht-Luft nicht durch die Oberfläche behindert ist. Auf waagerechte Flächen angewendet bedeutet dies eine Zuordnung entsprechend Tabelle 2.3. Bei senkrechten Flächen wird von einer gleichgerichteten Mischkonvektion ausgegangen.

	Oberseite	Unterseite
$\vartheta_L < \vartheta_O$	gleichgerichtet	entgegengerichtet
$\vartheta_L > \vartheta_O$	entgegengerichtet	gleichgerichtet

Tabelle 2.3 Einteilung der Mischkonvektion einer waagerechten Fläche

Im Falle gleichgerichteter Mischkonvektion berechnet sich der Gesamtkonvektionsbeiwert nach Gleichung (2.26). Bei entgegengerichteter Mischkonvektion gilt Gleichung nach [116] die Gleichung (2.27).

$$\alpha_K = \sqrt[3]{\alpha_{K,frei}^3 - \alpha_{K,erzwungen}^3} \quad (2.27)$$

Die Anwendung dieser Beziehung ist beschränkt auf Verhältnisse von $(\alpha_{K,erzwungen} : \alpha_{K,frei}) < 0,8$. Die Verwendung der Beziehungen (2.23)c bis f in Verbindung mit

dem Komponentensatz und der Unterscheidung nach gleichgerichteter und entgegengerichteter Mischkonvektion wird im Folgenden als erweiterter Konvektionsansatz bezeichnet.

Gegenüberstellung der verschiedenen Ansätze

Die vorgestellten Ansätze weichen in der Wärmestromdichte mit zunehmender Temperaturdifferenz voneinander ab. Der Einfluss des Niveaus der Lufttemperatur in den Ansätzen (2.23)c bis f auf den konvektiven Wärmeübergang ist gegenüber allen anderen Parametereinflüssen klein und fällt bei einer vergleichenden Gegenüberstellung nicht ins Gewicht.

[26] baut bei der Berechnung von Temperaturfeldern auf den Ansätzen der Beziehungen (2.23)c bis f, (2.24) sowie (2.26) auf und führt wegen der Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von den Luft- und Oberflächentemperatur Voruntersuchungen durch. Aus berechneten Tagesgängen des Wärmeübergangskoeffizienten werden Mittelwerte für senkrechte und waagerechte Flächen abgeleitet (Tabelle 2.4).

Dem sind in Tabelle 2.5 die Gesamtkonvektionsbeiwerte aus der einfachen Beziehungsgleichung $\alpha_K = 5,6 + 4,0 \cdot v$ gegenübergestellt, welche fast durchgängig größere Wärmeübergangskoeffizienten unterstellen. Ein größerer Wärmeübergangskoeffizient bedeutet aber, dass eine stärkere Kopplung der Oberflächentemperatur an die Lufttemperatur stattfindet. Im Falle einer starken Erhitzung durch intensive Sonnenstrahlung führt dies zu einer stärkeren Wärmeabgabe durch Konvektion. Die Folge ist, dass niedrigere Oberflächentemperaturen berechnet werden.

Orientierung Oberfläche	Gesamtkonvektionsbeiwert α_K als Mittelwert nach [26]			
	v=0 m/s	v=1 m/s	v=2 m/s	v=5 m/s
<i>Decke nach oben</i>	6,0	8,5	11,5	24,0
<i>Decke nach unten</i>	1,5	6,0	9,0	22,0
<i>Freie Außenwand</i>	4,5	7,5	10,5	23,0

Tabelle 2.4 Mittelwerte des täglichen Konvektionsbeiwertes für unterschiedlich geneigte Oberflächen und Windgeschwindigkeiten nach [26]

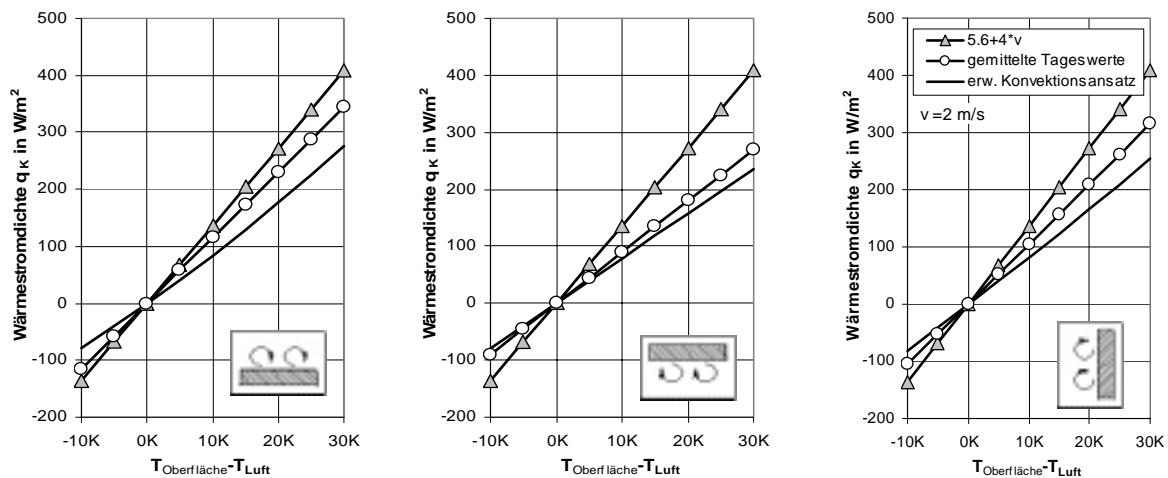
Orientierung Oberfläche	Gesamtkonvektionsbeiwert α_K als Mittelwert nach [46], [58] und [123]			
	v=0 m/s	v=1 m/s	v=2 m/s	v=5 m/s
<i>Decke nach oben</i>	5,6	10,6	13,6	25,6
<i>Decke nach unten</i>				
<i>Freie Außenwand</i>				

Tabelle 2.5 Konvektionsbeiwerte für unterschiedlich geneigte Oberflächen und Windgeschwindigkeiten mit den in [46], [58] und [123] verwendeten Ansätzen

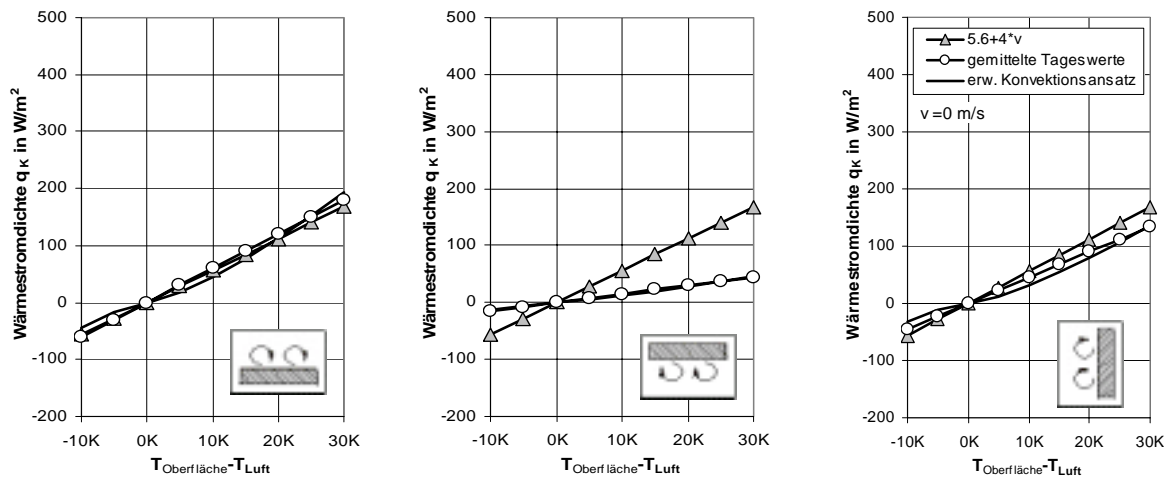
In einer Temperaturfeldberechnung muss für jedes Oberflächenelement zu jedem Zeitschritt aus Oberflächentemperatur, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit die momentane Wärmestromdichte bestimmt werden. Stellt man diese für die Wärmeübergangssituationen „Decke nach oben“, „Decke nach unten“ und „Freie Außenwand“ bei Windgeschwindigkeiten v=0 und v=2m/s über der Temperaturdifferenz $\vartheta_L - \vartheta_O$ dar, so zeigen sich gemäß Abbildung 2.3 zum Teil deutliche Unterschiede im angesetzten konvektiven Wärmestrom. Der Ansatz nach

[46], [58] und [123] ergibt im Vergleich zur Verwendung der Mittelwerte nach Tabelle 2.4 oder dem erweiterten Ansatz einen größeren Wärmetransport. Für die Wärmeabgabe nach oben und an einer senkrechten Wand bei Windstille stimmen die Wärmetransporte gut überein. Bei Verwendung der gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten nach Tabelle 2.4 wird ein niedrigerer Wärmestrom berechnet. Den durchweg niedrigsten Wärmeaustausch zeigt der erweiterte Konvektionsansatz. Dies muss aber im Kontext gesehen werden mit dem gleichzeitig vorhandenen Wärmeaustausch durch Strahlung und der Gesamtenergiebilanz aller Wärmeströme. Bei geringerem Wärmeaustausch durch Konvektion erhöht sich die Oberflächentemperatur und damit die abgehende Wärmestrahlung - aber auch der Wärmeaustausch durch Konvektion, da $|T_{\text{Luft}} - T_{\text{Oberfläche}}|$ ebenfalls ansteigt.

Windgeschwindigkeit $v=2\text{m/s}$



Windstille:



Wärmeabgabe nach oben

Wärmeabgabe nach unten

Wärmeabgabe an einer senkrechten Wand

Abbildung 2.3 Gegenüberstellung der Ansätze zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs: Wärmestromdichte bei 20°C Lufttemperatur und 2 m/s Überströmgeschwindigkeit bzw. Windstille

2.4.3 Wärmestrahlung

Allgemeines

Neben dem Wärmeübergang durch Konvektion findet an den Bauwerksoberflächen ein Wärmeaustausch durch Strahlung statt. Diese Form des Wärmeübergangs hängt nur von der stofflichen Beschaffenheit und der Temperatur des strahlenden Körpers ab und ist nicht an einen materiellen Träger gebunden. Die elektromagnetische Strahlung stellt für den Wärmehaushalt der Brückenbauwerke den zweiten bedeutenden Anteil dar. Ihre zutreffende Beschreibung ist damit elementar für die numerische Simulation nichtlinearer instationärer Temperaturfelder.

Von der Umgebung des Bauwerkes und der Sonne ausgehende Wärmestrahlung wird von den Bauwerksoberflächen teils reflektiert teils absorbiert. Absorbierte Strahlung wird in Wärme umgewandelt und durch Wärmeleitung im Querschnitt weitergeleitet. In gleicher Weise strahlt das Bauwerk Wärme ab, die entweder wieder auf Bauwerksflächen trifft oder aber in die Umgebung abstrahlt.

Wärmestrahlung umfasst stets einen weiten Wellenlängenbereich. Die Intensität der Strahlung verteilt sich jedoch nicht über alle Wellenlängen gleichmäßig. Durch das Plancksche Strahlungsgesetz wird die Intensität der so genannten schwarzen Strahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge und Temperatur angegeben.

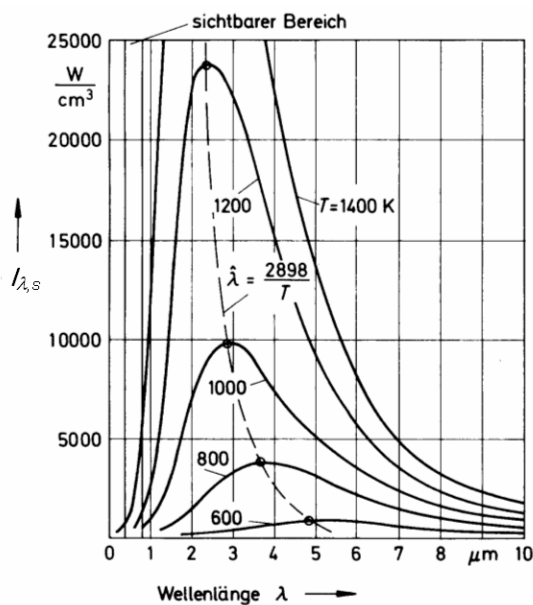


Abbildung 2.4
Energieverteilung der schwarzen Strahlung in Abhängigkeit der Temperatur und der Wellenlänge, [42]

Wie aus Abbildung 2.4 zu erkennen ist, steigt die Intensität vom Wert Null bei sehr kleinen Wellenlängen steil an bis zu einem temperaturabhängigen Maximum und fällt danach bei größeren Wellenlängen langsam wieder ab. Das Intensitätsmaximum wird durch das Wiensche Verschiebungsgesetz beschrieben und ist in Abbildung 2.4 durch die gestrichelte Linie graphisch wiedergegeben. Bei der einwirkenden Sonnenstrahlung liegt das Energiemaximum bei Wellenlängen von 0,48 μm , was einer Strahlungstemperatur von ca. 6000K entspricht. Dagegen liegt das Intensitätsmaximum für Oberflächen mit Temperaturen unter 100°C im Bereich $>7,8 \mu\text{m}$.

Das Vermögen eines Körpers elektromagnetische Strahlung einer Wellenlänge λ zu absorbieren, wird durch das Absorptionsverhältnis α_λ beschrieben. Dieses ist Eins, wenn sämtliche Strahlung aufgenommen und Null wenn sämtliche Strahlung reflektiert und/oder durchgelassen wird. Ein schwarzer Körper absorbiert alle auftreffenden Strahlen, gleich welcher Wellenlänge und gibt umgekehrt bei gegebener Temperatur ein Höchstmaß an Wärmestrahlung ab. Eine Oberfläche, die von allen Wellenlängen ein gleiches Absorptionsverhältnis α_λ hat, wird als grauer Strahler bezeichnet. Farbige Körper bevorzugen selektiv bestimmte Wellenlängenbereiche.

Nach dem Kirchhoffschen Gesetz emittiert eine Oberfläche bei gegebener Temperatur und Wellenlänge genauso viel Strahlung wie sie absorbiert und es gilt $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$. Die von einem Körper ausgehende Gesamtenergie E ist das Integral der spektralen Strahlungsintensität $I_{\lambda,T}$ über den gesamten Wellenlängenbereich λ .

$$E_T = \int_{\lambda=0}^{\infty} \varepsilon_\lambda \cdot I_{\lambda,T} d\lambda \quad (2.28)$$

Das Integral der Gleichung (2.28) führt für den schwarzen Strahler mit $\varepsilon_\lambda = 1$ zum Stefan-Boltzmann-Gesetz, wonach die Strahlungsenergie des schwarzen Körpers $E_{S,T}$ aus dem Produkt der Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^2\text{]}$ und der vierten Potenz der Kelvin-Temperatur T des strahlenden Körpers errechnet wird. Neben der Boltzmann-Konstante wird auch die Strahlungszahl des schwarzen Körpers $C_S = 5,67 \text{ [W/m}^2\text{K}^2\text{]}$ verwendet (Gleichung (2.29)).

$$E_{S,T} = \sigma_S \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 = 5,67 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = C_S \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (2.29)$$

Bei grauen Strahlern wird die Strahlungsenergie $E_{S,T}$ durch das Emissionsverhältnis ε abgemindert. Für farbige Strahler wird in der Regel das spektrale Emissionsverhältnis über einen begrenzten Wellenlängenbereich - und damit Temperaturbereich - durch einen Mittelwert ε_T zusammenfasst.

$$E_T = \varepsilon_T \cdot \sigma_S \cdot T^4 \quad (2.30)$$

Wie in anderen thermophysikalischen Aufgabengebieten wird auch bei der Berechnung klimatisch bedingter Temperaturfelder zwischen langwelligem und kurzwelligem Absorption- bzw. Emissionsverhältnissen unterschieden. Die von der Sonne ausgehende Strahlung ist kurzwellig, und von den deutlich unterhalb 100°C temperierten Bauwerksoberflächen geht eine langwellige Wärmeausstrahlung aus ([26],[46],[58],[124]).

Emissionskoeffizienten für technische Oberflächen

Für die wichtigsten relevanten Oberflächen sind in Tabelle 2.6 die Absorptions- bzw. Emissionsverhältnisse aufgeführt.

Baustoff		langwellige Strahlung	kurzwellige Strahlung
		ϵ_L	ϵ_K
Schwarzer Körper		1,00	1,00
Aluminium	roh	0,07 .. 0,09	0,30 .. 0,35
	poliert	0,29	0,20 .. 0,25
Stahl	roh mit Walz- oder Gusshaut	0,76 .. 0,83	
	frisch abgeschmirgelt	0,25 .. 0,46	0,37 .. 0,60
	angerostet	0,61	0,65 .. 0,80
	ganz rot verrostet	0,71 .. 0,85	0,80 .. 0,90
	weiß angestrichen	0,90 .. 0,95	0,12 .. 0,16
	verzinkt	0,23 .. 0,28	0,92
Beton	ungefärbt	0,88 .. 0,95	0,65
	weiß gestrichen		0,35
	stark verschmutzt		0,50 .. 0,90
Asphalt	normal	0,88	0,88 .. 0,95
	mit hellem Kies durchsetzt	0,60	

Tabelle 2.6 Absorptions- bzw. Emissionsverhältnisse verschiedener bautechnischer Oberflächen für kurzwellige und langwellige Wärmestrahlung, [26], [42], [58], [90]

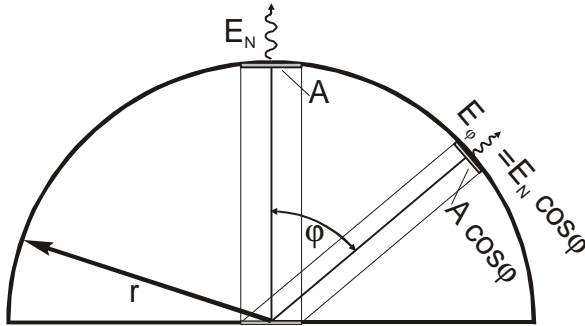
Hauptfaktor der Bauwerkserwärmung ist der solare Energieeintrag. Bei hellen, stärker reflektierenden Oberflächen findet infolge Sonnenstrahlung eine deutlich geringere Aufheizung statt. So absorbiert eine saubere waagerechte Betonoberfläche im Zeitraum der Sommersonnenwende (Sonnendeklination $\delta=23,5^\circ$) in der Mittagszeit etwa genauso viel Strahlungsenergie wie eine stark verschmutzte Betonoberfläche zur gleichen Tageszeit Ende März oder Mitte September.

Langwellige Strahlung wird durch die Bauwerkoberflächen sowohl absorbiert als auch emittiert. Ein hoher langwelliger Emissionsbeiwert wirkt einer starken Erhitzung entgegen, da viel Wärmeenergie abgestrahlt werden kann. Das Gegenteil kann bei verzinkten Oberflächen beobachtet werden, die aufgrund ihres sehr niedrigen langwelligen Emissionskoeffizienten unter Sonnenbestrahlung sehr heiß werden. Die nächtliche Auskühlung fällt für diese Flächen aber wegen der reduzierten (langwelligen) Wärmeabstrahlung in die Atmosphäre auch geringer aus und gleicht sich näher der Lufttemperatur an.

Lambertsches Kosinusetz und Strahlungsbilanz zwischen zwei Flächenelementen

Für die Bestimmung der thermischen Randbedingungen ist für jeden Oberflächenbereich des Bauwerkes eine Strahlungsbilanz aus dem Strahlungsein- und austrag zu ermitteln. Grundsätzlich hierfür ist die Beschreibung des Strahlungsaustauschs zwischen zwei Flächenelementen.

Die Gesamtemission der Wärmestrahlung einer Oberfläche verteilt sich auf alle Raumrichtungen. Nach dem Lambertschen Kosinusetz nimmt die Emission E_φ mit dem Kosinus der Winkelabweichung φ von der Flächennormalen ab (Gleichung (2.31)). Die Gesamtenergie – das Integral über alle Richtungen der Wärmestrahlung – führt zur Bestimmungsgleichung (2.32) der Normalstrahlung, wonach die Normalstrahlung E_N das $1/\pi$ -fache der Gesamtstrahlung $E_{S,T}$ ist.

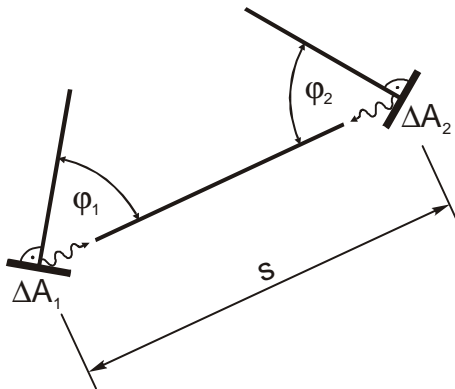


$$E_\varphi = E_N \cdot \cos \varphi \quad (2.31)$$

$$E_{S,T} = \frac{1}{r^2} \int_{\beta=0}^{2\pi} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} E_\varphi \cdot r^2 \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot d\beta = \pi \cdot E_N \quad (2.32)$$

Abbildung 2.5 Lambertsches Kosinusetz

Mit dem Lambertschen Kosinusetz und Gleichung (2.29) wird der Strahlungsaustausch zwischen zwei beliebig zugeordneten Flächenelementen ΔA_1 und ΔA_2 berechenbar. Die übertragene Wärme \dot{q} ist danach die Differenz aus der Wärmestrahlung des Flächenelementes ΔA_1 in Richtung des Flächenelementes ΔA_2 und der von ΔA_1 absorbierten Strahlung des Flächenelementes ΔA_2 . Die Herleitung der Gleichung (2.33) nach [42] geht davon aus, dass nicht absorbierte Strahlung diffus reflektiert und nicht wieder auf A_1 zurückgestrahlt. Die Wärmestromdichte von der Fläche ΔA_1 auf die Fläche ΔA_2 ergibt sich dann zu:



$$\dot{q}_{1,2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varphi_{1,2} \cdot C_S \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \quad (2.33)$$

Abbildung 2.6 Geometrie zweier beliebig zueinander angeordneter Flächenelemente ΔA_1 und ΔA_2

Die geometrischen Verhältnisse des gegenseitigen Strahlungsaustauschs werden in Gleichung (2.33) durch die Einstrahlzahl φ erfasst. Mit dem Kosinusetz berechnet sich die Einstrahlzahl nach Gleichung (2.34).

$$\varphi_{1,2} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{s^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2 \quad \text{und es gilt: } \varphi_{2,1} = \varphi_{1,2} \cdot \frac{A_1}{A_2} \quad (2.34)$$

Die Energieabgabe für das Flächenelement ΔA_1 in Richtung ΔA_2 ist jedoch nicht nur die von ΔA_1 an ΔA_2 übertragene Strahlung nach Gleichung (2.33). Es muss in der Strahlungsbilanzierung auch der Teil berücksichtigt werden, der nicht von ΔA_2 absorbiert wird. Dieser Anteil wird von ΔA_2 entweder (diffus) reflektiert oder transmittiert. Nur ein geringer Teil der reflektierten Strahlung wird auf ΔA_1 zurückgestrahlt.

Wird der nicht absorbierte Strahlungsanteil vollständig von der Fläche ΔA_2 durchgelassen, so modifiziert sich die Energiebilanz entsprechend Gleichung (2.35). Wird eine vollständige diffuse Reflexion der Strahlung an der Fläche ΔA_2 unterstellt und der auf ΔA_1 zurücktreffende Anteil in die Energiebilanz einbezogen, stellt sich die Energiebilanz für das Flächenelement ΔA_1 entsprechend Gleichung (2.36) dar. Aus dem ergänzten Summanden der Rückreflexion „ $\varepsilon_1^2 \dots$ “ ist zu entnehmen, dass der rückreflektierte Strahlungsanteil durch die Quadrierung des Emissionskoeffizienten ε_1 und der Einstrahlzahl $\varphi_{1,2}$ von höherer Ordnung klein ist und somit nur bei sehr großem ε_1 und $\varphi_{1,2}$ sowie kleinem ε_2 von Bedeutung ist. Er kann demnach vernachlässigt werden. Die Strahlungsbilanz der Wärmeabstrahlung des Flächenelementes ΔA_1 in Richtung ΔA_2 ist folglich mit Gleichung (2.35) gegeben.

$$q_{1,2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varphi_{1,2} \cdot C_s \cdot \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \varepsilon_1 \cdot \varphi_{1,2} \cdot C_s \cdot \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \quad (2.35)$$

(Strahlungsbilanz des Flächenelementes A_1 bei Transmission der nicht von A_2 absorbierten Strahlung)

$$q_{1,2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varphi_{1,2} \cdot C_s \cdot \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \varepsilon_1 \cdot \varphi_{1,2} \cdot C_s \cdot \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 + \varepsilon_1^2 \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot \varphi_{1,2}^2 \cdot C_s \cdot \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \quad (2.36)$$

(Strahlungsbilanz des Flächenelementes A_1 bei Reflexion der nicht von A_2 absorbierten Strahlung)

Einstrahlzahl φ

Die zur Beschreibung des Strahlungsaustauschs erforderliche Einstrahlzahl wird durch Integration ermittelt (Gleichung (2.34)). Eine graphische Veranschaulichung findet sich in Abbildung 2.7: Die Fläche A_2 erscheint aus Sicht des Flächenelementes ΔA_1 in einem Raumwinkel, welcher eine über ΔA_1 aufgespannte Halbkugel schneidet. Die lotrechte Projektion dieses Schnittes auf die Grundebene von ΔA_1 umrandet die in Abbildung 2.7 schraffiert dargestellten Fläche. Der Quotient aus dem Flächeninhalt dieser Fläche und der Grundfläche des durch die Halbkugel überdeckten Bereiches entspricht der Einstrahlzahl $\varphi_{1,2}$.

Für verschiedene geometrische Verhältnisse existieren aufbereitete Lösungen für die Einstrahlzahl [116], die allerdings für die gegebene Aufgabenstellung nur eingeschränkt verwendbar sind. Bei der Berechnung der Strahlungs-Energiebilanz eines Oberflächenelementes für ein als prismatisch angenommenes Brückenbauwerk sind überwiegend die Strahlungsverhältnisse des Elementes ΔA_1 gegen über längsachsparellen Streifen zu berücksichtigen (Abbildung 2.8). Eine Lösung für diese Grundsituation wird nachfolgend aufgezeigt.

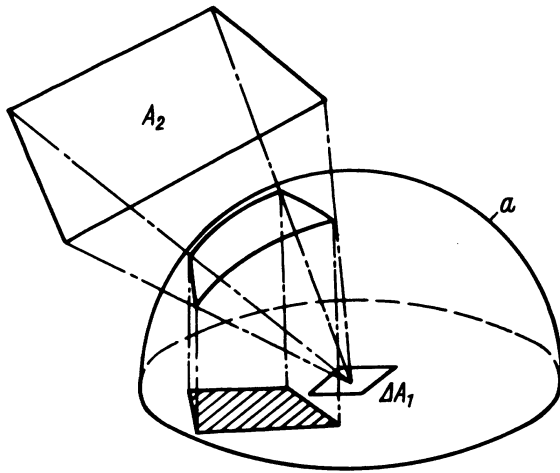


Abbildung 2.7
Graphische Veranschaulichung der Einstrahlzahl $\varphi_{1,2}$ durch das Verhältnis der schraffierten Fläche zum Flächeninhalt der gesamten Kreisfläche, [42]

Ausgehend von der Herleitung einer Grundlösung für einen Streifen ΔA_2 der Höhe h , der im Abstand a_N auf der Grundebene des Flächenelementes ΔA_1 angeordnet ist, kann die Einstrahlzahl für jeden beliebigen streifenförmigen Flächenanteil bestimmt werden.

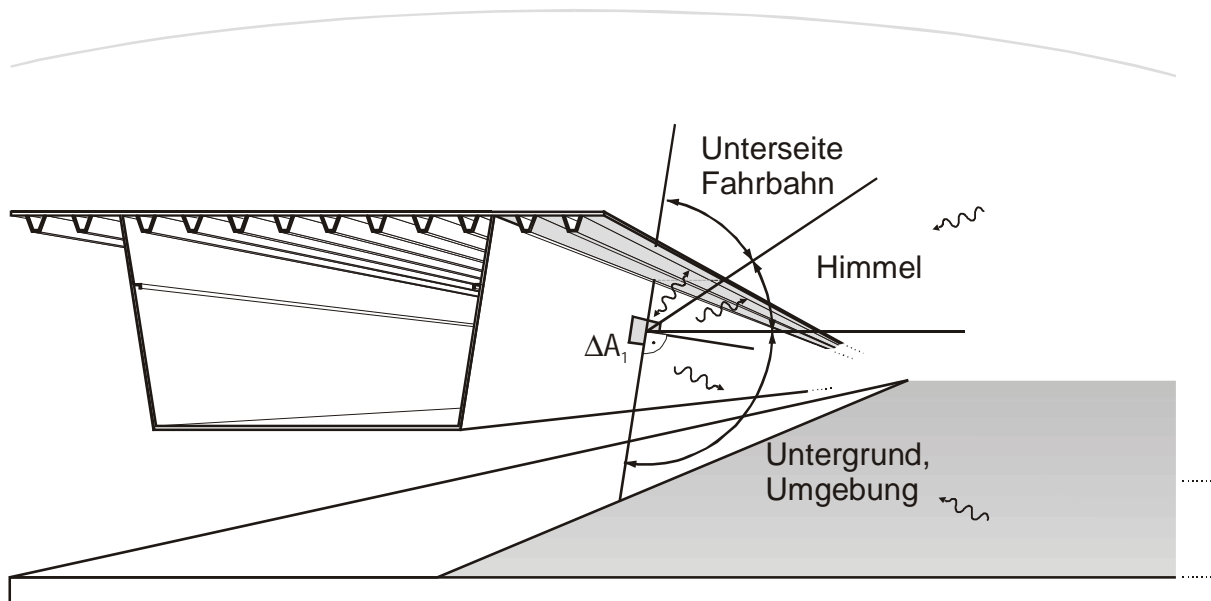


Abbildung 2.8 Strahlungsaustausch eines Flächenelementes mit streifenförmigen diffus strahlenden Flächenbereichen: dem Untergrund, der himmelsseitigen Diffusstrahlung und der vom Bauwerk ausgehenden Wärmestrahlung

Um das Flächenelement ΔA_1 wird eine Halbkugel mit dem Radius $r = a_N$ gespannt. Durch den Streifenabstand a_N und die Streifenhöhe h bestimmt sich der Winkel γ_w :

$$\gamma_w = \operatorname{atan}\left(\frac{h}{a_N}\right) \quad (2.37)$$

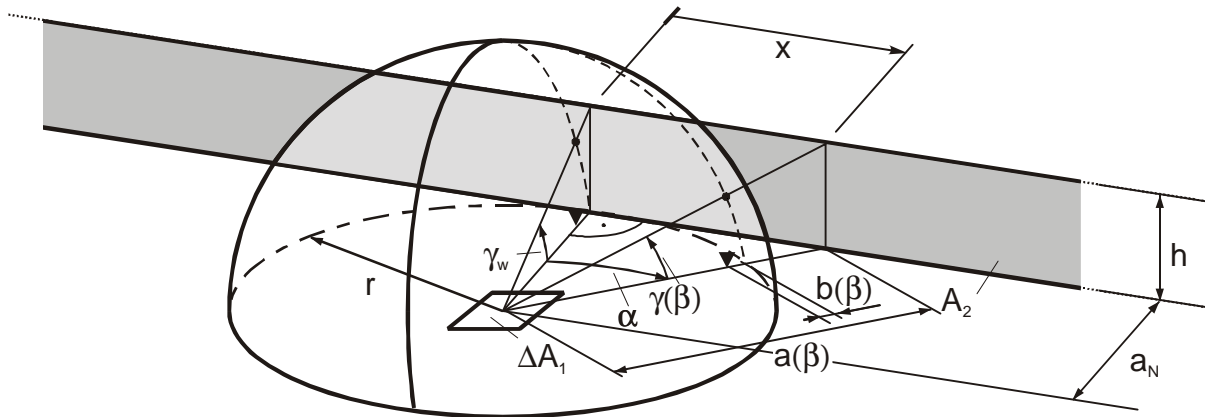


Abbildung 2.9 Geometrie für die Berechnung der Einstrahlzahl $\varphi_{1,2}$ des Strahlungsaustauschs eines Flächenelementes ΔA_1 mit einer streifenförmigen, unendlich ausgedehnten Fläche ΔA_2

Jeder Punkt auf der Oberkante des Streifens A_2 kann durch die Koordinate x lokalisiert werden. Eine Verbindungsgerade zwischen dem Mittelpunkt der Fläche ΔA_1 und einen Kantenpunkt der Koordinate x weicht in der Grundebene um den Winkel β von der Flächennormalen von A_2 ab.

$$\beta = \arctan \left(\frac{x}{a_N} \right)$$

(2.38)

Die Neigung dieser Verbindungsgeraden ist somit

$$\gamma(\beta) = \arctan \left(\frac{h}{a(\beta)} \right) \text{ mit} \quad (2.39)$$

$$a(\beta) = \frac{a_N}{\cos \beta} \quad (2.40)$$

Sie durchstößt die aufgespannte Halbkugel in einem Punkt, dessen senkrechte Projektion auf die Grundebene den Abstand $r - b(\beta)$ zum Mittelpunkt der Fläche ΔA_1 hat.

$$b(\beta) = r \cdot [1 - \cos(\gamma(\beta))] \quad (2.41)$$

Damit ist in Analogie zu Abbildung 2.7 die auf die Grundfläche projizierte Fläche A_φ zu:

$$A_\varphi = \int_{\beta=\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} dA_\varphi(\beta) \text{ mit } dA_\varphi(\beta) = \left[(\pi r^2) \right] \cdot \frac{d\beta}{2\pi} - \left[\pi \cdot (r - b(\beta))^2 \right] \cdot \frac{d\beta}{2\pi} \quad (2.42)$$

Die Gesamtfläche A_φ , die sich bei Überstreichen des gesamten Streifens A_2 ergibt (Gleichung (2.42)) liefert in Verbindung mit der Grundfläche des überspannten Kreises die Einstrahlzahl $\varphi_{1,2}$. Nach Auflösung des Integrals und Umformung erhält man die folgende einfache Beziehung (2.43).

$$\begin{aligned} \varphi(\gamma_w) &= \frac{A_\varphi}{A_O} = \frac{A_\varphi}{\pi \cdot r^2} = 1 - \frac{1}{2} \cdot [1 + \cos(\gamma(\beta = 0))] \\ &= 1 - \frac{1}{2} \cdot [1 + \cos(\gamma_w)] \quad \text{für } \gamma_w \in 0 \dots \pi \end{aligned} \quad (2.43)$$

Die Einstrahlzahl für die nicht vom Streifen A_2 verdeckte Fläche ergibt sich zu $1 - \varphi(\gamma_w)$, womit die Beziehung (2.43) auf beliebig angeordnete Streifen durch Subtraktion angewendet werden kann. In Abbildung 2.10 ist für ein Flächenelement des Stegbereiches einer Hohlkastenbrücke der Zusammenhang entsprechend wiedergegeben.

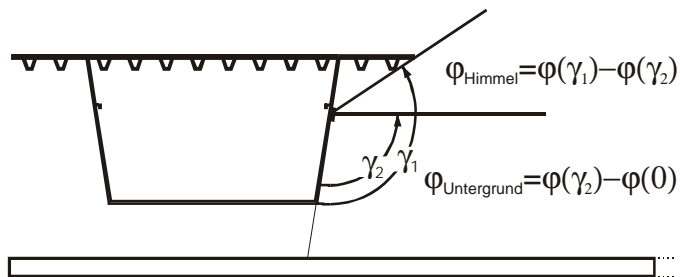


Abbildung 2.10
Einstrahlzahlbestimmung für ein
Stegflächenelement

Durch Auswertung der Einstrahlzahlen für alle Oberflächenpunkte eines prismatischen Brückenquerschnittes erhält man einen Verlauf für den Strahlungsaustausch mit den diffusen Strahlungsanteilen aus Richtung des Himmelshalbraumes und des Untergrundes. Am Beispiel eines Verbundbrückenquerschnittes wird dieser Verlauf graphisch veranschaulicht (Abbildung 2.11). Für alle Flächen, in deren Blickfeld sich Teile des Brückenquerschnitts befinden, zeigt sich ein Verlauf, der für senkrechte Flächen asymptotisch gegen 0,5 geht, und für waagerechte Flächen gegen 1,0 geht.

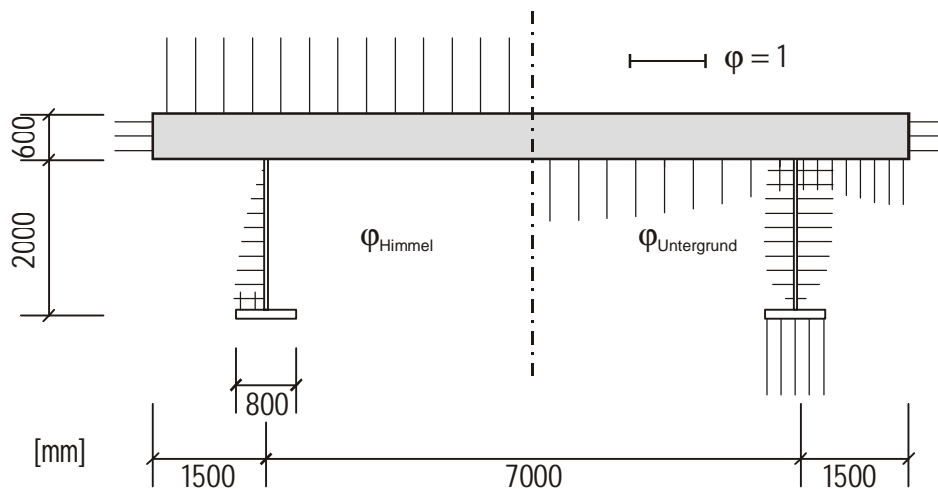


Abbildung 2.11 Verteilung der Einstrahlzahlen für den Strahlungsaustausch mit dem Untergrund und mit dem Himmelshalbraum

In dem verwendeten EDV-Programm [58] ist von einem vereinfachten Ansatz konstanter Einstrahlzahlen ausgegangen worden. Mit der hergeleitete Beziehung (2.43) können die Einstrahlverhältnisse an den Bauwerksoberflächen wirklichkeitsnaher berücksichtigt werden.

2.4.4 Bildung der ideellen Oberflächentemperatur

Der Gesamtwärmestrom an den Bauwerksoberflächen lässt sich summarisch durch die vorgeannten Teilwärmeströme aus Konvektion sowie Strahlung zusammenfassen und wird in jedem Zeitschritt der Temperaturfeldsimulation als thermische Randbedingung benötigt. Für die Temperaturfeldberechnung gemäß dem in Abschnitt 2.2 dargelegten Zeitschrittverfahren werden die thermische Randbedingung durch die Wärmestromdichte an den Bauwerksoberflächen vorgegeben. Wird der konvektive Wärmestrom und der Strahlungswärmestrom zusammengefasst, so ergibt sich die resultierende Wärmestromdichte \dot{q}_O an einem Oberflächenelement:

$$q_O = q_{Konvektion} + q_{Strahlung} \quad (2.44)$$

Wandelt man die Umgebungslufttemperatur ϑ_L in die Strahlungslufttemperatur ϑ_{id} um, so kann der gesamte Wärmestrom numerisch als Konvektionswärmeaustausch behandelt werden:

$$\text{Aus } q_O = \alpha_K \cdot (\vartheta_{id} - \vartheta_O) \quad \text{folgt } \vartheta_{id} = \vartheta_L + \frac{q_{Strahlung}}{\alpha_K} \quad (2.45)$$

Diese in [58] gewählte Zusammenfassung kann durch Einführung eines fiktiven *konstanten* Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{K,E}$ numerisch vorteilhaft erweitert werden, damit die Wärmeleitfähigkeitsmatrix [L] nach Gleichung (2.14) und die Randbedingungsmatrix [R] nach Gleichung (2.15) nicht mehr von einem zeitlich veränderlichen Wärmeübergangskoeffizient α_K abhängig. Bei sonst gleichbleibenden Materialeigenschaften müssen diese Systemmatrizen nicht bei jedem Berechnungsschritt neu aufgebaut werden.

Aus $q_O = \alpha_{K,E} \cdot (\vartheta_{id} - \vartheta_O)$ folgt die ideelle Umgebungslufttemperatur:

$$\vartheta_{id} = \frac{1}{\alpha_{K,E}} \cdot q_O + \vartheta_O = \frac{1}{\alpha_{K,E}} \cdot (\alpha_K \cdot (\vartheta_L - \vartheta_O) + q_{Strahlung}) + \vartheta_O \quad (2.46)$$

Für das Gesamtsystem ergibt sich der in Gleichung (2.20) einzusetzende Vektor der ideellen Umgebungslufttemperatur $\{\vartheta_{id}\}$ zu:

$$\{\vartheta_{id}\} = \frac{1}{\alpha_{K,E}} \cdot \left(([E] \cdot \{\alpha_K\}) \cdot (\{\vartheta_L\} - \{\vartheta_O\}) + \{q_{Strahlung}\} \right) + \{\vartheta_O\} \quad (2.47)$$

Für alle Elemente, die sich nicht an der Querschnittsoberfläche befinden, findet kein äußerer Wärmeaustausch statt und es gilt $\vartheta_{id}=0$.

2.4.5 Berechnung der Lufttemperatur in geschlossenen Kastenträgern

Im Inneren von ein- oder mehrzelligen Kastenträgern stellt sich eine Lufttemperatur ein, die von der Außenlufttemperatur abweicht. Der konvektive Wärmeübergang findet daher mit der Luft im Kasteninneren statt, welche selbst durch die umhüllenden Oberflächen temperiert wird. Ihr Erwärmungszustand wird durch den konvektiven Wärmeübergang mit den umgrenzenden Hohlkastenflächen geprägt. Ist der betreffende Hohlkasten nicht vollständig geschlossen, so findet neben dem Wärmeaustausch zwischen Bauwerksoberfläche und Luft auch noch ein Austausch mit der Außenluft statt.

In [26] wird ein Berechnungsmodell zur Berechnung der Lufttemperatur in Hohlkästen vorgestellt, darin wird im Hohlkasten von einer ausgeglichenen Lufttemperatur ausgegangen. Weiterhin wird angenommen, dass die Strömungsgeschwindigkeit der Luft gegen Null geht. Damit findet ein konvektiver Wärmeübergang mit den Wärmeübergangskoeffizienten nach den Gleichungen (2.23)c bis f statt.

Der gesamte Wärmestrom Q_L zwischen den Oberflächen und der im Hohlkasten des Brückenquerschnittes zirkulierenden Luft ergibt sich aus der Summe der einzelnen Wärmeströme an allen Teilflächen und wird durch den jeweiligen Temperaturunterschied zwischen Wandoberflächentemperatur und Luft bestimmt. Dabei sind für das Zeitintervall Δt die mittleren Oberflächentemperaturverhältnisse $\bar{\vartheta}_o$ im Hohlkasten anzunehmen.

$$Q_L = \int_A \alpha_K \cdot (\bar{\vartheta}_o - \vartheta_{Innenluft}) \cdot dA \quad (2.48)$$

Die Rohdichte der Luft ist abhängig von Luftdruck und Lufttemperatur. Bei Luftdrücken von 970 bis 1040hPa und Temperaturen zwischen -30 und 40°C schwankt diese im Bereich $1,49$ bis $1,08 \text{ kg/m}^3$. Für mittlere Verhältnisse wird kann mit einem Wert von $\rho_L = 1,25 \text{ kg/m}^3$ gerechnet werden [26]. Die spezifische Wärmekapazität der Luft beträgt nach [54] $c_L=1009 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$. Damit ändert sich die Temperatur der eingeschlossenen Luftmasse in einem Zeitintervall Δt um $\Delta\vartheta_{Innenluft}$:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{Innenluft} &= \frac{\Delta t}{\rho_L \cdot (c_L \cdot V_L)} \cdot Q_L \text{ und damit} \\ \Delta\vartheta_{Innenluft}(t) &= \frac{\Delta t}{\rho_L \cdot (c_L \cdot V_L)} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\alpha_{frei,i} \cdot l_i \cdot \left(\frac{\vartheta_{O,i}(t) + \vartheta_{O,i}(t + \Delta t)}{2} - \vartheta_{Innenluft}(t) \right) \right) \end{aligned} \quad (2.49)$$

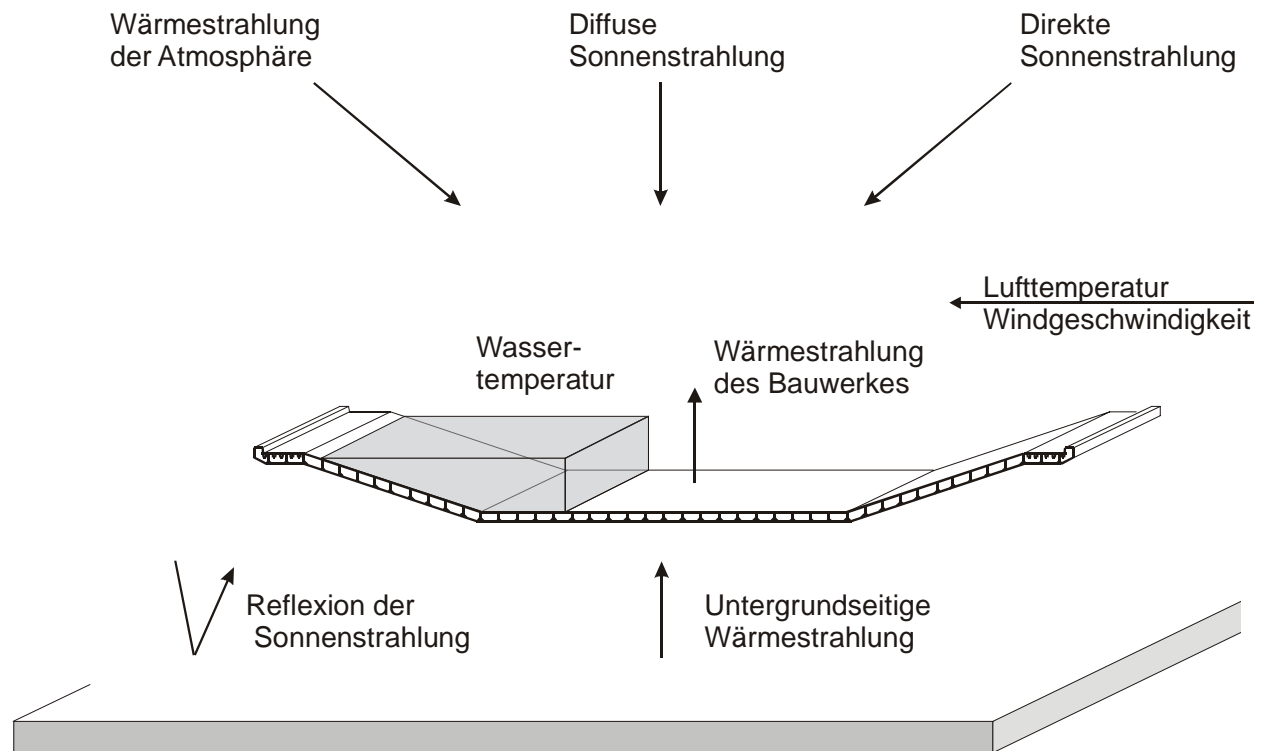
Aufgrund der Reduktion der Temperaturfeldaufgabe auf ein zweidimensionales Problem ist das Luftvolumen V_L faktisch durch den Querschnittsflächeninhalt des Hohlkastens $A_L \cdot 1$ gegeben. Aus Gleichung (2.49) ergibt sich schließlich die Innenlufttemperatur zum Zeitpunkt $t+\Delta t$:

$$\vartheta_{Innenluft}(t + \Delta t) = \vartheta_{Innenluft}(t) + \Delta\vartheta_{Innenluft}(t) \quad (2.50)$$

Die Richtigkeit dieses Ansatzes wurde in [26] durch Nachrechnung bestätigt.

2.5 Klimatische Temperatureinwirkungen auf Bauwerke

Für die statistische Analyse der Bauwerksreaktionen infolge klimatischer Temperatureinwirkungen liegt es nahe, der Simulation von Temperaturfeldern gemessene Klimadaten zugrunde zu legen. Diese schließen die stochastischen Eigenschaften des Wettergeschehens ein. Stehen keine Messdaten für eine Einwirkungskomponente zu Verfügung, müssen idealisierte Einwirkungsgrößen herangezogen werden.



Wärmeeintrag klimatischer Einwirkungen durch	
Strahlung	Wärmeübergang
<i>kurzwellige Strahlung</i>	<i>Konvektion</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Sonnenstrahlung <ul style="list-style-type: none"> ○ direkte Sonnenstrahlung ○ diffuse Sonnenstrahlung ○ reflektierte Sonnenstrahlung am Untergrund 	<ul style="list-style-type: none"> • Lufttemperatur • Wasser
<i>langwellige Strahlung</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Wärmestrahlung der Atmosphäre / Himmelsstrahlung • Wärmestrahlung des Untergrundes / der Umgebung • Wärmestrahlung der Bauwerksoberflächen 	

Abbildung 2.12 Meteorologische Randbedingungen eines Außenbauwerkes, nach [58]

Deren Eingangsparameter sind in der Regel selbst Mittel- oder Fraktilewerte oder direkt an Messdaten gekoppelt. Beispielsweise liegen für die Bodentemperatur oft keine Langzeitmessdaten vor. In diesem Fall bleibt nur eine Kopplung an die Lufttemperatur übrig, da diese durch Konvektion an der Bodenoberfläche erwärmt wird und folglich mit der Bodentemperatur korreliert.

Jede Einwirkungsgröße, wie die Lufttemperatur oder die Sonnenstrahlung, weist eigenständige Verläufe auf. Die dadurch beaufschlagten Brückenbauwerke filtern diese Einwirkungen, je nach thermischer Einbindung in die Umgebung und Querschnittskonstitution – vergleichbar der Filterung bei baulastdynamischen Belastungen. Die klimatischen Temperatureinwirkungen beeinflussen den Wärmehaushalt der Brückenstruktur über die im vorangegangenen Kapitel aufgezeigten Formen des Wärmeaustauschs Konvektion und Wärmestrahlung.

Abbildung 2.12 stellt alle permanent vorhandenen klimatischen Temperatureinwirkungen zusammen [26], [46], [58], [123]. Die Sonnenstrahlung ist der energiereichste Anteil der klimatischen Temperatureinwirkungen. Sie wirkt auf die Bauwerke sowohl auf direktem Wege als auch über die reflektierte Strahlung seitens des terrestrischen Untergrundes. Von den atmosphärischen Bestandteilen, der Bauwerksumgebung und dem Bauwerk selbst geht ebenfalls eine Wärmestrahlung aus, was in der Energiebilanzierung entsprechend zu berücksichtigen ist. Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit beeinflussen konvektiv die Temperatur des Bauwerks.

In die Temperaturfeldberechnung im Rahmen der vorliegenden Arbeit fließen aus der Literatur entnommene Modelle für idealisierte Einwirkungsgrößen meteorologischer Randbedingungen ein. Sie basieren z.T. auf physikalischen Zusammenhängen bzw. haben empirischen Charakter. Für den Ansatz der Wärmestrahlung der Atmosphäre konnten keine geeigneten Ansätze für die Anwendung in einer Simulation mit mehrjährigen Klimadaten gefunden werden. Durch die Auswertung vorliegender Messdaten wird jedoch gezeigt, dass eine Kopplung des Emissionsvermögens der Atmosphäre an die tägliche Lufttemperaturschwankung möglich ist.

Für die Berechnung von Temperaturfeldern mit gemessenen Klimadaten ist deren Aufbereitung erforderlich, die folgende Stufen umfasst: Überführung in ein einheitliches Datenformat und das Zeitsystem der mittleren Ortszeit, Ergänzung unabwendbar vorhandener Datenlücken durch geeignete deterministische Ansatzfunktionen, Resampling der i.d.R. stündlichen Messwerte in Zeitreihen mit Zeitschrittweiten zwischen 5 bis 20 Minuten. Weiterhin wurde unter Zugrundelegung des Berechnungsverfahrens aus [58] ein Algorithmus zur Verarbeitung dieser mehrjährigen Datenreihen für Temperaturfeldberechnungen aufbereitet.

2.5.1 Sonnenstrahlung

Wesentlicher Motor des Temperaturhaushalts der Erde ist die Solarenergie. Sie entspringt dem in der Sonne stattfindenden Kernfusionsprozess. Auf die Erde wirkt am äußeren Rand der Atmosphäre in ca. 200 km Höhe bei senkrechtem Einfallswinkel eine Strahlung der mittleren Intensität von 1356 W/m^2 [31]. Die Strahlungstemperatur der Sonne beträgt ca. 6000K. Die vor ihr ausgehende Strahlung ist damit gemäß der weiter oben getroffenen Unterscheidung kurzwelliger Charakter. Auf ihrem Weg durch die Atmosphäre wird die Strahlung teilweise in den Weltraum zurückreflektiert, teils absorbiert bzw. transmittiert.

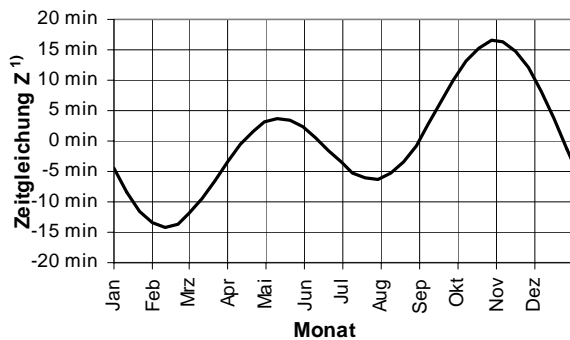
Auf die Bauwerksoberfläche trifft folglich Sonnenstrahlung mit reduzierter Intensität. Diese so genannte Globalstrahlung teilt sich in die auf die Erdoberfläche aus allen Richtungen einfallende Diffusstrahlung und ausgerichtete Direktstrahlung auf. Die Flächenleistung der Son-

nenstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche ist damit von der eintreffenden Strahlungsintensität, der Sonnenposition und der Flächenorientierung abhängig.

2.5.1.1 Sonnenzeit, Zonenzeit

Der Zeitbegriff der Sonnen- und Zonenzeit ist hinsichtlich der klimatischen Einwirkungen insoweit von Bedeutung, als dass die Berechnung der augenblicklichen Sonnenposition deterministisch von der wahren Ortszeit, auch Sonnenzeit genannt, abhängt. Indessen werden Uhrzeitangaben, und damit auch Klimadaten- und Temperaturmessungen, in der Regel in der mittleren Zonenzeit angegeben. Die Zusammenhänge der verschiedenen Zeitangaben sind bei der Aufbereitung bzw. dem Vergleich von Messdaten zu berücksichtigen.

Der Unterschied dieser Zeitsysteme besteht in ihrem Gültigkeitsbereich. Die mitteleuropäische Zeit MEZ bzw. Sommerzeit MESZ ist für die jeweilige Zeitzone einheitlich. Die Umrechnung in die wahre Ortszeit WOZ erfolgt über drei additive Anteile. Ersterer berücksichtigt den Unterschied zwischen der MEZ beim Längengrad $\lambda_{geo,0}=15^\circ$ und der auf den Standort bezogenen mittleren Ortszeit MOZ beim jeweiligen Längengrad λ_{geo} . Zum Zweiten muss ggf. der Stundenversatz infolge Sommerzeit beachtet werden.



Zeitgleichung z [h]:

$$Z = -0,1752 \cdot \sin(1,9154 \cdot d + 31,3637) - 0,1340 \cdot \sin(1,0447 \cdot d + 11,1097)$$

mit $d = 1 \dots 365$ (Ifd. Tag im Jahr)

(2.51)

1) Umrechnung von Z im Diagramm von [h] in [min]

Abbildung 2.13 Abweichung der wahren Ortszeit von der mittleren Ortszeit im Jahresgang

Sowohl als Folge der Exzentrizität der Erdbahn als auch der Schiefe der Ekliptik variiert zusätzlich der wahre Sonnentag im Jahresgang. Diese Schwankung wird durch die Zeitgleichung Z einkalkuliert. Sie drückt die Differenz zwischen wahrer und mittlerer Sonnenzeit aus und schwankt im Jahr zwischen +16,3 und -14,5 Minuten und ist in Abbildung 2.13 dargestellt. In der Literatur finden sich verschiedene Herleitungen von Zeitgleichungen unterschiedlicher Genauigkeit. Für die hier vorliegende Aufgabenstellung genügt eine einfachere Beziehung mit einer Abweichung von maximal einer Minute entsprechend Gleichung (2.51) [9], in der die Zeitfunktion Z aus dem laufenden Tag d im Jahr berechnet wird. So erhält man für die verschiedenen Zeitsysteme nachfolgende Beziehungen (2.52) zur Umrechnung der Tagesstunde t , mit deren Hilfe sich die orts- und jahreszeitabhängige Sonnenzeit ermitteln lässt.

$$\begin{aligned} t_{MEZ} &= t_{MESZ} - 1 \\ t_{MOZ} &= t_{MEZ} - (\lambda_{geo,0} - \lambda_{geo})/15 \quad \text{mit } \lambda_{geo,0} = 15^\circ \text{ für MEZ} \\ t_{WOZ} &= t_{MOZ} + z \end{aligned} \tag{2.52}$$

2.5.1.2 Sonnenposition

Die augenblickliche Sonnenposition ist zur Berechnung der Einwirkungsintensität unterschiedlich geneigter und orientierter Bauwerksoberflächen erforderlich. Sie ist stets im Zusammenhang mit dem örtlichen Standpunkt des Betrachters zu sehen. Die Position der Sonne gegenüber der Erde wird durch den Deklinationswinkel δ_s , den Azimutwinkel α_s , den Höhenwinkel γ_s sowie deren Abstand zur Erde beziehungsweise der ekliptikalen Länge φ_e beschrieben. Der sich im Jahreszyklus ändernde Abstand zwischen Sonne und Erde beeinflusst die extraterrestrische Strahlungsintensität auf die Außenhülle der Atmosphäre.

Sonnendeklinationswinkel, Sonnenhöhenwinkel und Azimutwinkel

Der Sonnendeklinationswinkel δ_s beschreibt denjenigen geographischen Breitengrad, in dem die Sonne am höchsten steht. Er resultiert aus der um ca. $23,45^\circ$ geneigten Erdachse und schwankt daher im Bereich $-23,45^\circ$ (Wintersonnenwende) bis $+23,45^\circ$ (Sommersonnenwende). Eine ausreichend genaue Bestimmungsgleichung in Abhängigkeit des d-ten Tages im Jahr gibt [58] mit Gleichung (2.53) an:

$$\delta_s = -23,5 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{(d + 284)}{365}\right) \quad (2.53)$$

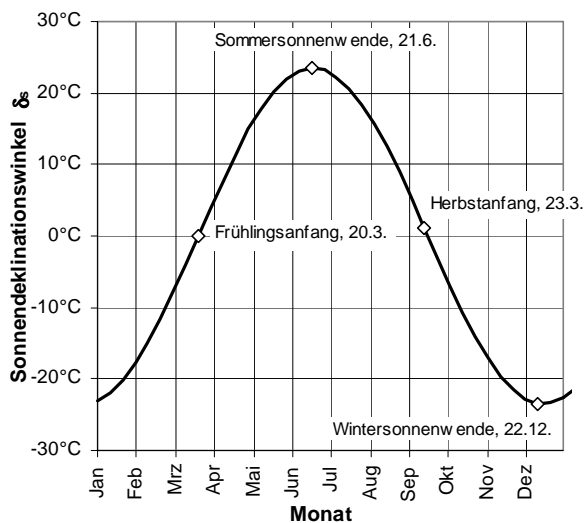


Abbildung 2.14
Jahresgang des Sonnendeklinationswinkels nach Gleichung (2.53)

Der Winkel, unter der die Sonne über dem Horizont steht, wird durch den Sonnenhöhenwinkel γ_s [deg] angegeben [58]. Er hängt neben der Tageszeit t_{WOZ} von der saisonalen Sonnendeklination sowie dem Breitengrad φ_{geo} des betrachteten Standortes ab:

$$\sin \gamma_s = \sin \delta_s \cdot \sin \varphi_{geo} + \cos \delta_s \cdot \cos \varphi_{geo} \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{t_{WOZ}}{24} - 180\right) \quad (2.54)$$

Der Sonnenazimutwinkel α_s bezeichnet die Winkelabweichung, die die Sonne gegenüber der Südrichtung hat. Er ist positiv, wenn die Sonne westlich der Südrichtung und negativ, wenn die Sonne östlich der Südrichtung steht. Diese Definition wird für den Azimutwinkel α_w einer Fläche übernommen; Bezugsgerade ist in diesem Fall die lotrechte Projektion der Flächennormalen auf die Erdoberfläche. Der Sonnenazimutwinkel α_s berechnet sich nach Glei-

chung (2.55). Die Abhängigkeit vom Breitengrad des Standortes geht indirekt über den Sonnenhöhenwinkel γ_s in die Gleichung ein.

$$\sin \alpha_s = \frac{\cos \delta_s}{\cos \gamma_s} \cdot \sin \left(360 \cdot \frac{t_{WOZ}}{24} - 180 \right) \quad (2.55)$$

In einigen Fällen ist eine graphische Ermittlung der Sonnenpositionsparameter α_s und γ_s hilfreich. Hierfür kann ein übliches ortsbezogenes wie in Abbildungen 2.17a dargestelltes Sonnenstandsdiagramm verwendet werden, in welchem über die Vorgabe eines konkreten Sonnendeklinationwinkels und Tageszeitpunktes die Positionsparameter abzulesen sind. Für eine graphische Ermittlung der Verschattungssituation wäre eine winkeltreue Ermittlung des Sonnenhöhenwinkels vorteilhaft. Hierfür kann ein Sonnenhöhenwinkeldiagramm aufgestellt werden, welches winkeltreu den Sonnenhöhenwinkel in Abhängig der Jahres- und Tageszeit wiedergibt. Mit dem in Abbildung 2.17b entwickelten Diagramm besteht auch die Möglichkeit, den Einfallswinkel β_s auf eine im Azimutwinkel α_w orientierte Fläche graphisch zu ermitteln.

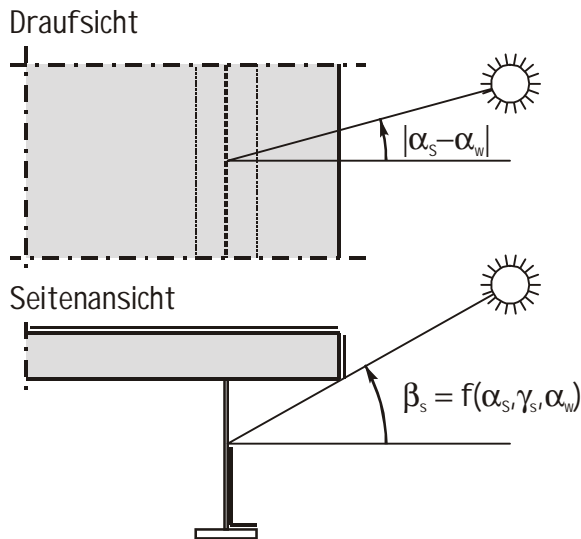


Abbildung 2.15
Definition des Einfallswinkels β_s in Abhängigkeit der bei $(\alpha_s; \gamma_s)$ positionierten Sonne auf eine α_w orientierte Fläche

2.5.2 Intensität der extraterrestrischen Sonnenstrahlung

Da die Erdbahn exzentrisch zur Sonne verläuft, schwankt die extraterrestrische Strahlung im Jahresgang. In der nördlichen Erdhemisphäre befindet sich die Erde im Winter relativ näher an der Sonne als im Sommer. Daher ist der Begriff der Solarkonstanten als fester Betrag genau genommen ein Mittelwert.

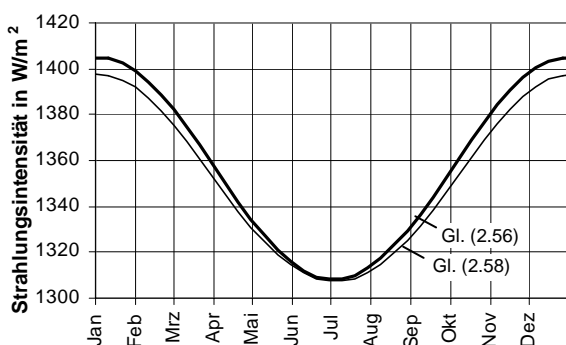


Abbildung 2.16
Jahresgang der extraterrestrischen Solarstrahlung I_0

Bestimmung des Sonnen-Azimetwinkels und Sonnen-Höhenwinkels zu verschiedenen Jahres- und Tageszeiten
(für den Ort 49,5° nördlicher Breite)

Sonnendeklinationwinkel:

Jahreszeit	Deklination
01. Jan.	-22,9°
01. Feb.	-17,2°
01. Mrz.	-7,9°
01. Apr.	4,4°
01. Mai.	15,2°
01. Jun.	22,2°
01. Jul.	23,0°
01. Aug.	17,7°
01. Sep.	7,3°
01. Okt.	-4,6°
01. Nov.	-15,7°
01. Dez.	-22,2°

Sonnenwende:

21. Jun.	23,5°
20. Dez.	-23,5°

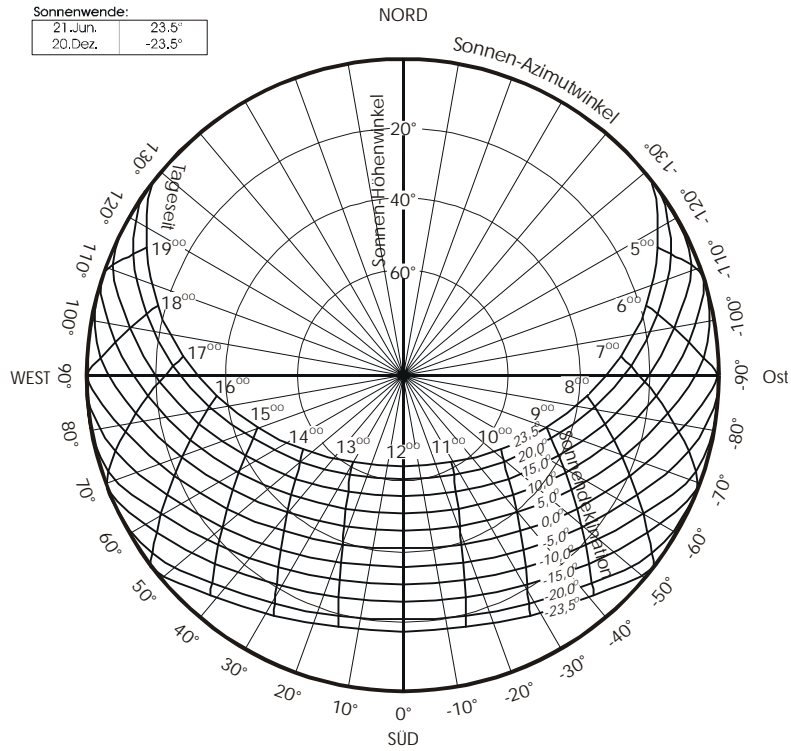


Abbildung 2.17a Sonnenstandsdiagramm

Bestimmung des Sonnen-Höhenwinkels zu verschiedenen Jahres- und Tageszeiten
(für den Ort 49,5° nördlicher Breite)

Sonnendeklinationwinkel:

Jahreszeit	Deklination
01. Jan.	-22,9°
01. Feb.	-17,2°
01. Mrz.	-7,9°
01. Apr.	4,4°
01. Mai.	15,2°
01. Jun.	22,2°
01. Jul.	23,0°
01. Aug.	17,7°
01. Sep.	7,3°
01. Okt.	-4,6°
01. Nov.	-15,7°
01. Dez.	-22,2°

Sonnenwende:

21. Jun.	23,5°
20. Dez.	-23,5°

Abweichung der Azimetwinkel $|\alpha_s - \alpha_w|$

90 80 70 60 50 40 30 20 0

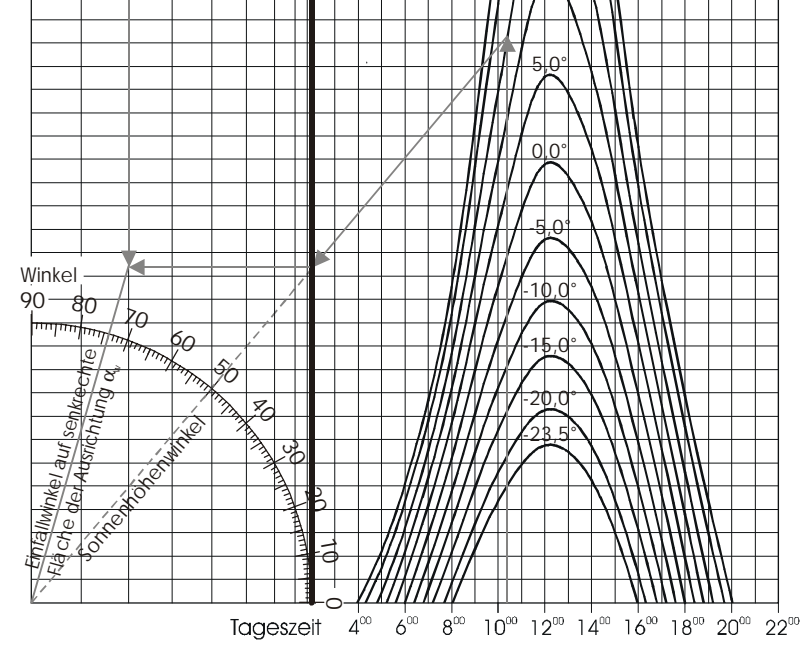


Abbildung 2.17b Sonnen-Höhenwinkel-Diagramm

[31] verwendet zur Bestimmung des Jahresgangs der extraterrestrischen Strahlung I_0 [W/m²] die Beziehung (2.56):

$$I_0 = 1356,5 + 48,5 \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{(d-2)}{365}\right) \quad (2.56)$$

In [26] und [41] wird ein Ansatz verwendet, der die jährliche Intensitätsschwankung unter Einbeziehung der ekliptikalen Länge berechnet. Diese Autoren legen eine Solarkonstante von 1352 W/m² zugrunde. In [9], [40] wird eine mittlere Solarkonstante von 1368 W/m² angegeben. Mit der ekliptikalen Länge φ_e

$$\varphi_e = 102,06 + 0,98629 \cdot (d - 2,8749) + 1,91368 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{(d - 2,8749)}{365}\right) \quad (2.57)$$

berechnet sich I_0 nach [41] zu:

$$I_0 = 1352,0 \cdot \left(1 - 0,0167 \cdot \cos(\varphi_e + 77,94) \cdot \frac{\pi}{180}\right)^2 \quad (2.58)$$

Wie die Gegenüberstellung in Abbildung 2.16 zeigt, weichen die Angaben für den Verlauf der extraterrestrischen Strahlungsintensität voneinander in Mittelwert und Amplitude voneinander ab. Ungünstigere Strahlungswerte werden mit Gleichung (2.56) erzielt und werden daher für die Bestimmung des idealisierten Intensitätsverlaufs der Sonnenstrahlung vorgezogen.

2.5.3 Globalstrahlung

Die auf der Erdoberfläche aus allen Himmelsrichtungen eintreffende Sonneneinstrahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet. Es handelt sich hierbei um die extraterrestrische Einstrahlung, die innerhalb der Atmosphäre durch die folgenden Prozesse reduziert wird [39]:

- **Streuung an Luftmolekülen, Rayleigh-Streuung**
Streuung an Molekülen, die viel kleiner sind als die Wellenlänge der eintreffenden Strahlung
- **Streuung und Absorption durch Aerosole; Mie-Streuung**
Unter Aerosolen versteht man feste Schwebeteilchen wie Staub, Luftverschmutzung und Meersalz in der Größenordnung 10^{-3} μm bis 10^2 μm . Im Gegensatz zur Rayleigh-Streuung sind die Radien der Aerosole größer als die Wellenlänge der Sonnenstrahlung. Die Extinktion wird mehr durch Streuung als durch Strahlungsabsorption hervorgerufen.
- **Absorption durch Gase und Wasserdampf**
Moleküle können ihren Energiezustand verändern, indem sie selektiv Photonen einer bestimmten Frequenz absorbieren, was sich in der Änderung des Rotations- oder Schwingungszustandes niederschlägt.
- **Absorption und Streuung in Wolken**
Wolken sind Ansammlungen kleiner beweglicher Körper in einem gasförmigen Medium, deren Anzahl groß genug ist, um eine für das Auge leicht erkennbare Verringerung der Sichtweite zu erzielen. Die Schwächung der Strahlung in Wolken wird durch Absorption (bis zu 20%) und der Erhöhung der Rückwärtsstreuwahrscheinlichkeit erreicht. Dabei spielt die Wolkendicke und deren Aerosolgehalt eine maßgebende Rolle. Darüber hinaus misst sich ihr Einfluss aus dem Bedeckungsgrad des Himmels.

Die aufgeführten Abminderungsprozesse sind weitgehend unabhängig voneinander, da es keine Wechselwirkung zwischen ihnen gibt. Der gestreute und den Erdboden erreichende Anteil der Sonnenstrahlung wird Diffusstrahlung genannt, der nicht gestreute wird Direktstrahlung

genannt. Die Summe der täglichen extraterrestrischen Sonnenstrahlung G_{0d} [Wh/m²] auf die Außenhülle der Atmosphäre ergibt sich durch die Integration der jahreszeitabhängigen Strahlungsintensität nach Gleichung (2.55) unter Berücksichtigung der Flächenleistung auf eine horizontale Fläche. Nach Integration erhält man:

$$G_{0d} = \frac{24}{\pi} \cdot I_0 \cdot \left(\frac{\pi}{180} \cdot \tau_h \cdot \sin \delta_s \cdot \sin \varphi_{geo} + \cos \delta_s \cdot \cos \varphi_{geo} \cdot \sin \tau_h \right) \quad (2.59)$$

Der in dieser Gleichung enthaltene Stundenwinkel τ_h der Sonne beim Sonnenuntergang ergibt aus der Bestimmungsgleichung des Sonnenhöhenwinkels (2.54) mit $\gamma_s = 0^\circ$. Es gilt:

$$\tau_h = 180 - \arccos(\tan \delta_s \cdot \tan \varphi_{geo}) \quad (2.60)$$

Diese Tagessumme extraterrestrischer Sonnenstrahlung ist folglich abhängig von der Jahreszeit und der geographischen Breite des betrachteten Standortes. Diese Abhängigkeit besteht daher auch für die auf der Erdoberfläche eintreffende Globalstrahlungssumme, welche aufgrund der oben genannten Extinktionsprozesse abgemindert wird.

Für einen jahreszeit- und ortsunabhängigen Vergleich der Globalstrahlung verschiedener Standorte kann der Quotient aus der am Erdboden eintreffenden Globalstrahlungssumme G_d und der extraterrestrischen Strahlungssumme G_{0d} verwendet werden. Dieser Quotient wird als relative Globalstrahlung RG bezeichnet [45]. Ein analoges Relativmaß kann für die Diffusstrahlung und Direktstrahlung gebildet werden.

$$RG = \frac{G_d}{G_{0d}} \quad (2.61)$$

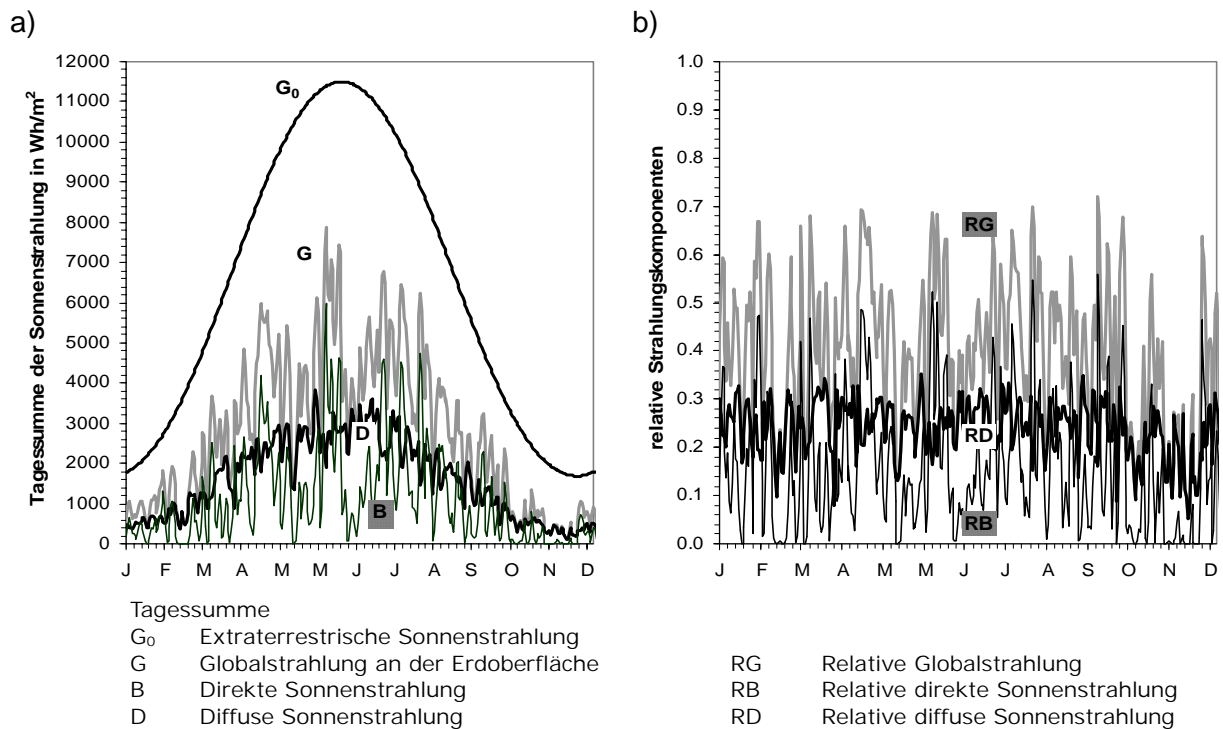


Abbildung 2.18 Jahresgang der Tagessumme der Globalstrahlung, diffusen und direkten Sonnenstrahlung sowie der extraterrestrischen Globalstrahlung aus dem Jahre 1997, Station 1516 (Osnabrück);
a) Tagessummenwerte in Wh/m²,
b) Ausgewertete Relativwerte der Strahlungskomponenten

Die Abbildung 2.18a zeigt den Jahresverlauf der Strahlungskomponenten Global-, Direkt- und Diffusstrahlung für Osnabrück im Jahr 1997. Durch die Relativwertbildung stellt sich ein über das Jahr hinweg ausgeglichener Verlauf dar, der lediglich die bewölkungs- und trübungsbedingten Schwankungen enthält (Abbildung 2.18b).

Wie aus Abbildung 2.18 hervorgeht, wurden im dargestellten Zeitraum 1996 höchstens 72% der extraterrestrischen Strahlung durch die Atmosphäre transmittiert. Die atmosphärische Trübung und Bewölkung spielen dabei, wie bereits beschrieben, eine maßgebliche Rolle. Anhang A.4 enthält eine Auswertung der maximalen relativen Globalstrahlung für 12 ausgewählte deutsche Städte für den Zeitraum der Sommersonnenwende Ende Juni. Demnach beträgt die RG in diesem Zeitraum im Mittel 56% bis 67%. Das Maximum der relativen Globalstrahlung beträgt im Mittel 76%. An strahlungsintensiven Tagen wird die extraterrestrische Sonnenstrahlung beim Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre nur um ein Viertel reduziert.

2.5.3.1 Trübung

Im wolkenlosen Fall wird die Globalstrahlung durch die o.g. Prozesse abgemindert. Bei Anwesenheit von Aerosolen spricht man von einer Trübung der Atmosphäre. Ein vom Sonnenstand unabhängiges Maß hierfür ist der Linkesche Trübungsfaktor T_{Li} . Er gibt die gedachte Anzahl von Rayleigh-Atmosphären an, die die gleiche Trübung hervorrufen würden wie die wirkliche Atmosphäre. Der Faktor T_{Li} fasst den Einfluss von Aerosolen und Wasserdampf zusammen. Die mittlere monatliche Trübung unterliegt im Allgemeinen jahreszeitlich bedingten Schwankungen.

Trübungszone	Trübungsfaktor T_{Li}		
	Winter	Sommer	Mittel
Industriegebiet	4,0	5,4	4,8
Großstadt	3,1	4,3	3,7
Land	2,1	3,5	2,8

Tabelle 2.7 Mittlere Trübungsfaktoren nach [110]

So ist die Atmosphäre im Sommer allgemein trüber als im Winter. In [110] sind durchschnittliche Trübungsfaktoren für ländliche Gebiete, Großstädte und Industriegebiete aufgeführt (Tabelle 2.7).

In [7] wird ein Modell vorgestellt, welches diesen Sachverhalt durch eine empirische Beziehung in Abhängigkeit des laufenden Tages im Jahr und territorialen Faktoren wiedergibt. Nach Gleichung (2.62) liegen die mittleren Trübungsfaktoren zwischen 3,0 und 4,9. Für Industriegebiete muss nach [7] der mittlere saisonale Wert T_{Li} wegen des erhöhten Aerosolgehaltes um +0,5 erhöht werden. In ländlichen Gebieten ist der Trübungsfaktor um 1,0 zu vermindern.

$$T_{Li} = T_{Li,0} + u \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{(d+13)}{365}\right) + v \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{(d+13)}{365}\right) \quad (2.62)$$

mit den Mittelwert- und Schwankungsparametern $T_{Li,0}$, u und v :

Trübungszone	$T_{Li,0}$	u	v
Nord- und Ostsee	3,6000	-0,6000	0,0070
Deutsche und polnische Tiefebene	3,9500	-0,9200	0,0330
Kontinental	3,9000	-0,7600	-0,0032

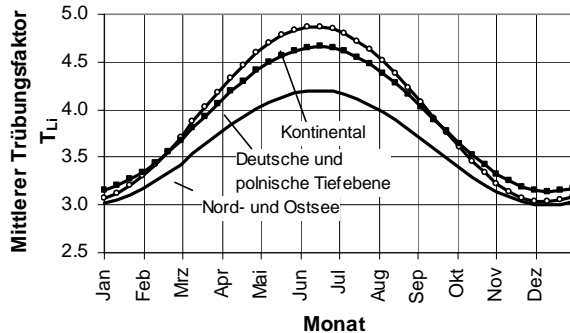


Abbildung 2.19
Mittlerer Jahresgang des Linkeschen Trübungs-faktors T_{Li} nach Gleichung (2.62)

2.5.3.2 Bewölkung

Bei bewölkter Wetterlage vermindert sich die auf der Erdoberfläche eintreffende Sonnenstrahlung durch vermehrte Rückreflexion der Strahlung in den Weltraum und Absorption in den Wolken. Eine stärkere Streuung an den Gasmolekülen und den Aerosolen bewirkt eine Anhebung des Anteiles der Diffusstrahlung gegenüber der Direktstrahlung.

Die Bewölkung des Himmels ist in acht Bewölkungsgrade B eingeteilt (0=wolkenlos bis 8=ganzflächig mit Wolken bedeckt) und wird durch augenscheinliche Beobachtung ermittelt. Die quantitative Einschätzung des solaren Strahlungseintrags ist insbesondere bei heiterer Bewölkung schwierig. Aber auch bei hohen Bewölkungsgraden wird eine unter Umständen mehrstöckige Wolkenschichtung – und damit Strahlungsminderung – nur grob durch die Gra- duierung berücksichtigt.

Ein Abminderungsfaktor κ_B für die Globalstrahlung in Abhängigkeit des Bewölkungsgrades B wird in [58] aufgeführt:

$$\kappa_B = 1 - 0,55 \cdot B - 0,25 \cdot B^4 \quad (2.63)$$

Vorhandene Bewölkung wirkt sich wegen der strahlungsmindernden Wirkung hinsichtlich der Temperaturbeanspruchung von Brückenbauwerken günstig aus. Liegen gemessene Daten der direkten und diffusen Sonnenstrahlung vor, so enthalten diese zwangsläufig den Einfluss aus Bewölkung, womit Unsicherheiten durch Ansatz der Abminderung κ_B vermieden werden.

2.5.4 Direkte Sonnenstrahlung

Die Direktstrahlung ist eine gerichtete Strahlungskomponente. Daher ist die Strahlungsleistung auf eine Fläche sowohl von der Intensität der eintreffenden Strahlung als auch der Flächenorientierung abhängig. Hinzu kommt, dass die Teile des Bauwerks oder anderer Objekte in der Bauwerksumgebung eine verschattende Wirkung ausüben können, so dass für diesen Fall der Strahlungseintrag für die verschatteten Flächenbereiche entfällt.

Die Intensität der Wärmestrahlung auf eine horizontale Fläche resultiert aus dem Produkt der extraterrestrischen Sonneneinstrahlung, einem Abminderungsfaktor, der Extinktion sowie einem aus dem Lambertschen Kosinusetz folgenden Anteil, welcher die Sonnenhöhe über dem Untergrund einbezieht:

$$I_{dir,h} = I_0 \cdot e_{dir} \cdot \sin \gamma_s \geq 0 \quad (2.64)$$

Für eine beliebig ausgerichtete geneigte Fläche folgt daraus:

$$I_{dir,\gamma} = I_{dir,h} \cdot \left[\cos \gamma_w + \frac{\sin \gamma_w \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_w)}{\tan \gamma_s} \right] \geq 0 \quad (2.65)$$

An wolkenlosen Tagen entspricht der Verlauf der direkten Strahlung relativ gut der Trübungshypothese. Diese geht davon aus, dass die direkte Strahlung logarithmisch proportional zu einem Mächtigkeitkoeffizienten der durchstrahlten Luftmasse geschwächt wird. Dieser Proportionalitätsfaktor entspricht dem im Abschnitt 2.5.3.1 beschriebenen Trübungsfaktor T_{Li} , der den Einfluss des Wasserdampfes, des Ozons und der Aerosole zusammenfasst. Ein Faktor zur Berücksichtigung der Mächtigkeit der durchstrahlten Luftmasse gibt [31] in Abhängigkeit des Sonnenhöhenwinkels und der geodätischen Höhe H in [m] an:

$$\delta(m) \cdot m = \left(\frac{9,38076 \cdot (\sin \gamma_s + \sqrt{0,003 + \sin^2 \gamma_s})}{2,0015 \cdot (1 - H \cdot 10^{-4})} + 0,91202 \right)^{-1} \quad (2.66)$$

Der in Gleichung (2.64) einzusetzende Extinktionsfaktor e_{dir} ist:

$$e_{dir} = \exp(-T_{Li} \cdot \delta(m) \cdot m) \quad (2.67)$$

Der Anteil zur Berechnung der Wärmestromdichte an einer Bauwerksoberfläche infolge direkter Sonnenstrahlung ist identisch mit der Strahlungsleistung $I_{dir,\gamma}$:

$$q_{dir} = \begin{cases} I_{dir,\gamma} & \text{falls sonnenbeschienen und nicht verschattet} \\ 0 & \text{in allen anderen Fällen} \end{cases} \quad (2.68)$$

2.5.5 Diffuse Sonnenstrahlung

Die Intensität der diffusen Sonnenstrahlung auf eine horizontale Fläche kann aus der Differenz von Globalstrahlung und Direktstrahlung ermittelt werden. Als deterministisches Berechnungs-Modell der Diffusstrahlung auf eine horizontale Fläche wird die in [58] aufgeführte, erweiterte Berlagessche Formel verwendet:

$$I_{diff,h} = I_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot e_{diff} \cdot \sin \gamma_s \quad \text{mit} \quad (2.69)$$

$$e_{diff} = [\exp(\alpha \cdot m) - \exp(-T_{Li} \cdot \delta(m) \cdot m)] \quad (2.70)$$

Der im Extinktionsfaktor e_{diff} enthaltene Term $\exp(\alpha \cdot m)$ berücksichtigt die Transmissioneigenschaften des Wasserdampfs in der Atmosphäre und nimmt je nach Sonnenhöhe Werte zwischen 0,81 bis 0,91 an [58].

Für geneigte und/oder unverschattete Flächen reduziert sich der sichtbare Himmelsraum entsprechend der Einstrahlzahl φ_{Himmel} , welche entsprechend Gleichung (2.43) zu bestimmen ist. Wird die Fläche nicht anderweitig verschattet so ist die Einstrahlzahl einer γ_w geneigten Fläche:

$$\varphi_{Himmel} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \gamma_w) \quad (2.71)$$

Der Strahlungseintrag der Diffusstrahlung berechnet sich dann zu:

$$I_{diff,\gamma} = \varphi_{Himmel} \cdot I_{diff,h} \quad (2.72)$$

Für die Berechnung des Extinktionsfaktors e_{diff} existieren zahlreiche empirische Modelle [26], [31], [39], [104]. Nach einer Gegenüberstellung mehrerer Ansätze wird in [39] das Diffusstrahlungsmodell des European Solar Radiation Atlas (ESRA) als robustes Verfahren bewertet. Darin setzt sich e_{diff} aus einer Transmissionsfunktion $\tau_D(T_L)$ für die Diffusstrahlung in Zenitrichtung und einer sonnenhöhenabhängigen Diffusfunktion $f_D(T_L, \gamma_s)$ zusammen und es gilt:

$$e_{diff}(T_{Li}, \gamma_s) = \tau_D \cdot f_D \quad (2.73)$$

$$\tau_D = -1,543 \cdot 10^{-2} + 3,0543 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Li} + 3,797 \cdot 10^{-4} \cdot T_{Li}^2 \quad (2.74)$$

$$f_D = a_0(T_L) + a_1(T_L) \cdot \sin(\gamma_s) + a_2(T_L) \cdot \sin^2(\gamma_s) \quad (2.75)$$

$$a_0 = 0,26463 - 6,1581 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Li} + 3,1408 \cdot 10^{-3} \cdot T_{Li}^2 \quad (a_0 \geq 0,002 / \tau_D)$$

$$a_1 = 2,0402 + 1,8945 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Li} - 1,1161 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Li}^2$$

$$a_2 = -1,3025 + 3,9231 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Li} + 8,5079 \cdot 10^{-3} \cdot T_{Li}^2$$

Die Bestimmungsgleichung für $I_{diff,h}$ lautet dann:

$$I_{diff,h} = I_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot e_{diff}(T_{Li}, \gamma_s) \quad \text{mit} \quad (2.76)$$

In die Energiebilanz an einer Bauwerksoberfläche infolge diffuser Sonnenstrahlung geht folgender Anteil ein:

$$q_{diff} = I_{diff,\gamma} \quad (2.77)$$

Für wolkenlose Tage kann eine sehr gute Übereinstimmung der deterministischen Ansätze mit realen Strahlungsverläufen festgestellt werden. In Abbildung 2.20 ist der gemessene Strahlungsverlauf der Globalstrahlung, Diffusstrahlung und Direktstrahlung mit den durch die Gleichungen (2.64) und (2.76) bestimmten Strahlungsverläufe gegenübergestellt. Es muss aber festgestellt werden, dass diese gute Übereinstimmung bei einem Trübungsfaktor $T_{Li}=3,2$ erreicht wird, der unterhalb der mit der Ansatzfunktion (2.62) berechneten mittleren Trübungsfaktoren zwischen 4,2 ... 4,8 liegt.

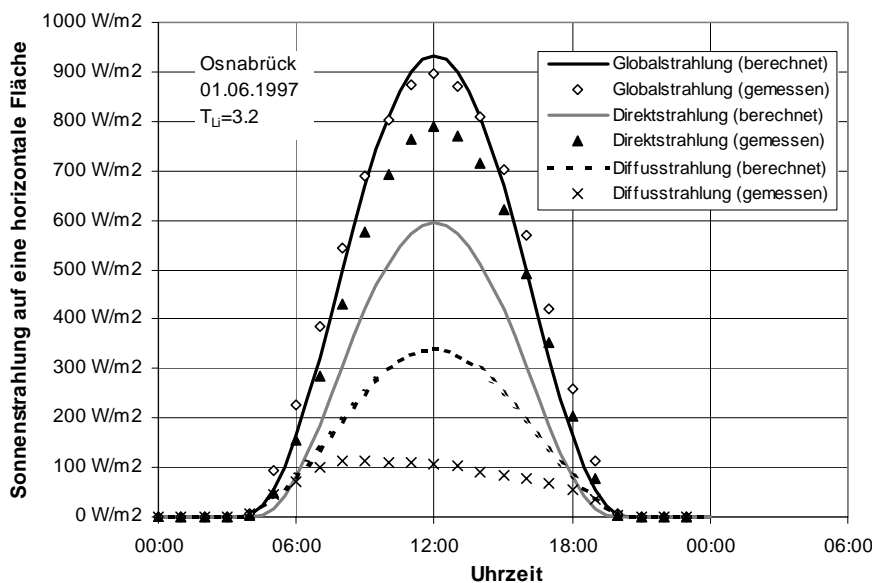


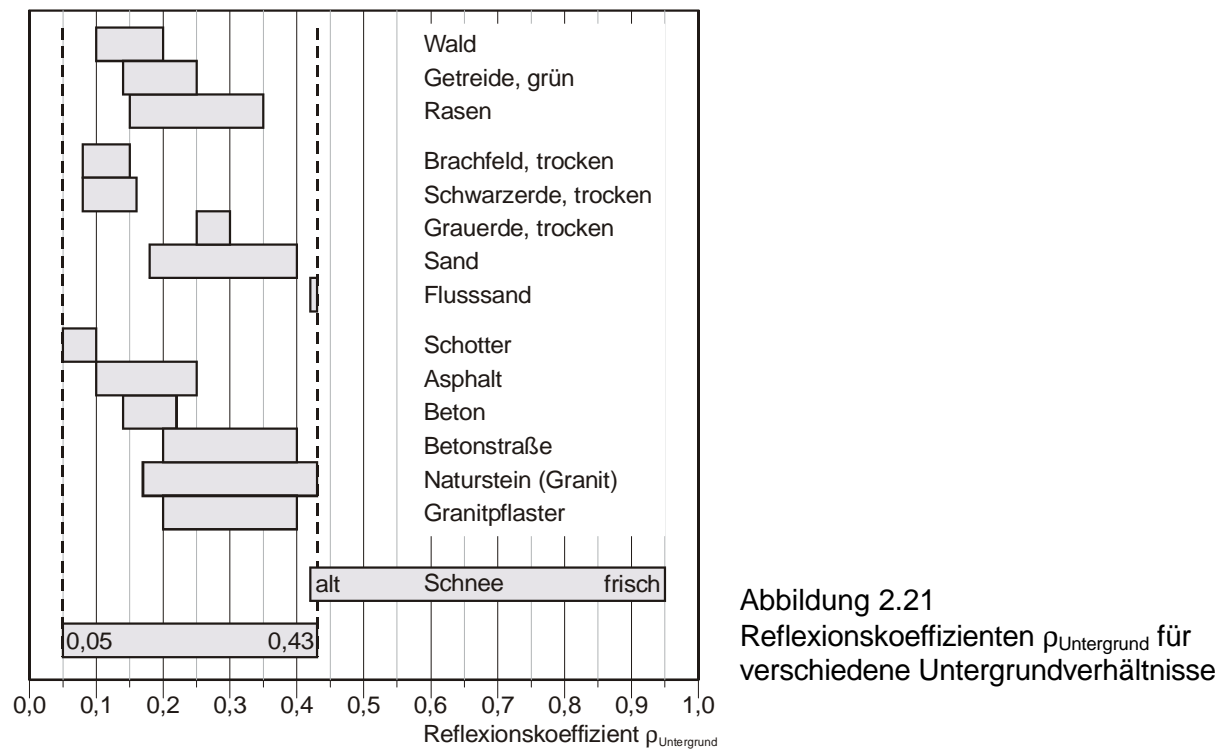
Abbildung 2.20 Gegenüberstellung gemessener Sonnenstrahlungsdaten in Osnabrück und den zugehörigen deterministischen Strahlungsverläufen nach den Gleichungen (2.64) und (2.76)

2.5.6 Reflektierte Sonnenstrahlung am Untergrund

Die von der Erdoberfläche nicht absorbierte Globalstrahlung wird zurückreflektiert und trifft auf alle Bauwerksflächen, die mit dem Untergrund im Strahlungsaustausch stehen. Maß des Reflexionsvermögens ist der Albedo $\rho_{\text{Untergrund}}$ (Abbildung 2.21). Es kann davon ausgegangen werden, dass von der Erdoberfläche nur diffus gestreute Sonnenstrahlung ausgeht [58].

Das Reflexionsvermögen verschiedener umgebender Flächen des Brückenbauwerks ist wegen der Materialvielfalt sehr unterschiedlich. Die Intensität der vom Untergrund ausgehenden Reflexionsstrahlung kann nur abschätzend angegeben werden, da sie sich durch verschiedene Untergrundbeschaffenheiten und unterschiedliche Flächenneigungen einen speziellen lokalen Wert annimmt.

Abbildung 2.21 gibt einen Überblick über das Reflexionsvermögen häufig vorkommender Untergrundverhältnisse. Demnach kann von einer Strahlungsreflexion zwischen 5-45%, im Mittel von 25% ausgegangen werden. In den Wintermonaten führt Schnee zu einem spürbaren Anstieg der Reflexionsstrahlung auf 42 bis 95% im Falle frischen Neuschnees.



Zur Berücksichtigung dieses Strahlungsanteiles $I_{\text{Reflexion}}$ wird von einer stark vereinfachten Umgebungssituation ausgegangen, die sich als theoretisch unendliche horizontale Ebene darstellt. Damit lässt sich der auf das Bauwerk treffende Strahlungsanteil teilweise analytisch beschreiben.

Grundsätzlich geht von den Brückenbauwerken eine Verschattungswirkung auf das nähere Umfeld aus. Zur Berücksichtigung dieser Verschattungswirkung bei der Temperaturfeldberechnung wird die Abminderung der Bauwerksbestrahlung durch das in Abbildung 2.22 dargestellte Modell verwendet. Infolge direkter Sonnenstrahlung zeichnet sich ein mehr oder weniger scharf konturierter, brückenparalleler Schattenstreifen unter dem Bauwerk ab. Seine Lage hängt von dem jeweiligen Sonnenstand ab. Die Breite dieses Streifens ist maßgeblich von der Bauwerksbreite abhängig. Die Diffusstrahlung weist unter dem Brückenbauwerk eine Art Senke auf, die sowohl von der Bauwerksbreite als auch ihrer Höhe über dem Untergrund abhängt. Je bodennaher und breiter das Bauwerk ist, desto stärker wird die Diffusstrahlung abgemindert, was sich in einer unscharfen Verdunklung unterhalb eines Brückenbauwerkes widerspiegelt.

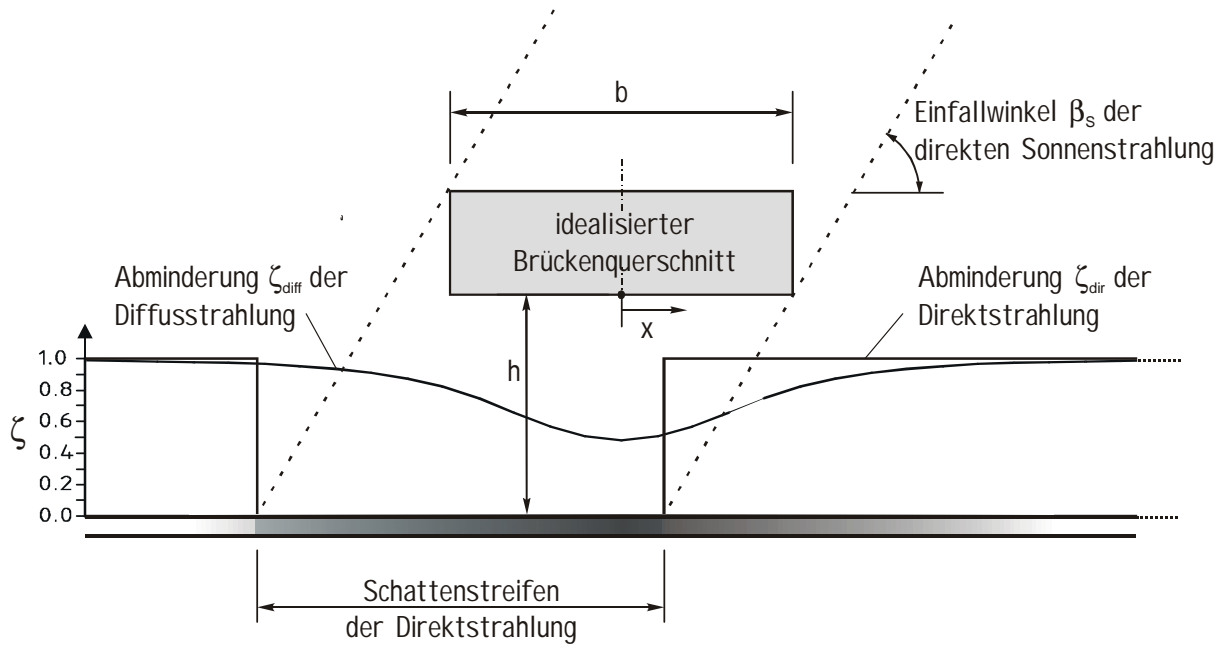


Abbildung 2.22 Abminderung ζ der Sonnenstrahlung in der Umgebung des Brückenbauwerkes durch einen idealisierten quaderförmigen Brückenquerschnitt

Die Verringerung des Strahlungseintrages auf den Untergrund im Bereich des Brückenbauwerkes kann mit Abminderungsfaktoren ζ_{dir} und ζ_{diff} ausgedrückt werden. Im Falle der Direktstrahlung nimmt ζ_{dir} den Wert Eins oder Null an. Vereinfachend wird der Schattenstreifen aus direkter Sonnenstrahlung derart angenommen, dass sich die Sonne im Zenit befindet und somit ein genau unterhalb befindlicher Schattenstreifen einstellt. Dadurch wird eine näherungsweise, vom Sonnenstand unabhängige Berechnung der Reflexionsstrahlung auf das Bauwerk möglich.

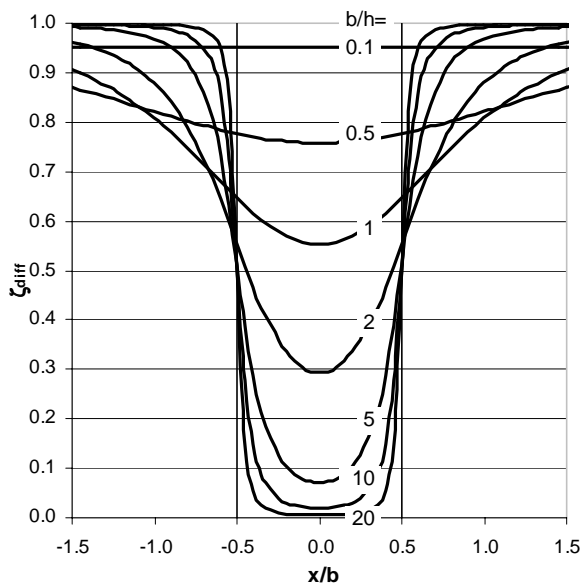


Abbildung 2.23 Verminderung ζ_{diff} der einfallenden Diffusstrahlung unterhalb und neben einer Brücke in Abhängigkeit des Verhältnisses von Brückenbreite b zur Höhe über dem Untergrund h

Der Faktor ζ_{diff} entsprechend Gleichung (2.79) ist durch das Integral über die sichtbare Himmelsfläche vom betrachteten Eroberflächenpunkt analog der Bestimmung der Einstrahlzahlen im Abschnitt 2.4.3 hergeleitet worden.

$$\zeta_{dir} = \begin{cases} 0 & \xi < 0,5 \\ 1 & \xi \geq 0,5 \end{cases} = \zeta_{diff} (\xi \rightarrow \infty) \quad \text{mit } \xi = \left| \frac{x}{b} \right| \quad \text{und} \quad (2.78)$$

$$\zeta_{diff} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\xi + \frac{1}{2}}{\sqrt{\frac{1}{(b/h)^2} + \left(\xi + \frac{1}{2}\right)^2}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\xi - \frac{1}{2}}{\sqrt{\frac{1}{(b/h)^2} + \left(\xi - \frac{1}{2}\right)^2}} \quad (2.79)$$

Die Intensität der Reflexionsstrahlung auf die unterseitigen Brückenflächen muss mit Hilfe des Lambertschen Kosinusetzes durch Integration über den gesamten von einer Fläche einsehbaren Untergrundbereich gelöst werden. Diese Integration ist für die Direktstrahlung analytisch und für den Diffusanteil nur numerisch lösbar. Eine ebene Fläche wie in Abbildung 2.22 weist eine Einstrahlzahl $\varphi_{\text{Untergrund}}=1$ auf. Wegen der Bauwerksverschattung reduziert sich die rechnerisch anzusetzende effektive Einstrahlzahl auf die Maße $\varphi_{\text{Untergrund,dir}}$ bzw. $\varphi_{\text{Untergrund,diff}}$. In Abbildung 2.24 sind für verschiedene Verhältnisse von Bauwerksbreite zu – Höhe die Einstrahlzahlen $\varphi_{\text{Untergrund}}$ ausgewertet. Es zeigt sich, dass bei sehr breiten und relativ flach über dem Untergrund verlaufenden Brückenbauwerken sich die in Brückenmitte eintreffende Reflexionsstrahlung auf weniger als 5% reduziert. Dies trifft beispielsweise für Kanalbrücken zu. Aber auch Autobahnbrücken weisen bei einer Gesamtbreite von ca. 38m und einer lichten Höhe von 4,70m ein Verhältnis von $b/h \approx 8$ auf. Für die Strahlungsintensität $I_{\text{Reflexion}}$ auf ein Oberflächenelement ergibt sich aus der Summe der beiden Strahlungsanteile:

$$I_{\text{Reflexion}} = \rho_{\text{Untergrund}} \cdot (\varphi_{\text{Untergrund,diff}} \cdot I_{\text{diff}} + \varphi_{\text{Untergrund,dir}} \cdot I_{\text{dir,h}}) \quad (2.80)$$

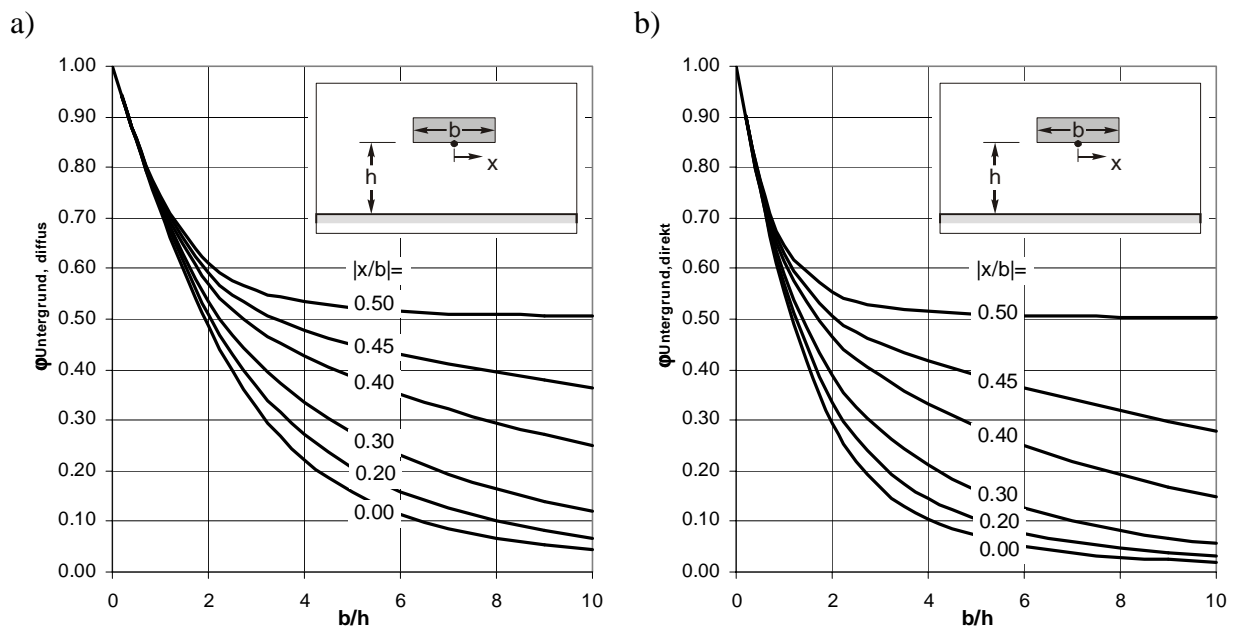


Abbildung 2.24 Abminderungsfaktoren $\varphi_{\text{Untergrund,diff}}$ und $\varphi_{\text{Untergrund,dir}}$ für den Strahlungseintrag kurzwelliger Reflexionsstrahlung auf die Unterseite eines quaderförmig idealisierten Brückenquerschnittes

In die Energiebilanz an einer Bauwerksoberfläche infolge reflektierter Sonnenstrahlung geht folgender Anteil ein:

$$q_{\text{Reflexion}} = I_{\text{Reflexion}} \quad (2.81)$$

2.5.7 Strahlung der Atmosphäre

Als zweite Strahlungskomponente im Strahlungshaushalt der Erdoberfläche ist die Infrarotstrahlung der Atmosphäre anzusehen. Die Bestandteile der Atmosphäre sind sowohl gasförmige und flüssige als auch feste Schwebstoffe, welche eine ihrer Temperatur und ihrem Emissionsvermögen entsprechende Wärmestrahlung aussenden. Diese kontinuierliche Strahlung hat die Charakteristik eines Graustrahlers. Dieser trägt entsprechend der langwelligen Absorptionsfähigkeit der Bauwerksoberflächen zur Bauwerkserwärmung bei. Ihre Intensität ist verknüpft mit der Temperatur der Atmosphärenbestandteile, dem Wasserdampfdruck sowie der Luftzusammensetzung. Im Falle eines bewölkten Himmels schirmen Wolken die darüber liegenden Luftschichten ab, so dass allein die Wassertröpfchen bzw. Eiskristalle als Strahlungsquelle wirksam werden.

Prinzipiell kann die Gegenstrahlung als grauer Strahler mit variabler Emissivität und Temperatur beschrieben werden [1], [58]. Mit der Einstrahlzahl φ_{Himmel} kann auch für diesen Strahlungsanteil Flächenneigung und Verschattungssituation berücksichtigt werden. Für wolkenlose und bedeckte Wettersituationen finden sich in der Literatur Untersuchungen, die die Strahlungsintensität an die Bodentemperatur koppeln und die Emissionsbeiwerte ε_{Atm} in Abhängigkeit des Wasserdampfdruckes sowie der geodätischen Höhe angeben. In einer zusammenfassenden Darstellung stellt [46] diese gegenüber. Übereinstimmend zeigt sich ein Zusammenhang der Gegenstrahlung mit der Höhenlage über NN. Die Ergebnisse, so in [46], liegen jedoch innerhalb der Messgenauigkeit. Aus dieser Zusammenstellung ergibt sich im Mittel eine Abnahme des Emissionsbeiwertes je 100m Höhe um 0,2%.

$$S_{\text{Atmosphäre}} = \varepsilon_{\text{Atm}} \cdot \varphi_{\text{Himmel}} \cdot C_S \cdot \left(\frac{\vartheta_{\text{Luft}} + 273}{100} \right)^4 \quad (2.82)$$

[104] stellt für wolkenlosen Himmel einen Bezug zur Außenlufttemperatur entsprechend her (Gleichung (2.82)) und gibt einen mittleren Emissionsbeiwert von $\varepsilon_{\text{Atm}}=0,82$ an. Für den vollständig bewölkten Himmel wird in [26] ein Emissionsbeiwert von 0,94 vorgeschlagen.

Im Hinblick auf die numerische Simulation von Temperaturfeldern mit gemessenen Klimadaten stellt sich die Frage nach dem anzusetzenden Emissionsbeiwert, da in der Regel keine Angaben zur langwelligen Himmelsstrahlung vorliegen und mit Sicherheit variierende Strahlungsintensitäten vorliegen. Deshalb wurden die Messergebnisse der Klimadatenreihe GAR2 [75] unter diesem Aspekt ausgewertet.

Der langwellige Emissionskoeffizient steht in direktem Zusammenhang mit dem Wasserdampfdruck und der durch die Meereshöhe bedingten Luftschichtdicke. Mit zunehmendem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre steigt die emissionsfähige Luftmasse, so dass der Emissionskoeffizient ansteigt. Im gleichen Zuge wird die Strahlungsdurchlässigkeit der Atmosphäre verringert und die auf der Erdoberfläche eintreffende Globalstrahlung wird abgeschwächt. Folglich muss ein Zusammenhang zwischen der langwelligen Strahlungsemission und der relativen Globalstrahlung (s. Seite 36) bestehen.

Der Bewölkungsgrad steht in direktem Zusammenhang mit der vorhandenen wärmestrahlenenden Wasserdampfmenge. In [40] wird eine lineare Abhängigkeit der relativen Globalstrahlung zum Bewölkungsgrad beschrieben. Abbildung 2.25 zeigt für vier ausgewählte Stationen diese Regression.

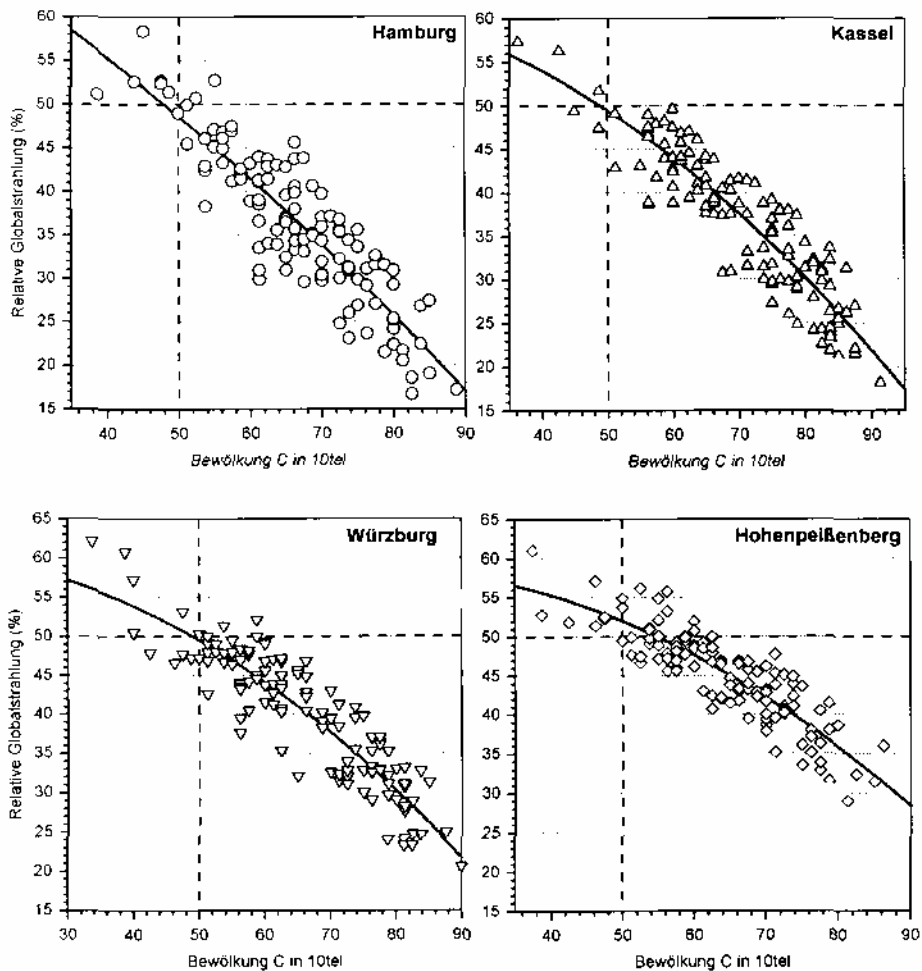


Abbildung 2.25 Abhängigkeit der Monatsmittel der relativen Globalstrahlung RG vom Bewölkungsgrad C für Hamburg, Kassel, Würzburg und Hohenpeißenberg, [40]

Mit der Datenreihe GAR2 liegen aus dem Zeitraum Oktober 1999 bis Februar 2001 minütliche Messwerte der Globalstrahlungsintensität, die Intensität der atmosphärischen Gegenstrahlung sowie die Lufttemperatur 2m über Erdboden vor. Durch Rückrechnung der Glei-

chung (2.82) kann der zugehörige atmosphärische Emissionsbeiwert aus Lufttemperatur und Gegenstrahlung berechnet werden.

Die Häufigkeitsverteilung der stündlichen Mittelwerte ist in Abbildung 2.26 wiedergegeben und stellt sich als zweigipflige Verteilung dar. Für den wolkenlosen Bereich zeichnet sich eine Übereinstimmung mit dem in [104] angegebenen Mittelwert von $\epsilon_{\text{Atm}}=0,82$ ab. Für bewölkte Wetterlagen wird in [26] ein Emissionsbeiwert von 0,94 vorgeschlagen. Es zeigt sich, dass in etwa 1% des Untersuchungszeitraumes sehr niedrige Stundenmittelwerte von $\epsilon_{\text{Atm}}=0,7$ auftreten. Da für die atmosphärische Gegenstrahlung kein charakteristischer Tagesgang festgestellt werden konnte, wurde der Auswertung der Tagesmittelwert des Emissionskoeffizienten zugrunde gelegt.

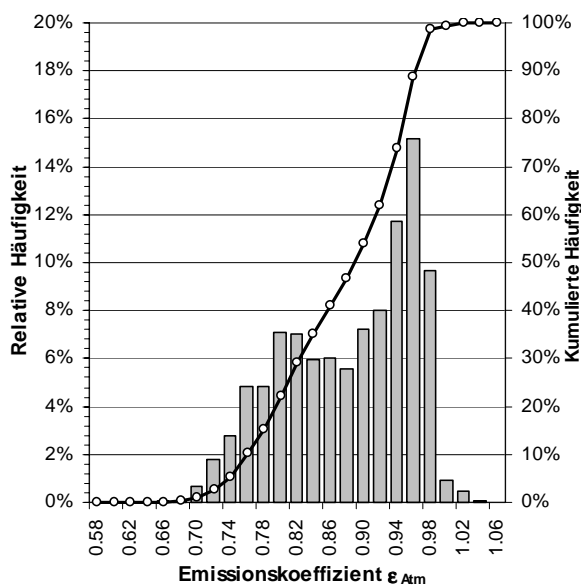


Abbildung 2.26
Häufigkeitsverteilung der gemessenen Stundenmittelwerte ϵ_{Atm} ; Messreihe GAR2, Periode 10/1999 bis 02/2001

Die Gegenüberstellung des Emissionskoeffizienten ϵ_{Atm} und der relativen Globalstrahlung RG deutet auf einen schwachen Zusammenhang zwischen beiden Größen hin, der mit den Erkenntnissen in [40] übereinstimmt (vgl. Abbildungen 2.25 und 2.27a). Ein weiterer, physikalisch im gleichen Kontext stehender Zusammenhang existiert mit der täglichen Lufttemperaturschwankung: Bei bedeckter Wetterlage liegen tendenziell geringere Temperaturspannen vor ($\epsilon_{\text{Atm}} \rightarrow 1,0$). In klaren Nächten hingegen sinkt die Lufttemperatur stark ab und die Temperaturspannen erreichen Werte von ca. 20K ($\epsilon_{\text{Atm}} \rightarrow 0,7$).

Mittels den angegebenen Regressionsgleichungen (2.83) kann überschlägig der Emissionsbeiwert über die relative Globalstrahlung nach Gleichung (2.61) bzw. die tägliche Temperaturschwankung abgeschätzt werden. Eine Regionalisierung der Zusammenhänge bedürfte allerdings umfangreicheren Datenmaterials und einer Datenanalyse.

$$\epsilon_{\text{Atm}} = 0,96 - 0,19 \cdot RG + z_u < 1,00 \quad \text{oder} \quad (2.83)\text{a}$$

$$\epsilon_{\text{Atm}} = 0,95 - 0,007 \cdot (\max \vartheta_{\text{Luft}} - \min \vartheta_{\text{Luft}}) + z_u < 1,00 \quad (2.83)\text{b}$$

mit z_u als normalverteilte Zufallszahl mit Mittelwert 0 und einer Standardabweichung 0,035

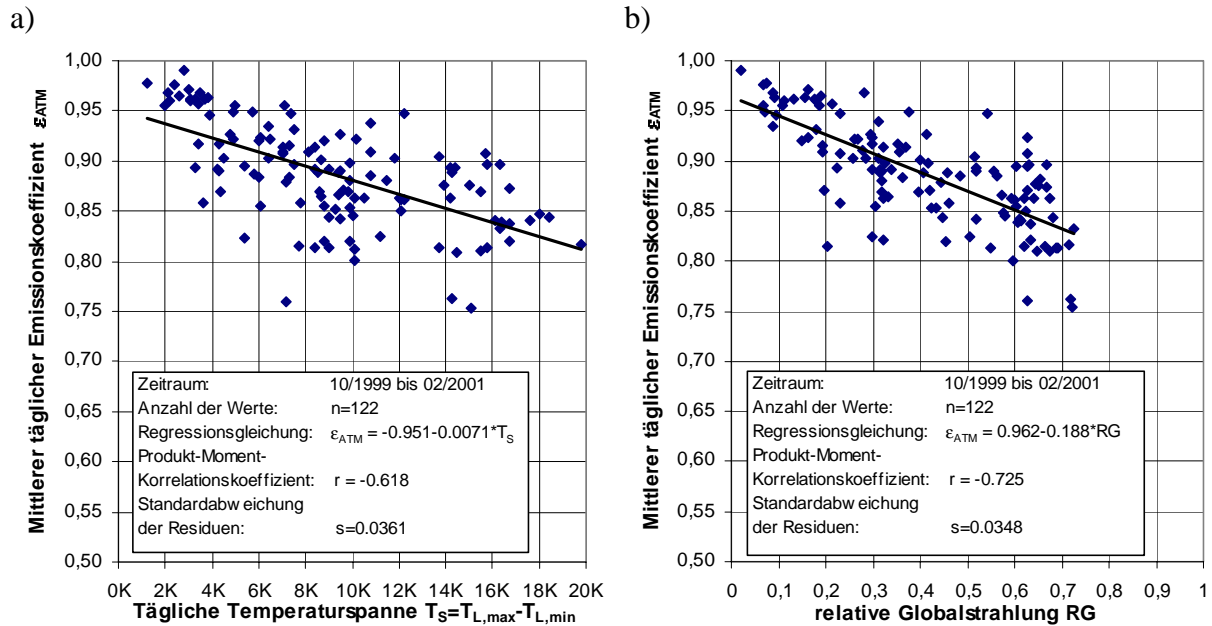


Abbildung 2.27 Zusammenhang zwischen dem mittleren täglichen Emissionskoeffizienten ϵ_{Atm} mit
a) der täglichen relativen Globalstrahlung RG bzw.
b) der Spanne der täglichen Lufttemperaturschwankung

2.6 Strahlung des Untergrundes

Die terrestrische Umgebung des Bauwerkes strahlt ebenfalls eine Wärmestrahlung aus, die proportional zu ihrer Temperatur ist [104]. Die vom Untergrund ausgehende diffuse, langwellige Strahlung setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: der Eigenabstrahlung und der reflektierten atmosphärischen Wärmestrahlung. Der bodenseitige Strahlungsanteil ist an die Erdoberflächentemperatur gekoppelt. In der Regel liegen jedoch keine Messdaten der Oberflächentemperatur des Bodens vor, so dass die Untergrundstrahlung nur durch eine Näherung dargestellt werden kann:

Dabei wird der Umstand genutzt, dass die bodennahe Luftmasse nicht direkt durch die kurzwellige Sonnenstrahlung, sondern durch die Erdoberfläche erwärmt wird [100]. Dies erfolgt durch einen konvektiven Wärmeübergang. Es liegt daher nahe, die langwellige Bodenabstrahlung in Abhängigkeit von der Lufttemperatur anzugeben. [104] verwendet hierfür die Beziehung (2.84) und gibt einen pauschalen Emissionskoeffizienten von 0,99 an, der zugleich die reflektierte atmosphärische Gegenstrahlung einbezieht:

$$S_{\text{Untergrund}} = \epsilon_{\text{Untergrund}} \cdot \varphi_{\text{Untergrund}} \cdot C_S \cdot \left(\frac{\vartheta_{\text{Luft}} + 273}{100} \right)^4 \quad \text{mit} \quad \epsilon_{\text{Untergrund}} = 0,99 \quad (2.84)$$

Dieser Ansatz stellt eine gute Näherung dar und wird von verschiedenen Autoren zur Temperaturfeldsimulation verwendet ([26], [58], [123]). Es ist aber zu vermuten, dass der durch dieses Modell angenommene Tagesgang der Bodenabstrahlung in der Regel geringere tägliche Schwankungen wiedergibt als es real der Fall ist. Wie bereits erwähnt, stellt sich die Temperatur der bodennahen Luftschichten prinzipiell durch Konvektion am Erdboden ein, weshalb die Lufttemperatur folglich geringere Schwankungen aufweist als die Temperatur der Erdoberflä-

che. Zur Abschätzung des Fehlers wurden aus der Klimadatenaufzeichnung GAR2 [75] exemplarisch für die Monate Februar und Juni 2000 die mittleren stündlichen Bodenabstrahlungswerte den rechnerischen Näherungswerten nach Gleichung (2.84) gegenübergestellt. Für den in Abbildung 2.28 dargestellten Vergleich wurden die gleichzeitigen Lufttemperaturwerte aus 2m über Untergrund verwendet. Danach wird für den Monat Juni zur Mittagszeit eine 35 W/m² geringere Strahlungsleistung angerechnet. Im Februar liegen die Abweichungen bei ±10 W/m². In beiden Zeiträumen wird die nächtliche Erdbodenausstrahlung durch das Modell um 10 W/m² zu groß abgeschätzt.

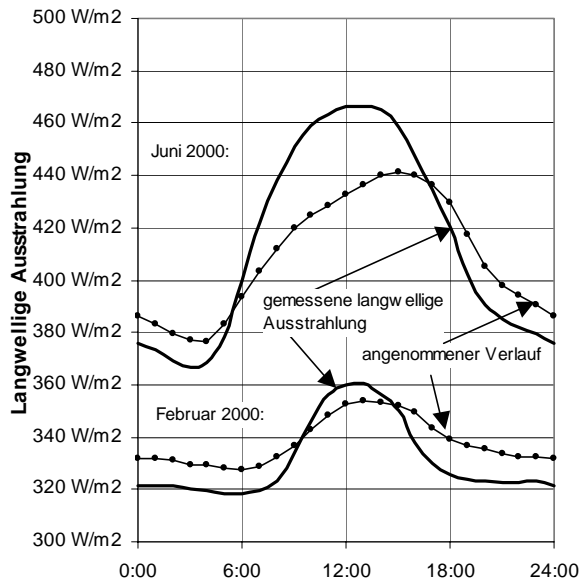


Abbildung 2.28
Gegenüberstellung gemessener langwelliger Ausstrahlung des Untergrundes und dem Näherungsansatz nach Gleichung (2.84) [104]; Monatsmittel für Februar und Juni 2000, Datenbasis: Messreihe GAR2, Lufttemperatur 2m über Untergrund

2.7 Lufttemperatur

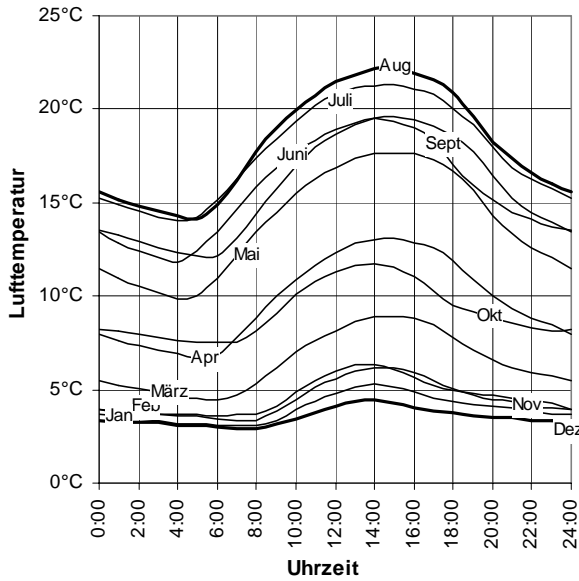
Die erdbodennahen Luftmassen werden an der Erdoberfläche durch Konvektion erwärmt. Die dadurch bedingten Unterschiede der Dichte rufen Luftströmungen in der Atmosphäre – respektive Wind – hervor und es findet eine Durchmischung der Luft statt. Ebenso tritt an den Bauwerksoberflächen ein Wärmeaustausch mit der Umgebungslufttemperatur statt. Die Außenlufttemperatur weist einen charakteristischen Tagesgang auf, der wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert wurde, an die Temperaturentwicklung der Bodenoberfläche gekoppelt ist. In der Zeit des morgendlichen Sonnenaufganges erwärmt sich die Oberflächentemperatur des Untergrundes, so dass auch die nächtlich auskühlende Luft ab diesem Zeitpunkt wieder wärmer wird. In der Zeit zwischen 14:00 bis 16:00 Uhr erreicht die Lufttemperatur ihr tägliches Maximum.

Diese Charakteristik erlaubt eine idealisierte Darstellung des Lufttemperatur-Tagesganges. In der Literatur wird dafür ein abschnittsweiser Kosinusansatz [26] oder Polynomansatz [58] vorgeschlagen, der den Verlauf durch den Zeitpunkt des Sonnenaufgangs sowie dem Tagesmaximal- und minimalwert der Lufttemperatur beschreibt. In der vorliegenden Arbeit wird ein erweiterter idealisierter Temperaturverlauf formuliert, der zusätzlich den Maximalwert des Vortages und den Minimalwert der Lufttemperatur des Folgetages mit einschließt (siehe Abbildung 2.29a). Der Vorteil besteht in der flexibleren Anpassungsfähigkeit an mehrtägige Temperaturszenarien.

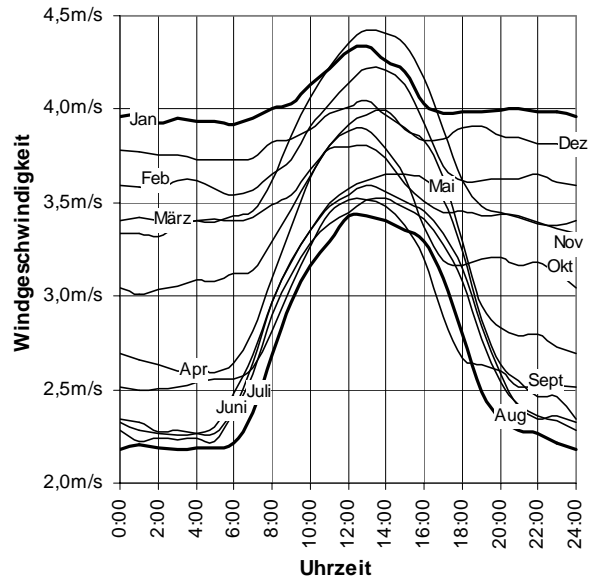
Mittlerer Tagesgang der Einwirkungskomponente:

(Datenbasis: Klimadatenzeitreihe OSI, [76])

a) Lufttemperatur

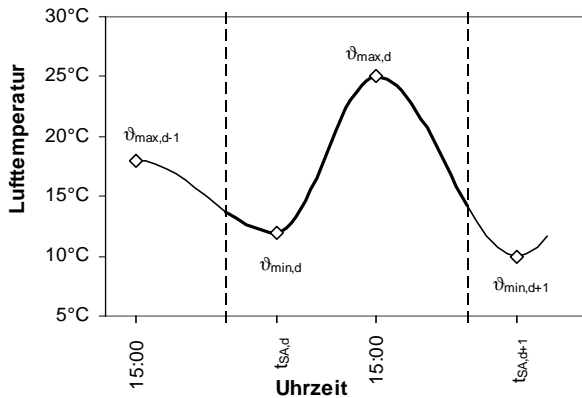


b) Windgeschwindigkeit

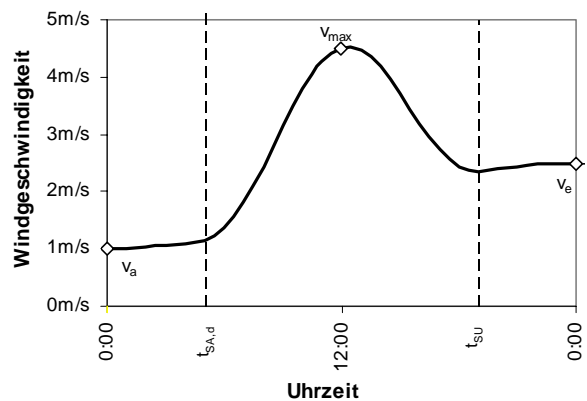


Idealisierter Tagesgang der Einwirkungskomponente:

a) Lufttemperatur



b) Windgeschwindigkeit



$0 \leq t < t_{SA,d} :$

$$v_{Luft} = \frac{1}{2} \cdot \left[(v_{max,d-1} + v_{min,d}) + (v_{max,d-1} - v_{min,d}) \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{24+t-15}{24-15+t_{SA,d}}\right) \right]$$

$t_{SA,d} \leq t < 15,0 :$

$$v_{Luft} = \frac{1}{2} \cdot \left[(v_{max,d} + v_{min,d}) - (v_{max,d} - v_{min,d}) \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{t-t_{SA,d}}{15-t_{SA,d}}\right) \right]$$

$15,0 \leq t < 24,0 :$

$$v_{Luft} = \frac{1}{2} \cdot \left[(v_{max,d} + v_{min,d+1}) + (v_{max,d} - v_{min,d+1}) \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{t-15}{24-15+t_{SA,d+1}}\right) \right]$$

(2.85)

$$v = v_a - (v_a - v_e) \cdot \left[0,5 + \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{24} - \pi\right) \right] - v_i$$

mit

$$v_i = \begin{cases} 0 & \text{falls } t \leq t_{SA} \text{ oder } t > (24 - t_{SA}), \text{ sonst} \\ \left(v_{max} - \frac{1}{2}(v_a - v_e) \right) \cdot \left(\cos\left(2\pi \cdot \frac{t - t_{SA}}{24 - 2 \cdot t_{SA}} \right) - 0,5 \right) & \end{cases}$$

(2.86)

Abbildung 2.29 Idealisierung des Lufttemperaturverlaufes und des Windgeschwindigkeitsverlaufes mittels Kosinus-Funktionen

Für das tägliche Temperaturmaximum wird der Zeitpunkt $t_{\max,d} = 15,00$ (15:00 Uhr MOZ) gewählt. Der Sonnenaufgang bei $t_{SA,d}$ markiert den Wendepunkt des nächtlichen Temperaturabfalls mit dem Minimalwert $\vartheta_{\min,d}$. Der Tagesverlauf der Lufttemperatur ϑ_{Luft} am Tag d wird somit für jede Tagesstunde t idealisiert (Gleichung (2.85)).

2.8 Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit kann als indirekte klimatische Einwirkungsgröße verstanden werden, da sie maßgeblich die Intensität des konvektiven Wärmeübergangs zwischen Luft und Bauwerksoberfläche beeinflusst (vgl. Gleichung (2.24) auf Seite 16).

Infolge großräumiger Luftdruckunterschiede entsteht ein horizontaler Luftmassentransport, der mit zunehmender Höhe gleichmäßig und relativ ungestört verläuft. In den erdoberflächennahen Schichten führen Oberflächenreibung und Verwirbelung zu einem räumlich und zeitlich ungleichmäßigeren Verlauf. In der Atmosphäre gibt es zudem vertikal gerichtete Luftbewegungen, die maßgeblich für den Wärme und Feuchtetransport von der Erdoberfläche in die Atmosphäre verantwortlich sind. Motor dieser Bewegungen sind ebenfalls Dichteunterschiede verschieden temperierter Luftmassen. Vertikalwinde sind überwiegend für die Entstehung von Niederschlag und Gewitter verantwortlich, horizontale für großflächige Wettervorgänge. Infolge einer tagtäglichen Erwärmung der Luft an der Erdoberfläche unterliegt die Luftmassenbewegung tageszeitlichen Schwankungen. So verstärken sich die Luftmassenbewegungen in den Tagstunden und beruhigen sich in den Nachtstunden, was in Abbildung 2.29b veranschaulicht wird.

Infolge der Zufälligkeit/Böigkeit des Windes und der starken Abhängigkeit von örtlichen und klimatischen Bedingungen liegt es nahe, eine konstante mittlere Windgeschwindigkeit anzunehmen. Zudem ist die Anströmung der einzelnen Bauwerksoberflächen durch die Bauwerksgeometrie, die Anströmrichtung des Windes und die Einbindung in die Umgebung nur unzureichend zu beschreiben und nicht verallgemeinerbar. So schlagen verschiedene Autoren den Ansatz einer mittleren Windgeschwindigkeit vor, die sich an lokalen und jahreszeitlichen Gesichtspunkten orientieren. [26] unterstellt seinen Untersuchungen eine über den Tag gemittelte Windgeschwindigkeit und empfiehlt je nach zu untersuchenden Lastfall eine Quasi-Windstille mit $v < 1\text{m/s}$. Dieser Vorschlag findet sich schon in [46], wo zur Voraussage von maximalen Temperaturspannungen eine Geschwindigkeit $v=1\text{ m/s}$ festgesetzt wurde. [58] verwendet die in Tabelle 2.8 zusammengestellten 95%-Fraktiklwerte der Lufttemperatur und Mittelwerte der Windgeschwindigkeit:

Monat	Januar	April	Juli	Oktober
ϑ_{\max}	5,0°C	2,0°C	30,5°C	20,0°C
ϑ_{\min}	-6,0°C	3,5°C	10,0°C	4,0°C
v	4,3m/s	3,5 m/s	2,8 m/s	3,1 m/s

Tabelle 2.8 Ansatz konstanter Windgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen, [58]

Eine Zusammenstellung monatlicher Windgeschwindigkeitsmittel mehrerer deutscher Städte findet sich in Anlage A.2 [18]. Es zeichnet sich ab, dass für die Lufttemperatur und die Wind-

geschwindigkeit kein einheitlicher Ansatz für den Standort Deutschland gewählt werden kann, sondern nur regional bezogene Betrachtungen erfolgen können. Andernfalls liegen Annahmen mit geringer Windgeschwindigkeit auf der sicheren Seite.

In [124] wird die Einwirkungsgröße Windgeschwindigkeit im gemeinsamen Auftreten mit Lufttemperatur und Globalstrahlung untersucht. Es wird gezeigt, dass für die Orte Hamburg und Hannover im Monat Juni lediglich 7% bzw. 18% der Stunden mit mehr als 20°C Windgeschwindigkeiten unterhalb 2,0 m/s aufweisen (1951-1970). Ebenso ergibt sich aus einer Regressionsanalyse zwischen Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit einen Trend zu höheren Windgeschwindigkeiten an sonnenreichen Tagen.

Für die Berechnung von Temperaturfeldern in (wärmeträgeren) Massivbau-Querschnitten wird daraus eine mittlere Windgeschwindigkeit von 3m/s abgeleitet. Dünnwandige Querschnitte, wie sie im Stahlbau zu finden sind, reagieren schneller auf die tägliche Einwirkungssituation. Kurzzeitige niedrige Windgeschwindigkeiten am Tage können zu deren schnellen Erwärmung führen, da sich der kühlende Effekt der erzwungenen Konvektion verringert. Es lässt sich zeigen, dass an Tagen mit extremer Sonnenstrahlung niedrigere Windgeschwindigkeitsmittel als 3,0m/s angesetzt werden müssen. Auf der Basis der in [59] zur Verfügung stehenden 21 Jahre umfassenden Klimadatenreihen wurde deshalb analysiert, welche mittlere Windgeschwindigkeit während der täglichen Sonnenscheindauer an Tagen mit einer täglichen Globalstrahlungssumme von 8250 bis 8750 Wh/m² vorherrschte. Solch hohe Strahlungssummen treten nur im Hochsommer bei wolkenlosem klarem Himmel auf. Die ermittelten Windgeschwindigkeitsmittel liegen zwischen 0,8 m/s und 3,6m/s. Tabelle 2.9 stellt die ermittelten Windgeschwindigkeitsmittel für 12 Stationen, aufgegliedert nach der maximalen Tageslufttemperatur dar. Die Auswertungsergebnisse des Standortes Berlin werden infolge der signifikanten Mittelwertabweichungen als nicht zuverlässig eingestuft.

Mittlere Windgeschwindigkeit ¹⁾ an Tagen mit einer täglichen Globalstrahlungssumme von 8250 bis 8750 Wh/m ² und maximalen Lufttemperatur von mindestens 22°C.												
Maximale Tageslufttemperatur	Bocholt	Hamburg	Osnabrück	Kassel	Trier	Freiburg	Würzburg	Mannheim	Stuttgart	Berlin	Braunschweig	Weihenstephan
22°C	1.7	3.2	2.7	2.4	1.9	3.6	2.8	1.8	3.0	4.0(?)	3.0	
24°C	2.6	3.5	2.9	2.2	2.7	3.2	3.3	2.4	2.4	8.7(?)	2.9	1.3
26°C	3.4	3.6	2.3	2.3	3.4	2.0	3.3	2.9	2.2	3.6(?)	3.1	
28°C	2.5	2.9	2.2	0.8	3.0	2.9	2.2	2.6	2.3	3.2(?)		
30°C	1.1		3.6		2.4	2.7	2.4	2.0	2.5	9.1(?)		1.4
32°C			3.1		2.2	2.0	1.6	1.5		5.4(?)		
34°C						3.5	2.9	1.6	1.9			

¹⁾ Mittelwert der Windgeschwindigkeit während der Sonnenscheindauer

Tabelle 2.9 Mittlere Windgeschwindigkeit während der Sonnenscheindauer an Tagen mit extremer Globalstrahlungssumme und zugehöriges Tagesmaximum der Lufttemperatur, Zeitraum 1980-2000

Es empfiehlt sich daher, zur Abschätzung extremer Temperaturbeanspruchungen entweder den saisonalen Mittelwert anzusetzen oder auf der sicheren Seite liegend 1,5m/s, womit die mittägliche Windgeschwindigkeit zu niedrig und die nächtlichen Beruhigung zu hoch abgeschätzt wird.

Zur ideellen Beschreibung eines Tagesganges der Windgeschwindigkeit schlägt [123] ein Modell vor, welches die Geschwindigkeit aus der Summe eines und eines parabelförmigen Anteiles darstellt. In Analogie zum idealisierten Modell der Lufttemperatur mit Gleichung (2.86) wird jedoch ein flexiblerer Kosinus-Ansatz vorgeschlagen, der die maximale Windgeschwindigkeit am Tag und die mitternächtlichen Geschwindigkeiten einbezieht (Abbildung 2.29). Somit kann auch hier ein kontinuierliches mehrtägiges Szenario entwickelt werden.

2.9 Verwendung von Klimamessdaten

Mit der theoretischen Beschreibung der klimatischen Randbedingungen ist es möglich, alle Einwirkungskomponenten situationsbezogen zu parametrisieren. Damit können aussagekräftige Parameterstudien durchgeführt werden, welche eine gute Einschätzung des Temperaturverhaltens von Brückenquerschnitten ermöglichen und den Einfluss verschiedener Systemparameter aufzeigen. Wegen den komplexen Wechselbeziehungen aller Klimaelemente ist die Aufstellung von Einwirkungsparametern zur Ermittlung charakteristischer Temperaturfelder aus dreierlei Hinsicht problematisch. Die Alternative besteht in der Anwendung gemessener Klimadatenverläufe (Abbildung 2.30).

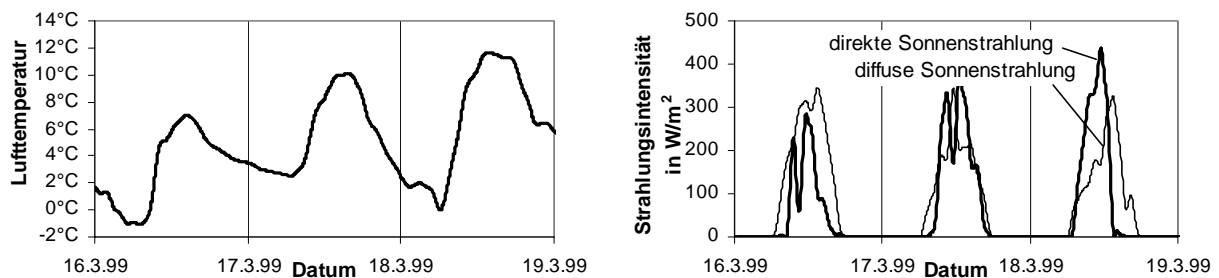


Abbildung 2.30 Beispiel: drei gemessene Tagesgänge von Lufttemperatur und Sonnenstrahlung

Bei der Anwendung idealisierter Klimadatenverläufe ist zu bedenken:

- 1) Für jede klimatische Einwirkungskomponente lassen sich durch statistische Auswertungen Mittel- und Extremwerte für die täglichen Schwankungen oder Minima und Maxima bestimmen. Fest steht aber auch, dass alle diese Komponenten nicht gleichzeitig Extremwerte annehmen, sich teilweise sogar ausschließen. Wegen der eingangs beschriebenen „Filterwirkung“ der Bauwerke kann nicht postuliert werden, welche Einwirkungskombination in welcher zeitlichen und quantitativen Ausprägung für die Temperaturreaktion des Bauwerkes ungünstig ist. Hinzu kommt, dass die jeweils unterschiedlichen Bauweisen (Stahl-, Stahlverbund- und Massivbrücken) ein unterschiedliches Temperaturverhalten zeigen. Beispiele für Klimadatenzusammenstellungen finden sich in Tabelle 2.8, weiterhin sei aber auch auf [46], [58] und [92] verwiesen.
- 2) Die numerische Berechnung von Temperaturfeldern erfordert eine Ausgangstemperierung zum Zeitpunkt $t=0$. Erst nach einer numerisch „mehrtägigen“ Einschwingzeit sind

auswertbare Temperaturverteilungen verfügbar. Werden nun idealisierte, auf Fraktilwerten bzw. Mittelwerten basierende Randbedingungen gewählt, erhält man eine rechnerische Bauwerksreaktion aus einer theoretisch unendlichen Abfolge der angenommenen extremen Wettersituation. Dies widerspricht jedoch dem realen Einwirkungsprozess.

- 3) Eine Ermittlung von repräsentativen Temperaturbeanspruchungen mit konkreter Widerkehrperiode ist mit diesen Berechnungsergebnissen nicht schlüssig möglich.

Zur Erfassung sowohl saisonaler Unterschiede der Temperaturbeanspruchungen als auch deren Zufallseigenschaften ist daher die Simulation von Temperaturfeldern mittels gemessener Klimadaten erforderlich. Diese müssen über einen mehrjährigen Zeitraum kontinuierlich vorliegen. Die kleinste praktikable Abtastrate von Klimadaten liegt bei 60 Minuten. Zur praktischen Anwendung stehen in dieser Arbeit die in Tabelle 2.10 aufgeführten zwei Datenreihen zur Verfügung.

	Wetterstation Garching des Meteorologischen Instituts der LMU München, [74]	Wetterstation Osnabrück des DWD, [76]
Kurzbezeichnung	GAR1	OS1
Standort	Garching 48:16N 11:41O 481müNN	Osnabrück 52:15N 08:03O 95müNN
Zeitraum	01.01.1989 – 31.12.1997 (9 Jahre)	01.05.1997 – 30.06.2000 (3 Jahre)
Klimakomponenten	Globalstrahlung, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit	Globalstrahlung, Diffusstrahlung, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit
Samplerate	1 Stunde	1 Stunde

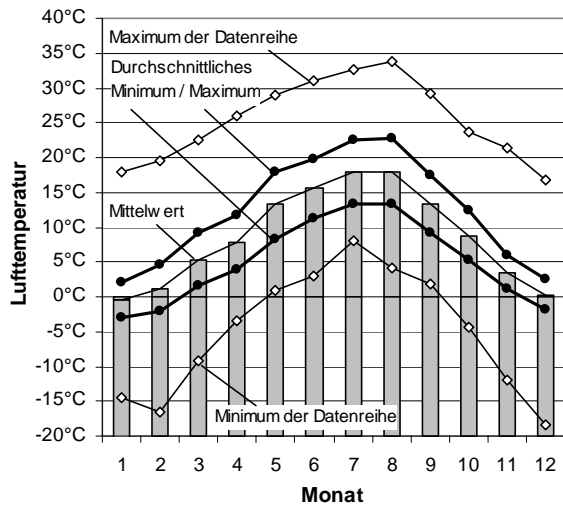
Tabelle 2.10 Verwendete Klimadatenreihen für Langzeitsimulationen

Die Rohdaten waren zunächst aufzubereiten, da durch Messausfälle abschnittsweise keine Messwerte vorlagen. Dies betrifft insbesondere die Zeitreihe GAR1 [60]. Für eine Temperaturfeldberechnung war die Ersetzung der fehlenden Messdaten durch sinnvolle (i.d.R. splineangepasste) Näherungswerte notwendig.

Zusätzlich standen Informationen aus weiteren Auswertungen zur Verfügung, die allerdings nicht für Langzeitsimulationen aufbereitet werden konnten: [18], [40], [45], [124]. Von der Messstation des Meteorologischen Instituts der Universität Hannover [77] lagen die täglichen Lufttemperaturminima und Extrema des Zeitraums 1951 bis 2000 vor. Zur Untersuchung des Emissionskoeffizienten der langwelligen atmosphärischen Gegenstrahlung im Abschnitt 2.5.7 wurden über den Zeitraum 11/1999 bis 02/2001 minutliche Messwerte des Meteorologischen Instituts der LMU München aufgezeichnet. Diese Datenreihe GAR2 umfasst die Globalstrahlung, die Lufttemperaturen in verschiedenen Höhen über dem Untergrund, Windgeschwindigkeit, Bodenoberflächentemperatur und die langwellige Wärmestrahlung der Atmosphäre. Aufgrund mehrerer mehrtägiger Unterbrechungen konnten diese Daten nicht für eine Langzeitsimulation aufbereitet werden.

Darüber hinaus standen die in [59] aufgeführten Klimadaten zur allgemeinen Auswertung zur Verfügung. Diese Daten umfassen von zwölf über Deutschland verteilten Wetterstationen die stündlichen Messwerte von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Diffusstrahlung über den Zeitraum 1980-2000. Eine Stationsaufstellung findet sich in Anhang A.3.

Zeitreihe GAR1(01.01.1989 – 31.12.1997)



Zeitreihe OS1(01.05.1997 – 30.06.2000)

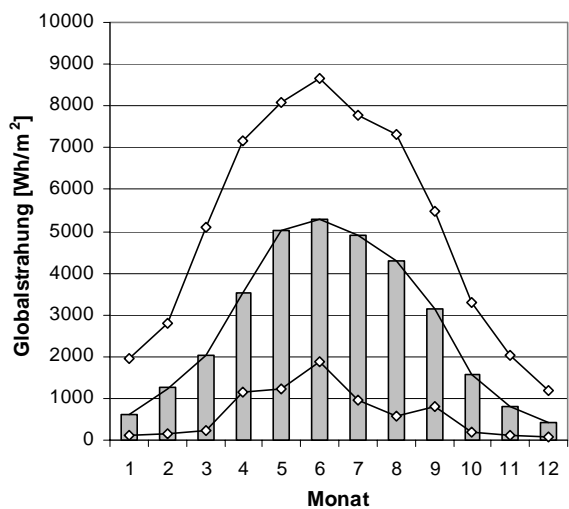
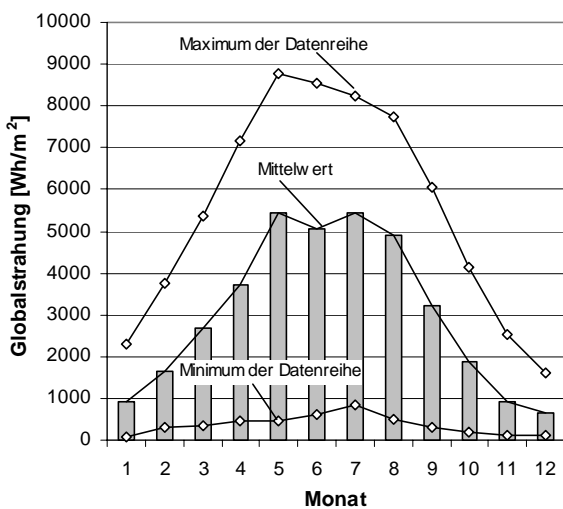
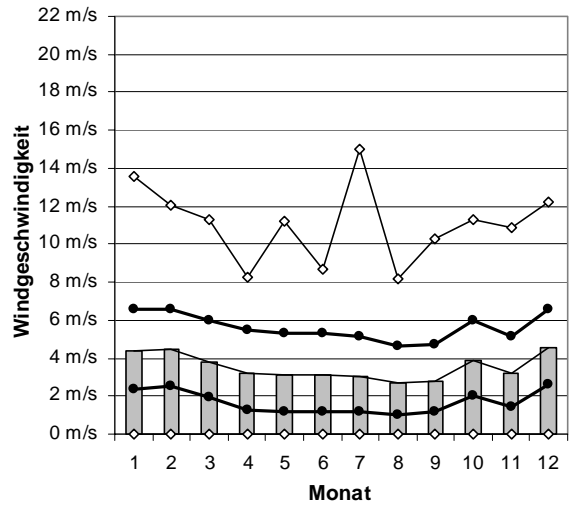
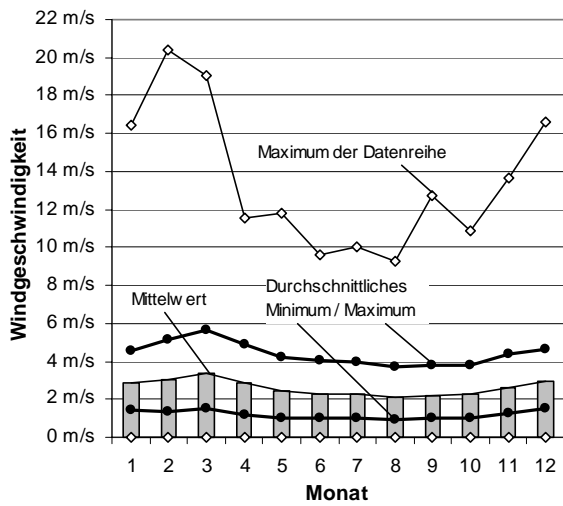
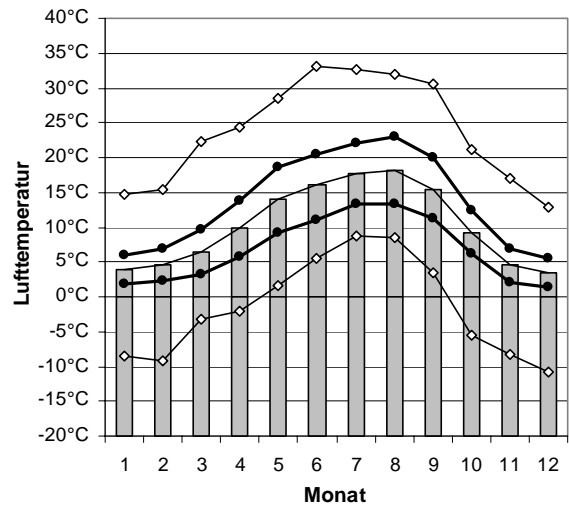


Abbildung 2.31 Monatliche Extrem- und Mittelwerte der Klimadatenreihen GAR1 und OS1, tabelliert in Anhang A.1

2.10 Resamplingverfahren

Langzeittemperaturberechnungen erfordern ununterbrochene Klimadatenverläufe. Zur Schließung von Messdatenlücken werden die oben dargelegten idealisierten Klimadatenverläufe verwendet, wobei die verwendeten Eckparameter sich (i.d.R) an den mittleren saisonalen Wetterkenndaten orientieren. Gemessene Klimadaten liegen in der Regel als Summen-, Mittel- oder Extremwerte in Zeitintervallen von einer Stunde oder eines Tages bzw. als Jahreswert vor. Die numerische Simulation von Temperaturfeldern als Zeitschrittverfahren erfordert Eingangsgrößen mit einer Zeitschrittgröße von maximal 20 Minuten. Dies macht ein Resampling der Daten erforderlich. Die maximale Samplerate sollte eine Stunde nicht überschreiten. Die Stundenwerte liegen für Temperaturmesswerte sowie die Windgeschwindigkeit meist als Mittelwert vor, Strahlungsintensitäten werden in der Regel als Stundensummen aufgezeichnet.

Eine lineare Interpolation zwischen stündlichen Werten würde zu einer Verringerung der Schwankungsbreite der Klimadaten führen, da die Mittelwertangabe ja impliziert, dass im zugrunde gelegten Zeitabschnitt Werte ober- und unterhalb des Mittelwertes vorliegen mussten. Eine geringfügige Verbesserung ergibt sich durch eine Spline-Interpolation.

Aus den genannten Gründen wurde ein Resampling-Verfahren ausgearbeitet, welches die Mittelwertforderung einhält. Alle kurzzeitigeren Abkühlungs- und Erhitzungseffekte sind – wie in einem Beispiel gezeigt werden kann – nicht reproduzierbar und bedürften einer höheren Messdatendichte.

Klimadatenfunktion K

Zur Ermittlung von Zwischenwerten mit Zeitschrittwerten von weniger als einer Stunde wurde eine polynomische Ansatzfunktion 2. Grades verwendet, welche den Klimadatenverlauf über einen Zeitraum von einer Stunde darstellen soll:

$$K_i(t) = k_{1,i} \cdot t^2 + k_{2,i} \cdot t + k_{3,i} \quad \text{mit } t \in [t_a \dots t_e] \quad (2.87)$$

- $K_i(t)$ Ansatzfunktion zur Approximierung von Klimadaten innerhalb der Stunde i
- $k_{j,i}$ Koeffizienten der Ansatzfunktion der Stunde i (j=1 .. 3)
- t Zeitkoordinate in [min]
- t_a, t_e Anfangs- und Endzeitpunkt der Stunde i ($t_a = -60$; $t_e = t_a + 60$ [min])

Entsprechend des quadratischen Ansatzes nach Gleichung (2.87) ergeben sich für jede betrachtete Stunde i drei Koeffizienten $k_{1,i}$ bis $k_{3,i}$. Weiterhin hat die Funktion nur in den Zeitgrenzen t_a bis t_e Gültigkeit.

Grundsätzlich gilt, dass gemessene Stundenwerte entweder das Geschehen der vorangegangenen Stunde repräsentieren ($t_a = -60$) oder aber den Zeitbereich von 30 Minuten vor bis 30 Minuten nach dem betreffenden Termin ($t_a = -30$).

Das sich für jede Stunde ergebende Polynom muss folgende Bedingungen erfüllen:

- a) Der Mittelwert des sich aus der Funktion ergebenden Klimadatenverlaufs muss gleich dem gemessenen Mittelwert \bar{k}_i bzw. der Stundensumme sein,
- b) der Anfangswert der Klimadatenfunktion einer Stunde muss mit dem Endwert der Klimadatenfunktion der vorangegangenen Stunde übereinstimmen und
- c) in gleicher Weise müssen an den Koppelpunkten die Steigungen der betreffenden Funktionen identisch sein.

Mit den genannten Forderungen ergibt sich für zwei aufeinander folgende Stunden zwischen den Polynomkoeffizienten folgender Zusammenhang:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{t_e^3 - t_a^3}{3(t_e - t_a)} & \frac{t_e^2 - t_a^2}{2(t_e - t_a)} & 1 \\ -2t_e & -1 & 0 & 2t_a & 1 & 0 \\ -t_e^2 & -t_e & 1 & t_a^2 & t_a & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_{1,i-1} \\ k_{2,i-1} \\ k_{3,i-1} \\ k_{1,i} \\ k_{2,i} \\ k_{3,i} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{k}_i \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.88)$$

Aus der Beziehung (2.88) lässt sich ein lineares Gesamtgleichungssystem aufbauen, dessen Lösung die 24x3 Polynomkoeffizienten eines ganzen Tages liefert. Der resampelte Tagesgang kann dann mit Gleichung (2.87) berechnet werden.

Dieses Verfahren führt zu einer guten Reproduktion der Klimadatenverläufe. Allerdings ist für Sonnenstrahlungs-Daten zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs und Sonnenuntergangs eine Modifikation erforderlich, welche sich aus zwei zusätzlich zu berücksichtigenden Forderungen ableitet. Einerseits ist die Sonnenstrahlungsintensität stets ein positiver Wert. Andererseits müssen Sonnenaufgangszeit und Sonnenuntergangszeit den täglichen Strahlungszeitraum begrenzen.

Die Klimadatenfunktionen K für die Sonnenstrahlung werden unter der gewählten Methode zum Zeitpunkt t_{SA} und t_{SU} „Schwingungen“ um die Nullachse erzeugen: Daher empfiehlt es sich, für diese Stunden eine lineare Interpolation anzuwenden, wodurch die Stundensumme in dieser Zeit zwar falsch eingeschätzt wird, was in den betreffenden maximal 60 Minuten zu vernachlässigen sein dürfte.

Bei der Ermittlung der Klimadatenfunktionen spielt es lediglich bei der Bestimmung von Sonnenaufgangs- und Sonnenuntergangszeitpunkt eine Rolle, welches Zeitsystem den Messdaten zugrunde liegt. Erst bei dem Zusammenfügen des kompletten Klimadatensatzes zur Temperatursimulation muss berücksichtigt werden, ob die Ausgangsdaten in der MEZ, MESZ, MOZ oder WOZ angegeben wurden. Es liegt nahe, die Klimadaten auf die mittlere Ortszeit der Messstation umzurechnen.

Beispiel

Mit einem Beispiel wird das beschriebene Verfahren verifiziert. Hierzu sind aus einer Klimadatenaufzeichnung die Größen Lufttemperatur und Sonnenstrahlung herangezogen worden.

Die zwei bewusst gewählten Tage weisen infolge heiterer Bewölkung kurzzeitige Schwankungen im Tagesverlauf auf. In einem ersten Schritt sind aus den minütlich vorliegenden Momentan-Messwerten 15-Minuten-Mittel gebildet worden. Diese Werte wurden wiederum zu 60-Minuten-Mittelwerten zusammengefasst und entsprechen damit Messdaten mit einer Samplerate von 60 Minuten.

Aus diesen Stundenmittelwerten konnten schließlich mit dem beschriebenen Resampling-Verfahren die Klimadaten rückgerechnet werden. Die Graphen der Abbildung 2.32 stellen die Tagesgänge der Lufttemperatur und der Globalstrahlung der gewählten Tage dar.

Es ist erkennbar, dass durch die Einführung der Mittelwertbedingung eine bessere Reproduktion der Klimadaten möglich ist als durch eine lineare Interpolation, die eine Verbindung der 60-Minuten-Mittelwerte darstellte. In Zeiträumen mit kontinuierlichem Verlauf ist die Übereinstimmung mit dem ursprünglichen Klimadatenverlauf sehr gut. Wie es sich jedoch am zweiten Tag des dargestellten Globalstrahlungsverlaufes zeigt, wird aber auch deutlich, dass kurzzeitigere Schwankungen nicht nachgebildet werden können.

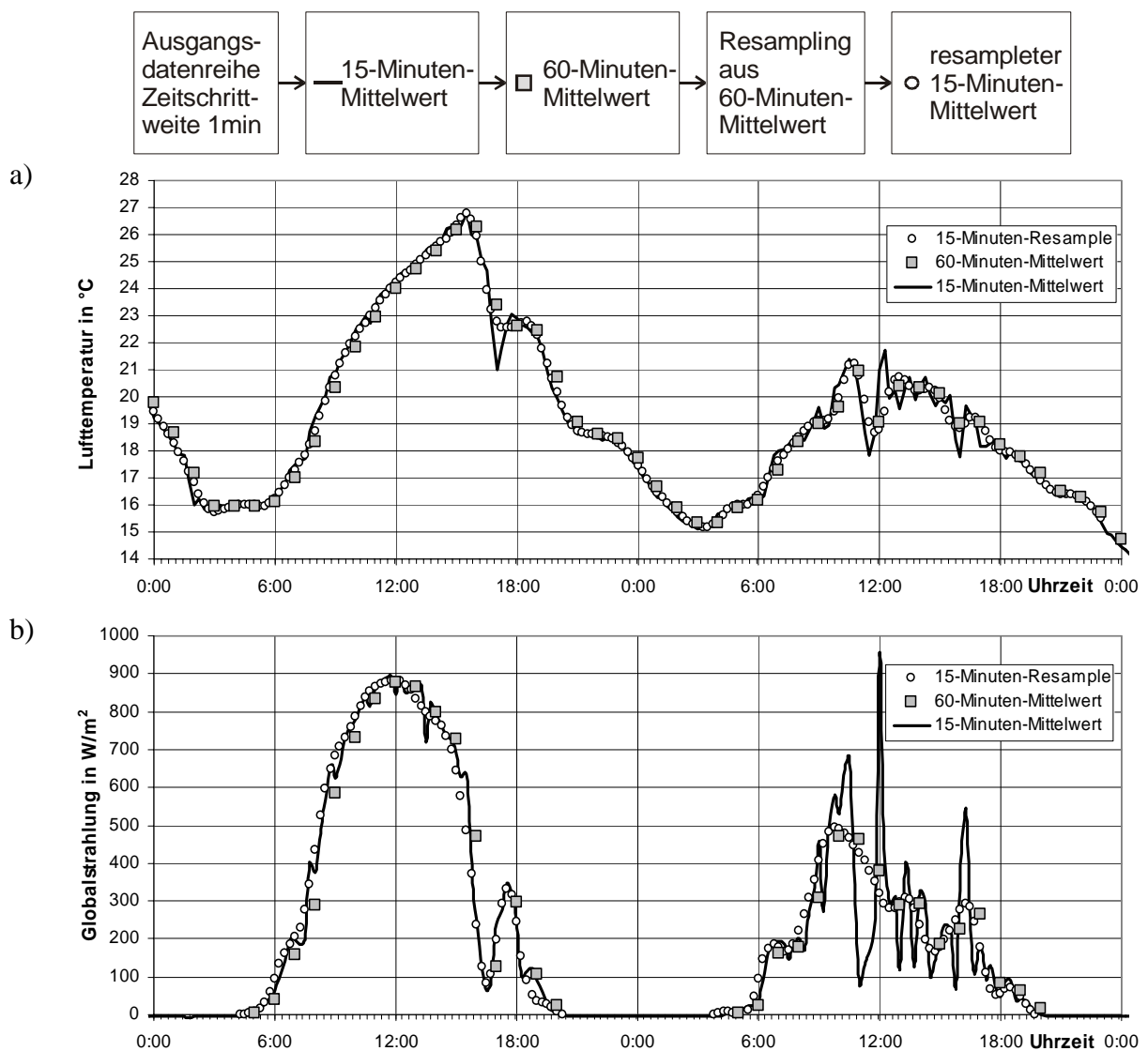


Abbildung 2.32 Resampling von Messwerten aus Stundenmittelwerten; Gegenüberstellung von Messwerten und Resampling-Werten; a) Lufttemperatur b) Globalstrahlung

3 Zerlegung nichtlinearer Temperaturfelder

3.1 Allgemeines

Die Analyse klimatisch bedingter Temperaturfelder dient letztlich der Ermittlung von Bauwerksreaktionen also Verformungen, Spannungen und Kräften. Diese Auswirkungen sind Resultat der indirekten Einwirkungskomponente Temperatur. Aus den berechneten nichtlinearen Temperaturfeldern lassen sich die resultierenden Bauwerksreaktionen mit den Hilfsmitteln der Mechanik bestimmen. Unter der Voraussetzung, dass sowohl die Temperaturen im Querschnitt unabhängig von den Verformungen als auch die eingesetzten isotropischen Materialien uneingeschränkt elastisch sind. Ist der Spannungs- und Verformungszustand infolge Temperatureinwirkungen durch Auflösung der elastischen Gleichgewichts- und Spannungsdehnungsbeziehungen zu bestimmen. Grundlegend hierfür sind die Spannungsdehnungsbeziehungen unter Berücksichtigung von Temperaturänderungen.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E^{-1} & -\mu \cdot E^{-1} & -\mu \cdot E^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ -\mu \cdot E^{-1} & E^{-1} & -\mu \cdot E^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ -\mu \cdot E^{-1} & -\mu \cdot E^{-1} & E^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu)}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu)}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu)}{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} + \alpha_T \cdot (\vartheta - \vartheta_0) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Als numerisches Instrument ist hierfür die Finite-Elemente-Methode einsetzbar, einschließlich der Berücksichtigung der nichtlinearen Temperaturverteilung über den gesamten Querschnitt [30]. Die so errechneten Bauwerksreaktionen enthalten integral alle mechanischen Temperatureinwirkungen auf das Bauwerk. Wegen der steten Veränderung der Temperaturfelder ist allerdings eine Auswahl „ungünstiger“ Erwärmungszustände zu treffen, da eine parallele elastostatische Analyse aller Zeitschrittergebnisse aus der Temperaturfeldberechnung einen hohen Rechenaufwand nach sich zöge. Wegen der verschiedenartigen Auswirkungen (Längsausdehnung, Zwangskräfte, Lagerverschiebung, örtliche Spannungen etc.) ist eine solche Auswahl nicht ohne quantitative Kenngrößen möglich.

Alternativ besteht die Möglichkeit der Zerlegung der berechneten Temperaturfelder in mehrere idealisierte Temperaturanteile, welche entweder einer konkreten mechanischen Wirkung zugeordnet werden (→ Abbildung 3.1) und/oder einer realitätsgetreueren Repräsentation des nichtlinearen Erwärmungszustandes dienen (→ Abbildung 3.2). Entscheidender Vorteil der Temperaturfeldzerlegung ist, dass für die Auswertung von Langzeit-Temperaturfeldsimulationen der Informationsgehalt reduziert wird auf eine begrenzte Zahl von idealisierten Temperaturanteil-Zeitreihen. Diese Zeitreihen können in einem Folgeschritt einer statistischen Extremwertanalyse zugrunde gelegt werden. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass alle idealisierten Temperaturanteile gleichzeitig wirken. Extremwerte der einzelnen

Temperaturanteile treten dabei i.d.R. nicht gleichzeitig auf [107]. Zudem muss bedacht werden, dass eigentlich nicht die charakteristischen Extremwerte der Temperatureinwirkungen sondern Extremwerte der Bauwerksreaktionen gesucht sind. Da Temperatur-Einwirkungen aber stets durch Temperaturkenngrößen angegeben werden, muss deshalb neben der Zerlegung eines Temperaturfeldes und der anschließenden Ermittlung charakteristischer Extremwerte eine Kombinationsregel alle Temperaturkomponenten wieder zusammenfassen.

Im Brückenbau wird üblicherweise ein konstanter Temperaturanteil ΔT_N , ein linear horizontaler bzw. vertikaler Temperaturunterschied ΔT_{MZ} und ΔT_{MY} ausgewertet (Abbildung 3.1). Diese bewirken eine Längenänderung sowie eine horizontale bzw. vertikale Bauwerksverkrümmung. Hinsichtlich der Indizierung in der gegenwärtigen Normung ist eine Inkonsistenz in der Indizierung festzustellen, nämlich dass der Temperaturunterschied ΔT_{MZ} eine Bauwerksverkrümmung analog eines Biegemomentes M_Y verursacht und ΔT_{MY} bei einer Verformungsbehinderung Zwangsmomente M_Z bewirkt.

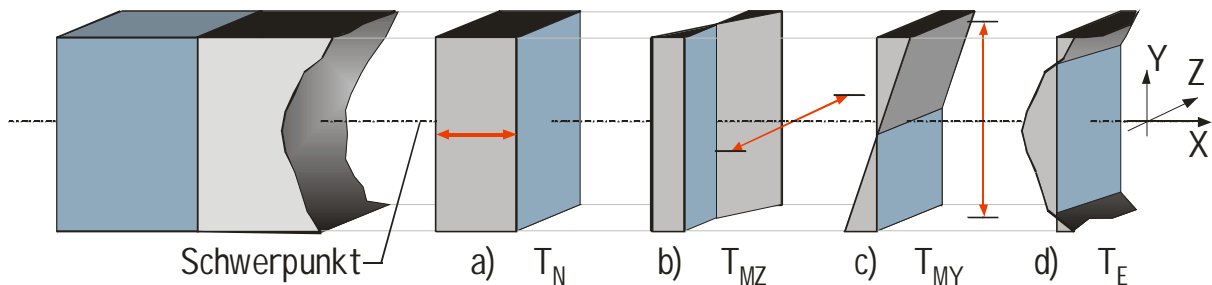
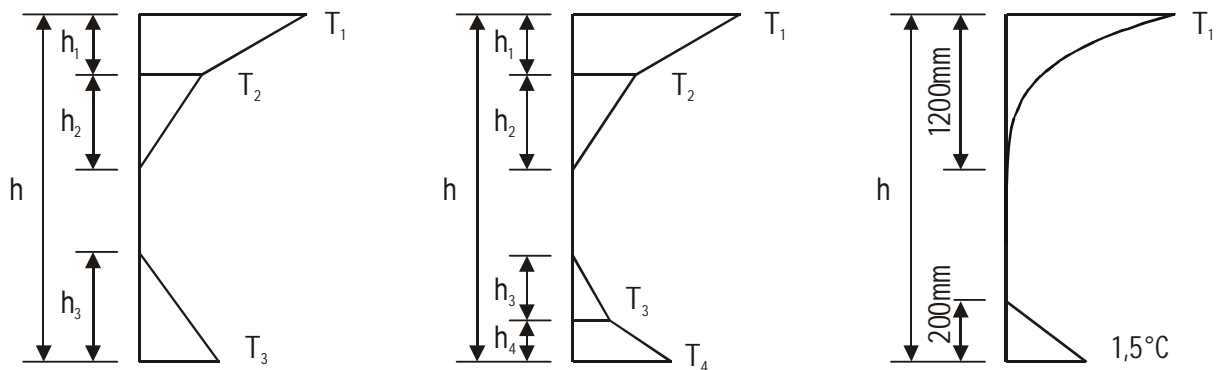


Abbildung 3.1 Aufteilung eines Temperaturprofils in vier Anteile nach [15], [22]

- (a) Konstanter Temperaturanteil ΔT_N ;
- (b) linear veränderlicher Temperaturanteil in der x-z-Ebene ΔT_{MZ} ;
- (c) linear veränderlicher Temperaturanteil in der x-y-Ebene ΔT_{MY} ;
- (d) Nicht-lineare Temperaturverteilung ΔT_E

Weitere normativ verwendete Idealisierungen von Temperaturzuständen sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Diese orientieren sich näher an dem tatsächlichen vorhandenen (vertikalen) Temperaturprofil als an der mechanischen Wirkung, wenngleich sie wie beabsichtigt mit dem vertikalen Temperaturunterschied korrelieren.



a) England [10]

b) Deutschland [15], [22]

c) Neuseeland [86]

Abbildung 3.2 Beispiele normativ idealisierter Temperaturfelder [10], [15], [22], [86]

Im Gegensatz zu Brückenbauwerken des Straßen- und Eisenbahnbaus unterscheiden sich die Kanalbrücken der Wasserstraßen durch die großflächigen Bauwerksabmessungen und den ausschließlich trogförmigen Querschnitt mit geneigten oder senkrechten Trogwänden. Ein Ansatz klassischer Ersatztemperaturverteilungen für den Gesamtquerschnitt idealisiert die tatsächlich auftretenden Temperaturverteilungen zu stark. Hieraus folgt die Forderung, für herausgelöste Teilstrukturen Temperaturverteilungen anzugeben. Abbildung 3.3 zeigt für eine Kanalbrücke mit geneigten Trogwänden eine Zusammenfassung von Flächenbereichen gleichartiger Temperaturbelastung, wie sie für eine idealisierte Beschreibung des Temperatureinwirkungszustandes in [64] gewählt wurde.

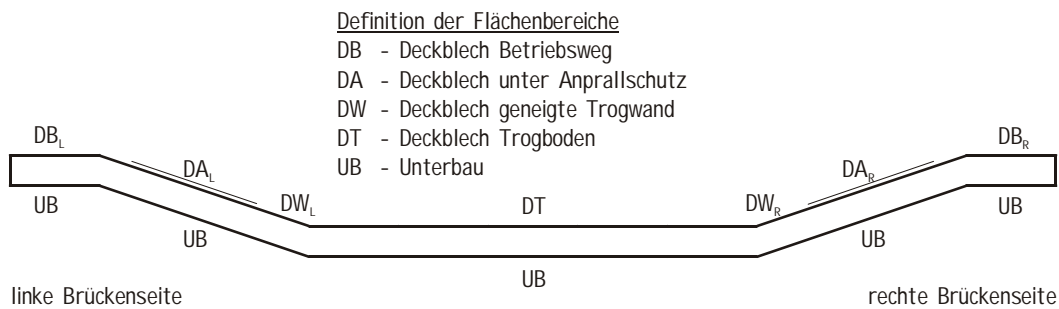


Abbildung 3.3 Definition gleichartiger Querschnittsbereiche einer Kanalbrücke mit geneigten Trogwänden, [64]

Aufgrund der variablen Anforderungen an idealisierte Temperaturfeldern müssen durch ein in sich schlüssiges Berechnungsverfahren beliebig geformte Ersatztemperaturfelder aus den nichtlinearen Temperaturverteilungen extrahiert werden können, um die Temperaturfelder aus numerischen Langzeitsimulationen zielorientiert zu idealisieren. Aufbauend auf dem üblichen Verfahren der Temperaturfeldzerlegung ([22]) wird daher eine allgemeine Zerlegungsvorschrift auf der Basis von Formfunktionen aufbereitet.

3.2 Aufstelltemperatur

Jedes Volumenelement eines Brückenbauwerkes dehnt sich im Falle freier Verformungsmöglichkeit bei einer Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ um das Maß ε aus, was mit der grundlegenden Proportionalitätsbeziehung (3.2) formuliert wird.

$$\varepsilon = \alpha_T \cdot \Delta\vartheta = \alpha_T \cdot (\vartheta_t - \vartheta_{t=0}) \quad (3.2)$$

Darin gibt der Wärmeausdehnungskoeffizient α_T an, welche Dehnung ε sich pro 1K Temperaturänderung einstellt. Von grundsätzlicher Bedeutung ist für eine Temperaturdehnung die Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ gegenüber einem Ausgangszustand $\vartheta_{t=0}$, weshalb die alleinige Angabe eines Temperaturfeldes nicht zur Beschreibung einer Temperaturbeanspruchung genügt: Ein Querschnitt besitzt ursprünglich den Temperaturzustand $T(t=0)$ und ist zu einem späteren Zeitpunkt $t > 0$ auf $T(t)$ eintemperiert. Weist der Querschnitt in der Folgezeit wieder den Temperaturzustand des Ausgangszustandes auf, so sind alle temperaturbedingten Dehnungen gleich Null, und der Bauwerkszustand entspricht – aus Sicht der Temperaturbeanspruchungen – dem Ursprungszustand.

Diese Aussage macht deutlich, dass Temperaturbeanspruchungen stets an einen Ausgangszustand gebunden sind. Dieser ist nicht im vornherein eindeutig definiert, da jedes Bauwerk in mehreren Prozessschritten zusammengefügt wird und in dieser Zeit wiederum zeitlich veränderliche Temperatureinwirkungen auftreten.

Im Brückenbau wird üblicherweise eine Referenztemperatur verwendet [14], [17], [22], in der das Bauwerk seine Sollage einnimmt und bezüglich der alle weiteren ständigen und veränderlichen Lasten aufgebracht werden. Es ist anzunehmen, dass die übliche Annahme von $+10^{\circ}\text{C}$ mit der durchschnittlichen Lufttemperatur in Deutschland begründet ist, welche bei ca. $8,3^{\circ}\text{C}$ liegt. Die tatsächliche Aufstelltemperatur eines Brückenbauwerkes hängt allerdings von saisonalen und tageszeitlichen Faktoren ab [44], [66], [95], [117]. Die Kenntnis der Aufstelltemperatur spielt beispielsweise bei der Festsetzung von verschieblichen Brückenlagern eine wesentliche Rolle. Diese müssen so eingestellt werden, dass die Brücke bei einer theoretischen Temperierung auf die Referenztemperatur die geplante Position und Form hat [63], [66]. In [117] wird in diesem Zusammenhang ein simultanes Vorgehen von Temperaturmessungen und Temperaturfeldberechnungen zur exakten Voreinstellung von Lager- und Übergangskonstruktionen beschrieben.

Um die Extraktion idealisierter Temperaturfelder von diesem Ausgangszustand zu entkoppeln, ist die Angabe der Faserdehnung bzw. Temperaturänderung gegenüber der Temperatur 0°C oder auch 0 K sinnvoll.

Da der Temperaturpunkt 0°C leichter verständliche Maßzahlen liefert, empfiehlt es sich, die Bauwerksreaktionen gegenüber einem 0°C – Referenzquerschnitt zu quantifizieren. Der Anteil aus dem „Aufstell-Temperaturfeld“ kann damit losgelöst durch die fiktive Ausgangstemperierung aller Fasern auf 0°C berücksichtigt werden. Gleichung (3.2) wird dann zu:

$$\varepsilon = \alpha_T \cdot (T(t) - 0) + \alpha_T \cdot (0 - T(t=0)) = \alpha_T \cdot (T(t) - T(t=0)) \quad (3.3)$$

Zur Bestimmung der Bauwerksreaktionen sind daher zwei Schritte notwendig: 1.) die Bestimmung des maßgeblichen Aufstelltemperaturfeldes und 2.) der charakteristischen Temperaturbeanspruchungen gegenüber einem 0°C -Referenzquerschnitt. Die Bestimmung der tatsächlichen Aufstelltemperatur ist stark an den Montageprozess und die vorherrschenden klimatischen Einwirkungen gebunden [44], [66], [117]. Die Ermittlung der Aufstelltemperatur ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

3.3 Konzept der Formfunktion

Mit einer Zerlegung nichtlinearer Temperaturfelder soll es ermöglicht werden, für konkrete Fragestellungen aus der ungleichmäßigen Temperaturverteilung Intensitätskennzahlen herauszufiltern, die eine gesuchte thermische oder mechanische Wirkung hervorrufen. Dabei existiert jeweils eine problemorientierte Grund-Temperaturverteilung über den Querschnitt, die mit einer Intensitätskennzahl multipliziert die extrahierte Temperatureinwirkung wiedergibt. Dies kann am Beispiel eines gleichmäßig erwärmten Verbundbrückenquerschnitts veranschaulicht werden: Die Temperaturverteilung über den Querschnitt ist wie gewählt konstant.

Da i.d.R. $\alpha_{T,Stahl} \neq \alpha_{T,Beton}$ ist, sind jedoch die Temperaturdehnungen in Stahl und Beton unterschiedlich. Eine Temperaturverteilung mit der Folge einer konstanten Dehnungsverteilung erfordert im Beton eine um den Faktor $\alpha_{T,Stahl}/\alpha_{T,Beton}$ vergrößerte Erwärmung. Die effektive Längenänderung des Verbundträgers hängt zusätzlich von den Flächenverhältnissen und den E-Moduli ab. Aus diesem Grunde ist bei der Zerlegung von Temperaturfeldern zwischen den folgenden drei Arten zu unterscheiden:

- a) Temperaturbezogene Temperaturfelder (Zerlegung nach effektiven Temperaturen)
- b) Dehnungsbezogene Temperaturfelder (Zerlegung nach Dehnungen in eine Richtung)
- c) Schnittgrößenbezogene Temperaturfelder (Zerlegung nach Längsnormalspannungen)

Ausgangspunkt der Aufspaltung nichtlinearer Temperaturfelder in skalierbare Anteile ist der Erwärmungszustand jeder Querschnittsfaser des als prismatisch angenommenen Brückenquerschnittes. Dieser wird dargestellt durch das augenblickliche ebene Temperaturfeld $T(y,z)$. Die Grundform einer herauszufilternden Temperaturverteilung wird durch eine Formfunktion $\Psi(y,z)$ gegeben, die für jede Querschnittsfaser einen Formwert enthält. Im einfachsten Falle ist $\Psi(y,z)=1$. Die Formfunktionen $\Psi(y,z)$ sind derart zu definieren, dass sie mit einem Skalierfaktor DT_Ψ multipliziert die idealisierte Temperaturverteilung $T_\Psi(y,z)$ widerspiegelt (Gleichung (3.4)). DT_Ψ ist dabei der idealisierte Temperaturanteil und enthält die komprimierte Information des augenblicklichen Temperaturzustandes $T(y,z)$ mit der Temperaturverteilungsform $\Psi(y,z)$.

$$T_\Psi(y, z) = DT_\Psi \cdot \Psi(y, z) \cdot \frac{1}{f_\Psi(y, z)} \quad (3.4)$$

Der in Gleichung (3.4) enthaltenen Faktor $f_\Psi(y,z)$ ist dimensionslos und folgendermaßen definiert:

a) Temperaturbezogenes Temperaturfeld: $f_\Psi^{(T)}(y, z) = 1 \quad (3.5a)$

b) Dehnungsbezogenes Temperaturfeld: $f_\Psi^{(\epsilon)}(y, z) = \frac{\alpha_T(y, z)}{\alpha_{T,0}} \quad (3.5b)$

c) Schnittgrößenbezogenes Temperaturfeld: $f_\Psi^{(F)}(y, z) = \frac{\alpha_T(y, z)}{\alpha_{T,0}} \cdot \sqrt{\frac{E(y, z)}{E_0}} \quad (3.5c)$

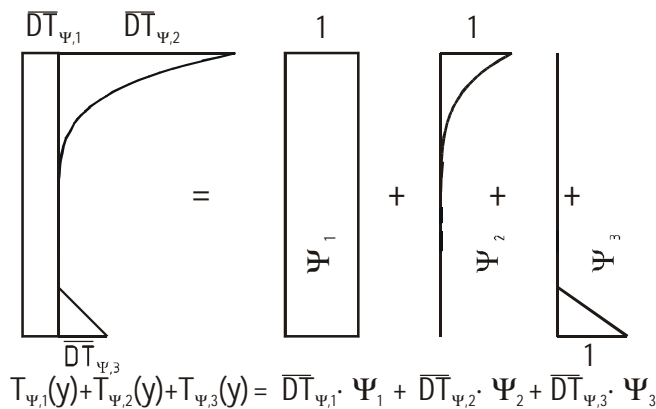


Abbildung 3.4
Beispiel von Formfunktionen zur Zerlegung eines Temperaturfeldes in Anlehnung an Abbildung 3.2c

Nach Einführung des Formmomentes I_Ψ entsprechend Gleichung (3.6)

$$I_\Psi = \int_{(A)} \Psi^2 dA \quad (3.6)$$

errechnet sich der Temperaturanteil DT_Ψ nach folgender Beziehung:

$$DT_\Psi = \frac{1}{I_\Psi} \int_{(A)} T(y, z) \cdot f_\Psi(y, z) \cdot \Psi(y, z) \cdot dA \quad (3.7)$$

Wird vom zugrunde gelegten Temperaturfeld $T(y, z)$ der Anteil $T_\Psi(y, z)$ abgezogen, so enthält man das verbleibende Resttemperaturfeld $T_{\text{Rest}, \Psi}$:

$$T_{\text{Rest}, \Psi} = T - T_\Psi \quad (3.8)$$

Dieses Resttemperaturfeld enthält keinen Anteil der Form Ψ mehr, was durch einfachen Beweis gezeigt werden kann. Gemäß Gleichung (3.7) und (3.8) gilt:

$$\begin{aligned} \frac{1}{I_\Psi} \int_{(A)} T_{\text{Rest}, \Psi} \cdot f_\Psi \cdot \Psi \cdot dA &= \frac{1}{I_\Psi} \int_{(A)} \left(T - DT_\Psi \cdot \Psi \cdot \frac{1}{f_\Psi} \right) \cdot f_\Psi \cdot \Psi \cdot dA \\ &= \frac{1}{I_\Psi} \int_{(A)} T \cdot \Psi \cdot f_\Psi \cdot dA - \frac{1}{I_\Psi} \int_{(A)} DT_\Psi \cdot \Psi^2 \cdot dA \\ &= DT_\Psi - DT_\Psi \cdot \frac{1}{I_\Psi} \int_{(A)} \Psi^2 \cdot dA \\ &= DT_\Psi - DT_\Psi \cdot \frac{1}{I_\Psi} \cdot I_\Psi \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Aus einem nichtlinearen Temperaturfeld $T(y, z)$ können mehrere verschiedene Temperaturanteile der Formfunktionen $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n$ extrahiert werden. Diese sind paarweise linear unabhängig von einander, wenn gilt:

$$\frac{1}{I_{\Psi_i}} \int_{(A)} T_{\Psi_i, k} \cdot f_{\Psi_i, i} \cdot \Psi_i \cdot dA = \frac{1}{I_{\Psi_k}} \int_{(A)} T_{\Psi_i, i} \cdot f_{\Psi_i, k} \cdot \Psi_k \cdot dA = 0 \quad \text{mit } i \neq k \quad (3.10)$$

Für das Beispiel in Abbildung 3.4 gilt dies beispielsweise für die Formfunktionen Ψ_2 und Ψ_3 . Da jedoch der Mittelwert des parabelförmigen Anteils Ψ_2 größer als Null ist, sind Ψ_2 und Ψ_1 nicht orthogonal zueinander. Gleiches gilt für Ψ_1 und Ψ_3 . In diesen Fällen enthält der Temperaturanteil DT_{Ψ_i} Temperaturen, die der Form des Temperaturanteils DT_{Ψ_k} entsprechen, d.h. bei der Extraktion eines Temperaturanteiles der Form Ψ_k aus einem Temperaturfeld T_{Ψ_i} ergibt sich ein von Null verschiedenes Ergebnis.

$$\begin{aligned}
 DT_{\psi,k}^i &= \frac{1}{I_{\psi,k}^{(A)}} \int T_{\psi,i} \cdot f_{\psi,k} \cdot \Psi_k \cdot dA \\
 &= \frac{1}{I_{\psi,k}^{(A)}} \int \left(DT_{\psi,i} \cdot \frac{1}{f_{\psi,i}} \cdot \Psi_i \right) \cdot f_k \cdot \Psi_k \cdot dA \\
 &= \frac{I_{\psi,ki}}{I_{\psi,k}} \cdot DT_{\psi,i}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

mit

$$I_{\psi,ki} = \int_{(A)} \frac{f_{\psi,k}}{f_{\psi,i}} \cdot \Psi_i \cdot \Psi_k \cdot dA \tag{3.12}$$

Für die gemischten Formmomente $I_{\psi,ki}$ nach Gleichung (3.12) gilt:

$$i \neq k: \quad I_{\psi,ik} \neq I_{\psi,ki} \qquad i=k: \quad I_{\psi,i} = I_{\psi,ii}$$

Wird ein ungleichmäßiges Temperaturfeld in mehrere Anteile zerlegt, so muss dieses bis auf einen nicht zerlegten Restanteil durch alle Temperaturanteile rekonstruiert werden können. Wegen der möglichen Überschneidung der Formfunktionen kann dies nicht durch die Summe $\sum_{i=1}^n T_{\psi,i}$ erfolgen, da die Temperaturfelder $T_{\psi,i}$ ($i=1..n$) wie beschrieben gegenseitige Anteile enthalten können. Mit dem Beweis in Gleichung (3.9) konnte gezeigt werden, dass mit der Bestimmung des Temperaturanteiles $DT_{\psi,i}$ nach Gleichung (3.7) aus dem Temperaturfeld die Form Ψ_i vollständig extrahiert wurde. Dieses (maximale) Maß $DT_{\psi,i}$ setzt sich aus der Summe der sog. „effektiven Anteile“ $\overline{DT}_{\psi,k}$ ($k=1..n$) bezüglich der Form Ψ_i zusammen:

$$DT_{\psi,i} = \sum_{k=1}^n \frac{I_{\psi,ik}}{I_{\psi,i}} \cdot \overline{DT}_{\psi,k} \tag{3.13}$$

Diese effektiven Temperaturinhalte $\overline{DT}_{\psi,k}$ werden über die Lösung des linearen Gleichungssystems (3.14) erhalten. Eine Rekonstruktion des zerlegten Temperaturfeldes erfolgt mit der Gleichung (3.15). Sind alle Komponenten $\overline{DT}_{\psi,k}$ im Sinne von Gleichung (3.10) voneinander linear unabhängig, so vereinfacht sich die Formbeiwertmatrix des nachstehenden Gleichungssystems zu einer Einheitsmatrix und es gilt $\overline{DT}_{\psi,k} = DT_{\psi,k}$.

$$\begin{Bmatrix} DT_{\psi,1} \\ DT_{\psi,2} \\ \vdots \\ DT_{\psi,n} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_{\psi,11}}{I_{\psi,1}} & \frac{I_{\psi,12}}{I_{\psi,1}} & \dots & \frac{I_{\psi,1n}}{I_{\psi,1}} \\ \frac{I_{\psi,21}}{I_{\psi,2}} & \frac{I_{\psi,22}}{I_{\psi,2}} & \dots & \frac{I_{\psi,2n}}{I_{\psi,2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{I_{\psi,n1}}{I_{\psi,n}} & \frac{I_{\psi,n2}}{I_{\psi,n}} & \dots & \frac{I_{\psi,nn}}{I_{\psi,n}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \overline{DT}_{\psi,1} \\ \overline{DT}_{\psi,2} \\ \vdots \\ \overline{DT}_{\psi,n} \end{Bmatrix} \tag{3.14}$$

$$T(y, z)_{idealisiert} = \sum_{i=1}^n \overline{DT}_{\psi,i} \cdot \Psi_i(y, z) \cdot \frac{1}{f_{\psi,i}(y, z)} \quad (3.15)$$

Die Differenz aus dem ursprünglichen Temperaturfeld und dem rekonstruierten Temperaturfeld ist der nicht durch die Formfunktionen $\Psi_{i=1..n}$ erfassbare Erwärmungszustand.

3.4 Basis-Formfunktionen

3.4.1 Temperaturbezogene Temperaturanteile DT_A , DT_Y , DT_Z

Eine temperaturbezogene Zerlegung nichtlinearer Temperaturfelder ist unabhängig von der Variabilität der Wärmedehn- bzw. Elastizitätseigenschaften der Querschnittsmaterialien. Sie stellt daher keinen direkten Bezug zu einer mechanischen Wirkung her. Ihr Einsatz beschränkt sich daher auf eine Komprimierung der Temperaturverteilung durch parametrisierbare Anteile (vgl. Abbildung 3.4).

Die drei Grundformen der Auflösung von Temperaturverteilungen sind linearisierte Formen: Die gleichmäßige Temperaturverteilung DT_A und die linear veränderlichen Temperaturverteilungen senkrecht zu den Querschnittshauptachsen DT_Y und DT_Z . Die zugehörigen Formfunktionen und Formmomente sind:

$$DT_A: \quad \Psi_A = 1 \quad I_{\Psi,A} = \int_{(A)} 1^2 \cdot dA \quad (3.16a)$$

$$DT_Z: \quad \Psi_Z = y - y_s \quad I_{\Psi,Z} = \int_{(A)} (y - y_s)^2 \cdot dA \quad (3.16b)$$

$$DT_Y: \quad \Psi_Y = z - z_s \quad I_{\Psi,Y} = \int_{(A)} (z - z_s)^2 \cdot dA \quad (3.16c)$$

Darin sind die Koordinaten y_s und z_s die Flächenschwerpunkte des Querschnittes. DT_A , DT_Z und DT_Y spiegeln die effektive durchschnittliche Querschnittstemperatur wieder sowie den Temperaturgradienten um die y-Hauptachse bzw. die z-Hauptachse. Praxisüblich ist die Verwendung von Temperaturunterschieden, die sich auf die Querschnittsbreite b und dessen Höhe h beziehen. Aus Gründen der Kompatibilität mit der Indizierung der normativ festgelegten Temperaturanteile (s. Seite 60) findet eine Vertauschung der Indizes Y und Z statt. Somit ergibt sich für symmetrische Querschnitte:

$$\begin{aligned} \text{mittlere Temperatur:} & \quad \Delta T_S = DT_A \\ \text{vertikale Temperaturdifferenz:} & \quad \Delta T_Y = DT_Z \cdot h \\ \text{horizontale Temperaturdifferenz:} & \quad \Delta T_Z = DT_Y \cdot b \end{aligned}$$

3.4.2 Dehnungsbezogene Temperaturanteile $DT_{\epsilon A}$, $DT_{\epsilon Y}$, $DT_{\epsilon Z}$

Damit die generalisierte Beziehung zwischen Wärmedehnung, Temperaturänderung und Wärmeausdehnungskoeffizient $\epsilon = \alpha_T \cdot \Delta T$ auch für Verbundquerschnitte gültig ist, müssen sich dehnungsbezogene Temperaturanteile auf einen festgelegte Bezugs- Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T,0}$ beziehen. Die Längsdehnungen und Krümmungen des prismatischen Brückenquerschnitts ergeben sich dann aus:

$$\varepsilon_x = \alpha_{T,0} \cdot DT_{\varepsilon A} \quad \kappa_y = \alpha_{T,0} \cdot DT_{\varepsilon Y} \quad \kappa_z = \alpha_{T,0} \cdot DT_{\varepsilon Z} \quad (3.17)$$

Der Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_{T,0}$ ist bei homogenen Querschnitten sinnvollerweise dem Ausdehnungskoeffizienten des Querschnittsmateriales gleichzusetzen. Bei Verbundquerschnitten muss ein Bezugswerkstoff gewählt werden. Für Stahlverbundbrücken bietet sich $\alpha_{T,0} = \alpha_{T,\text{Stahl}} = 1,2 \cdot 10^{-5} [1/\text{K}]$ an, da dieser gegenüber Beton einen weniger variablen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweist [13].

Unter Annahme der Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte schreibt sich der Temperaturdehnungszustand infolge einer zwängungsfreien Längsdehnung ε_x und der Krümmung κ_y und κ_z zu:

$$\varepsilon_x(y, z) = \varepsilon_x + \kappa_y \cdot (z - z_s) + \kappa_z \cdot (y - y_s) \quad (3.18)$$

Demnach muss die Extraktion über eine Transformation des Temperaturfeldes in ein Dehnungsfeld erfolgen. Beziehen sich die zu extrahierenden Anteile auf den Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T,0}$, folgt aus Gleichung (3.18):

$$\varepsilon_x(y, z) = \alpha_{T,0} \cdot (DT_{\varepsilon A} + DT_{\varepsilon Y} \cdot (z - z_s) + DT_{\varepsilon Z} \cdot (y - y_s)) \quad (3.18b)$$

Aus Gleichung (3.7) folgt:

$$\begin{aligned} DT_{\Psi} \cdot \alpha_{T,0} &= \frac{1}{I_{\Psi(A)}} \int (\alpha_T \cdot T) \cdot \Psi \cdot dA \\ DT_{\Psi} &= \frac{1}{I_{\Psi(A)}} \int T \cdot f_{\Psi}^{(\varepsilon)} \cdot \Psi \cdot dA \quad \text{mit} \quad f_{\Psi}^{(\varepsilon)}(y, z) = \frac{\alpha_T(y, z)}{\alpha_{T,0}} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Der Anteil des ebenen Dehnungszustandes lässt sich mit den Basis-Formfunktionen aus Abschnitt 3.4.1 berechnen. Der Einfluss der Wärmedehnung wird durch den Faktor $f_{\Psi}(y, z)$ berücksichtigt. Die Formfunktionen und die Formmomente für die dehnungsbezogenen Temperaturanteile sind identisch mit den temperaturbezogenen Formfunktionen (3.16a bis c) so dass gilt:

$$DT_{\varepsilon A}: \quad \Psi_{\varepsilon A} = 1 \quad I_{\Psi, \varepsilon A} = \int_{(A)} 1^2 \cdot dA \quad (3.20a)$$

$$DT_{\varepsilon Z}: \quad \Psi_{\varepsilon Z} = y - y_s \quad I_{\Psi, \varepsilon Z} = \int_{(A)} (y - y_s)^2 \cdot dA \quad (3.20b)$$

$$DT_{\varepsilon Y}: \quad \Psi_{\varepsilon Y} = z - z_s \quad I_{\Psi, \varepsilon Y} = \int_{(A)} (z - z_s)^2 \cdot dA \quad (3.20c)$$

$DT_{\varepsilon A}$, $DT_{\varepsilon Y}$ und $DT_{\varepsilon Z}$ bewirken eine Längsdehnung bzw. die Krümmung des Brückenoberbaus. Im Falle einer statisch bestimmten Lagerung verursachen diese Anteile keine Auflagerkräfte und damit verbundene Zwangsschnittgrößen aber auch keine interne Längsspannungen aus innerem Zwang. Alle nicht durch diese Anteile erfassten Temperaturen rufen bei Verbundquerschnitten bis auf einen Restanteil zusätzliche Längsdehnungen, Querschnittsverkrümmungen, Querschnittstorsion sowie Profilverformungen hervor.

3.4.3 Schnittgrößen-bezogene Temperaturanteile DT_N , DT_{MY} , DT_{MZ} und $DT_{M\omega}$

Im vorangegangenen Abschnitt sind drei linear unabhängige Temperaturanteile abgeleitet worden, die den ebenen Dehnungszustand des nichtlinearen Temperaturfeldes repräsentieren. Im Falle einer statisch bestimmten Lagerung treten wie beschrieben lediglich Verformungen und Dehnungen, nicht aber Längseigenspannungen auf. Folglich verbleiben alle spannungsverursachenden Temperaturen im Resttemperaturfeld. Zur Erfassung der integralen Längenänderung bzw. Bauwerksverkrümmung müssen deshalb die Dehnsteifigkeitsverhältnisse im Querschnitt berücksichtigt werden.

Die Definition Schnittgrößen-bezogener Temperaturanteile geht konform mit der normativen Verwendung in [15], [22]. Allerdings wird bei der Zerlegung die nichtlineare Spannungs-Dehnungsbeziehung des Werkstoffes Stahlbeton nicht berücksichtigt, da diese nur aus der Überlagerung von Temperaturdehnungen und Dehnungen aus Lasten anderer Herkunft erfassbar sind. Zudem wird die Querkontraktion (Gleichung (3.1), S. 59) vernachlässigt. Zur Anwendung dieses Zerlegungskonzeptes für schnittgrößenbezogene Temperaturanteile muss ein im Zug- und Druckbereich linearelastisches Material mit $\mu=0$ angenommen werden.

a) Normalkraft-affiner Temperaturanteil DT_N

In einem (gedanklich) beidseitig eingespannten Stab baut sich bei einer Temperaturveränderung eine Normalkraft N_T auf. Diese im Verbundschwerpunkt angreifende Kraft N_T verursacht eine gleichmäßige Dehnung ε_x , die der Temperatureausdehnung entgegengerichtet ist. Daher gilt:

$$N_T = \int_{(A)} \sigma_x(y, z) \cdot dA = \int_{(A)} \varepsilon_x \cdot E \cdot dA = \int_{(A)} (\alpha_T \cdot T) \cdot E \cdot dA \quad (3.21)$$

Mit der Formfunktion Ψ_N und dem zugehörigen Formmoment $I_{\Psi, N}$ sowie dem Faktor $f_{\Psi}^{(F)}$

$$\Psi_N = 1 \cdot \sqrt{\frac{E(y, z)}{E_0}} \quad I_{\Psi, N} = \int_{(A)} \left(\sqrt{\frac{E}{E_0}} \right)^2 \cdot dA = A_0 \quad (3.22)$$

$$f_{\Psi}^{(F)}(y, z) = \frac{\alpha_T(y, z)}{\alpha_{T,0}} \cdot \sqrt{\frac{E(y, z)}{E_0}}$$

gilt mit Verwendung des Bezugs-Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T,0}$ und dem Bezugs-E-Modul E_0 :

$$\begin{aligned} \frac{N_T}{E_0 A_0} = \varepsilon_x &= DT_N \cdot \alpha_{T,0} = \frac{1}{E_0 A_0} \int_{(A)} \alpha_T \cdot T \cdot E \cdot dA \\ DT_N &= \frac{1}{I_{\Psi, N}} \int_{(A)} \frac{\alpha_T}{\alpha_{T,0}} \cdot T \cdot \frac{E}{E_0} \cdot dA \\ &= \frac{1}{I_{\Psi, N}} \int_{(A)} T \cdot f_{\Psi}^{(F)} \cdot \Psi_N \cdot dA \end{aligned} \quad (3.23)$$

Wie sich zeigen lässt, hat der eingeführte Bezugs-E-Modul E_0 keinen quantitativen Einfluss auf die Größe des Temperaturanteiles DT_N und könnte prinzipiell entfallen. Wird bei homogenen Querschnitten $E_0=E(y,z)=\text{konst.}$ angesetzt, vereinfacht sich der Faktor f_ψ zu $f_\psi^{(F)}=1$, womit eine formale Übereinstimmung mit den temperatur- und dehnungsbezogenen Temperaturanteilen herbeigeführt wird.

b) Biegemoment-affine Temperaturanteile DT_{M_y} und DT_{M_z}

Analog zur Abspaltung des Normalkraft-affinen Temperaturanteiles lassen sich die dem Biegemoment affinen Temperaturanteile DT_{M_y} und DT_{M_z} ableiten. Für M_y gilt

$$M_y = \int_{(A)} \sigma_x \cdot (z - z_s) \cdot dA = \int_{(A)} \varepsilon_x \cdot E \cdot (z - z_s) \cdot dA = \int_{(A)} (\alpha_T \cdot T) \cdot E \cdot (z - z_s) \cdot dA \quad (3.24)$$

Die Koordinaten y_s und z_s beziehen sich auf den Schwerpunkt des Verbundquerschnittes. Mit der Formfunktion Ψ_M , dem zugehörigen Formmoment $I_{\Psi,MY}$

$$\Psi_{MY} = (z - z_s) \cdot \sqrt{\frac{E(y, z)}{E_0}} \quad I_{\Psi,MY} = \int_{(A)} \left(\sqrt{\frac{E}{E_0}} \cdot (z - z_s) \right)^2 \cdot dA = I_{y,0} \quad (3.25)$$

ist

$$\begin{aligned} \frac{M_y}{E_0 I_{y,0}} = \kappa_y &= DT_{MY} \cdot \alpha_{T,0} = \frac{1}{E_0 I_{y,0}} \int_{(A)} \alpha_T \cdot T \cdot (z - z_s) \cdot E \cdot dA \\ DT_{MY} &= \frac{1}{I_{\Psi,MY}} \int_{(A)} \frac{\alpha_T}{\alpha_{T,0}} \cdot T \cdot (z - z_s) \cdot \frac{E}{E_0} \cdot dA \\ &= \frac{1}{I_{\Psi,MY}} \int_{(A)} T \cdot f_\psi^{(F)} \cdot \Psi_{MY} \cdot dA \end{aligned} \quad (3.26)$$

Der Temperaturgradient DT_{M_z} berechnet sich durch sinngemäße Vertauschung der z-Koordinate durch die y-Koordinate.

c) Wölbordinaten-affiner Temperaturanteil DT_{M_ω}

Die logische Fortführung der schnittgrößenbezogenen Temperaturanteile führt zum Verwölbungs-Temperaturanteil DT_{M_ω} , welche mit dem Wölbmoment M_ω gekoppelt ist. Über die Wölbordinate $\omega(y,z)$ bzw. $\omega(s)$ bezüglich des Schubmittelpunktes ergibt sich die Formfunktion Ψ_ω nach Gleichung (3.28). Der Temperaturanteil DT_{M_ω} resultiert aus der konsequenten Anwendung der Gleichung (3.7) auf Seite 64.

$$M_\omega = \int_{(A)} \sigma_x \cdot \omega \cdot dA = \int_{(A)} \varepsilon_x \cdot E \cdot \omega \cdot dA = \int_{(A)} (\alpha_T \cdot T) \cdot E \cdot \omega \cdot dA \quad (3.27)$$

$$\Psi_{M\omega} = \omega \cdot \sqrt{\frac{E(y,z)}{E_0}} \quad I_{\Psi,M\omega} = \int_{(A)} \left(\sqrt{\frac{E}{E_0}} \cdot \omega \right)^2 \cdot dA = I_{\omega,0} \quad (3.28)$$

$$DT_{M\omega} = \frac{1}{I_{\Psi,M\omega}} \int_{(A)} T \cdot f_{\psi}^{(F)} \cdot \Psi_{M\omega} \cdot dA \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{M_{\omega}}{E_0 I_{\omega,0}} &= DT_{M\omega} \cdot \alpha_{T,0} = \frac{1}{E_0 I_{\omega,0}} \int_{(A)} \alpha_T \cdot T \cdot \omega \cdot E \cdot dA \\ DT_{M\omega} &= \frac{1}{I_{\Psi,M\omega}} \int_{(A)} \frac{\alpha_T}{\alpha_{T,0}} \cdot T \cdot \omega \cdot \frac{E}{E_0} \cdot dA \\ &= \frac{1}{I_{\Psi,M\omega}} \int_{(A)} T \cdot f_{\psi}^{(F)} \cdot \Psi_{M\omega} \cdot dA \end{aligned} \quad (3.30)$$

Zur Erfassung der Profilverformung und Querbiegebeanspruchung von Kaltwerken infolge nichtlinearer Temperaturverteilungen werden in [58] jeder Grundverschwenkung des Kaltwerkes Einheitsverwölbungsordinaten $\omega_p(y,z)$ zugeordnet. In einem dort als Temperaturbelastungsvektor bezeichneten Vektor werden die aus dem nichtlinearen Temperaturfeld extrahierten ω_p -affinen Temperaturanteile zusammengefasst. Diese Anteile lassen sich ebenfalls durch das obige Zerlegungsverfahren ermitteln. In [58] entsprechen sie dem Ausdruck $DT_{M\omega_p} \cdot I_{\Psi,M\omega_p}$ mit der Bestimmungsgleichung (3.30), wobei für ω die jeweilige Verwölbungsordinate ω_p einzusetzen ist.

d) Zusammenfassung

Für die schnittgrößenbezogenen Temperaturanteile gilt zusammenfassend:

$$DT_N: \quad \Psi_N = 1 \cdot \sqrt{\frac{E(y,z)}{E_0}} \quad (3.31a)$$

$$DT_{MY}: \quad \Psi_{MY} = (z - z_s) \cdot \sqrt{\frac{E(y,z)}{E_0}}, \quad DT_{MZ}: \quad \Psi_{MZ} = (y - y_s) \cdot \sqrt{\frac{E(y,z)}{E_0}} \quad (3.31b)$$

$$DT_{M\omega}: \quad \Psi_{M\omega} = \omega \cdot \sqrt{\frac{E(y,z)}{E_0}} \quad (3.31c)$$

Voraussetzung ist, dass y und z Hauptachsen des Querschnittes sind. Die praxisübliche Verwendung der schnittgrößenbezogenen Temperaturanteile beschränkt sich meist auf die Temperaturschwankung ΔT_N sowie die linearen Temperaturunterschiede ΔT_{MY} und ΔT_{MZ} . Aus Gründen der Kompatibilität mit der Indizierung der normativ festgelegten Temperaturanteile (s. Seite 60) findet eine Vertauschung der Indizes Y und Z statt. Somit ergibt sich für symmetrische Querschnitte:

Temperaturschwankung:	$\Delta T_N = DT_N$
Vertikaler Temperaturunterschied:	$\Delta T_{MY} = DT_{MZ} \cdot h$
Horizontaler Temperaturunterschied:	$\Delta T_{MZ} = DT_{MY} \cdot b$
Wölbtemperaturunterschied:	$\Delta T_{M\omega} = DT_{M\omega}$

3.4.4 Ableitung weiterer Temperaturfelder

Die vorangegangene Zerlegung nichtlinearer Temperaturfelder liefert eine elementare Komprimierung des Temperaturzustandes in wenige Kennwerte und damit die zahlenmäßige Datenbasis für eine statistische Auswertung. Durch zielgerichtete Aufschlüsselungen obiger idealisierter Temperaturanteile lassen sich weitere beanspruchungs-affine Anteile ableiten, welche in dieser Arbeit allerdings nicht weiter verfolgt werden. Folgendes Beispiel veranschaulicht die Extraktion desjenigen Temperaturfeld-Anteiles, der in Verbundbrücken in der Verbundfuge aus innerem Zwang temperaturbedingte Schubbeanspruchungen hervorruft.

$$T(y, z)_{\text{Zwang}} = \frac{\overline{DT}_N \cdot \Psi_N(y, z) + \overline{DT}_{M_y} \cdot \Psi_{M_y}(y, z)}{f^{(F)}} - \frac{\overline{DT}_{\epsilon_A} \cdot \Psi_{\epsilon_A}(y, z) + \overline{DT}_{\epsilon_y} \cdot \Psi_{\epsilon_y}(y, z)}{f^{(\epsilon)}} \quad (3.32)$$

Die Schubbeanspruchungen setzen sich aus äußeren und inneren Zwangsbeanspruchungen zusammen. Bei statisch unbestimmten Trägern rufen vertikale Temperaturgradienten DT_{M_z} an den Auflagern vertikale Zwangsauflagerkräfte und damit in Trägerlängsrichtung Querkräfte und Biegemomente hervor. Bei statisch bestimmter Brückenlagerung entfallen diesen äußere Zwangskräfte. Unabhängig davon treten stets auch innere Zwangskräfte auf, welche aus dem unterschiedlichen Temperaturdehnungszustand der Betonfahrbahnplatte und der Stahlstege resultieren. Die Längenänderung und Querschnittskrümmung des Brückenüberbaus werden durch die idealisierten Temperaturfelder $T_N(y, z)$ und $T_{M_y}(y, z)$ wiedergegeben ($\rightarrow \overline{DT}_N, \overline{DT}_{M_z}$). Zieht man von diesem idealisierten Temperaturfeld die dehnungsbezogenen Temperaturfelder $T_{\epsilon_A}(y, z)$ und $T_{\epsilon_y}(y, z)$ ab, so resultiert daraus diejenige Temperaturverteilung $T_{\text{Zwang}}(y, z)$ (Gleichung (3.32)), die für die innere Zwangsbeanspruchung ursächlich ist.

3.4.5 Variabilität von Wärmeausdehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul

Wärmeausdehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul haben selbst keinen Einfluss auf die Temperaturverteilung in Brückenquerschnitten. Wie aus den vorangegangenen Abschnitten hervorgeht, beeinflussen sie aber die Größe der idealisierten Temperaturanteile. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Stahl beträgt $\alpha_{T, \text{Stahl}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ und weist nur eine geringe Streubreite auf. Die Wärmedehneigenschaft von Beton ist von den Wärmedehnzahlen des Zuschlages sowie des Zementsteins abhängig. Zusätzlich zur molekularkinetisch bedingten Wärmedehnung überlagern sich mechanische Dehnungen infolge innerer Gefügespannungen [13]. Die Ausdehnungskoeffizienten für Beton liegen im Bereich $\alpha_{T, \text{Beton}} = 0,6 \cdot 10^{-5} \dots 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ [13], [58]. Im Brückenbau relevante Stähle weisen einen Elastizitätsmodul auf, der mit dem Rechenwert $E_{\text{St}} = 21000 \text{ kN/cm}^2$ angegeben werden kann. Stahlbeton weist infolge seiner zusammengesetzten Struktur eine große Schwankungsbreite der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen auf. Im Brückenbau eingesetzte Betone haben E-Moduli im Bereich $E_B = 2600 \dots 3700 \text{ kN/cm}^2$.

In der europäischen Normung wird als Bezugs-Wärmedehnung $\alpha_{T,0} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ verwendet. Eine Erörterung um das Für und Wider wird in Anlage A.9 auf Seite 173 geführt. Für homogene Stahl- und Massivquerschnitte empfiehlt sich, für die Zerlegung $\alpha_T / \alpha_{T,0} = 1$ und $E/E_0 = 1$ anzusetzen, für Verbundbrückenquerschnitte $\alpha_{T,0} = \alpha_{T, \text{Stahl}}$ und $E_0 = E_{\text{Stahl}}$. Eine Abdeckung der Variabilität der genannten Materialparameter wird nur dadurch erreicht, dass Temperaturfelderzerlegungen mit variablen Wärmeausdehnungskoeffizienten und E-Moduli in den genannten Bereichen erfolgen. Dabei muss beachtet werden, dass die Schwerpunktlage (y_s, z_s) bei Verbundquerschnitten auch von den E-Moduli abhängig ist.

4 Kombination von idealisierten Temperaturfeldern

4.1 Allgemeines

Der Erwärmungszustand von Brückenquerschnitten wird mit dem zuvor hergeleiteten Zerlegungsverfahren für jeden Berechnungsschritt der Temperaturfeldsimulation in mehrere effektive idealisierte Temperaturanteile $\overline{DT}_{\psi,i}(t)$ mit $i=1..n$ aufgespalten. Diese bilden gemeinsam ein geschlossenes Abbild des temporären Temperaturzustandes $T(y,z,t)$, welches über die Beziehung (3.15) auf Seite 66 bis auf einen Restanteil rekonstruiert werden kann. Die durch einen Zahlenwert quantifizierte Temperaturanteile $\overline{DT}_{\psi,i}$ werden als Lastangabe der klimatisch bedingten Temperatureinwirkung verwendet (vgl. Abbildungen 3.1 und 3.2). Da die einzelnen Anteile aus der Zerlegung eines ursprünglichen Gesamttemperaturfeldes entstammen, müssten Temperaturlastangaben stets alle Zerlegungskomponenten enthalten, deren Quantität das gemeinsame, gleichzeitige Wirken aller Temperaturanteile berücksichtigt. Daher besteht die Notwendigkeit, die beschreibenden Temperaturanteile durch eine Kombinationsregel zusammenzufassen. Für jeden einzelnen Temperaturanteil können mit statistischen und wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden Extremwerte abgeleitet werden, die mit einer vorgegebenen Wiederkehrperiode erreicht oder überschritten werden. Ein gemeinsamer Lastansatz dieser Extremwerte führt jedoch zu einer konservativen Bemessung und ist nicht anzustreben.

Die meisten Einwirkungen auf Brückentragwerke sind Zufallsfunktionen der Zeit. Im Bauwesen werden zur gemeinsamen Berücksichtigung solcher Lasten Lastkombinationsregeln aufgestellt. Die jeweiligen Lastmaxima treten nicht zum gleichen Zeitpunkt auf, so dass das Maximum des Summenprozesses „Bauwerksbeanspruchung“ kleiner ist als die Summe der Beanspruchungsmaxima aus den Einzellasten. Genaue Lösungen erfordern die genauen statistischen Lastinformationen und sind oftmals auf spezielle Probleme beschränkt. Es werden daher bei Zuverlässigkeitsanalysen verschiedene Näherungen verwendet [107]. Die Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung, bei der auf die mechanischen Gesetzmäßigkeiten die Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung angewandt werden, baut auf der Verteilung der Einwirkungen und Widerstände auf. Durch eine Grenzzustandsfunktion wird ein unsicherer von dem sicheren Bereich abgegrenzt (Einwirkung = Widerstand). Diese Grenzzustandsfunktion ist für konkrete Fälle aufstellbar. Für die Angabe von Temperatureinwirkungen ist es aber erforderlich, dass für alle möglichen mechanischen Konstellationen das vorgegebene Sicherheitsniveau einhalten werden muss. Daher ist eine Verallgemeinerung erforderlich, die alle möglichen Grenzzustandsfunktionen einschließt.

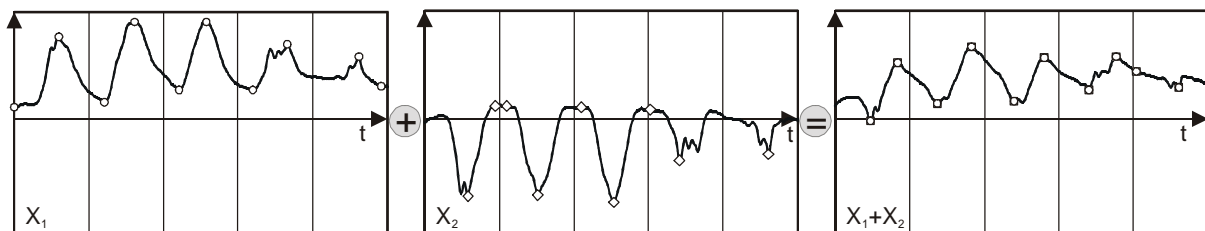


Abbildung 4.1 Unterschiede der Extremwerte in Größe und Auftretenszeitpunkt von Prozessfunktionen $X_1(t)$ und $X_2(t)$ sowie deren Summe $X_1(t)+X_2(t)$

Die Vielzahl an möglichen Kombinationen von n extrahierten Temperaturanteilen wirft für die Festlegung einer praktikablen Kombinationsvorschrift Schwierigkeiten auf. Erschwerend kommt hinzu, dass die Temperaturkomponenten stochastisch *nicht* voneinander unabhängig sind, sondern durch die klimatischen Einwirkungssituationen in gewissem Zusammenhang stehen. Zur Ableitung einer Kombinationsvorschrift können deshalb keine Verfahren angewandt werden, die die stochastische Unabhängigkeit der zu berücksichtigenden instationären Einflussgrößen voraussetzen [23], [88], [106] oder allein auf der statistischen Verteilung der Extremwerte basieren. Andernfalls müsste eine Transformation in unabhängige Stichproben erfolgen. Für die Bestimmungen von Überlagerungsregeln sind Informationen über den Beanspruchungsverlauf zwischen den Extremereignissen zwingend erforderlich, welche in den Ergebnissen einer Extremwertstatistik allerdings nicht mehr enthalten sind. Aus diesem Grunde wird angestrebt den Informationsgehalt der kompletten vorliegenden Zeitreihen zu nutzen.

Anhand einer horizontal statisch bestimmt gelagerten Einfeldbrücke wird der Unterschied zwischen dem Tagesgang der einzelnen Temperaturanteile und der Bauwerksreaktion veranschaulicht. Abbildung 4.2 stellt eine Einfeldbrücke dar, welche auf einem festen Lager, einem längsverschieblichen Lager und zwei allseits verschieblichen Lagern aufliegt. Infolge eines konstanten Temperaturanteiles ΔT_N und den linearen Temperaturunterschieden ΔT_{MY} und ΔT_{MZ} treten keine Zwangskräfte auf. Es wird unterstellt, dass sich die linearen Temperaturunterschiede auf die Trägerhöhe h_g und Trägerbreite b_g beziehen. Die Lagerebene befindet sich um das Maß h_L unterhalb der Systemschwerlinie. Die Bestimmungsgleichungen der Längsverschiebungswege u_2 bis u_4 sind in Gleichung (4.1) zusammengefasst.

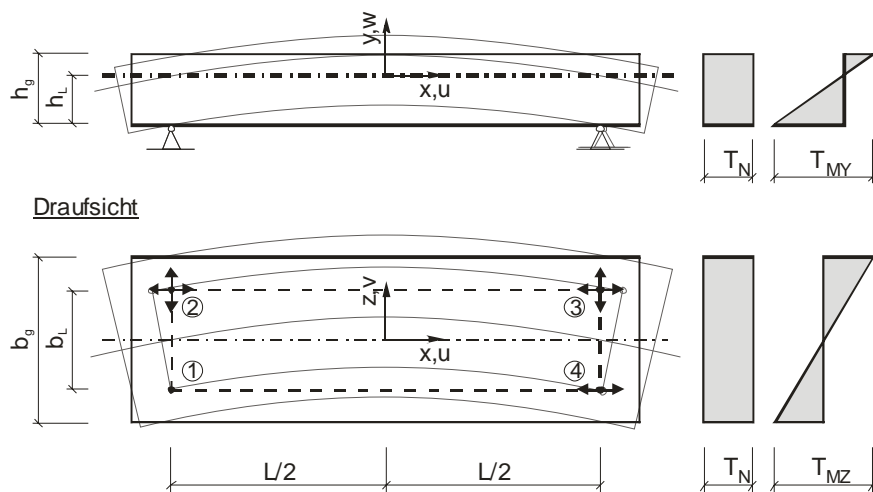


Abbildung 4.2 Einfeldträger in horizontal statisch bestimmter Lagerung

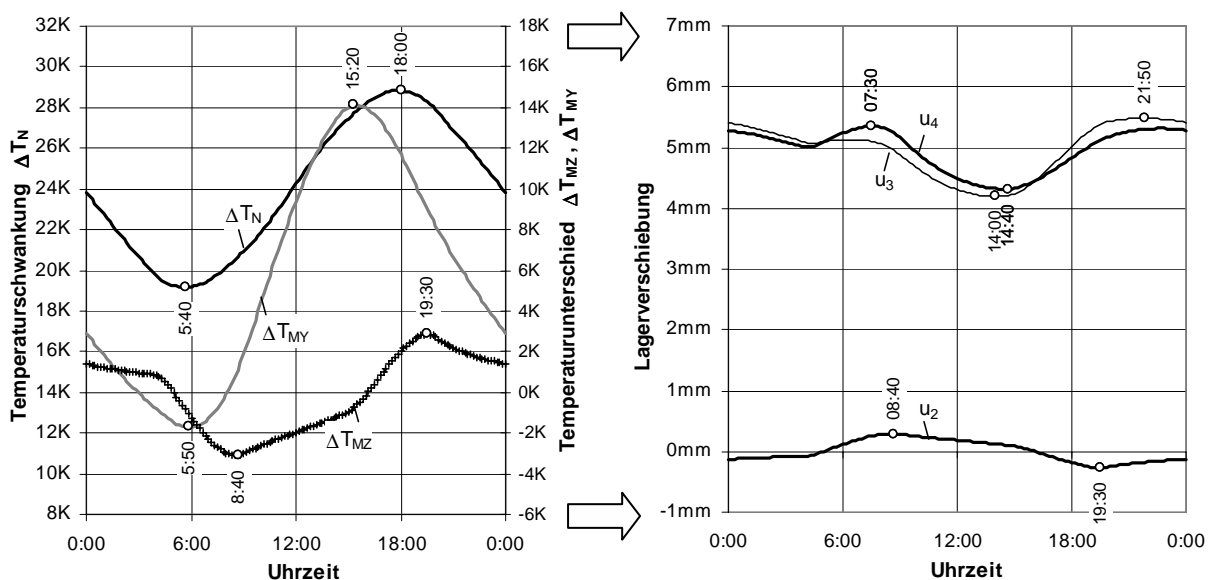
Bestimmungsgleichung der Lagerverschiebungen u_1 bis u_4 infolge ΔT_N , ΔT_{MX} und ΔT_{MY} :

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = (\alpha_T \cdot L) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{b_L}{2b_g} \\ 1 & -\frac{h_L}{h_g} & 0 \\ 1 & -\frac{h_L}{h_g} & -\frac{b_L}{2b_g} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta T_N \\ \Delta T_{MY} \\ \Delta T_{MZ} \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

Folgendes ist festzustellen:

- Es zeigt sich, dass nicht jedes Lager durch alle der verwendeten Temperaturanteile beeinflusst wird. So ist u_2 allein vom horizontalen Temperaturunterschied ΔT_{MZ} abhängig. Für das Lager 3 müssen die Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY} berücksichtigt werden. Allein die Verschiebung u_4 wird aus allen drei Temperaturanteilen errechnet.
- An den Lagern 3 und 4 ruft ein negativer Wert der Temperaturunterschiede ΔT_M und ein positiver Wert der Temperaturschwankung ΔT_N eine positiv orientierte Lagerverschiebung hervor. Es treten also Vorzeichenunterschiede auf, die durch eine Kombinationsvorschrift mit erfasst werden müssen.
- Jede Temperatureinwirkung geht mit einem unterschiedlichen „Übertragungsfaktor Last→Bauwerksreaktion“ in die Berechnung ein ($\alpha_T \cdot L \cdot h_L/h_g$ etc.)
- Alle Verschiebungsgrößen enthalten gleichermaßen das Produkt $\alpha_T \cdot L$. Weitere Parameter sind Verhältniszahlen h_L/h_g und b_L/b_g .

Wirken auf den Einfeldträger die in Abbildung 4.3a beispielhaft dargestellten Temperatureinwirkungen, so resultieren daraus die nebenstehenden Lagerwege.



- a) Tagesgang eines konstanten Temperaturanteiles ΔT_N , linearen vertikalen Temperaturunterschiedes ΔT_{MY} und linearen horizontalen Temperaturunterschiedes ΔT_{MZ}
- b) Lagerverschiebungen u_2 , u_3 und u_4 gegenüber dem gleichmäßig auf 0°C temperierten Querschnitt; gewählte Systemparameter:
 $\alpha_T = 1,0 \cdot 10^{-5}$, $L = 25000\text{mm}$,
 $h_L/h_g = 0,75$, $b_L/b_g = 0,75$

Abbildung 4.3 Unterschied der Zeitpunkte der Tagesextrema von Temperatureinwirkungen und der durch diese verursachten Lagerverschiebungen

Der Tagesgang des Verschiebungsweges u_2 verläuft affin zum horizontalen Temperaturunterschied ΔT_{MZ} . Daher stimmen die Zeitpunkte der maximalen Tageswerte überein – im deutlichen Unterschied zu den Lagerverschiebungen u_3 und u_4 . Maximale Längsverschiebungen u_3 und u_4 ergeben sich bei extrem warmem Querschnitt und gleichzeitig minimalem vertikalen Temperaturunterschied „unten wärmer als oben“.

Dieses praktische Beispiel kann von dem dargestellten Tagesverlauf auf die ganze Nutzungszeit des Einfeldträgers sowie auf alle denkbaren Brückenkonstruktionen und deren Bemessungspositionen ausgedehnt werden. Eine Temperatur-Kombinationsregel muss folglich bei der Bemessung verschiedene Anforderungen erfüllen: Einerseits müssen alle zu bemessenden Bauwerkspositionen mindestens auf dem zugrunde gelegten Einwirkungs- und Sicherheitsniveau liegen. Bei gegebenen Temperatureinwirkungsgrößen müssen trotz variabler Systemgeometrie mit diesen Einwirkungsgrößen alle Bemessungspositionen auf dem gegebenen Sicherheitsniveau nachgewiesen werden. Andererseits besteht die praktische Forderung nach einer einfachen und übersichtlichen Kombinationsregelung.

Bei der Turkstra'schen Regel werden zu den n Zeitpunkten, an denen die n Lastprozesse maximale Bauwerksbeanspruchungen hervorrufen, die Momentanwerte der übrigen $n-1$ Beanspruchungen zum jeweiligen Lastmaximum hinzuaddiert. Da jede Temperatureinwirkung durch einen positiven und einen negativen Extremwert charakterisiert wird, sind insgesamt $2 \cdot n$ Lastkombinationen zu untersuchen. Die Annahme der Turkstra'schen Kombinationsregel liegt in der Regel auf der unsicheren Seite, doch konnte in [35] nachgewiesen werden, dass der begangene Fehler nicht groß ist. Für eine Zuverlässigkeitsanalyse wird jeweils für eine der n Lasten die Verteilung der Extremwerte zugrunde gelegt und für die verbleibenden $n-1$ Lasten die Verteilung der Momentanwerte. Die ungünstigste der n Kombinationen ist diejenige mit dem geringsten Sicherheitsindex.

Für den Summenprozess aus n in ihrer Gleichzeitigkeit zu berücksichtigenden Temperaturanteile würde sich die maßgebende Lastkombination folgendermaßen darstellen:

$$\max[\overline{DT}_{\psi,1}(t), \overline{DT}_{\psi,2}(t), \dots, \overline{DT}_{\psi,n}(t)] = \max \left[\begin{array}{cccc} \max(\overline{DT}_{\psi,1}(t)) + \overline{DT}_{\psi,2}(t) & \dots + \dots & \overline{DT}_{\psi,n}(t) \\ \overline{DT}_{\psi,1}(t) + \max(\overline{DT}_{\psi,2}(t)) & \dots + \dots & \overline{DT}_{\psi,n}(t) \\ \vdots & + & \vdots & \dots + \dots & \vdots \\ \overline{DT}_{\psi,1}(t) + \overline{DT}_{\psi,2}(t) & \dots + \dots & \max(\overline{DT}_{\psi,n}(t)) \end{array} \right] \quad (4.2)$$

In Gleichung (4.2) steht $\max(\overline{DT}_{\psi,i}(t))$ für den Maximalwert der Zufallsgröße $\overline{DT}_{\psi,i}(t)$ im zugrunde gelegten Bezugszeitraum. Die Momentanwerte bei Eintreten von $\max(\overline{DT}_{\psi,i}(t))$ sind mit $\overline{DT}_{\psi,j \neq i}(t)$ angegeben. Grundvoraussetzung zur Anwendung dieser Regel ist, dass stochastische Abhängigkeiten zwischen den Lastanteilen vernachlässigbar klein sind. Dies ist aber aus den weiter oben beschriebenen Gründen für idealisierte Temperaturanteile nicht gegeben.

In [28] werden verschiedene weitere Modelle zur Ermittlung von Kombinationswerten vorgestellt. Sie alle unterstellen die stochastische Unabhängigkeit der zu kombinierenden Lastprozesse und wären somit, wie bereits erwähnt, nur durch eine Transformation der Lastprozesse in unkorrelierte Anteile anwendbar.

Durch die numerische Langzeitsimulation von Temperaturfeldern werden für jeden Zeitschritt nichtlineare Temperaturfelder bestimmt, aus denen nach dem oben beschriebenen Verfahren Temperaturanteile $DT_{\psi,i}$ extrahierbar sind. Der Summenprozess „Bauwerksreaktion“

ließe sich dann direkt aus den Simulationsergebnissen bilden. Darauf aufbauend wird eine Temperatur-Kombinationsregel abgeleitet, welche das simultane Auftreten dieser Temperaturanteile erfasst.

4.2 Einwirkung und Auswirkung

Versteht man die idealisierten Temperaturanteile \overline{DT}_{ψ} als Einwirkung auf das Bauwerk, so ist die dadurch bewirkte Bauwerksreaktion S_{ψ} als Auswirkung auf \overline{DT}_{ψ} zu bezeichnen. Unterstellt man ein linear-elastisches Tragsystem, so bestimmt sich die Auswirkung S infolge Temperaturbeanspruchung aus der Superposition aller durch die Einzeltemperaturanteile widergespiegelten Temperaturfelder. Auswirkungen sind beispielsweise Zwangskräfte an einem Lagerpunkt oder Bauwerksverformungen in interessierenden Bereichen. Der Erwärmungszustand zu einem beliebigen Zeitpunkt t sei durch n orthogonale Temperaturanteile $\overline{DT}_{\psi,i}$ mit $i=1..n$ beschrieben. Üblicherweise sind dies der konstante Temperaturanteil ΔT_N sowie der lineare vertikale bzw. lineare horizontale Temperaturunterschied ΔT_{MY} und ΔT_{MZ} , aber auch Temperaturanteile, die eine Querschnittsverdrehung bzw. Profilverformung bewirken zählen dazu ([58]). Aus Gründen einer übersichtlicheren Darstellung wird im Folgenden statt dem effektiven Temperaturanteil $\overline{DT}_{\psi,i}$ das repräsentierte idealisierte Temperaturfeld $T_{\psi,i}$ als Bezeichnungsvariable verwendet, so dass formal $T_{\psi,i} = \overline{DT}_{\psi,i}$ gilt.

Der Temperaturzustand wird demnach durch ein n -Tupel von Temperaturkenngrößen $T_{\psi,i}$ beschrieben:

$$T(t)_{idealisiert} = [T_{\psi,1}(t), T_{\psi,2}(t), \dots, T_{\psi,n}(t)] \quad (4.3)$$

Ein- und Auswirkungen sind wegen der Annahme eines linear-elastischen Tragsystems durch einen Übertragungsfaktor $\hat{c}_{\psi,i}^{(s)}$ verknüpft [28]. Durch diesen Faktor kann die Reaktion $S_{\psi,i}^{(s)}$ einer Bemessungsposition (s) infolge des Temperaturanteiles $T_{\psi,i}$ berechnet werden. Nach Gleichung (4.4)a ist die Gesamtwirkung $S(t)^{(s)}$ an der Bemessungsposition (s) zum Zeitpunkt t durch die Summe aller Einzelauswirkungen gegeben:

$$S(t)^{(s)} = \sum_{i=1}^n S_{\psi,i}(t)^{(s)} = \sum_{i=1}^n \hat{c}_{\psi,i}^{(s)} \cdot T_{\psi,i}(t) \quad (4.4)a$$

Dadurch stellt sich auch die Bauwerksreaktion als Summenprozess dar. Sie nimmt für jede Bemessungsposition unterschiedliche Extremwerte an (vgl. Abbildung 4.3b). Führt man für jeden Temperaturanteil einen Ausgangstemperaturzustand $T_{\psi,i,0}$ ein, bei dem alle Auswirkungen den Wert Null annehmen, ergänzt sich die Gleichung (4.4)a:

$$\begin{aligned} S(t)^{(s)} - S_0^{(s)} &= \sum_{i=1}^n S_{\psi,i}(t)^{(s)} - \sum_{i=1}^n S_{\psi,i,0}^{(s)} \\ &= \sum_{i=1}^n \hat{c}_{\psi,i}^{(s)} \cdot (T_{\psi,i}(t) - T_{\psi,i,0}) \\ &= \sum_{i=1}^n \hat{c}_{\psi,i}^{(s)} \cdot T_{\psi,i}(t) - \sum_{i=1}^n \hat{c}_{\psi,i}^{(s)} \cdot T_{\psi,i,0} \end{aligned} \quad (4.4)b$$

Durch die Abtrennung des Aufstellwertes kann der Einfluss einer Ausgangstemperierung des Bauwerks entkoppelt von den Temperatureinwirkungen betrachtet werden.

4.3 Positive und negative Extremwerte der Ein- und Auswirkungen

Jeder Temperaturanteil kann durch einen positiven und einen negativen Extremwert $T_{\psi,i, \text{pos}}$ bzw. $T_{\psi,i, \text{neg}}$ eingegrenzt werden. Die Bestimmung dieser Extremwerte kann aus der jeweiligen Randverteilung der mehrdimensionalen Verteilung aller Temperaturanteile oder aber der Extremwertverteilung des betrachteten Temperaturanteiles abgeleitet werden. Sie entsprechen einem repräsentativen Wert (charakteristischer Wert mit Wiederkehrperiode $R=50$ Jahren oder Kombinationswert mit häufigerer Wiederkehrperiode). Aus dieser Eingrenzung folgt, dass die Bauwerksreaktion $S_{\psi,i}^{(s)}$ innerhalb den Grenzen $S_{\psi,i, \text{pos}}^{(s)}$ und $S_{\psi,i, \text{neg}}^{(s)}$ liegt.

In dem Summenbildungsprozess nach Gleichung (4.4)a sind die Vorzeichen der Übertragungsfaktoren von der jeweiligen Bemessungsposition abhängig. Damit gilt für die Ein- und Auswirkung:

$$\begin{array}{ll}
 \text{falls } \hat{c}_{\psi,i}^{(s)} > 0 \text{ ist} & \text{führt } T_{\psi,i, \text{pos}} \text{ zu } S_{\psi,i, \text{pos}}^{(s)} \text{ und } T_{\psi,i, \text{neg}} \text{ führt zu } S_{\psi,i, \text{neg}}^{(s)} \\
 \text{falls } \hat{c}_{\psi,i}^{(s)} < 0 \text{ ist} & \text{führt } T_{\psi,i, \text{pos}} \text{ zu } S_{\psi,i, \text{neg}}^{(s)} \text{ und } T_{\psi,i, \text{neg}} \text{ führt zu } S_{\psi,i, \text{pos}}^{(s)} \\
 \\
 \text{folglich gilt} & T_{\psi,i} \text{ mit } T_{\psi,i, \text{neg}} < T_{\psi,i} < T_{\psi,i, \text{pos}} \text{ führt zu} \\
 & S_{\psi,i}^{(s)} \text{ mit } S_{\psi,i, \text{neg}}^{(s)} < S_{\psi,i}^{(s)} < S_{\psi,i, \text{pos}}^{(s)}
 \end{array}$$

Dementsprechend führen Beanspruchungswerte innerhalb der Extremgrenzen zu geringeren statischen Bauwerksbeanspruchungen. Diese eigentlich simple Feststellung zeigt, dass sich Kombinationsregeln primär an repräsentativen Extremwerten $T_{\psi,i, \text{pos}}$ bzw. $T_{\psi,i, \text{neg}}$ orientieren müssen!

4.4 Systemnormierung

Mit Hilfe einer Systemnormierung können die Einflüsse aller beschreibenden Temperaturanteile in eine genormte Relation zueinander gestellt werden. Wegen der Existenz von positiven und negativen Extremwerten muss zusätzlich der jeweilige Vorzeicheneinfluss auf den Summenprozess berücksichtigt werden. Hierzu werden Systemübertragungsfaktoren und Vorzeichenfaktoren eingeführt:

a) Systemübertragungsfaktor

Das reale Bauwerk weist an einer Bemessungsstelle einen zeitlich veränderlichen Verlauf der Beanspruchung $S(t)$ auf. Der Übertragungsfaktor Temperatureinwirkung \rightarrow Systemreaktion wird durch den Systemfaktor $\hat{c}_{\psi,i}$ gebildet (Gleichung (4.4)a). Für jede Bemessungsposition (s) des Bauwerkes kann eine positive Lastwirkung $S_{\text{pos}}^{(s)}$ definiert werden, wobei die Vorzeichenregelung meist an das Koordinatensystem des Bauwerkes bzw. an die Schnittgrößendefinition gekoppelt ist.

Der System-Übertragungsfaktor bestimmt sich zu:

$$\hat{c}_{\psi,i}^{(s)} = \frac{S_{\psi,i}^{(s)}(t)}{T_{\psi,i}(t)} = \text{konstant} \quad (4.5)$$

Durch den Betrag des Übertragungsfaktors wird die Intensität der Systemreaktion auf eine Temperatureinwirkung $T_{\psi,i}$ beziffert. Aus der Summe aller Beträge $|\hat{c}_{\psi,i}^{(s)}|$ wird ein „Gesamtübertragungsfaktor“ $C^{(s)}$ gebildet. Als Vorzeichenregelung für den Temperatureinwirkungsprozess ist es notwendig festzulegen, dass der Gesamtübertragungsfaktor negativ wird, wenn der Übertragungsfaktor des ersten Temperaturanteiles $T_{\psi,1}$ kleiner Null ist. Es gilt:

$$C^{(s)} = \begin{cases} + \sum_{i=1}^n |\hat{c}_{\psi,i}^{(s)}| & \text{falls } \hat{c}_{\psi,1}^{(s)} \geq 0 \\ - \sum_{i=1}^n |\hat{c}_{\psi,i}^{(s)}| & \text{falls } \hat{c}_{\psi,1}^{(s)} < 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

b) Vorzeichenfaktor

Die Betragsbildung in Gleichung (4.6) macht die Einführung eines Vorzeichenfaktors erforderlich, welcher angibt, ob eine Einwirkung $T_{\psi,i}(t) > 0$ eine dem Vorzeichen nach positive oder negative Auswirkung $S_{\psi,i}^{(s)}(t)$ hat (vgl. Abschnitt 4.3). Es existieren bei n Temperaturanteilen insgesamt 2^n „±“-Vorzeichenkombinationen. Dabei ist festzustellen, dass jeweils zwei Kombinationen gegenseitig durch Negation darstellbar sind. Für eine beliebige Konfiguration kann somit ein mit „+1“ und/oder „-1“ besetzter Zeilenvektor geschrieben werden. Im Weiteren wird eine vereinfachende Nomenklatur für diesen Vektor verwendet, die die Zahl 1 in diesem Zeilenvektor weglässt und wie in Tabelle 4.1 nur die Vorzeichen ausweist. Der Vorzeichenfaktor $v_{\psi,i}$ ist folgendermaßen definiert:

$$v_{\psi,i}^{(s)} = \begin{cases} +1 & \text{falls } \hat{c}_{\psi,i}^{(s)} = 0 \\ \frac{\hat{c}_{\psi,i}^{(s)}}{|\hat{c}_{\psi,i}^{(s)}|} \cdot \frac{C^{(s)}}{|C^{(s)}|} & \text{falls } \hat{c}_{\psi,i}^{(s)} \neq 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Wegen der Definition des vorzeichenbehafteten Gesamtübertragungsfaktors $C^{(s)}$ nach Gleichung (4.6) und des Vorzeichenfaktors nach Gleichung (4.7) gilt stets $v_{\psi,1} = +1$. Dadurch halbiert sich die mögliche Kombinationszahl auf $2^{(n-1)}$.

Anzahl der gleichzeitig berücksichtigten Temperaturanteile	Anzahl der Vorzeichenkombinationen	Vorzeichenkombinationen
1	1	{+}
2	2	{+ +}; {+ -}
3	4	{+ + +}; {+ + -}; {+ - +}; {+ - -}
n	$2^{(n-1)}$	{+ + ... +} ... {+ - ... -}

Tabelle 4.1 Vorzeichenkombinationen bei n zu kombinierenden Temperaturanteilen mit der Definition von $v_{\psi,i}$

Wie aus dem Beispiel des Einfeldträgers zu entnehmen ist (Abbildung 4.2, Seite 73), treten in einer Konstruktion nicht zwangsläufig immer alle möglichen Vorzeichenkombinationen auf. Wegen der Variabilität der Tragwerke, darf jedoch keine Einschränkung auf bestimmte zu betrachtende Kombinationen vorgenommen werden.

c) Anteilswert

Mit der Definition eines Gesamt-Übertragungsfaktors $C^{(s)}$ kann ein Anteilswert $a_{\psi,i}$ eingeführt werden. Der mit Gleichung (4.8) festgelegte Wert enthält normierte Intensitätsinformationen aller zur Beschreibung des Temperaturverhaltens verwendeten Temperaturanteile.

$$a_{\psi,i}^{(s)} = \frac{|\hat{C}_{\psi,i}^{(s)}|}{|C^{(s)}|} \quad (4.8)$$

Der Anteilswert $a_{\psi,i}$ hat zwei wesentliche Eigenschaften: Er nimmt Werte zwischen Null und Eins an und die Summe aller Anteilswerte ergibt stets Eins:

$$\begin{aligned} 1. \quad & a_{\psi,i}^{(s)} \in [0..1] \\ 2. \quad & \sum_{i=1}^n a_{\psi,i}^{(s)} = 1 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Wenn ein Anteilswert $a_{\psi,i}^{(s)}$ Null ist, so besteht keine Abhängigkeit der Bemessungsposition von dem Temperaturanteil $T_{\psi,i}$. Ist er genau Eins, so haben alle anderen $n-1$ Temperaturanteile $T_{\psi,j \neq i}$ keinerlei Auswirkung auf die Bemessungsposition.

d) Systemreaktion

Mit den definierten Variablen zur Systemnormierung wird der Lastprozess jeder Bemessungsposition entsprechend der Sensitivität auf Temperatureinwirkungen in einem klar begrenzten Einflussraum beschrieben. Mit der gewählten Beschreibung können alle denkbaren Bemessungspositionen erfasst werden.

Die Systemreaktion entsprechend Gleichung (4.4)a stellt sich nunmehr als Produkt aus einem Gesamt-Übertragungsfaktor und einem Summenausdruck dar. Der Summenausdruck in Gleichung (4.10) entspricht dem normierten Lastprozess und ist eine aus den einzelnen Temperaturanteilen zusammengesetzte Temperaturkenngröße $T_K(t)$. Diese ist ebenfalls zeitlich veränderlich.

$$S(t)^{(s)} = C^{(s)} \cdot \left[\sum_{i=1}^n a_{\psi,i}^{(s)} \cdot v_{\psi,i}^{(s)} \cdot T_{\psi,i}(t) \right] = C^{(s)} \cdot T_K(t) \quad (4.10)$$

Bei gegebener Wichtung $\{a_{\psi,i}\}$ und Vorzeichenkombination $\{v_{\psi,i}\}$ können von dem Summenprozess $T_K(t)$ Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode berechnet werden. Sie sind die für diesen betrachteten Fall gültige repräsentative Einwirkungen. Diese positiven und negativen Extremwerte des Summenprozesses können als repräsentative Kombinations-

Temperatureinwirkung $T_{K,pos}$ und $T_{K,neg}$ bezeichnet werden. Die Bauwerksreaktion $S_{pos}^{(s)}$ bzw. $S_{neg}^{(s)}$ berechnet sich dann nach Gleichung (4.11):

$$S_{pos}^{(s)} = C^{(s)} \cdot T_{K,pos} \quad \text{bzw.} \quad S_{neg}^{(s)} = C^{(s)} \cdot T_{K,neg} \quad (4.11)$$

4.5 Bestimmung der Kombinations-Temperaturkennwerte

Jede Vorzeichen- und Anteilswertkombination bildet einen eigenständigen Last- bzw. Summenprozess $T_K(t, \{a_{\psi,i}\}, \{v_{\psi,i}\})$. Wie bereits erwähnt wurde, können aus der Zeitreihe dieses Lastprozesses wiederum Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode bestimmt werden. Diese Extremwerte bilden die Kombinations-Temperaturkennwerte $T_{K,pos}(\{a_{\psi,i}\}, \{v_{\psi,i}\})$ bzw. der zugrunde gelegten Anteilswert- und Vorzeichenkombination.

Eine anschauliche Lösung findet man für zwei zu kombinierende Temperaturanteile $T_{\psi,1}$ und $T_{\psi,2}$. Ausgangspunkt ist die 2-dimensionale Verteilung der Temperaturanteile $T_{\psi,1}$ und $T_{\psi,2}$. Extremkombinationen mit R-jähriger Wiederkehrperiode charakterisieren sich durch die gleiche Auftretenswahrscheinlichkeit und können in einem $T_{\psi,1}$ - $T_{\psi,2}$ -Diagramm durch eine Isolinie gekennzeichnet werden (Abbildung 4.4a).

Durch Multiplikation aller Punkte dieser Isolinie mit den Anteilsfaktoren $a_{\psi,1}$ und $a_{\psi,2}$ wird diese Linie gleicher Wahrscheinlichkeit in eine verzerrte Darstellung überführt. Abbildung 4.4b zeigt transformierte Isolinien für fünf Anteilswerte $a_{\psi,1}$ im Bereich Null bis Eins. Aus der Bestimmungsgleichung (4.10) der Bauwerksreaktion kann für $n=2$ abgeleitet werden, dass sich Auswirkungen gleichen Betrags- und Vorzeichens auf einer Geraden befinden, was durch die Geradengleichung (4.12) formuliert wird. Für die Vorzeichenkombination $\{+ +\}$ ist der Steigungsfaktor dieser Geradengleichung -1 und für die Vorzeichenkombination $\{+ -\}$ $+1$.

$$S^{(s)} = konst = C^{(s)} \cdot v_{\psi,1}^{(s)} \cdot (a_{\psi,1}^{(s)} \cdot T_{\psi,1}) + C^{(s)} \cdot v_{\psi,2}^{(s)} \cdot (a_{\psi,2}^{(s)} \cdot T_{\psi,2}) \quad \text{wird zu:}$$

$$(a_{\psi,2}^{(s)} \cdot T_{\psi,2}) = \left(-\frac{v_{\psi,1}^{(s)}}{v_{\psi,2}^{(s)}} \right) \cdot (a_{\psi,1}^{(s)} \cdot T_{\psi,1}) + \frac{S^{(s)}}{C^{(s)}} \cdot \frac{1}{v_{\psi,2}^{(s)}} \quad (4.12)$$

Die gesuchten Kombinations-Temperaturenkennzahlen $T_{K,pos/neg}$ ergeben sich somit aus den Extremwerten der Isolinien in einem um $-\pi/2$ gedrehten Koordinatensystem. Es bilden sich auf der Ordinate die $1/\sqrt{2}$ -fachen Kombinations-Temperaturkennzahlen der Vorzeichenkombination $\{+ +\}$ ab und auf der Abszisse die der Kombination $\{+ -\}$. Die für jedes Verhältnis von Anteilsfaktoren $\{a_{\psi,i}\}$ bestimmten positiven bzw. negativen Extremwerte werden mit $T_{K\{+\pm,\pm\},pos}$ bzw. $T_{K\{+\pm,\pm\},neg}$ bezeichnet, dabei kennzeichnet der Index die zugrunde gelegte Vorzeichenkombination und die Art des Extremums.

Die Kombinations-Temperaturkennzahlen T_K lassen sich auch auf einem alternativen Wege bestimmen: Hierfür werden zunächst für alle Vorzeichen-Kombinationen $\{v_{\psi,i}\}$ und diskrete

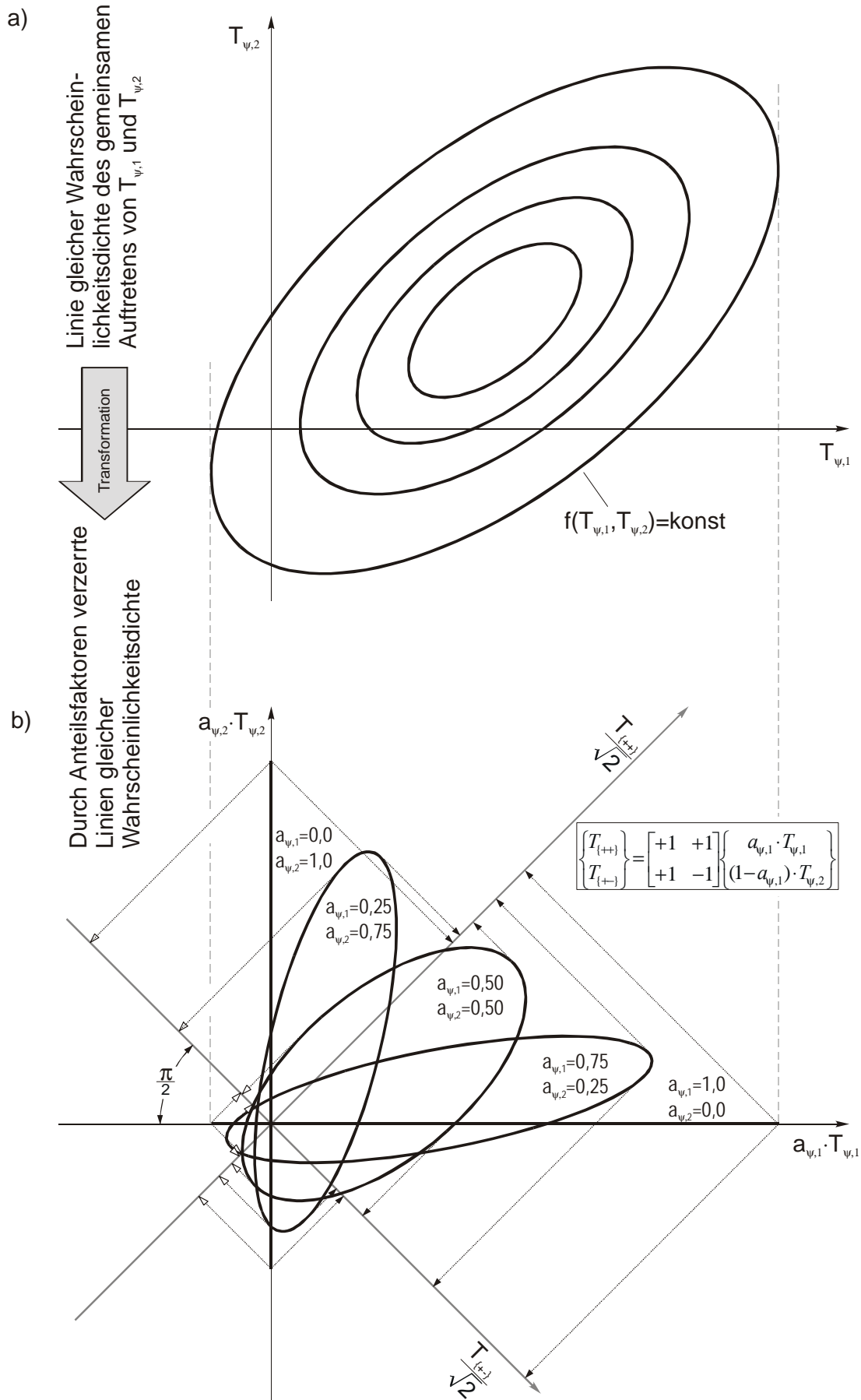


Abbildung 4.4 Ableitung von Kombinations-Temperaturkennwerten aus der zweidimensionalen Wahrscheinlichkeitsdichte

Anteilswertkombinationen $\{a_{\psi,i}\}$ die Summenprozesse $T_K(t, \{a_{\psi,i}\}, \{v_{\psi,i}\})$ gebildet. Aus diesen Summenprozessen werden die repräsentativen Temperaturkennwerte $T_{K\{+\pm,\pm\},pos/neg}$ mit einer vorgegebenen Wiederkehrperiode ausgewertet. Da die Zeitreihen der Temperaturanteile $T_{\psi,i}(t)$ aus der numerischen Simulation der Temperaturfelder abgeleitet werden, bietet letztere Vorgehensweise verfahrenstechnische Vorteile.

4.6 Kombinationsfläche und Systemreaktion

Die positiven und negativen Extremwerte aller Lastprozesse $T_K(t, \{a_{\psi,i}\}, \{v_{\psi,i}\})$ bilden einen hypergeometrischen Ort, der als Kombinationsfläche bezeichnet werden kann [88]. Er enthält für jede Bemessungsposition eine Temperatur-Kennzahl, die eine Beanspruchung mit der zugrunde gelegten Wiederkehrperiode repräsentiert. Dieser Temperatur-Kennwert entspringt einer eindeutigen Kombination aus allen berücksichtigten Temperaturanteilen.

Für eine einzelne zu berücksichtigende Temperaturbeanspruchung $T_{\psi,1}$ existiert nur ein Wertepaar $T_{\{+\}pos}$ und $T_{\{+\}neg}$. Bei zwei in ihrer Gleichzeitigkeit zu berücksichtigenden Temperaturanteilen vereinfacht sich die Kombinationsfläche zu einem Satz von vier Kombinationskurven: Die möglichen Vorzeichenkombinationen $\{++\}$ und $\{+-\}$ liefern jeweils Kurven für eine positive und negative Temperaturlast (Abbildung 4.5). Sind $C^{(s)}$, $\{a_{\psi,i}^{(s)}\}$ und $\{v_{\psi,i}^{(s)}\}$ bekannt, so ist die Bestimmung der repräsentativen Systemreaktion mit der Wiederkehrperiode R mit Gleichung (4.11) durchzuführen.

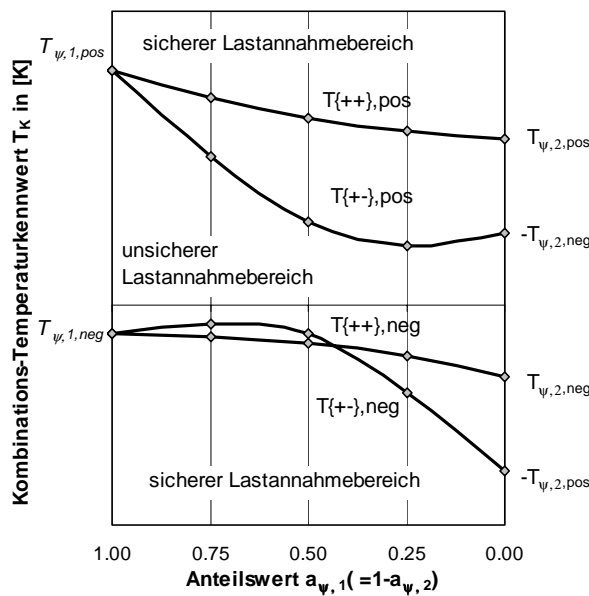


Abbildung 4.5
Kombinationskurven für zwei zu kombinierende Temperaturanteile $T_{\psi,1}$ und $T_{\psi,2}$: positiven und negativen Extremwerte der Vorzeichenkombinationen $\{++\}$ und $\{+-\}$ bei variablen Anteilswertverhältnissen a_{ψ}

Für den Nachweis einer Bemessungsposition zeichnet sich folgende prinzipielle Vorgehensweise ab:

1. Indizierung der n idealisierten zueinander orthogonalen Temperaturanteile $T_{\psi,i}$, Gl. (3.7)
2. Berechnung der Systemübertragungsfaktoren $\hat{c}_{\psi,i}$, Gleichung (4.5)
3. Berechnung des Gesamtübertragungsfaktors $C^{(s)}$, Gleichung (4.6)
4. Ermittlung der vorliegenden Vorzeichenkombination $\{v_{\psi,i}\}$, Gleichung (4.7)
5. Berechnung der Anteilswerte $\{a_{\psi,i}\}$, Gleichung (4.8)
6. Ablesung der Temperatur-Kombinationskennzahlen $T_{K,pos}$ bzw. $T_{K,neg}$ für $\{v_{\psi,i}\}$ und $\{a_{\psi,i}\}$
7. Berechnung der extremen Systemreaktion S_{pos} und S_{neg} , Gleichung (4.11)

Für die praktische Verwendung muss die Kombinationsfläche hierfür in einer geeigneten Form dargestellt werden. Für ein bis drei zu kombinierende Temperaturanteile lassen sich relativ einfache Darstellungsmöglichkeiten finden (siehe Anhang A.7). Ab vier gleichzeitig zu berücksichtigende Temperaturanteilen müssen umfangreiche Tabellen aufgestellt werden. Dies ist beispielsweise bei Schrägseilbrücken der Fall, wo mindestens ΔT_N und ΔT_{MY} des Versteifungsträgers aber auch die Seiltemperatur $\Delta T_{N,Seil}$ sowie $\Delta T_{N,Pylon}$ des Pylons simultan auf das Bauwerk einwirken. Zur vollständigen Beschreibung sind faktisch $2^4=16$ 4-dimensionale Kombinationskurven notwendig! Hierbei wird ein praktisches Problem deutlich: je mehr Temperaturanteile in einem Temperatur-Lastkonzept vorkommen, vergrößert sich die theoretische Kombinationsfläche, so dass bei n Temperaturanteilen 2^n n -dimensionale Flächen vorliegen. Aus diesem Grunde sind im Sinne einer handhabbaren Umsetzung auch vereinfachte Formen der Kombinationsregeln formuliert werden.

Die vorgestellte Kombination von idealisierten Temperaturanteilen hat den Vorteil eines ausgeglichenen Sicherheitsniveaus für alle Bemessungspositionen. Nachteilig ist, wie aufgezeigt, die mitunter hohe Zahl an erforderlichen Kombinations-Diagrammen. Zusätzlich besteht eine Schwierigkeit für die Anwendung EDV-basierter diskreter Berechnungsverfahren (bspw. Finite-Elemente-Methode). Eine Systemnormierung nach Abschnitt 4.4 ist zwar mit deren Hilfe möglich, widerspricht aber dem Einsatzzweck, nämlich für vorgegebene Lastfälle den Verformungs- und Spannungszustand sowie Lagerwege und -kräfte der Bauwerksstruktur zu ermitteln. Die Eingangslasten werden bei der FEM dabei stets durch konkrete in Ort, Betrag und Wirkungsrichtung definierte Lasten vorgegeben. Der zusammengefasste Kombinations-Temperaturkennwert T_K stellt hingegen eine Misch-Größe dar, die nicht mehr durch ein Temperaturfeld $T(x,y,z)$ dargestellt werden kann. Sie ist somit nicht für numerische Verfahren wie die FEM verwendbar.

4.7 CAF-Kombinationsregel für zwei Temperaturanteile

Der entscheidende Anwendungsnachteil von Kombinationsflächen für numerische Lösungsverfahren ist nur durch eine Linearisierung der Kombinationsflächen zu beseitigen. Mit einer Linearisierung der Kombinationskurven können vereinfachte und praktikable Überlagerungsregeln gefunden werden. Grundsätzliche Bedingung ist, dass die durch diese Kombinationsregel wiedergegebenen Beanspruchungen mindestens dem gleichen Sicherheitsniveau der Kombinationskurven entsprechen. Eine linearisierte Kombinationsfläche weicht folglich von der ursprünglichen nichtlinearen Fläche ab, so dass zwangsläufig eine teilweise Erhöhung des Sicherheitsindex folgt.

Eine mögliche Form einer Kombinationsregel stellt die Combination-Amplification-Factor-Kombinationsregel dar. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass nacheinander jeder der n Temperaturanteile einmal als „Basislast“ voll eingesetzt wird, während alle anderen Anteile abgemindert werden. Der ungünstigste Beanspruchungswert dieser n Kombinationen ist maßgebend. Die CAF-Regel findet in der Normung Anwendung für die Kombination von linearem vertikalen Temperaturunterschied ΔT_{MY} und konstantem Temperaturanteil ΔT_N ([15], [22], [14]).

Die allgemeine Form der CAF-Regel lautet für die Kombination von mehreren Temperaturanteilen $T_{\psi,i}$:

$$\begin{array}{l} \text{für } n=2 \\ T_{\psi,1} \oplus \omega_2 \cdot T_{\psi,2} \\ \omega_1 \cdot T_{\psi,1} \oplus T_{\psi,2} \end{array} \qquad \text{Allgemein} \qquad \left\{ 1,0 \cdot T_{\psi,i} \oplus \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \omega_j T_{\psi,i} \right\} \text{ mit } \omega_j < 1$$

Darin sind $T_{\psi,i}$ die repräsentativen positiven und negativen Werte einer Temperatureinwirkung und ω_j Kombinationsbeiwerte zur Abminderung aller anderen Temperaturanteile $T_{\psi,j \neq i}$. Die Linearisierung besteht in der Bestimmung der Kombinationsbeiwerte ω . Aus dem Umstand, dass innerhalb einer Konstruktion verschiedene Vorzeichenkombinationen $\{v_{\psi,i}\}$ auftreten können, ergibt sich zwangsläufig, dass es verschiedene Grade der Vereinfachung der Kombinationskurve geben muss. Es lassen sich verallgemeinert vier Abstufungen angeben:

Stufe	Verallgemeinerungsstufe	Anzahl der Kombinationsbeiwerte
1	<i>Kombinationsregel mit zwei Unterscheidungen: a) der Vorzeichenkombination und b) nach positiven und negativen Temperaturbeanspruchungen</i>	$2^{(n+1)}$
2	<i>Kombinationsregel mit alleiniger Unterscheidung nach positiven und negativen Temperaturlasten</i>	2^n
3	<i>Allgemeine Kombinationsregel ohne Unterscheidungen von Vorzeichenkombination sowie positiven und negativen Temperaturbeanspruchungen</i>	$2^{(n-1)}$
4	<i>Kombination aller Temperaturanteile ohne Abminderung ($\omega_i=1,0$)</i>	1

Ziel der Verallgemeinerung ist eine Linearisierung der gekrümmten Kombinationsfläche. Parameter der Linearisierung sind Kombinationsbeiwerte ω_i . Wegen der rasch ansteigenden Zahl der Kombinationswerte wird eine Lösung für zwei miteinander zu kombinierende Temperaturanteile hergeleitet, die sich analog auf drei und mehr Temperaturanteile übertragen lässt.

Rechnerisch können sich negative Kombinationswerte ergeben. In diesen Fällen kann der zugehörige Temperaturanteil in der Bauwerksbemessung vernachlässigt werden, da der Nicht-Ansatz eine auf der sicheren Seite liegende Annahme darstellt. Es gilt also die Bedingung $1 \geq \omega_i \geq 0$.

4.7.1 Stufe 1 - Kombinationsregel mit Unterscheidung der Vorzeichenkombination und für positive und negative Temperaturlasten

Die Kombinationsfläche grenzt den sicheren Lastannahmebereich von dem unsicheren Lastannahmebereich ab. Eine Temperaturlastannahme im sicheren Bereich weist einen höheren Sicherheitsindex auf – liegt also auf der sicheren Seite. Dieser Bereich grenzt sich stets in

konvexer Form vom unsicheren Lastannahmereich ab. Hängen die Extremwerte der Temperaturanteile $T_{\psi,1}$ und $T_{\psi,2}$ linear voneinander ab, so geht die Kombinationskurve in eine Gerade über.

Für $n=2$ kann eine Linearisierung durch zwei Geraden g_1 und g_2 entsprechend Abbildung 4.6 vorgenommen werden. g_1 und g_2 schneiden sich im Anteilsverhältnis $a_{\psi,1} = a_{\psi,2} = 0,5$ auf dem Niveau $T_K(a_{\psi,1} = a_{\psi,2} = 0,5)$. Theoretisch wäre auch ein anderes Anteilsverhältnis $a_{\psi,i} \neq 0,5$ als Kreuzungspunkt annehmbar, so dass der Abstand von Kombinationskurve zu den Geraden g_1 und g_2 minimiert wird. Aus praktischen Erwägungen wird davon jedoch kein Gebrauch gemacht.

In Abbildung 4.6 wurde beispielhaft eine mögliche Kombinationskurve für eine positive Temperatureinwirkung $T_{K,pos}$ der Vorzeichenkombination $\{++\}$ dargestellt. Bei $a_{\psi,1} = 1,0$ spielt der Temperaturanteil $T_{\psi,2}$ keine Rolle, so dass der Kombinations-Temperaturkennwert $T_K(a_{\psi,1} = 1)$ den repräsentativen Extremwert des Temperaturanteiles $T_{\psi,1}$ annimmt. Bei $a_{\psi,1} = 0,0$ gilt entsprechendes: $T_K(a_{\psi,1} = 0,0) = T_{\psi,2}$.

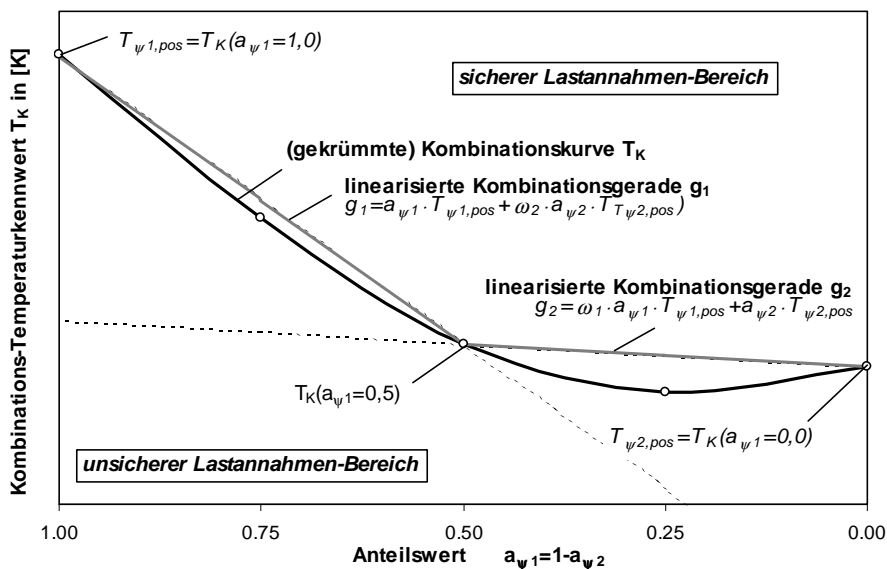


Abbildung 4.6 Linearisierung der gekrümmten Kombinationskurve $T_{\{++\},pos}$ durch zwei Geraden g_1 und g_2 mit Schnittpunkt beim Anteilswert $a_{\psi,1} = a_{\psi,2} = 0,5$.

Die Geraden g_1 und g_2 folgen den Beziehungen (4.13). Die Steigungsfaktoren ω_1 und ω_2 errechnen sich nach den Gleichungen (4.14).

$$\begin{aligned} g_1 &= a_{\psi,1} \cdot T_K(a_{\psi,1}) + \omega_2 \cdot a_{\psi,2} \cdot T_K(a_{\psi,2}) = a_{\psi,1} \cdot T_{\psi,1,pos} + \omega_2 \cdot (1 - a_{\psi,1}) \cdot T_{\psi,2,pos} \\ g_2 &= \omega_1 \cdot a_{\psi,1} \cdot T_K(a_{\psi,1}) + a_{\psi,2} \cdot T_K(a_{\psi,2}) = \omega_1 \cdot a_{\psi,1} \cdot T_{\psi,1,pos} + (1 - a_{\psi,1}) \cdot T_{\psi,2,pos} \end{aligned} \quad (4.13)$$

mit

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{2 \cdot T_K(a_{\psi,1} = 0,5) - T_K(a_{\psi,1} = 0,0)}{T_K(a_{\psi,1} = 1,0)} = \frac{2 \cdot T_K(a_{\psi,1} = 0,5) - T_{\psi,2,pos}}{T_{\psi,1,pos}} \\ \omega_2 &= \frac{2 \cdot T_K(a_{\psi,1} = 0,5) - T_K(a_{\psi,1} = 1,0)}{T_K(a_{\psi,1} = 0,0)} = \frac{2 \cdot T_K(a_{\psi,1} = 0,5) - T_{\psi,1,pos}}{T_{\psi,2,pos}} \end{aligned} \quad (4.14)$$

So lassen sich für jede der vier Kombinationskurven zwei Steigungsfaktoren ermitteln, die zu nachfolgend angegebenen Temperaturkombinationen führen. Die Bestimmungsgleichungen der Kombinationsfaktoren sind im Anhang A.8 angegeben.

Vorzeichenkombination	Extremum	Kombinationsregel		Gleichung
{++}	positives	i	$T_{\psi,1,pos} \oplus \omega_{\psi,2,\{++\},pos} \cdot T_{\psi,2,pos}$ $\omega_{\psi,1,\{++\},pos} \cdot T_{\psi,1,pos} \oplus T_{\psi,2,pos}$	(4.15a)
	negatives	ii	$T_{\psi,1,neg} \oplus \omega_{\psi,2,\{++\},neg} \cdot T_{\psi,2,neg}$ $\omega_{\psi,1,\{++\},neg} \cdot T_{\psi,1,neg} \oplus T_{\psi,2,neg}$	(4.15b)
{+-}	positives	iii	$T_{\psi,1,pos} \oplus \omega_{\psi,2,\{+-\},pos} \cdot T_{\psi,2,neg}$ $\omega_{\psi,1,\{+-\},pos} \cdot T_{\psi,1,pos} \oplus T_{\psi,2,neg}$	(4.15c)
	negatives	iv	$T_{\psi,1,neg} \oplus \omega_{\psi,2,\{+-\},neg} \cdot T_{\psi,2,pos}$ $\omega_{\psi,1,\{+-\},neg} \cdot T_{\psi,1,neg} \oplus T_{\psi,2,pos}$	(4.15d)
12 Eingangswerte: $T_{\psi,1,pos}$ $T_{\psi,1,neg}$ $T_{\psi,2,pos}$ $T_{\psi,2,neg}$ $\omega_{\psi,1,\{++\},pos}$ $\omega_{\psi,1,\{++\},neg}$ $\omega_{\psi,1,\{+-\},pos}$ $\omega_{\psi,1,\{+-\},neg}$ $\omega_{\psi,2,\{++\},pos}$ $\omega_{\psi,2,\{++\},neg}$ $\omega_{\psi,2,\{+-\},pos}$ $\omega_{\psi,2,\{+-\},neg}$				

Tabelle 4.2 Kombinationen zweier Temperaturanteile, Verallgemeinerungsstufe 1

T_K kann demnach durch die oben aufgeführten repräsentativen Extremwerte und die zugehörigen Kombinationswerte auf der sicheren Seite linear angenähert werden. Folglich kann in Gleichung (4.11) der Wert T_K durch den ursprünglichen Summenausdruck in Gleichung (4.10) ersetzt werden, wobei anstelle der Zeitreihen $T_{\psi,i}(t)$ nunmehr die um den Kombinationswert ω_i verminderten repräsentativen Extremwerte $T_{\psi,i,pos/neg}$ ersetzt werden.

In den Berechnungsverfahren wie der FEM ergibt sich die Systemnormierung in Übertragungs-, Anteils- und Vorzeichenfaktor für jede Bemessungsstelle automatisch, so dass einzig die Temperatureinwirkungen entsprechend obiger Kombinationsregeln eingesetzt werden müssen. Die maßgebenden Tragwerksreaktionen werden durch Anwendung der aufgeführten Temperatur-Kombination ermittelt.

4.7.2 Stufe 2 - Kombinationsregel mit Unterscheidung positive und negative Temperaturlasten

Sollen bei der Bestimmung der Kombinationsbeiwerte die möglichen Vorzeichenkombinationen nicht unterschieden werden, so verändert sich die Zahl der zu untersuchenden Lastkombinationen nicht, da diese Zahl allein durch die Binominal-Algebra festgelegt ist. Gleichwohl halbiert sich die Zahl der Kombinationsbeiwerte von $2^{(n+1)}$ auf 2^n . In Tabelle 4.3 sind die erforderlichen Lastkombinationen einschließlich der Kombinationswerte für $n=2$ zusammengefasst. Die Kombinationsbeiwerte lassen sich direkt aus den Steigungsfaktoren der Verallgemeinerungsstufe 1 gewinnen:

$$\begin{aligned}
 \omega_{\psi,1,pos} &= \max(\omega_{\psi,1,\{++\},pos}; \omega_{\psi,1,\{+-\},pos}) & \omega_{\psi,1,neg} &= \max(\omega_{\psi,1,\{++\},neg}; \omega_{\psi,1,\{+-\},neg}) \\
 \omega_{\psi,2,pos} &= \max(\omega_{\psi,2,\{++\},pos}; \omega_{\psi,2,\{+-\},pos}) & \omega_{\psi,2,neg} &= \max(\omega_{\psi,2,\{++\},neg}; \omega_{\psi,2,\{+-\},neg})
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Vorzeichenkombination	Extremum	Kombinationsregel	Gleichung	
{+ +} und {+ -}	positives	i	$\begin{matrix} T_{\psi,1,pos} & \oplus & \omega_{\psi,2} \cdot T_{\psi,2,pos} \\ \omega_{\psi,1,pos} \cdot T_{\psi,1,pos} & \oplus & T_{\psi,2,pos} \end{matrix}$	(4.17)a
		ii	$\begin{matrix} T_{\psi,1,pos} & \oplus & \omega_{\psi,2} \cdot T_{\psi,2,neg} \\ \omega_{\psi,1,pos} \cdot T_{\psi,1,pos} & \oplus & T_{\psi,2,neg} \end{matrix}$	
	negatives	iii	$\begin{matrix} T_{\psi,1,neg} & \oplus & \omega_{\psi,2} \cdot T_{\psi,2,pos} \\ \omega_{\psi,1,neg} \cdot T_{\psi,1,neg} & \oplus & T_{\psi,2,pos} \end{matrix}$	(4.17)b
		iv	$\begin{matrix} T_{\psi,1,neg} & \oplus & \omega_{\psi,2} \cdot T_{\psi,2,neg} \\ \omega_{\psi,1,neg} \cdot T_{\psi,1,neg} & \oplus & T_{\psi,2,neg} \end{matrix}$	
8 Eingangswerte: $T_{\psi,1,pos}$ $T_{\psi,1,neg}$ $T_{\psi,2,pos}$ $T_{\psi,2,neg}$ $\omega_{\psi,1,pos}$ $\omega_{\psi,1,neg}$ $\omega_{\psi,2,pos}$ $\omega_{\psi,2,neg}$				

Tabelle 4.3 Kombinationen zweier Temperaturanteile, Verallgemeinerungsstufe 2

4.7.3 Stufe 3 – Allgemeine Kombinationsregel ohne jegliche Unterscheidung

Die Allgemeine Kombinationsregel ohne jegliche Unterscheidung zwischen positiven oder negativen Kombinationen und der Vorzeichenkombinationen erfordert weiterhin vier Lastkombinationen. Jedoch verbleibt für jeden Temperaturanteil nur noch ein Kombinationsbeiwert, so dass die CAF-Regel lautet:

Vorzeichenkombination	Extremum	Kombinationsregel	Gleichung	
{+ +} und {+ -}	positives	i	$\begin{matrix} T_{\psi,1,pos} & \oplus & \omega_{\psi,2} \cdot T_{\psi,2,pos} \\ \omega_{\psi,1} \cdot T_{\psi,1,pos} & \oplus & T_{\psi,2,pos} \end{matrix}$	(4.18)a
		ii	$\begin{matrix} T_{\psi,1,pos} & \oplus & \omega_{\psi,2} \cdot T_{\psi,2,neg} \\ \omega_{\psi,1} \cdot T_{\psi,1,pos} & \oplus & T_{\psi,2,neg} \end{matrix}$	
	negatives	iii	$\begin{matrix} T_{\psi,1,neg} & \oplus & \omega_{\psi,2} \cdot T_{\psi,2,pos} \\ \omega_{\psi,1} \cdot T_{\psi,1,neg} & \oplus & T_{\psi,2,pos} \end{matrix}$	(4.18)b
		iv	$\begin{matrix} T_{\psi,1,neg} & \oplus & \omega_{\psi,2} \cdot T_{\psi,2,neg} \\ \omega_{\psi,1} \cdot T_{\psi,1,neg} & \oplus & T_{\psi,2,neg} \end{matrix}$	
6 Eingangswerte: $T_{\psi,1,pos}$ $T_{\psi,1,neg}$ $T_{\psi,2,pos}$ $T_{\psi,2,neg}$ $\omega_{\psi,1}$ $\omega_{\psi,2}$				

Tabelle 4.4 Kombinationen zweier Temperaturanteile, Verallgemeinerungsstufe 3

Analog zu Abschnitt 4.7.2 werden die Kombinationsbeiwerte $\omega_{\psi,1}$ und $\omega_{\psi,2}$ aus dem Maximum der detaillierteren Kombinationsbeiwerte der Verallgemeinerungsstufe 1 gebildet:

$$\begin{aligned} \omega_{\psi,1} &= \max(\omega_{\psi,1,\{++,\},pos}; \omega_{\psi,1,\{+-,\},pos}; \omega_{\psi,1,\{++,\},neg}; \omega_{\psi,1,\{+-,\},neg}) \\ \omega_{\psi,2} &= \max(\omega_{\psi,2,\{++,\},pos}; \omega_{\psi,2,\{+-,\},pos}; \omega_{\psi,2,\{++,\},neg}; \omega_{\psi,2,\{+-,\},neg}) \end{aligned} \quad (4.19)$$

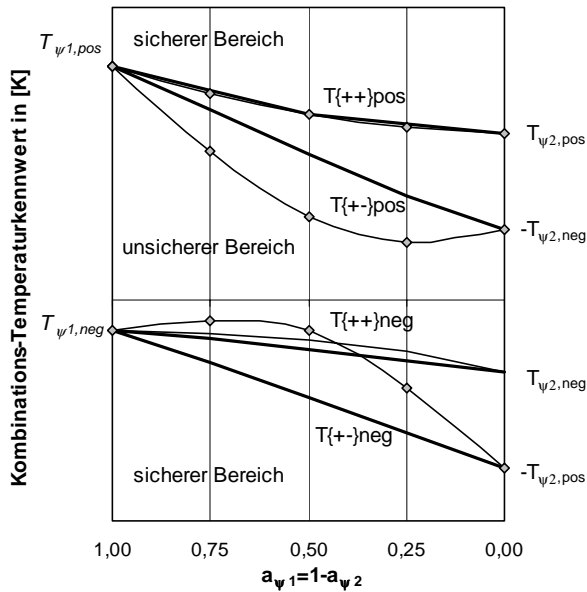


Abbildung 4.7
Linearisierte Kombinationskurven bei Anwendung der Verallgemeinerungsstufe 3

4.7.4 Stufe 4 – Kombination ohne Abminderung

Der ungünstigste Fall einer Kombinationsregel stellt die Verwendung der Kombinationsbeiwerte $\omega_i=1,0$ dar. Es ist festzustellen, dass aufgrund der Zahl der binomial festgelegten Vorzeichenkombinationen in der Systemübertragung (Tabelle 4.1 auf Seite 78) keine allgemeinere Reduktion der erforderlichen Zahl von 2^n Lastkombinationen möglich ist. Allein die Zahl der auszuweisenden Kombinationsfaktoren ist von der gewählten Verallgemeinerungsstufe abhängig und schwankt für n Temperaturanteile zwischen n und $n \cdot (n-1) \cdot 2^n$.

4.7.5 Kombinationsregel in der gegenwärtigen Normung

In der gegenwärtigen Normung wird das gleichzeitige Wirken des konstanten Temperaturanteiles ΔT_N und des linearen vertikalen Temperaturunterschiedes ΔT_M durch folgende Kombinationsregel erfasst [14], [15], [22]:

$$\begin{matrix} \Delta T_N \oplus \omega_M \cdot \Delta T_M \\ \omega_N \cdot \Delta T_N \oplus \Delta T_M \end{matrix} \quad \text{mit} \quad \begin{matrix} \omega_M = 0,75 \\ \omega_N = 0,35 \end{matrix} \quad (4.20)$$

Der ungünstigste Fall ist maßgebend. Die angegebene Kombinationsregel ist der Verallgemeinerungsstufe 3 zuzuordnen, da lediglich zwei Kombinationswerte angegeben werden. Es ist festzustellen, dass die Anwendung dieser Kombinationsregel 8 Berechnungen erfordert, also nicht weniger als bei Angabe von 8 Kombinationsbeiwerten. In der Literatur ist keine Abschätzung oder Herleitung der Faktoren ω_N und ω_M zu finden. Nur in besonderen Fällen wird in der Norm der Ansatz eines horizontalen Temperaturunterschiedes verlangt. Daher findet er keinen Eingang in die o.g. Kombinationsregel und muss damit, falls ungünstig wirkend unabgemindert berücksichtigt werden. Die Bestimmung einer Kombinationsregel für die Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY} ist für den überwiegenden baupraktischen Bereich ausreichend.

4.7.6 Grenze des CAF-Regel-Formates

Das gegebene Format der CAF-Regel steht im Einklang mit der üblicherweise im Bauwesen verwendeten Kombinationsbeschreibung veränderlicher Lasten. Für Temperaturbeanspruchungen zeigt sich aber, dass die Zahl der erforderlichen Berechnungskombinationen nicht reduziert werden kann und die Reduktion auf zwei Kombinationsbeiwerte zu einer deutlichen Überbewertung bestimmter Belastungssituationen führt (vgl. Abbildung 4.7 für die Vorzeichenkombination $T\{+ -\}$).

Es ist unmittelbar einzusehen, dass die Kombinationsbeiwerte gemäß der Beziehung (4.14) von der Größe der Kombinationstemperaturkennwerte T_K abhängen. Wird beispielsweise anstelle der Kombination $DT_N \oplus DT_{MY}$ die adäquate Kombination $\Delta T_N \oplus \Delta T_{MY}$ mit $\Delta T_N = DT_N$ und $\Delta T_{MZ} = DT_{MY} \cdot h$ gebildet, werden jeweils unterschiedliche Kombinationsbeiwertpaare ermittelt. Wird zudem die Temperaturschwankung gegenüber der Referenztemperatur $T_0 (=10^\circ\text{C})$ angesetzt, ändert sich der Kombinationsbeiwert ω_N zu $\omega_N \text{ bzgl. } T_0$, denn die anzusetzende Bauwerkstemperatur muss in jedem Fall die gleiche bleiben:

$$\omega_{N \text{ bzgl. } T_0} = \frac{\omega_N \cdot \Delta T_{N \text{ bzgl. } 0^\circ\text{C}} - T_0}{\Delta T_{N \text{ bzgl. } 0^\circ\text{C}} - T_0} \quad (4.21)$$

Daher sind die Kombinationsfaktoren keine verallgemeinerbaren Faktoren. Zur Beschreibung des repräsentativen Temperaturzustandes für zwei Temperaturanteile $T_{\psi,1}$ und $T_{\psi,2}$ ist folglich die Ermittlung und Angabe der acht Kombinationskennzahlen gemäß Tabelle 4.5 ausreichend. Die daraus resultierende Kombinationsfläche wird durch 8 Bemessungspunkte eingegrenzt, welche die Kombinationen $(1 \cdot T_{\psi,1} \oplus \omega_{\psi,2} \cdot T_{\psi,2})$ und $(\omega_{\psi,1} \cdot T_{\psi,1} \oplus 1 \cdot T_{\psi,2})$ für alle Vorzeichenkombinationen $\{++\}$ und $\{+-\}$ markieren (Abbildung 4.8 und Anhang A.8).

$T_{K,\{+-\},neg}$	$T_{\psi,2,pos}$	$T_{K,\{++\},pos}$	Tabelle 4.5 Kompakte Beschreibung der Kombinationsfläche von $T_{\psi,1} \oplus T_{\psi,2}$ durch acht Bemessungspunkte
$T_{\psi,1,neg}$	$T_{\psi,1} \oplus T_{\psi,2}$	$T_{\psi,1,pos}$	
$T_{K,\{++\},neg}$	$T_{\psi,2,neg}$	$T_{K,\{+-\},pos}$	

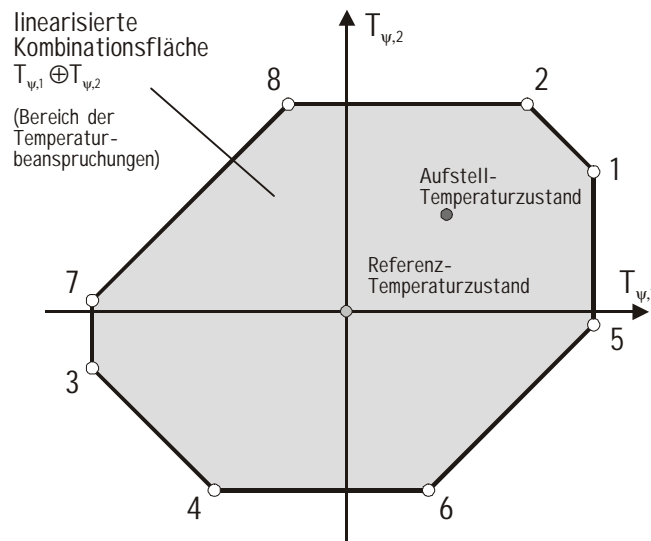


Abbildung 4.8
8 Bemessungspunkte zweier Temperaturanteile, siehe Anhang A.8

5 Der Zufallsprozess der Temperaturbeanspruchungen

5.1 Allgemeines

Wie alle veränderlichen Einwirkungen werden auch Temperaturbeanspruchungen in der Bauwerksbemessung durch repräsentative Werte quantifiziert. Normativ sind Einwirkungen unterschiedlicher Lastniveaus festgelegt, die dem Sicherheitserfordernis der konkreten Bemessungsaufgabe gerecht werden. Da es sich im vorliegenden Fall um zeitlich veränderliche Einwirkungen handelt, sind die Beanspruchungsniveaus entweder an eine Auftretenshäufigkeit oder an eine maximal zugelassene Wirkungsdauer innerhalb eines Bezugszeitraumes geknüpft [16].

Da die klimatischen Einwirkungen auf die Außenbauwerke stochastischen Charakter haben, sind die idealisierten Temperaturanteile, welche den Erwärmungszustand des Brückenbauwerkes beschreiben, ebenfalls zufallsbehaftet. Mit der vorgenommenen Zerlegung der nichtlinearen Temperaturfelder in Abschnitt 3.3 liegen mehrere parallele Temperaturzeitreihen $T_{\psi,i}(t)$ vor, welche in ihrer zeitlichen Entwicklung zu analysieren sind. Durch die Verwendung gemessener Klimadaten für die Temperaturfeldberechnung bleibt der Zufallscharakter bis hin zu diesen Temperaturzeitreihen erhalten. Sie bilden deshalb die Datenbasis für die Bestimmung repräsentativer Temperatureinwirkungen.

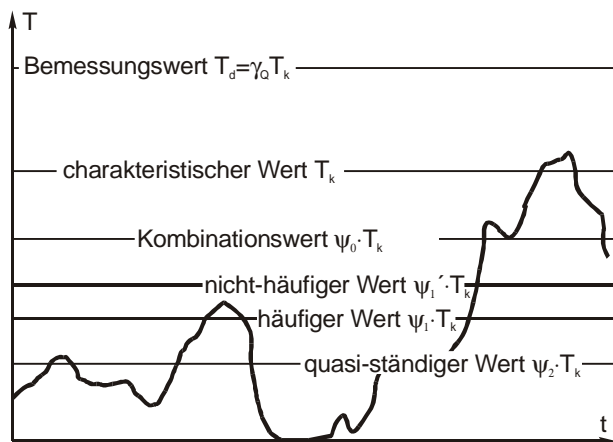


Abbildung 5.1
repräsentative Werte einer zeitlich veränderlichen Last, Prinzipdarstellung nach [24]

Da es letztlich um die Bestimmung von Lastwerten zur Bauwerksbemessung geht, sind diejenigen repräsentativen Temperaturzustände von Interesse, die das Überschreiten der Bauwerksreaktion mit einer vorgegebenen Auftretenshäufigkeit repräsentieren. Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, dass dazu eine (linearisierte) Kombinationsfläche zu bilden ist, die das gemeinsame Auftreten mehrerer Temperaturanteile widerspiegelt. Mit der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Systemnormierung sind aus den Zeitreihen der idealisierten Temperaturanteile $T_{\psi,i}(t)$ gewichtete Zeitreihen $T_K(t, \{a_{\psi,i}\}, \{v_{\psi,i}\})$ abzuleiten.

$$T_K(t) = \sum_{i=1}^n a_{\psi,i}^{(s)} \cdot v_{\psi,i}^{(s)} \cdot T_{\psi,i}(t) \quad (5.1)$$

Die auszuwertende Basisvariable $X(t)$ wird folglich durch die Zeitreihen $T_K(t)$ gebildet.

In der Tragwerksbemessung werden klimatische Temperatureinwirkungen als in sich geschlossene Lastgruppe behandelt. Die gleichen Gründe für die Entwicklung einer Kombinationsregel innerhalb dieser Gruppe treffen auch für die Berücksichtigung von Temperatureinwirkungen mit anderen veränderlichen Einwirkungen wie Wind, Schnee und Verkehr zu. Diese Lastkombinationen sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

5.2 Variabilität der Rahmenbedingungen

Die Möglichkeit der modellhaften Simulation von Temperaturfeldern erlaubt die Festlegung der thermodynamischen Randparameter für eine konkrete Situation. Da jedes Brückenbauwerk aufgrund seiner individuellen Beschaffenheit und Positionierung in der Umwelt eine eigene Beanspruchungscharakteristik aufweist, ist die Bauwerksantwort also von mehreren meist voneinander unabhängigen Einflüssen abhängig, wie:

- a) regionale Unterschiede der klimatischen Einwirkungen,
- b) Variation der thermischen Umgebungsbedingungen,
- c) Positionierung in der Umgebung,
- d) Unterschiede in der Bauform der Brücke,
- e) Variabilität der thermophysikalischen und mechanischen Materialeigenschaften

Die Veränderung eines der genannten Parameter bewirkt zwangsläufig eine Änderung der auszuwertenden Datenbasis. Folglich kann erst mit Erfassung des gesamten o.g. Parameter-raumes eine Hüllfläche ermittelt werden, innerhalb derer sich die Temperaturbeanspruchungen bewegen. Diese wird umso größer, je mehr Parameter vollständig abgedeckt werden. Dazu ist es jedoch erforderlich, mit einem geeigneten Verfahren Extrembeanspruchungen unterschiedlicher Auftretenshäufigkeit für eine konkrete Situation zu bestimmen. Dafür muss vereinfachend angenommen werden, dass die o.g. Parameter zeitlich unveränderlich sind.

5.3 Wiederkehrperiode von Temperatureinwirkungen

Bei der Bestimmung von repräsentativen Temperatureinwirkungen ist von vorrangigem Interesse, in welchen zeitlichen Abständen ein bestimmter Niveauwert erreicht wird. Diese Zeitspanne wird Wiederkehrperiode R genannt. Sie ist derart definiert, dass ein R -jähriges Ereignis T_R im Durchschnitt einer unendlichen Folge von Jahren alle R Jahre auftritt. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten des Beanspruchungsniveaus T_R in jedem Jahr gleich, unabhängig davon, ob in vorangegangenen Zeitintervallen bereits Überschreitungen stattfanden.

Die Verwendung der Wiederkehrperiode als Niveaukriterium für eine veränderliche Einwirkung beruht auf der Überlegung, dass die Belastungen, denen ein Bauwerk standhalten muss, erst durch Zuordnung von Belastungsintensität und Auftretenshäufigkeit aussagekräftig sind [107]. Temperatureinwirkungen sind eine niederfrequente veränderliche Last mit täglichem Zyklus und werden durch einen Tagesminimal und –maximalwert eingegrenzt. Weist der Tagesverlauf zwei Beanspruchungsspitzen auf, wird dabei nur der größere Wert als einma-

liges Ereignis gewertet. In der Regel ist es gleichgültig, ob mehrere Lastspiele innerhalb weniger Wochen auftreten oder höchstens eine Überschreitung in einem Jahr auftritt. Maßgeblich ist die Zahl der Lastspiele eines Beanspruchungsniveaus.

In Abbildung 5.2 sind beispielhaft unterschiedliche Wiederkehrperioden der maximalen Lufttemperatur in Hannover dargestellt, basierend auf der Auswertung der Jahresmaximalwerte. Es ist an diesen Messdaten nachweisbar, dass es für die Bestimmung eines R-jährigen Wertes nicht unwesentlich ist, ob nur Jahresextremwerte oder alle Tagesextremwerte berücksichtigt werden. Wird beispielsweise nur die registrierte Jahresmaximaltemperatur der Luft berücksichtigt, so wird der 10-jährige Wert per Definition in den vorliegenden 50 Jahren etwa 5 Mal erreicht oder überschritten. Dies ist für die Lufttemperatur 34,9°C der Fall. Werden die täglichen Extrema als Einzelereignisse betrachtet, so wird im gegebenen Zeitraum die Lufttemperatur 34,9°C an insgesamt 11 Tagen überschritten, was einer Wiederkehrperiode von $R \approx 4,5J$ statt 10J entspricht ($\rightarrow R = 49/11 \approx 4,5 \text{ Jahre}$). Die Lufttemperatur, welche im Mittel alle 10 Jahre erreicht oder überschritten wird, beträgt 36,2°C.

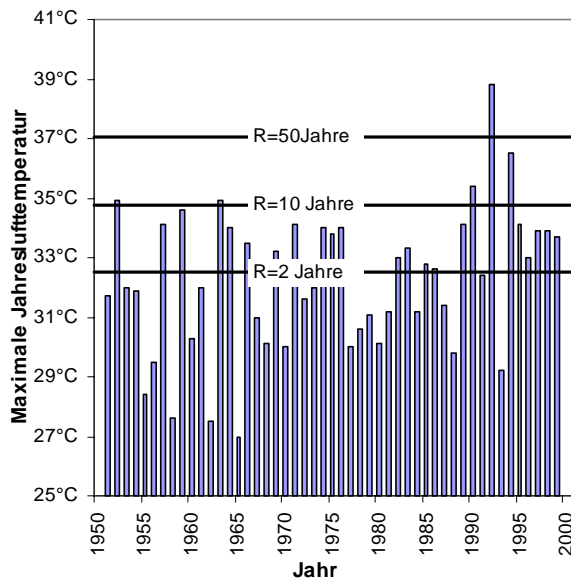


Abbildung 5.2
 Beispiel unterschiedlicher Wiederkehrperioden der maximalen Lufttemperatur in Hannover, basierend auf den *Jahresmaximaltemperatures* von 1951 bis 2000

Gegen die Verwendung jährlicher Extremwerte zur Bestimmung R-jähriger Temperatureinwirkungen sprechen daher folgende Fakten: Einerseits wird nur der Jahresextremwert als ein Ereignis gewertet und alle anderen niedrigeren Beanspruchungen gehen nicht in die Analyse mit ein. Andererseits stehen keine kontinuierlichen Klimadatenreihen zur Verfügung, die eine 50- oder langjährigere Temperaturfeldsimulation ermöglichen. Die Ermittlung R-jähriger Temperaturbeanspruchungen basiert somit auf den täglichen Extremwerten der Temperatureinwirkungen $T_K(t, \{a_{\psi_i}\}, \{v_{\psi_i}\})$.

5.4 Repräsentative Beanspruchungsniveaus

Die Temperatureinwirkungen werden gemäß des Sicherheitskonzeptes im Ingenieurbau durch einen charakteristischen und weitere repräsentative Werte quantifiziert. Sie sind Mittelwerte oder Fraktile statistischer Verteilungen [16], [24]. Basislast ist die charakteristische Temperaturbeanspruchung T_k . Sie ist als diejenige Einwirkung definiert, welche im Mittel alle 50 Jahre auftritt ($T_k = T_{R=50\text{Jahre}}$). Für die Nachweise der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit werden – orientiert am zu untersuchenden Lastfall - verschiedene niedrigere Lastniveaus angesetzt. Eine Definition dieser Lastniveaus findet sich in der DIN 1055-100. Saisonale Unterschiede werden darin nicht berücksichtigt.

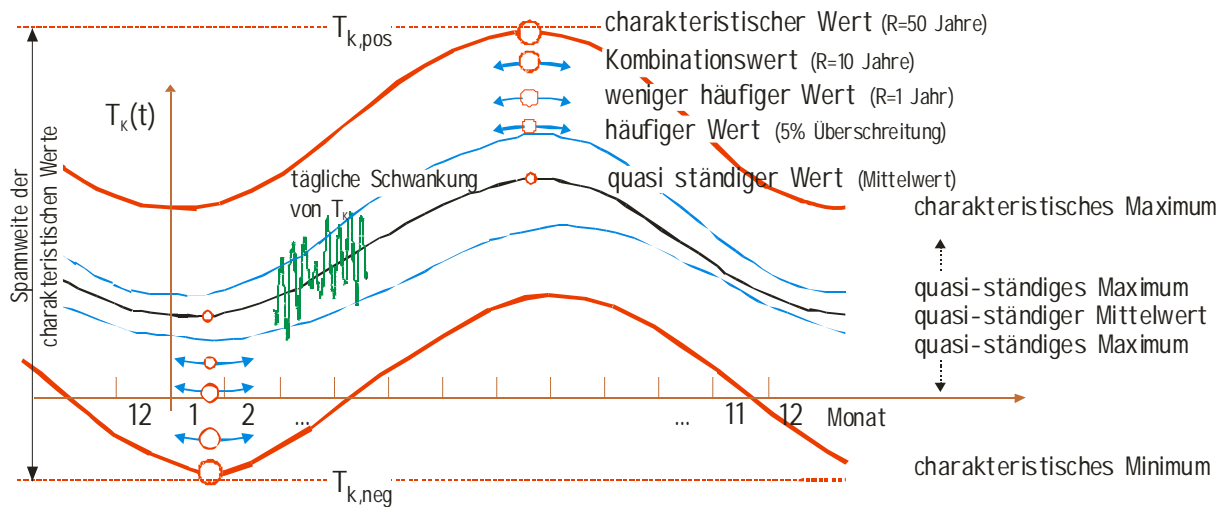


Abbildung 5.3 Schematische Darstellung repräsentativer Werte der saisonal veränderlichen Temperatureinwirkungen

Mit Abbildung 5.3 wird schematisch veranschaulicht, dass für klimatisch bedingte Temperatureinwirkungen insbesondere der „häufige“ und „quasi-ständige“ Extremwert dem saisonalen Verlauf der Beanspruchungen folgen muss, da dieser andernfalls in bestimmten Zeiten permanent überschritten und in anderen Zeitabschnitten gar nicht erreicht würde. Unter diesem Aspekt werden nachfolgend die verschiedenen Einwirkungsniveaus hinsichtlich einer Auswertung der Temperatur-Zeitreihen erörtert und ggf. dem Charakter der Temperaturbeanspruchungen angepasst.

Seltenes Ereignis – Charakteristischer Wert T_k

Einwirkung, die mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren erreicht oder überschritten wird. Sie entspricht der 98%-Fraktile für den Bezugszeitraum 1 Jahr. (nach [16])

Die seltene Beanspruchung ist bei nicht-umkehrbaren Auswirkungen auf das Tragwerk maßgeblich, z.B. bei der Begrenzung bleibender Verformungen. Der charakteristische Wert T_k einer Temperatureinwirkung ist mit obiger Definition eindeutig festgelegt. Jeder Temperaturanteil wird somit durch einen positiven und einen negativen charakteristischen Wert eingegrenzt ($T_{k,pos}$ und $T_{k,neg}$), der im Mittel alle 50 Jahre erreicht oder überschritten wird. Es ist davon auszugehen, dass die definierte Überschreitungshäufigkeit nur ein einmaliges Überschreiten innerhalb von 50 Jahren erlaubt (im Mittel). In analoger Weise lassen sich mit der

gleichen Definition charakteristische Monatswerte berechnen, die sich auf einen konkreten Monat beziehen.

Kombinationswert $\psi_0 \cdot T_k$

Der dem Kombinationswert $\psi_0 \cdot T_k$ zugehörige Bemessungswert $T_d = \gamma_F \cdot \psi_0 \cdot T_k$ wird in der Regel so festgelegt, dass er entweder in einem Bezugszeitraum von einem Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% nicht überschritten, oder T_d in 10 Jahren maximal 1-mal erreicht oder überschritten wird. (Hinweis: Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis ist $\gamma_F = 1,0$) (nach [16])

Der Kombinationswert $\psi_0 \cdot T_k$ wird verwendet zur Bestimmung des Bemessungswertes bei der Kombination unabhängiger, gleichzeitig auftretender Einwirkungen. Er wird in der gegenwärtigen Normenregelung ([14], [15], [22]) für Temperaturbeanspruchungen nicht ausgewiesen. Der Kombinationswert ist für $\gamma_F = 1,0$ analog zum charakteristischen Wert bestimmbar.

Nicht-häufiger Wert $\psi_1' \cdot T_k$

Der nicht-häufige Wert $\psi_1' \cdot T_k$ wird im Mittel nicht häufiger als einmal pro Jahr erreicht oder überschritten. (nach [16])

Die Definition des nicht-häufigen Wertes $\psi_1' \cdot T_k$ durch die obige Regelung ist ebenfalls eindeutig. Seine Bestimmung ist grundsätzlich nicht aus Jahresextremwerten ableitbar, sondern erfordert die Auswertung der Extremwertverteilung der täglichen Extremwerte.

Als Alternativwert für die nicht-häufige Beanspruchung ist die Wiederkehrperiode $R=2$ Jahre anwendbar, da sie einerseits die Definition der Überschreitenshäufigkeit „nicht häufiger als einmal im Jahr“ einhält und andererseits auch einsetzbar ist, wenn nur Jahresextremwerte vorliegen. Sie entspricht der 50%-Fraktile für den Bezugszeitraum 1 Jahr.

Häufigster Wert $\psi_1 \cdot T_k$

Die Überschreitungshäufigkeit von $\psi_1 \cdot T_k$ ist auf 300-mal je Jahr bzw. 5% des Zeitraums begrenzt. (nach [16])

Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis bei umkehrbaren Auswirkungen auf das Tragwerk wird der häufige Beanspruchungswert verwendet. Für die Definition des häufigen Wertes $\psi_1 \cdot T_k$ werden zwei Alternativen benannt. Die erstere besagt, dass dieser Wert maximal 300 Mal pro Jahr überschritten werden darf (im Mittel). Im Hinblick auf Temperaturbeanspruchungen könnte diese Festlegung nur bedeuten, dass der häufige Wert an höchstens 300 Tagen überschritten wird. Allerdings dürfte damit der häufige Wert des Beanspruchungsmaximums kleiner sein als der quasi-ständige Wert und sogar kleiner als der häufige Wert des Beanspruchungsminimums.

Die zweite, vorzuziehende Alternative ist daher die Begrenzung der Überschreitenshäufigkeit auf höchstens 5% der Gesamtzeit. Da sich die Auswertung auf die Tagesminimal- bzw. Tagesmaximalwerte bezieht, wird die 5%-Regelung auf diese Extremwerte angewandt. Damit wird ein geringfügig höheres Einwirkungsniveau erzielt als mit dem in [29] vorgeschlagenen Niveau. Dort ist für den häufigen Wert eine mittlere Wiederkehrperiode des Extremwertes von zwei Wochen angenommen worden. Da den Analysen in [29] Datenkollektive von Tagesextremwerten aus den Monaten Juni bis August zugrunde gelegt wurden, gelten die dort ausge-

wiesenen häufigen Werte folglich nur für diesen Jahreszeitraum. Wie aus Abbildung 5.3 hervorgeht, muss der häufige Wert mit einem saisonalen Bezug ausgewertet werden.

Quasi ständiger Wert $\psi_2 \cdot T_k$

Der quasi ständige Wert $\psi_2 \cdot T_k$ kann als zeitlicher Mittelwert betrachtet werden, der mit einer Häufigkeit von 50% über- bzw. unterschritten wird. (nach [16])

Zum Gebrauchstauglichkeitsnachweis von Langzeit-Auswirkungen auf das Tragwerk wird der quasi-ständige Wert herangezogen. Dieser Wert ist definitionsgemäß der zeitliche Mittelwert der Temperaturbeanspruchung, wird also in 50% der Zeit überschritten und in 50% der Zeit unterschritten.

Der Begriff des quasi-ständigen Wertes wird nur teilweise der Charakteristik der Temperaturbeanspruchungen gerecht, da er wegen des zyklischen Jahresganges der Temperatureinwirkungen nicht tatsächlich die mittleren Beanspruchungen in allen Jahreszeiten repräsentiert. Hinzu kommt, dass je nach gegebener Fragestellung Beanspruchungen entweder auf dem Niveau der Extremwerte oder dem Niveau der Momentanwerte von Bedeutung sind.

Es ist zweckmäßig, nur die durchschnittlichen saisonbezogenen Tagesextremwerte zu bestimmen. Der quasi-ständige Wert nach obiger Definition ist dann aus dem Mittelwert von quasi-ständigen Minimum und Maximum abzuleiten.

5.5 Verfahren zur Ermittlung repräsentativer Werte

Für die Ermittlung repräsentativer Temperatureinwirkungen sind in der Literatur verschiedene Vorgehensweisen zu finden. Die Grundzüge dieser Verfahren werden in den nachfolgenden Abschnitten kurz dargestellt. Zur Ermittlung von Extremwerten und die Ableitung von Kombinationsregeln weisen sie jedoch Nachteile auf, was die Erarbeitung von Extrapolationsmethoden erforderte, die zum Einen den gesamten Jahresverlauf der Temperatureinwirkungen und zum anderen die jahreszeitlichen Unterschiede berücksichtigen. Sie sind Gegenstand der Abschnitte 5.6 und 5.7.

5.5.1 Verwendung idealisierter Klimadaten

Eine mögliche Vorgehensweise zur Extrapolation von extremen Temperatureinwirkungen besteht in der Auswertung ungünstiger, extremer Wettersituationen und der Formulierung idealisierter Klimadaten auf der Basis dieser Extremsituationen. Darin werden Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung statistisch ausgewertet und i.d.R. 95% bzw. 98%-Fraktile der Klimadatenverteilungen als ungünstige klimatische Randparameter eingesetzt [123], [124]. Um verschiedene klimatische Einwirkungssituationen zu erfassen, wurden in [92] mehrere Parametersätze zusammengestellt, die Grundlage zur Ermittlung von Temperaturlastannahmen bilden. Auf der Basis dieser Parametersätze erfolgt die Berechnung der Temperaturreaktionen des Brückentragwerkes, deren Minima bzw. Maxima die gesuchten Extremwerte bilden. Eine Zuweisung der Wiederkehrperiode der Temperaturbeanspruchungen ist nur näherungsweise möglich. Außerdem ist die Festlegung extremer Witterungsverhältnisse stark an das Bauwerk und die betrachtete Temperaturreaktion geknüpft.

5.5.2 Auswertung partieller Zeitreihen

In [29] wurden zur Ableitung von repräsentativen Beanspruchungen Simulationsrechnungen mit gemessenen Klimadaten durchgeführt. Die dafür verwendete Datenbasis umfasste einen dreimonatigen Abschnitt (1. Juni bis 31. August) aus fünf aufeinander folgenden Jahren. Es wurde unter Annahme der stochastischen Unabhängigkeit von 3-Tagesextremwerten die 3-Tagesmaximalwerte (der vertikalen Temperaturunterschiede) ausgewertet. Zur Berechnung der Extrembeanspruchungen unterschiedlicher Wiederkehrperiode wurde weiterhin angenommen, dass die Stichproben der einseitig begrenzten Extremverteilung Typ III (E3) folgen. Zwei Parameter dieser Verteilung sind aus dem Mittelwert und der Standardabweichung der simulierten 3-Tagesextrema abgeleitet worden. Als dritter Parameter wurde die obere Grenze der E3-Verteilung gesetzt. Mit Hilfe der Inversfunktion der E3-Verteilung konnten damit repräsentative Werte unterschiedlicher Wiederkehrperiode bestimmt werden. Die verwendeten Fraktile für die dreißig jährlich verfügbaren Stichprobenwerte sind in Tabelle 5.1 angegeben. In [62] wurde gezeigt, dass auch die Pearson-3-Verteilung (P3) verwendbar ist.

Einwirkungsniveau	Fraktile der Extremwertverteilung	Einwirkungsniveau	Fraktile der Extremwertverteilung
„selten“ <i>R=50 Jahre</i>	$P = 1 - \frac{1}{30 \cdot 50}$	„häufig“, <i>R=14 Tage</i>	$P = 1 - \frac{1}{(14/3)}$
„weniger häufig“, <i>R=1 Jahr</i>	$P = 1 - \frac{1}{30 \cdot 1}$	„quasi-ständig“, <i>R=3Tage</i>	$P = 1 - \frac{1}{2}$

Tabelle 5.1 In [29] zugrunde gelegte Fraktile der Extremwertverteilung zur Bestimmung repräsentativer Werte unterschiedlichen Einwirkungs niveaus

Dieses Verfahren erlaubt in relativ einfacher Weise die Bestimmung unterschiedlicher Fraktile der Temperaturbeanspruchung. Jedoch sind verschiedene Punkte als kritisch zu werten:

- a) Durch die Einschränkung des Zeitraums Juni-August werden Extremwerte außerhalb dieser Zeitspanne nicht mit berücksichtigt. Für ein allgemeines Berechnungsverfahren wäre somit die Auswahl von ungünstigen Beanspruchungszeiträumen erforderlich (Beispiel: Sommermonate für Bauwerkserwärmung, Wintermonate für extreme Bauwerksabkühlung). Der häufige und quasi-ständige Extremwert bezieht sich ausschließlich auf den zugrunde gelegten Zeitraum
- b) Eine Änderung der Dauer und der saisonalen Lage des partiellen Zeitraums führt zwangsläufig zu anderen Mittelwerten (→ quasi-ständiger Wert) und Standardabweichungen. Außerdem sind die Tagesextremwerte nicht homogen verteilt: Die Beanspruchungen am Anfang und Ende des Zeitraums Juni bis August sind im Mittel stets niedriger als in der Mitte dieses Zeitabschnittes. Damit wird eine verzerrte Extremwertverteilung angenommen, in der nur die im Kulminationszeitraum auftretenden Extremwerte den letztlich interessierenden Fraktilenbereich beeinflussen.
- c) Die in [29] und [62] vorgenommene Extraktion der 3-Tages-Extremwerte soll eine Autokorrelation zwischen den Stichprobenwerten ausschließen. Es kann jedoch gezeigt werden, dass selbst die 3-Tagesextremwerte der Lufttemperatur autokorrelieren, was damit auch für die Temperaturreaktionen des Bauwerkes zutrifft.

- d) Nachrechnungen haben gezeigt, dass zur Anpassung der theoretischen E3-Verteilung anstelle eines oberen Grenzwertes x_0 die Schiefe als dritter Verteilungsparameter herangezogen werden darf.

5.5.3 Komponentenerlegung und Generierung einer Zeitreihe

Eine den saisonalen Charakter der Temperaturbeanspruchungen berücksichtigende Verfahrensweise findet sich in [3]. Die Auswertung der dort zugrunde gelegten kontinuierlichen dreijährlichen Temperaturmessdaten beziehen sich auf die Tagesextremwerte der maximalen Bauwerksmitteltemperatur und des vertikalen Temperaturunterschiedes von Massivbrücken. Es wird zunächst festgestellt, dass sich diese Tagesextremwerte aus einem periodischen (saisonalen) Anteil und einer zufälligen Komponente zusammensetzen. Mittels Fourierkoeffizienten wird der periodische Part der Zeitreihe bestimmt und von dieser abgezogen, so dass für die weitere statistische Auswertung der Zufallsanteil zur Verfügung steht. Dieser wird an eine Normalverteilung angepasst, wodurch alle erforderlichen Informationen zusammengefasst werden auf die Periodenparameter, den Mittelwert und die Standardabweichung.

Die Berechnung repräsentativer Extremwerte erfolgt in [3] über die Generierung einer 2000-jährigen Zeitreihen aus der Überlagerung der periodischen Komponente und dem normalverteilt angenommenen Zufallsanteil. Aus diesen Zeitreihen sind Temperaturwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode durch eine Rangstatistik ausgewertet worden. Damit werden die in Abschnitt 5.5.2 genannten Punkte a) und b) umgangen, in dem der gesamte Jahreszeitraum zur Extrapolation herangezogen wird.

Die Autokorrelation aufeinander folgender Strichprobenwerte wird jedoch nicht ausgeschlossen, da jeder Tagesextremwert verwendet wird. Die Anpassung des gesamten Zufallsanteiles an eine Normalverteilung ist als Näherung zu verstehen, da schon durch die unterschiedliche Sonnenscheindauer und Strahlungsintensität die klimatischen Einwirkungen saisonal unterschiedliche Verteilungsparameter aufweisen.

Die Generierung von Zufallszeitreihen zur statistischen Analyse ist mit den bei Monte-Carlo-Methoden bekannten Eigenschaft behaftet: Für jede Generierung werden andere Extremwerte bestimmt, deren Streuung jedoch durch Anhebung des Simulationszeitraumes reduziert werden kann [106].

5.5.4 Weitere Verfahren

In der Hoch- und Niedrigwasseranalyse werden ebenfalls Berechnungen der Wiederkehrperiode von Hoch- und Niedrigwasserereignissen durchgeführt. Diese basieren meist auf der statistischen Auswertung von Jahreshöchst- bzw. Niedrigstabflüssen. Wegen des begrenzten Umfangs der Temperatur-Datenbasis werden diese Verfahren nicht angewendet [6], [19], [20], [47], [71].

5.6 Extrapolationsverfahren

Zur Ermittlung repräsentativer Extremwerte werden zwei Extrapolationsverfahren erarbeitet, welche jeweils auf einem Komponentenmodell aufbauen. Die Unterscheidung des periodischen und stochastischen Charakters in [3] wird aufgegriffen, da sie der realen Beanspruchungsentwicklung im Jahreszyklus entspricht und saisonale Effekte durchgängig berücksichtigt werden können. Im ersten Verfahren wird die Überschreitenswahrscheinlichkeit eines vorgegebenen Beanspruchungsniveaus x_R für jeden Monat des Jahres ermittelt. Daraus lässt sich die Wiederkehrperiode von x_R auf dem Bezughorizont eines Jahres berechnen. Über einen iterativen Rechenablauf werden daraus Extremwerte unterschiedlicher Beanspruchungsniveaus errechnet. Datengrundlage dieses Verfahrens sind in Anlehnung an [29] die 3-Tages-Extremwerte der Temperatureinwirkungszeitreihen. Damit besteht zwar wie in [3], [29] und [62] eine Autokorrelation zwischen den Stichproben. Durch die Komponentenerlegung der Zeitreihen, die monatsweise Berücksichtigung der Zufallseigenschaften stellt diese Verfahrensweise eine Verbesserung gegenüber den vorgenannten Lösungen dar.

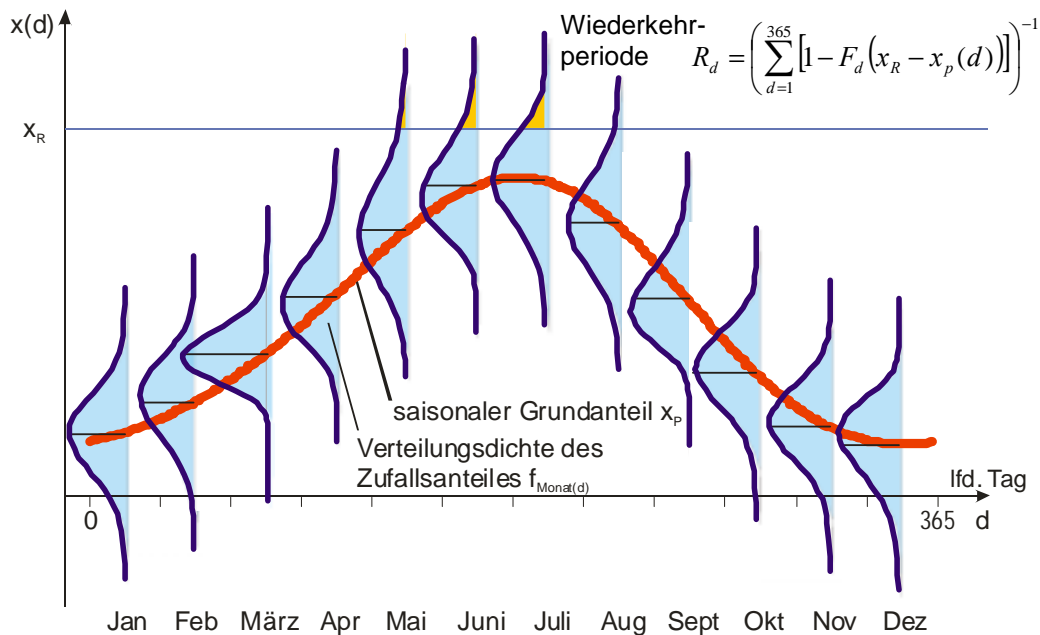


Abbildung 5.4 Zerlegung der Zeitreihen durch ein Komponentenmodell zur Ermittlung repräsentativer Extremwerte

Da gezeigt werden kann, dass die Klimaeinwirkungen und folglich auch die Temperatureinwirkungen auf Brückenbauwerke autoregressiven Charakter haben, wird ein weiteres Verfahren umgesetzt. Repräsentative Extremwerte werden darin über eine Monte-Carlo-Simulation bestimmt, d.h. einer Generierung einer Zeitreihe aus dem ermittelten saisonalen Grundanteil und einem AR-Prozess, dessen Parameter gleichfalls für jeden Monat des Jahres ausgewertet werden. Aus dieser erzeugten Zeitreihe werden Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode durch eine Rangstatistik ausgewertet. Auf dieses Verfahren wird im Kapitel 5.7 eingegangen.

5.6.1 Komponentenmodell

Sowohl die klimatischen Temperatureinwirkungen als auch die sich daraus ergebenden Temperaturreaktionen setzen sich aus einem deterministischen und einem stochastischen Anteil zusammen. Der deterministische Anteil gliedert sich dabei in einen transienten und einen periodischen Teil. Das dieser Arbeit zugrunde gelegte Modell ist durch Gleichung (5.2) gegeben und unterscheidet Trend, Periode und Zufallsanteil [4].

$$X = X_t + X_p + X_z \quad (5.2)$$

Die Basisvariable X wird gebildet durch die täglichen Extremwerte der berechneten Temperatur-Zeitreihen T_K . Je nach auszuwertendem Extremwert besteht die n Werte umfassende Stichprobe aus Tagesmaximalwerten oder Tagesminimalwerten von T_K . Analog zu Gleichung (5.2) gilt dann:

$$x(i) = x_t(i) + x_p(i) + x_z(i) \quad \text{mit} \quad i = 1..n \quad (5.3)$$

Alternativ kann die Zeitreihe derart indiziert werden, dass der Zeitschritt i der Phase nach dem Jahrestag d entspricht. Dies ist insbesondere für die Ermittlung des periodischen Anteiles notwendig, da die jährliche Periodendauer von 365 Tagen bekannt ist.

$$i = d + j \cdot 365 \quad \text{mit} \quad d=1,2,\dots,365 \quad \text{und} \quad j=0,1,\dots,\infty$$

5.6.2 Trendkomponente

Weisen die klimatischen Einwirkungen einen langfristigen Trend auf, so wird sich dies ebenfalls in den Temperaturreaktionen widerspiegeln. In der gegenwärtigen Diskussion zur globalen Erderwärmung wird von einem Anstieg der mittleren Lufttemperatur zwischen +2K und +5K in den nächsten 100 Jahren ausgegangen. Die vorhandenen Klimamodelle erlauben aufgrund der komplexen Mechanismen nur ungefähre Prognosen. Auch für Deutschland ist zu erwarten, dass die Lufttemperatur im Mittel ansteigen wird, so dass neue Maximalwerte erreicht werden. Durch die höhere Aufnahmefähigkeit von Wassermolekülen in der Atmosphäre ist gleichsam mit einer geringfügigen Abnahme der Globalstrahlung zu rechnen [5]. Ebenso werden sich Bewölkung, Niederschlag und Dauer von verschiedenen Wetterlagen ändern. Das Prognoseproblem der Klimaveränderung ist letztlich an verschiedene wirtschaftliche und gesellschaftspolitische Entwicklungen geknüpft [5], [32], [33], [99]. Vereinfachend wird deshalb davon ausgegangen, dass die verwendeten Klimadatenreihen keine Tendenz aufweisen. Die Auswirkung einer Klimaänderung auf die Temperaturbeanspruchung von Brückenbauwerken muss eigenständig thematisiert werden.

Eine weitere Trendkomponente tritt auf, wenn sich die thermischen Randbedingungen des Bauwerkes oder aber auch der Materialeigenschaften wie das Absorptionsvermögen der Oberflächen im Laufe der Zeit ändern. Dies ist beispielsweise bei zunehmender Verschmutzung der Bauwerksflächen der Fall. Solche transienten Effekte sind durch Temperaturfeldberechnungen mit variierenden Eingangsparametern zu erfassen. Sprungartige Änderungen im

Temperaturverhalten treten bei Veränderungen am Brückenquerschnitt auf, wie nach dem Aufbringen eines Anstrichs oder dem Belageinbau. Solche Änderungen können nicht durch Langzeitsimulationen von Temperaturfeldern analysiert werden und müssen eigenständig untersucht werden.

Der lineare Trend einer Zeitreihe mit n Stichproben x(t) wird mit dem Regressionskoeffizienten a_x beschrieben, der sich nach Gleichung (5.4) bestimmt [6].

$$a_x = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x(i) \cdot i) - \sum_{i=1}^n x(i) \cdot \sum_{i=1}^n i}{n \cdot \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (5.4)$$

Ein Trend kann ausgeschlossen werden, wenn die Hypothese nicht widerlegt werden kann, dass der Regressionskoeffizient nur zufällig von Null verschieden ist. Unter Annahme einer normalverteilten Grundgesamtheit schlägt [6] den Hypothesentest mit der t-Verteilung unter zweiseitiger Fragestellung vor. Die zu prüfende Größe t_x berechnet sich mit Gleichung (5.5). Sie folgt genau genommen nur bei normalverteilten Messwerten exakt der t-Verteilung, so dass dieser Test nur als Abschätzung angesehen werden kann.

$$t_x = \frac{a_x}{s_x} \sqrt{\sum_{i=1}^n i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad \text{mit} \quad (5.5)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (x(i) - b_x - a_x \cdot i)^2} \quad (5.6)$$

$$b_x = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x(i) - a_x \cdot \sum_{i=1}^n i\right) \quad (5.7)$$

Datenreihe	Einwirkungsgröße	Anz.d. Werte n	Regressionskoeffizient a _x [1/Tag]	Prüfgröße t _x	Prüfwert t _{α=0,05}	Hypothese „kein Trend“
Garching 1	min T _{Luft}	3289	1,08·10 ⁻⁴	0,855	1,96	angenommen
	Tagesmittel T _{Luft}		0,04·10 ⁻⁴	0,025		angenommen
	max T _{Luft}		-1,16·10 ⁻⁴	0,719		angenommen
	Tägl. Globalstrahlungssumme		-2,95·10 ⁻⁴	0,007		angenommen
Osnabrück 1	min T _{Luft}	1097	-14,47·10 ⁻⁴	1,464	1,962	angenommen
	Tagesmittel T _{Luft}		-11,48·10 ⁻⁴	1,779		angenommen
	max T _{Luft}		-11,63·10 ⁻⁴	1,544		angenommen
	tägl. Globalstrahlungssumme		34,44·10 ⁻⁴	-0,422		angenommen

Tabelle 5.2 Hypothesentest „kein Trend“ für die zur Temperaturfeldsimulation verwendeten Klimadatenreihen GAR1 [74] und OS1 [76]

Die den Langzeitsimulationen zugrunde gelegten Klimadatenreihen GAR1 und OS1 wurden hinsichtlich ihrer Trendkomponente untersucht. Dafür wurden die täglichen Extremwerte der

Lufttemperatur, die Tagesmitteltemperatur und sowie die Globalstrahlungssumme analysiert. Die Prüfung mit der t-Verteilung erfolgt mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha=0,05$, dass kein Trend in den vorliegenden Datenreihen enthalten ist (Tabelle 5.2). Es ist allerdings zu erwarten, dass längere Zeitreihen mit fünfzig und mehr Jahren eine signifikante Trendkomponente aufweisen, was dem o.g. Erwärmungstrend des Klimas entspräche.

Ein analoger Nachweis mit modellhaft simulierten Temperaturbeanspruchungen würde zwangsläufig zu gleichen Ergebnissen führen. Bei Anwendung der o.g. Klimadatenreihen zur Extrapolation von Extremwerten entfällt somit die Extraktion der Trendkomponente.

5.6.3 Periodische Komponente

Der periodische Anteil wird primär durch die tägliche und jahreszeitliche Schwankung der Klimaeinwirkungen bestimmt. Das Bauwerk selbst ist als stationär anzusehen. Ferner kann die thermische Einbettung des Bauwerkes in die Umgebung jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen. Dies gilt insbesondere für die Reflexion der kurzwelligen Strahlung am Untergrund. Ein anschauliches Beispiel bietet hierfür eine Ackerfläche (Schwarzerde): Brachland reflektiert etwa 8 bis 15% der eintreffenden Sonnenstrahlung. Unter Bewuchs steigt die Reflexion auf 14-32%. Ist im Winter eine Schneedecke vorhanden, so reflektiert diese 80 bis 95% der Sonnenstrahlung. Da in den gemessenen Klimadaten keine Angaben des Albedo enthalten sind, wird mit einem durchschnittlichen Reflektionskoeffizienten $\rho_{\text{Untergrund}} = 0,25$ gerechnet [58], was etwa dem Wert von Rasen entspricht.

Bauwerksreaktionen weisen wie bereits erwähnt zwei grundsätzliche Regelmäßigkeiten auf. Beide sind direkt mit dem Sonnenlauf verknüpft und stellen sich in Tagesgang und jährlichem Zyklus dar. Die durchzuführenden Extremwertuntersuchungen basieren jedoch auf der Auswertung der täglich auftretenden Extremwerte, wodurch die Basisvariable X nur einen jährlichen Zyklus enthält. Von Vorteil ist, dass die Periodendauer des jährlichen Zyklus mit ≈ 365 Tagen bekannt ist. Eine Schätzung dieses Parameters ist daher nicht notwendig.

Zur Elimination des periodischen Anteiles aus den Zeitreihen werden zwei Verfahrensweisen angewendet: die Methode der Mittelwertbildung und die Bildung eines Linienspektrums

1) Mittelung

Die Methode der Mittelwertbildung geht davon aus, dass die zu analysierende Zeitreihe in Zeitreihen der (Perioden-) Länge 365Tage (= 1Jahr) zerlegt wird. Der Mittelwert aller Stichprobenwerte gleicher Phasenlage ergibt nach Gleichung (5.8) im Mittel den periodischen Anteil der m Jahre umfassenden Zeitreihe mit d als laufenden Tag im Jahr. In der Regel liegen nur wenige vollständige Jahreszyklen vor, so dass diese Methode nur unzureichend den periodischen Anteil liefert. Zudem wird keine analytische Aussage über die Form von x_p gewonnen. Allerdings ist diese Methode für die Mittelung von Tagesgängen gut geeignet, da eine deutlich größere Anzahl von Zyklen vorliegt und charakteristische Merkmale von Tagesgängen herausgefiltert werden können (vgl. Abbildung 2.29 auf Seite 50). Liegen insgesamt m Jahreszyklen vor, dann gilt:

$$x_p(d) \approx \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} x(d + j \cdot 365) \quad (5.8)$$

2) Bildung des Linienspektrums des periodischen Anteiles

Der periodische Anteil $x_p(d)$ kann mittels einer Fourier-Reihe beschrieben werden. Dann gilt für eine n Stichproben umfassende Zeitreihe die Gleichung (5.9).

$$x_p(i) = x_p(d + j \cdot 365) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^K a_k \cdot \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{365} \cdot i\right) + \sum_{k=1}^K b_k \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{365} \cdot i\right) \quad (5.9)$$

mit den Fourierkoeffizienten

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x(i) \\ a_k &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x(i) \cdot \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{365} \cdot x(i)\right) \\ b_k &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x(i) \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{365} \cdot x(i)\right) \end{aligned} \quad (5.10)$$

Wegen des Jahreszyklus der klimatischen Einwirkungen treten keine höheren innerjährigen Frequenzen in der periodischen Komponente auf. Für die Bildung eines Linienspektrums zu Darstellung der Tagesmaximalwerte der Temperatureinwirkungen ist die Begrenzung auf $k=3$ Frequenzen ausreichend.

5.6.4 Zufallsanteil

Werden von der gegebenen Basisvariablen X der Trend X_t und die periodische Komponente X_p abgezogen, so erhält man den Zufallsanteil X_z , der allein durch die Zufallseigenschaften des Wetters hervorgerufen wird.

$$x_z(i) = x(i) - x_t(i) - x_p(i) \quad (5.11)$$

Von diesem Zufallsanteil sind für jeden Monat Mittelwert, Standardabweichung und Schiefe bestimmbar. Nach einer Anpassung an eine theoretische Verteilungsfunktion stehen alle zur Extrapolation notwendigen Daten zur Verfügung. Zur Parameterschätzung wird in der vorliegenden Arbeit auf die Momentenmethode zurückgegriffen. Die Parameterschätzung und Bias-Korrektur zur Erfassung des begrenzten Stichprobenumfangs erfolgt nach den in [83] angegebenen Methoden.

Für die Beurteilung der Anpassungsgüte der theoretischen Verteilung an die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Stichprobe wird der Kolomogoroff-Smirnov-Test angewandt. Bei diesem wird getestet, ob die Verteilungsfunktion $F_x(x)$, der die vorliegende Stichprobe entstammt, als die Verteilung der Grundgesamtheit angesehen werden darf [103]. Beim K-S-Test bezieht man sich auf die maximale Abweichung D_n der Summenhäufigkeitsverteilung $F_x(x_i)$ der Stichprobenwerte von der angepassten theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilung $\tilde{F}(x_i)$.

$$D_n = \max \left\{ \begin{array}{l} \max_{i=1}^n \left(\left| F_x(x_i) - \tilde{F}(x_i) \right| \right) \\ \max_{i=1}^{n-1} \left(\left| F_x(x_i) - \tilde{F}(x_{i+1}) \right| \right) \end{array} \right. \quad (5.12)$$

Dieser Prüfwert D_n wird mit einem kritischen Wert D_n^α getestet, der vom Stichprobenumfang und dem Signifikanzniveau α abhängt. Die angepasste Verteilung wird bei $D_n < D_n^\alpha$ angenommen. Als Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = P(D_n^\alpha > D_n)$ wird für die Verteilungsanpassung 5% angesetzt. D_n^α liegt z.B. in [6] und [103] in tabellierter Form vor.

Im Falle der zu analysierenden Temperatureinwirkungen liegen keine Informationen über die statistischen Eigenschaften der Grundgesamtheit vor. Daher müssen die Prüfwerte des un spezifizierten K-S-Tests verwendet werden. In [6] sind aus Simulationsuntersuchungen kritische Prüfwerte für verschiedene Verteilungen für den Fall geschätzter Parameter für Stichprobenumfänge zwischen 10 und 200 ermittelt worden. Für die P3-Verteilung sind Werte für D_n^α in mehreren Tabellen für unterschiedliche Wertebereiche des Schiefekoeffizienten angegeben.

Für die 3-Tages-Extremwerte des Zufallsanteiles zeigen die Normalverteilung und die P3-Verteilungen gute Anpassungsergebnisse.

5.6.5 Bestimmung der Überschreitenswahrscheinlichkeit

Ausgangspunkt der Bestimmung der Überschreitenswahrscheinlichkeit eines Temperatureinwirkungsniveaus T_R mit der Wiederkehrperiode R ist die Betrachtung zweier disjunkter Ereignisse A und B , dass heißt es gilt für deren Auftretenswahrscheinlichkeiten $P\{A\} + P\{B\} = 1$. Dabei steht A für das Überschreiten eines Einwirkungsniveaus T_R und B für das Nicht-Überschreiten. Die Wahrscheinlichkeit P , dass in n künftigen Jahren ein Ereignis $T \geq T_R$ genau m -mal eintritt, ergibt sich dann aus der Binominalverteilung:

$$P(T \geq T_R) = \binom{n}{m} \cdot \left(\frac{1}{R}\right)^m \cdot \left(1 - \frac{1}{R}\right)^{(n-m)} \quad (5.13)$$

Folglich wird ein 50-jähriges Ereignis in dem Bezugszeitraum „1 Jahr“ mit einer Wahrscheinlichkeit von 2% genau einmal erreicht oder überschritten (\rightarrow seltenes Ereignis).

Allgemein gilt:

$$P(T \geq T_R, n = 1, m = 1) = \frac{1}{R} \quad (5.14)$$

Durch Umstellung der Gleichung (5.14) nach R kann aus einer vorliegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung von Jahresextremwerten die Jährigkeit eines Beanspruchungsniveaus rückgerechnet werden. Die gegebene Beziehung gilt allerdings nur, wenn im Bezugszeitraum ein einzelnes Ereignis auftritt bzw. nur ein Ereignis berücksichtigt wird. Wird die Häufigkeitsverteilung durch k Werte je Jahr gebildet, so ist in den genannten Gleichungen R durch $k \cdot R$ zu ersetzen.

Die hinsichtlich verschiedener Wiederkehrperioden zu untersuchenden Zeitreihen aus Tagesextremwerten werden mit den oben dargelegten Methoden in mehrere Komponenten zerlegt. Aus mehreren Gründen wurde dabei die Trendkomponente ausgeschlossen: Einerseits liegt der berechnete Trend in den zur Temperaturfeldsimulation verwendeten Klimadatenreihen unterhalb der Signifikanzgrenze und andererseits ist ein zu erwartender Erwärmungstrend auch aus 10-20jährigen Datenreihen nicht zuverlässig anwendbar. Andererseits wären dann die Extremwerte ebenfalls trendbehaftet. Die wahrscheinlichkeitstheoretische Beziehung zur Extrapolation der Extremwerte schließt deshalb nur die Komponenten X_p und X_z ein.

Ausgangspunkt ist die Betrachtung der Temperaturbeanspruchungen der Tag mit der laufenden Nummer d eines jeden Jahres. Der saisonale (periodische) Grundanteil hat am laufenden Tag d eines Jahres den Wert $x_p(d)$. Ferner ist der zufällige Anteil $x_z(d)$ in einer unendlichen Folge von Jahren zufallsverteilt mit der Verteilungsfunktion F_d , deren Mittelwert $\mu_d=0$ ist. Wird das Ereignis, dass an einem Tag d der Wert x_R überschritten wird, mit A_d bezeichnet, so hat das Ereignis A_d die Auftretenswahrscheinlichkeit $P_d(A_d)$:

$$P_d(A_d) = P(x_z(d) \geq x_R) = 1 - F_d(x_R - x_p(d)) \quad (5.15)$$

Damit ist die Wahrscheinlichkeit P_a , dass der Wert x_R innerhalb eines ganzen Jahres erreicht oder überschritten wird die Summe aller Ereignisse A_d mit $d=1..365$.

Es gilt folglich Gleichung (5.16):

$$P_a = P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_{365}) = 1 - \prod_{d=1}^{365} [1 - P_d(A_d)] = 1 - \prod_{d=1}^{365} F_d(x_R - x_p(d)) \quad (5.16)$$

Dabei ist die Zahl der Überschreitungen von x_R unerheblich. Für einen sehr kleinen Wert x_R , bei dem mindestens für einen Tag $F_d \rightarrow 0$ geht, wird das Produkt in Gleichung (5.16) ebenfalls Null, und das Überschreiten von x_R stellt ein sicheres Ereignis dar ($P_a=1$). So ist beispielsweise die Wahrscheinlichkeit so gut wie Null, dass in Deutschland im Monat Juni die Lufttemperatur -10°C unterschritten wird. Ab einem gewissen Niveau von x_R gilt für alle Tage $F_d(x_R - x_p(d)) > 0$. Dann nimmt das genannte Produkt Werte zwischen 0,0 und 1,0 an.

In einem weiteren Schritt wird das gesamte Jahr in drei Zeitabschnitte unterteilt, wobei sich der mittlere Zeitraum von d_1 bis d_2 erstreckt. Dann ergibt sich folgende Ungleichung:

$$\prod_{d=1}^{365} F_d(x_R - x_p(d)) \leq \prod_{d=d_1}^{d_2} F_d(x_R - x_p(d)) \quad (5.17)$$

woraus folgt:

$$\begin{aligned} 1 - \prod_{d=1}^{365} F_d(x_R - x_p(d)) &\geq 1 - \prod_{d=d_1}^{d_2} F_d(x_R - x_p(d)) \\ P_a(A_1 \cup \dots \cup A_{365}) &\geq P(A_{d_1} \cup \dots \cup A_{d_2}) \end{aligned} \quad (5.18)$$

Mit dieser Ungleichung (5.18) wird belegt, dass bei Berücksichtigung eines begrenzten Zeitausschnittes $d_1 \dots d_2$ die berechnete Überschreitenswahrscheinlichkeit für ein Beanspruchungsniveau x_R geringer ist als unter Einbeziehung des gesamten Jahreszeitraumes.

Zur Bestimmung R-jähriger Werte muss daher der gesamte Jahreszeitraum berücksichtigt werden. Ein hundertjähriges Ereignis im Monat April kann auf den Jahresbezug beispielsweise immer noch ein zwanzigjähriges Extrem-Ereignis darstellen.

Die Jährigkeit eines gegebenen Wertes x_R lässt sich aus der o.g. Gleichung (5.16) ableiten. Damit gilt:

$$R_a = \frac{1}{P_a} = \left[1 - \prod_{d=1}^{365} F_d(x_R - x_p(d)) \right]^{-1} \quad \text{mit } R \in [1, \infty] \quad (5.19)$$

Bei der Bestimmung von R_a nach Gleichung (5.19) wird lediglich berücksichtigt, dass der Wert x_R innerhalb des Jahres überschritten wird, nicht aber wie oft. Die so bestimmte Rückkehrperiode wertet folglich das Überschreiten x_R je Jahr als ein Ereignis, auch wenn x_R an mehreren Tagen überschritten wurde.

Es wird aber die weiter oben begründete Forderung gestellt, dass x_R innerhalb von R Jahren nur einmal erreicht oder überschritten werden darf (im Mittel). Hierfür ist die Wahrscheinlichkeit P_d , dass an einem Tag d der Wert x_R überschritten wird durch Gleichung (5.15) gegeben. Diese besagt, dass am d-ten Tag eines Jahres x_R in n Jahren etwa $n \cdot P_d$ -mal überschritten wird. Werden alle Überschreitensereignisse des Jahres einbezogen, so ergibt sich die Zahl m der Überschreitungen des Einwirkungsniveaus x_R in n Jahren aus Gleichung (5.20):

$$m = \sum_{d=1}^{365} n \cdot P_d = n \cdot \sum_{d=1}^{365} [1 - F_d(x_R - x_p(d))] \quad (5.20)$$

Mit der Definition der Wiederkehrperiode beträgt die Zahl der Überschreitungen eines R-jährigen Ereignisses in n Jahren im Mittel $m = n/R$. Damit folgt aus Gleichung (5.20):

$$R_d = \left(\sum_{d=1}^{365} [1 - F_d(x_R - x_p(d))] \right)^{-1} \quad \text{mit } R \in \left[\frac{1}{365}, \infty \right] \quad (5.21)$$

Für repräsentative Werte, die sich auf den Bezugszeitraum eines Monats beziehen, ist in Gleichung (5.21) der Zeitbereich $d=1 \dots 365$ durch den entsprechenden kürzeren Abschnitt $d=d_1 \dots d_2$ zu ersetzen. Es gilt gleichermaßen, dass die Überschreitenswahrscheinlichkeit von x_R in einem begrenzten Zeitabschnitt $d_1 \dots d_2$ geringer ist als bei Berücksichtigung des gesamten Jahreszeitraumes ist.

Es lässt sich durch Umformung zeigen, dass ein vorgegebenes Einwirkungsniveau x_R bei Berücksichtigung aller Tagesextrema (Gl. (5.21)) eine niedrigere Wiederkehrperiode aufweist, also häufiger auftritt als bei alleiniger Betrachtung der Jahrextremwerte (Gl. (5.19))

$$R_d < R_a \quad (5.22)$$

Die Bestimmung eines repräsentativen Ereignisses aus der Basisvariablen X zielt auf die Ermittlung eines Wertes x_R unter Vorgabe der Wiederkehrperiode R_d ab. Gleichung (5.21) kann aber nicht analytisch nach x_R aufgelöst werden, weshalb nur eine iterative Lösung möglich ist.

Grundsätzlich ist es erforderlich, die Verteilungsfunktionen F_d des Zufallsanteiles jeden Tages d im Jahr zu ermitteln. Da für die Bildung der Verteilungsfunktionen F_d bei n -jährigen Zeitreihen je Tag d nur n Stichproben vorliegen, ist eine Vergrößerung des Stichprobenumfangs nur dadurch erzielbar, wenn eine monatsweise Gleichartigkeit der Wahrscheinlichkeitsverteilung F_d unterstellt wird. In Abbildung 5.4 auf Seite 98 wird dies veranschaulicht. Zur Bildung der monatlichen Verteilungsfunktionen werden, wie zu Beginn dieses Abschnittes dargelegt, die 3-Tagesextremwerte verwendet.

Alle vorangegangenen Beziehungen wurden hinsichtlich des Überschreitens von Maximalwerten formuliert. Das Unterschreiten von Minimalwerten lässt sich durch sinnngemäße Umstellung obiger Beziehungen behandeln oder aber durch Umwandlung der Minimalwert-Zeitreihe durch Negation in eine Maximalwert-Zeitreihe.

5.7 Generierung eines stochastischen Prozesses

5.7.1 Autoregression

Eine wesentliche Voraussetzung zur Anwendung statistischer Verteilungsfunktionen ist, dass aufeinander folgende Ereignisse unabhängig voneinander sind [53]. Sind Stichprobenwerte voneinander abhängig, so kann dies periodische, transiente oder autoregressive Ursachen haben. Nach der Komponentenzerlegung der Zeitreihen im Kapitel 5.6.1 sind Trend und Periode in dem Anteil X_z nicht mehr enthalten.

Ein quantitatives Maß für die Abhängigkeit zeitlich aufeinander folgender Ereignisse von den Vorhergegangenen ist der Autokorrelationskoeffizient r_d [6]:

$$r_d = \frac{(n-d) \cdot \sum_{i=1}^{n-d} (x(i) \cdot x(i+d)) - \sum_{i=1}^{n-d} (x(i)) \cdot \sum_{i=1}^{n-d} (x(i+d))}{\sqrt{\left((n-d) \cdot \sum_{i=1}^{n-d} (x(i)^2) - \left(\sum_{i=1}^{n-d} (x(i)) \right)^2 \right) \cdot \left((n-d) \cdot \sum_{i=1}^{n-d} (x(i+d)^2) - \left(\sum_{i=1}^{n-d} (x(i+d)) \right)^2 \right)}} \quad (5.23)$$

mit $d=1..m < n$; n = Anzahl der Stichproben

Der Autokorrelationskoeffizient r_d nimmt für den Phasenversatz $d=0$ den Wert Eins an. Sind die Stichprobenwerte unabhängig voneinander, so ist r_d für $d>0$ nur zufällig von Null verschieden. Nach [6] ist die Dichtefunktion der aus der Stichprobe geschätzten Werte r_d für $n>30$ näherungsweise normalverteilt mit Mittelwert $\mu=0$ und der Varianz:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n - d + 3} \tag{5.24}$$

Die Konfidenzgrenze $|r_{d,\alpha}|$ bestimmt sich dann für das Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ und dem Fraktilwert 1,96 der Standard-Normalvariablen z_α nach [6] zu:

$$|r_{d,\alpha}| = \frac{1,96}{\sqrt{n - d + 3}} \tag{5.25}$$

Übersteigt der Autokorrelationskoeffizient r_d diese Konfidenzgrenze, ist dieser nicht nur zufällig von Null verschieden: die Zeitreihe autokorreliert. Anhand der täglichen Lufttemperatur-Extrema von Osnabrück im Jahr 2000 kann gezeigt werden, dass die in [29] getroffene Annahme der Unabhängigkeit von 3-Tages-Extremwerten der Lufttemperatur unzutreffend ist. In Abbildung 5.5a sind Lufttemperaturmaximum und -Minimum im Jahresgang dargestellt (Datenbasis X), unterlegt mit dem periodischen Grundanteil X_p . Der darunter abgebildete Zufallsanteil X_z weist auf Zusammenhänge zwischen den Temperaturen aufeinander folgender Tage hin, was mit der Gleichartigkeit der Lufttemperaturen innerhalb der Wetterphasen zu begründen ist. Die Koeffizienten r_d für diese Temperaturschwankungen um den periodischen Grundanteil sind für verschiedene Zeitversätze d in der Abbildung 5.5d graphisch dargestellt. Sie weisen einen degressiven Abfall auf und sind auch nach einer Phasenverschiebung von 10 Tagen noch außerhalb des eingezeichneten Konfidenzintervalls, sie sind also signifikant verschieden von Null. Aufgrund dieser degressiven Form kann gefolgert werden, dass es sich um einen autoregressiven Prozess handelt.

Diese Autoregression lässt sich qualitativ durch eine Schematisierung von Wettervorgängen bestätigen. In der Medizinmeteorologie existiert ein Schema der Wetterphasen [105]. Mit seiner Hilfe werden Zusammenhänge zwischen verschiedenen Wettersituation und den davon beeinflussbaren Reaktionen des Menschen analysierbar.

Wph	Bezeichnung	Temperatur/Feuchte(Empfindung)	Andauer
1	Mittleres Schönwetter	kühl→mild, trocken <i>(belebend, erfrischend)</i>	1-2 Tage
2	Gesteigertes Schönwetter	mild→warm, trocken <i>(angenehm, behaglich)</i>	1-2 Tage und mehr
3	Übersteigertes Schönwetter (3f: Föhn)	warm, sehr trocken <i>(warm, sehr warm)</i>	1 Tag
4	Aufkommender Wetterumschlag (4a: aufgleiten aus Südost)	warm, feucht <i>(feuchtwarm bis schwül)</i>	6-18 Stunden (4a: 2 u. mehr Tage)
5	Wetterumschlag (5s: Südweststurm)	warm → feucht <i>(fröstelnd, nasskalt)</i>	1-12 Stunden (5s: wenige Stunden)
6	Wetterberuhigung 6z: aktive Kaltluft 6s: Trogorkan	kalt → kühl, feucht → trocken <i>(kalt, frisch)</i>	1 Tag 6z: 2 u. mehr Tage 6s: wenige Stunden

Tabelle 5.3 Typische Wetterphasen, nach [105]

Tabelle 5.3 listet die typischen Wetterphasen auf, die im Umfeld eines Tiefdruckgebietes herrschen. Die Vielfältigkeit der meteorologischen Vorgänge wird zwar sehr stark vereinfacht, dennoch ist erkennbar, dass die Wetterphasen nur in wenigen Fällen zwei und mehr Tage an-

dauern. Wegen des kausalen Zusammenhangs der Wetterphasen hängt das Wettergeschehen eines Tages zwangsläufig auch von den Bedingungen der vorangegangenen Tage ab, so dass die Klimakomponenten im Grunde aus zwei Anteilen bestehen: den Bedingungen der Vortage und den zufälligen Veränderungen des chaotischen Wettersystems.

Wie am Beispiel der Lufttemperatur-Extrema in Osnabrück gezeigt wird (Abbildung 5.5), handelt es sich bei den Lufttemperatureinwirkungen um einen autoregressiven Vorgang. Gleiches gilt somit auch für die Temperaturreaktionen eines Brückenbauwerkes. Sinnbildlich kann dies mit einem zeitlich begrenzten Erinnerungsvermögen des Wettersystems oder des Brückensystems beschrieben werden (Wärmespeichervermögen der Luftmassen bzw. des Brückentragwerkes). Der degressive Verlauf der Korrelationskoeffizienten r_d deutet nach [96] auf einen AR[1]-Prozess hin. Ein autoregressiver Prozess der Ordnung p (AR[p]) definiert sich folgendermaßen:

$$\hat{x}_z(i) = \alpha_1 \cdot \hat{x}(i-1) + \alpha_2 \cdot \hat{x}_z(i-2) + \dots + \alpha_p \cdot \hat{x}_z(i-p) + x_e(i) \quad (5.26)$$

mit

$$\hat{x}_z(i) = x_z(i) - \bar{x}_z$$

Darin ergibt sich das Ereignis $x(i)$ aus der Summe der p vorangegangenen mit einem Parameter α_j gewichteten Ereignisse $x(i-j)$ mit $j=1\dots p$ und einem White-Noise-Prozess $x_e(i)$. Der Prozess $x(i)$ ist stationär, wenn alle Wurzeln der charakteristischen Gleichung

$$\alpha(z) = 1 - \alpha_1 \cdot z - \dots - \alpha_p \cdot z^p = 0 \quad (5.27)$$

außerhalb des komplexen Einheitskreises liegen, d.h. wenn für alle z mit $|z| \leq 1$ gilt:

$$\alpha(z) \neq 0 \quad (5.28)$$

Für einen stationären AR[1]-Prozess folgt daraus unmittelbar $|\alpha_1| < 1,0$. Negative Parameter α bewirken augenscheinlich einen pendelnden Verlauf, da ein vorangegangenes Ereignis eine Vorzeichenumkehr des Folgeereignisses bewirkt. Dies entspricht nicht dem Charakter von Temperaturbeanspruchungen, sondern eher Schwingungsvorgängen. Es kann daher angenommen werden, dass sich im Falle der Temperaturbeanspruchungen der Wertebereich von α_1 auf $0 \leq \alpha_1 < 1$ beschränkt.

Eine erwartungstreue Schätzung der AR-Parameter ist die Yule-Walker-Schätzung [96]. Die Parameter werden aus den Autokorrelationskoeffizienten r_d des zugrunde liegenden Prozesses berechnet. Für höhere AR[p]-Prozesse mit $p > 1$ können die Parameter mit der Levinson-Durbin-Rekursion bestimmt werden. Theoretische Hintergründe finden sich hierzu in [83] und [96]. Nachfolgend sind die Parameterschätzungen für AR[1] bis AR[3]-Prozesse aufgeführt:

AR[1]:	$\alpha_1 = r_1$	mit r_1 und r_2 nach Gleichung (5.23)	
AR[2]:	$\alpha_1 = r_1 \cdot \frac{1-r_2}{1-r_1^2}$	$\alpha_2 = 1 - \frac{1-r_2}{1-r_1^2}$	
AR[3]:	$\alpha_1 = r_1 \cdot \frac{1-r_2}{1-r_1^2}$	$\alpha_2 = 1 - \frac{1-r_2}{1-r_1^2}$	$\alpha_3 = \frac{r_3 - \alpha_1 \cdot r_2 - \alpha_2 \cdot r_1}{1 - \alpha_1 \cdot r_1 - \alpha_2 \cdot r_2} \cdot \frac{1}{1 - \alpha_3^2}$

(Hinweis: Die Parameter sind am besten iterativ bestimmbar mit Startwert $\alpha_3=0$)

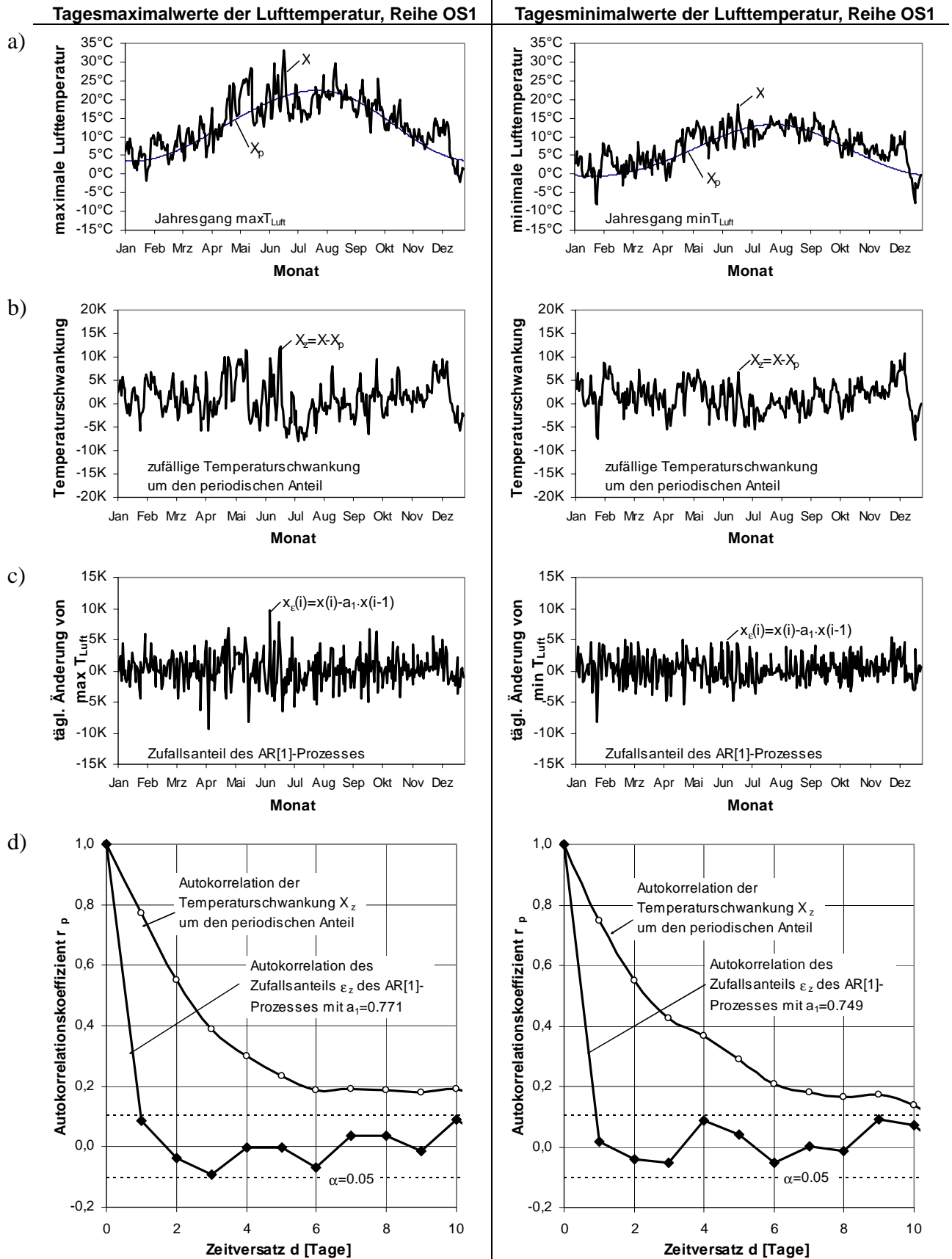


Abbildung 5.5 Zeitreihenzerlegung der täglichen Lufttemperaturmaxima in Osnabrück, Zeitreihe OS1, Jahr 2000

Nach der Parameterschätzung für α_i kann aus X_z durch Umstellen der Gleichung (5.26) der White-Noise-Prozess $x_\varepsilon(i)$ extrahiert werden. Für einen AR[1]-Prozess gilt dann:

$$x_\varepsilon(i) = \hat{x}_z(i) - \alpha_1 \cdot \hat{x}_z(i-1) \quad (5.29)$$

Für das gegebene Beispiel ist dieser Anteil aus der Temperaturschwankung X_z (Abbildung 5.5b) abgeleitet worden. Mit den Parametern $\alpha_1=0,771$ für das Maximum und $\alpha_1=0,749$ für das Minimum ergibt sich der in Abbildung 5.5c wiedergegebene Verlauf des White-Noise-Prozesses x_ε . Wie den darunter abgebildeten Periodogrammen zu entnehmen ist, liegen die Autokorrelationskoeffizienten r_d für $d \geq 1$ innerhalb des eingezeichneten Konfidenzintervalls. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass alle Ereignisse x_ε statistisch voneinander unabhängig sind. Die empirische Verteilung von x_ε kann ebenfalls monatsweise durch eine analytische Verteilungsfunktion F_ε angenähert werden. Für den White-Noise-Prozess kann eine Normalverteilung oder eine Pearson-3-Verteilung unterstellt werden.

5.7.2 Extremwert-Extrapolation durch Generierung einer Zeitreihe

Aus der Modellbildung hieraus wird ein zweites Extrapolationsverfahren abgeleitet: Sind die Verteilungsparameter bekannt, ist für jeden ein AR-Zufallsprozess mit den gegebenen autokorrelierten Zufallseigenschaften generierbar. Die hierfür notwendige Generierung des White-Noise-Prozesses mit der gegebenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion F_ε erfolgt mittels der in Abbildung 5.6 veranschaulichten Transformation gleichverteilter Zufallszahlen z_n . In Überlagerung mit dem jahreszeitlich zugehörigen Saisonalanteil x_p wird eine Zeitreihe erzeugt, die dem zugrunde gelegten stationären Prozess der Temperatureinwirkung entspricht. Erfolgt eine Generierung über eine große Zahl von Jahren, so können daraus analog zu [3] mittels einer Rangstatistik repräsentative Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode abgeleitet werden.

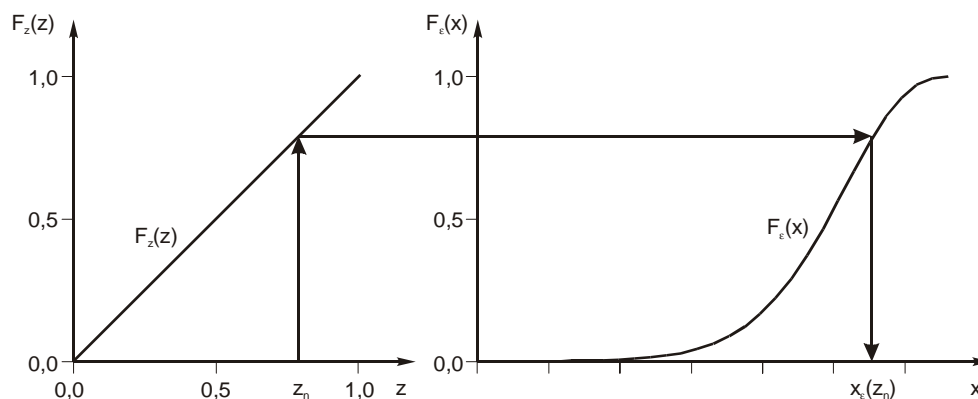
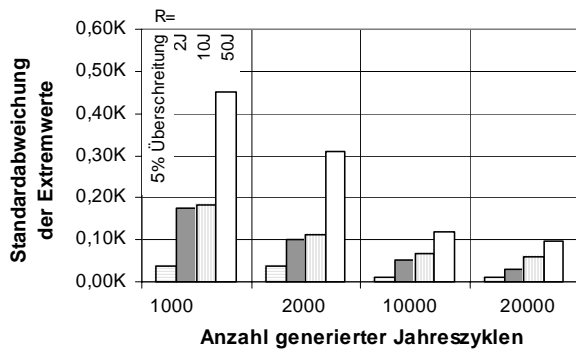


Abbildung 5.6 Transformation einer gleichverteilten Zufallsvariable z_n in eine Variable x_ε mit der Verteilungsfunktion $F_\varepsilon(z)$

Die Berechnungsergebnisse, die mittels dieses Monte-Carlo-Verfahrens ermittelt werden, sind wiederum Zufallszahlen. Mit Zunahme der Zahl an generierten Jahreszyklen nimmt die

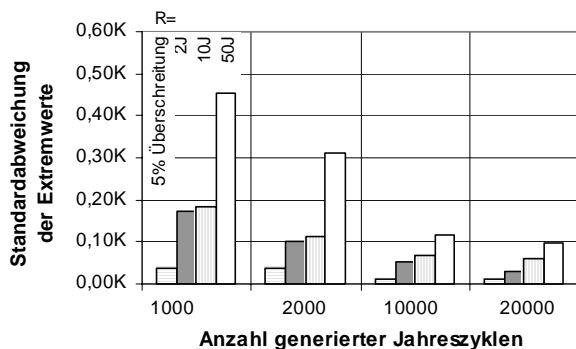
Streuung der Ergebnisse ab. Für die in Abbildung 5.5 dargestellte Zeitreihe der Lufttemperatur in Osnabrück wurde das Konvergenzverhalten mit den verschiedenen Zeitreihendauern $n=1000, 2000, 10000$ und 20000 Jahren untersucht. Hierzu erfolgten jeweils 10 Simulationsrechnungen, um eine Aussage über die Streuung der Ergebnisse zu erlangen. Die Parameterschätzungen für die Extrapolation sind in Anhang A.6 zusammengestellt. In Abbildung 5.7 sind für die Zeitreihen des Lufttemperaturmaximums und –Minimums für unterschiedliche Wiederkehrperioden die Standardabweichungen der jeweils 10 Berechnungsergebnisse aufgetragen. Die rechts nebenstehenden Tabellen enthalten den jeweilig ersten in einer Berechnungsserie ermittelten Extremwert.

a) Lufttemperaturmaximum



Wiederkehrperiode	Extremwert in °C			
Simulationsjahre n=	1000	2000	10000	20000
50 Jahre	36,5	36,3	36,4	36,4
10 Jahre	34,4	34,2	34,3	34,3
2 Jahre	32,2	32,1	32,1	32,2
5% Überschreitung	25,2	25,3	25,3	25,3

b) Lufttemperaturminimum



Wiederkehrperiode	Extremwert in °C			
Simulationsjahre n=	1000	2000	10000	20000
50 Jahre	-22,5	-22,4	-22,2	-22,1
10 Jahre	-19,0	-19,2	-19,3	-19,3
2 Jahre	-15,7	-15,4	-15,5	-15,5
5% Überschreitung	-5,0	-5,0	-5,0	-5,0

Abbildung 5.7 Konvergenzverhalten der Monte-Carlo-Simulation

Es konnte einerseits die Abnahme der Standardabweichung nach dem Grundzusammenhang $a \cdot n^{-b}$ mit dem Exponenten $b=0,23..0,56$ festgestellt werden. Auf der anderen Seite zeigen die Resultate, dass die Standardabweichung mit zunehmendem Extrapolationshorizont größer wird.

Für die Ermittlung von Extremwerten wurden in [3] Zeitreihen mit $n=2000$ Jahren generiert, so dass der 50jährige Wert etwa 40-mal in dieser Zeitreihe auftritt. Die erzielte Genauigkeit mit einer einzelnen Simulationsrechnung kann als gut eingestuft werden. Eine deutliche Verbesserung der Ergebnisstreuung wird mit der Simulation von $n=10000$ Jahren erreicht. Die Standardabweichung der Simulationsergebnisse beträgt für die Lufttemperatur weniger als $0,11K$. Ein vergleichbares Konvergenzverhalten der Berechnungsergebnisse ist für die Temperaturreaktionen des Brückenbauwerkes zu erwarten. Eine weitere Verdopplung des Rechenaufwandes erscheint aufgrund der in Abbildung 5.7 dargestellten degressiven Charakteristik nicht sinnvoll.

5.8 Ablauf des Verfahrens zur Extremwertbestimmung

Für einen gegebenen Brückenquerschnitt in einer gegebenen Rahmenkonstellation stellt sich der Extrapolationsablauf entsprechend Abbildung 5.8 dar. Nach der Modellbildung, der Festlegung der thermischen Einbettung und der klimatischen Exposition (1) werden mehrjährige Temperaturfeldsimulationen durchgeführt (2). Die in jedem Zeitschritt berechnete Temperaturverteilung wird in mehrere idealisierte Temperaturanteile $\overline{DT}_{\psi,i}$ zerlegt (3). Für die Berechnung der Kombinationsfläche müssen aus diesen Temperaturanteilen nach Gleichung (5.1) entsprechende gemischte Kombinations-Temperaturanteile T_K gebildet werden (4). Für jede dieser T_K -Zeitreihen sind in einem Folgeschritt die täglichen Maxima und Minima zu extrahieren, welche Grundlage der anschließenden Extremwertbestimmung sind (5).

Von jeder Extremwert-Zeitreihe (X) wird der transiente Anteil X_t und periodische Anteil X_p bestimmt. Werden diese Anteile von X abgezogen, ergibt sich die stochastische, autoregressive Systemreaktion X_z (6). In einem Folgeschritt sind für jeden Kalendermonat die statistischen Eigenschaften des Zufallsanteiles von X_z zu bestimmen, damit die saisonal unterschiedlichen Verteilungen der Extremwerte berücksichtigt werden (7). Entsprechend der beiden dargelegten Verfahrensweisen wird entweder der Zufallsanteil durch ein autoregressives Modell beschrieben oder die statistische Verteilung der 3-Tagesextremwerte verwendet (8). Die Bestimmung repräsentativer Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode erfolgt für jeden Monat und für den gesamten Jahreszeitraum auf zwei alternativen Wegen (9-10): a) Über die Bestimmung der Überschreitenswahrscheinlichkeit wird durch die iterative Lösung der Gleichung (5.21) unter Verwendung des periodischen Grundanteiles X_p und der monatlichen theoretischen Verteilungsparametern von X_z Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode ermittelt. b) Es wird auf der Basis des periodischen Grundanteiles X_p und den bestimmten AR-Prozessparametern eine mehrjährige Extremwertzeitreihe generiert. Über eine Rangstatistik werden dann aus dieser Zeitreihe Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode ermittelt.

Sind für jeden Kombinationstemperaturanteil T_K die positiven und negativen Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode ermittelt worden, ist nach deren entsprechenden Zusammenstellung (11) eine Transformation notwendig. Da diese gemischten Anteile zwecks Bildung einer Kombinationsfläche auszuwerten waren, ist deren Umrechnung in Bemessungspunkte auf der Basis der ursprünglichen Temperaturanteile $DT_{\psi,i}$ erforderlich. Diese liefert die Kombinationsfläche, innerhalb derer die Temperaturbeanspruchungen der jeweiligen Wiederkehrperiode auftreten (12). Für die praktische Anwendung können dann Kombinationsbeiwerte ω abgeleitet werden (13). Als Ergebnis liegen die Temperatureinwirkungen für den zugrunde gelegten Brückenquerschnitt in der eingangs festgelegten Rahmenkonstellation vor (14).

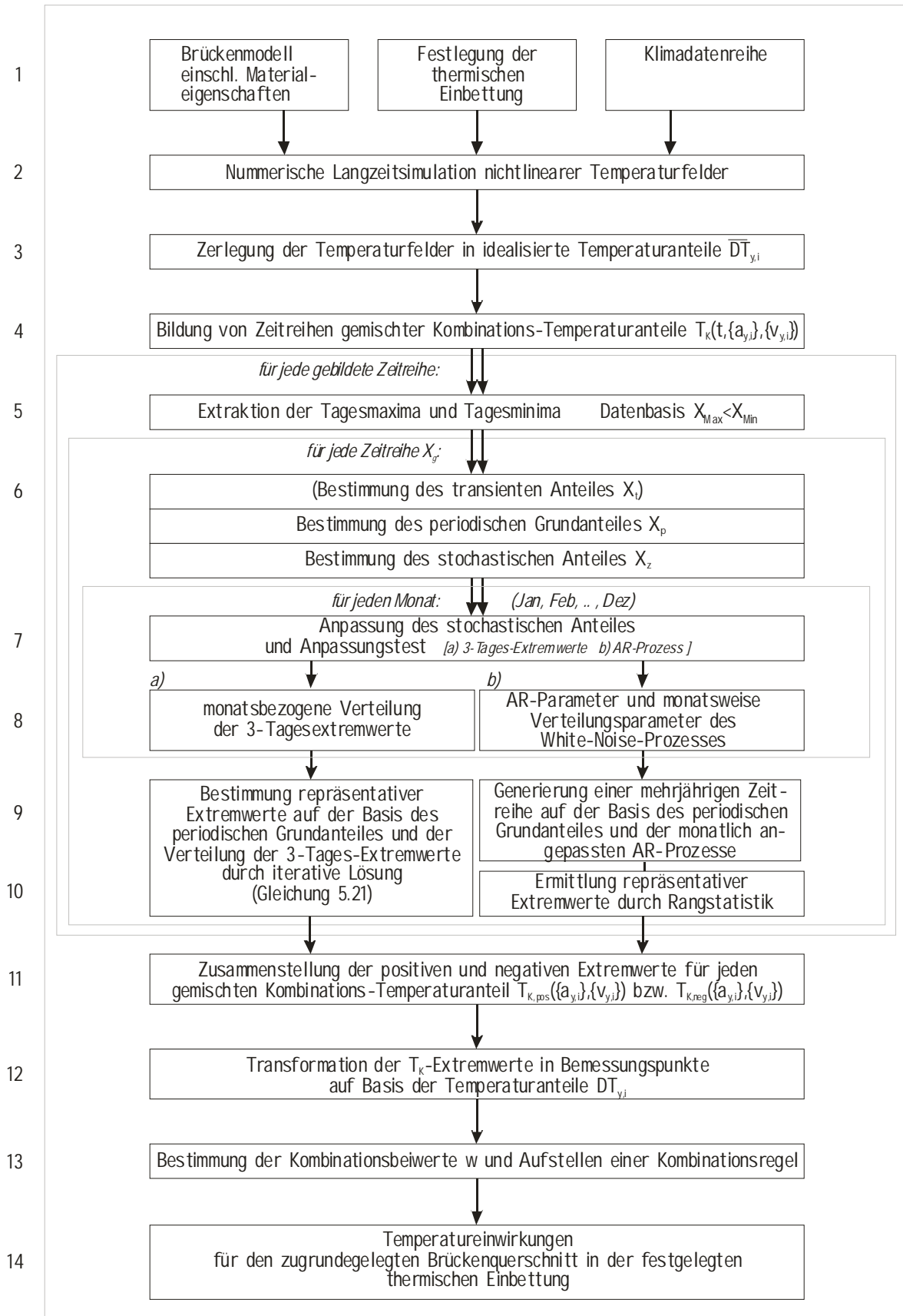


Abbildung 5.8 Abfolge der Ermittlung von repräsentativen Extremwerten und der Zusammenstellung einer Kombinationsregel für eine definierte Bauwerkskonstellation

6 Überprüfung des Berechnungsverfahrens

6.1 Numerische Langzeitsimulation von Temperaturfeldern

Das Berechnungsverfahren nichtlinearer Temperaturverteilungen auf der Basis gemessener Klimadaten wurde mit Temperaturmessungen an realen Tragwerken überprüft. Zur Verifikation standen Daten aus mehrjährigen Temperaturmessprogrammen an der Mittelland-Kanalüberführung bei Minden [62], der Kanalüberführung über die Leine [64] und Temperaturmessdaten eines Fahrwegträgers des Magnetschnellbahnsystems Transrapid im Emsland [59] zur Verfügung. Die für Vergleichrechnungen verfügbaren Klimadaten sind durch die Klimadatenreihe OS1 [76] gegeben. Diese spiegelt das Wetterverhalten der Station Osnabrück 52:15 N 08:03 O auf der Höhe 95m.ü.N.N. wieder. Aus der räumlichen Differenz zwischen den Objektstandorten und der Klimadatenbasis treten bei der Gegenüberstellung von Temperaturmessungen und Berechnungsergebnissen zwangsläufig Unterschiede auf. Dies ist insbesondere an heiter bewölkten Tagen einsichtig, da der Wechsel der Bewölkung ortsabhängig ist. Aus dem affinen Verlauf der Lufttemperaturen an den gegebenen Standorten wird auf gleichartige meteorologische Einwirkungsverhältnisse geschlossen.

Für Vergleichsrechnungen am Fahrwegträger des Magnetschnellbahnsystems lagen keine Messergebnisse der Lufttemperatur vor, so dass die Gegenüberstellung der Lufttemperaturen in Abbildung 6.1 nur die Verläufe an der Leineflutbrücke und der Kanalbrücke Minden sowie die Messdaten der Wetterstation Osnabrück enthält. Durch ein Offset um +5K bzw. +10K sind die Temperaturaufzeichnungen graphisch besser vergleichbar. Die jeweils registrierten Lufttemperaturverläufe lassen auf eine gute Übereinstimmung der lokalen Wetterverhältnisse schließen. Für die übrigen Klimakomponenten ist anzunehmen, dass ebenfalls gleichartiges Wetterverhalten vorliegt.

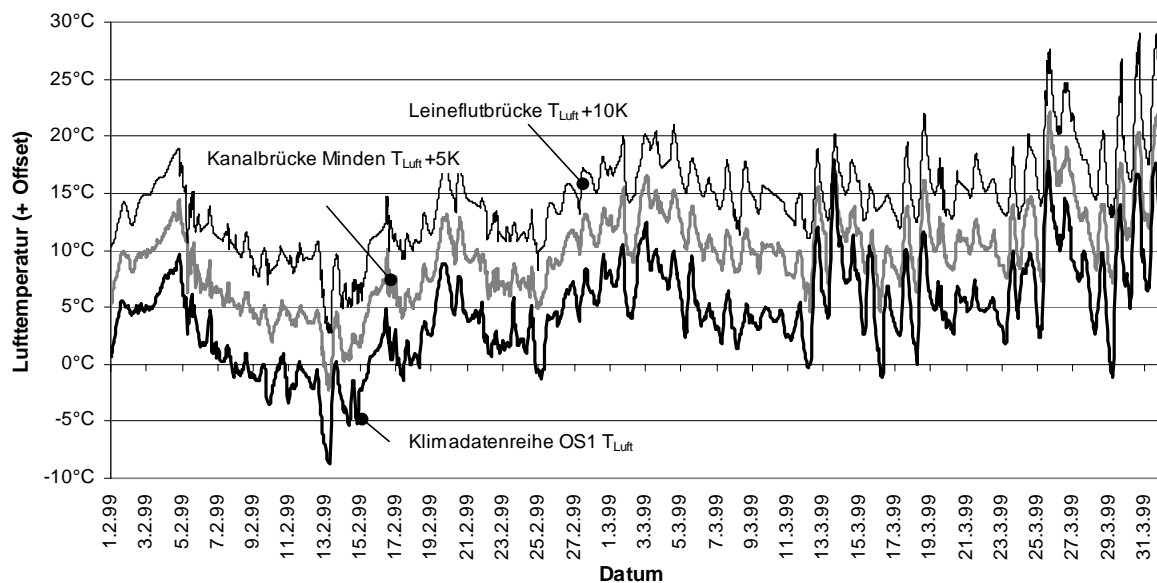


Abbildung 6.1 Gegenüberstellung der an der Leineflutbrücke und der Kanalbrücke Minden gemessenen Lufttemperatur und dem Lufttemperaturverlauf in Osnabrück im Zeitraum Februar-März 1999, zur besseren Vergleichbarkeit Anhebung der gemessenen Luftschattentemperaturen um +5K bzw. +10K

Damit können Temperaturfeldberechnungen durchgeführt werden, welche das durch die Klimadatenreihe OS1 gegebene Wettergeschehen repräsentieren.

In einem mehrjährigen Messprogramm wurde das Temperaturverhalten der Leineflutbrücke 253 (MLK) an insgesamt 23 Messpunkten am Bauwerk aufgezeichnet. Zusätzlich ist unterhalb der Brücke ein Temperaturfühler für die Messung der Luftschattentemperatur angeordnet worden. Der in Abbildung 6.2 dargestellte Messquerschnitt befindet sich in Feldmitte der 56m langen Kanalbrücke.

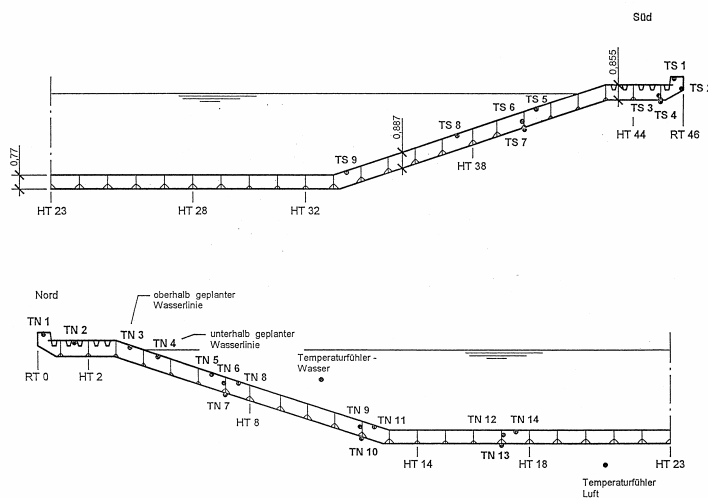


Abbildung 6.2
 Querschnitt der Leineflutbrücke 253
 (MLK) und Temperaturmesspunkte

Wegen des flächigen Aufbaus der Kanalbrücke war insbesondere das unterschiedliche Temperaturverhalten des Deckblechbereiches und des Unterbaus von Interesse, da hieraus ausgeprägte Vertikalverkrümmungen in Bauwerkslängs- und Querrichtung hervorgehen. Zur modellhaften Berechnung der instationären Temperaturfelder ist der Querschnitt dementsprechend diskretisiert worden.

Werden die mit der Klimadatenreihe OS1 berechneten Temperaturfelder den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt, so wird eine gute Übereinstimmung von Modell und Realität festgestellt. In den Abbildungen 6.3 und 6.4 ist beispielhaft für einen zweimonatigen Zeitraum Februar/März 1999 der Temperaturverlauf an je einem Messpunkt auf der Brückenoberseite und der Brückenunterseite gegenübergestellt. Für wolkenfreie Strahlungstage sind die Tagesgänge nahezu deckungsgleich. Abweichungen von Messreihe und Berechnung treten vorwiegend an teilweise bedeckten Tagen auf, was auf lokale Unterschiede der Bewölkung und dem steten Strahlungswechsel bei heiterer Bewölkung zurückzuführen ist.

Werden die täglichen Extremwerte der Blechtemperaturen aus Messung und Berechnung gegenübergestellt, so beträgt die Standardabweichung 4,3K für die Maximalwerte und 1,3K für die Minimalwerte. In Tabelle 6.1 sind für den abgebildeten Zeitraum Mittelwert und Standardabweichung für die Absolutwerte und die Abweichungen der Tagesextremwerte von Messung und Berechnung zusammengestellt.

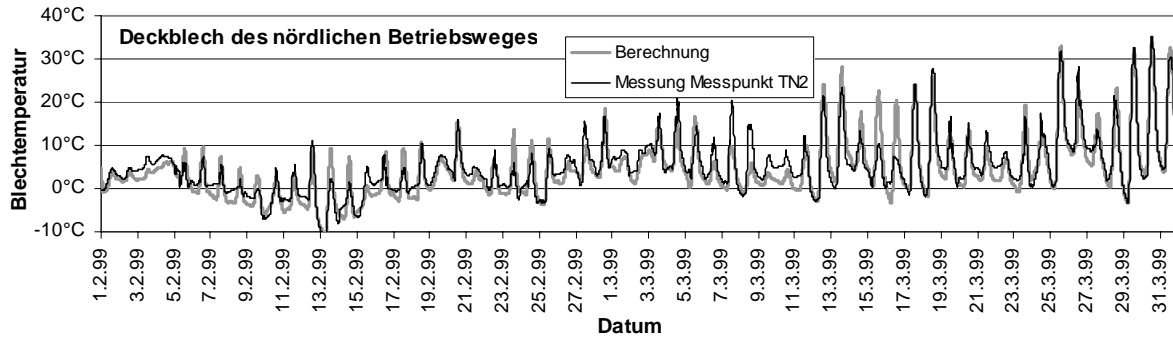


Abbildung 6.3 Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe infolge klimatischer Temperatureinwirkungen für einen Deckblechpunkt (TN2)

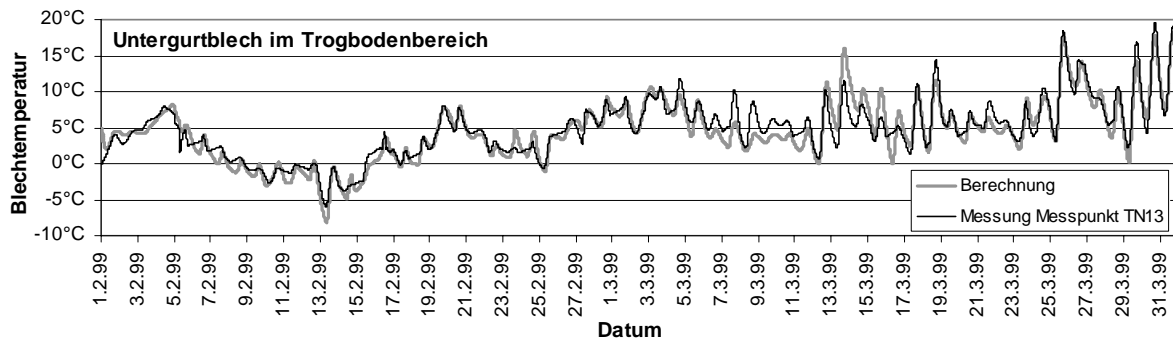


Abbildung 6.4 Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe infolge klimatischer Temperatureinwirkungen für einen Untergurtpunkt (TN13)

	Mittelwert Standardabweichung			
	Deckblech		Untergurt	
	Messung	Berechnung	Messung	Berechnung
<i>Absolutwerte der Tagesextrema</i>				
Tagesmaximaltemperatur	12,7 °C 8,4K	12,8 °C 8,5K	6,9°C 4,7K	7,2°C 4,9K
Tagesminimaltemperatur	0,0 °C 3,7K	-0,6 °C 3,4K	2,3°C 3,5K	2,6°C 3,0K
<i>Abweichung der Tagesextrema von Messung und Berechnung</i>				
Tagesmaximaltemperatur	+0,1 K 4,3K		-0,27 K 1,26 K	
Tagesminimaltemperatur	-0,6 K 1,3K		-0,25 K 1,63 K	

Tabelle 6.1 Mittelwert und Standardabweichung der Tagesextremwerte des Deckblechpunktes

Während der Bauwerksmontage und späterer Wartungsphasen sind Kanalbrückenbauwerke unbefüllt. In dieser Zeit treten über die Querschnittshöhe ausgeprägte Temperaturunterschiede auf: Sonnenstrahlung führt zur Erhitzung der Deckbleche; diese zugeführte Wärmeenergie kann nur abgeführt werden durch die vergleichsweise schlanken Stege in den Unterbau oder durch langwellige Strahlung bzw. Konvektion. Im Gegensatz dazu erwärmt sich der Untergurtbereich wegen seiner verschatteten Lage nur mäßig. Der Temperaturunterschied zwischen Deckblech und Unterbau wird an sonnenstrahlungsreichen Tagen bei hohem Sonnenstrand maximal. In den Nachtstunden kehrt sich dieser Temperaturunterschied um: Die nach oben gerichteten Deckbleche kühlen unter die Lufttemperatur ab, da von ihnen insbesondere in klaren Nächten eine größere Wärmestrahlung ausgeht als vom Himmelshalbraum eintrifft. Die Untergurte erhalten bodenseitige Wärmestrahlung und bleiben etwa auf dem Niveau der Lufttemperatur. Wird die tägliche maximale Deckblechtemperatur dem maximalen Tempera-

turunterschied zwischen Deckblech und Unterbau gegenübergestellt, lässt sich ein linearer Zusammenhang feststellen, der sowohl durch die Messdaten und der Auswertung der Simulationsergebnisse belegt werden kann (Abbildung 6.5).

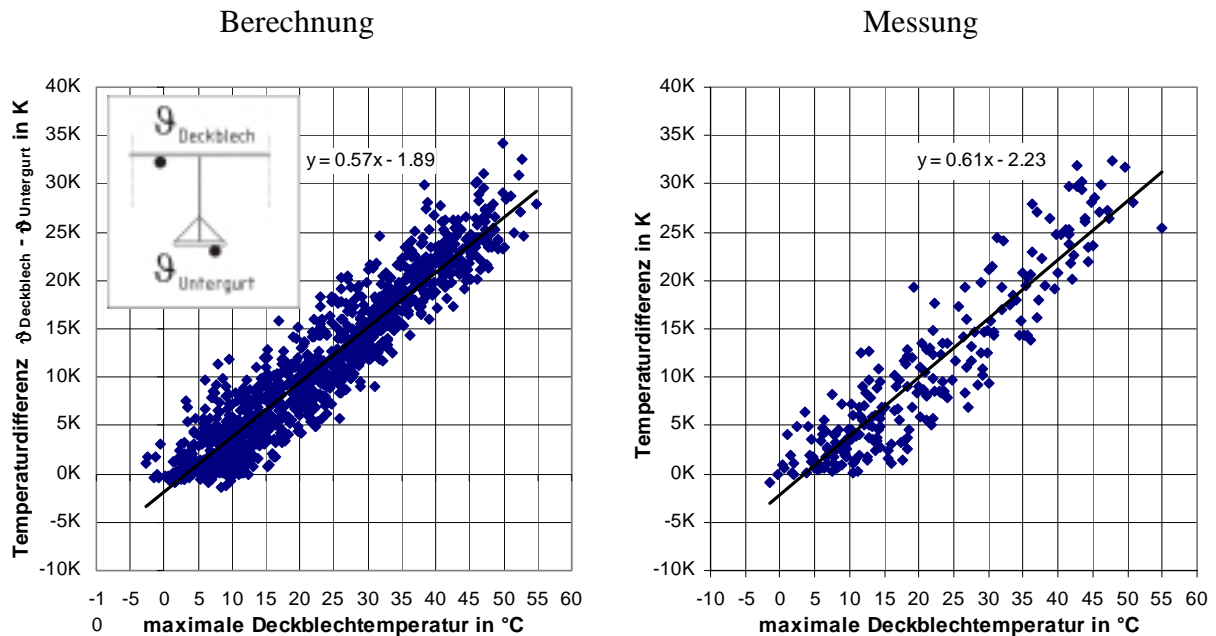


Abbildung 6.5 Vergleichende Gegenüberstellung des Zusammenhangs zwischen der maximalen täglichen Deckblechtemperatur und der maximalen Temperaturdifferenz zwischen dem Deckblech und dem Untergurt.

Der vielschichtige Prozess der unterschiedlichen klimatischen Temperatureinwirkungen und die daraus folgenden Temperaturfelder können mit dem gewählten Verfahren auch über eine Berechnung mit mehrjährigen Klimadatenreihen modellhaft erfasst werden. Eine deckungsgleiche Wiedergabe der realen Verhältnisse kann allerdings nicht erwartet werden, da neben den lokal unterschiedlichen Klimateinwirkungen letzten Endes eine modellhafte Idealisierung und Parametrisierung vorgenommen wird.

6.2 Verfahren zur Ermittlung von Extremwerten unterschiedlicher Wiederkehrperiode

Der Tragwerksbemessung werden Temperatureinwirkungen unterschiedlicher Wiederkehrperiode zugrunde gelegt. Mit dem im Abschnitt 5.8 gewählten Verfahren sollen aus den berechneten mehrjährigen Temperaturfeldern entsprechende Extremwerte ermittelt werden. Zur Überprüfung der angewendeten Methode wurden Lufttemperaturmessdaten für Osnabrück ([59]) aus dem Zeitraum 1980-2000 ausgewertet und mit Resultaten anderer Verfahren verglichen. Die Wahl der Lufttemperatur als Datengrundlage ist durch mehrere Punkte zu begründen: Eine Überprüfung soll anhand realer Messdatenkollektive erfolgen. Im Gegensatz zu Bauwerkstemperaturmessungen existieren für die Lufttemperatur sehr lange Messzeitreihen. Andererseits weisen Temperaturniveau und tägliche Temperaturschwankung ausgeprägte saisonale Unterschiede auf. Als Haupteinwirkungskomponente auf Brücken spiegelt sich die Lufttemperatur zudem in den Temperaturreaktionen wieder.

Liefert das Verfahren für klimatisch veränderliche Einwirkungskomponenten zutreffende Ergebnisse, ist eine Übertragbarkeit auf simulierte Temperatur-Berechnungsergebnisse möglich.

In Abbildung 6.6 sind die täglichen Lufttemperaturextremwerte über den Zeitraum 1980-2000 dargestellt. Der Umfang der für Temperaturfeldberechnungen verfügbaren Klimadatenreihe OS1 ist ebenfalls in dieser Abbildung markiert. Im abgebildeten 21-jährigen Zeitraum traten Lufttemperaturen zwischen $-20,4^{\circ}\text{C}$ und $+35,2^{\circ}\text{C}$ auf. Die kumulierte Überschreitens- bzw. Unterschreitenshäufigkeit ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

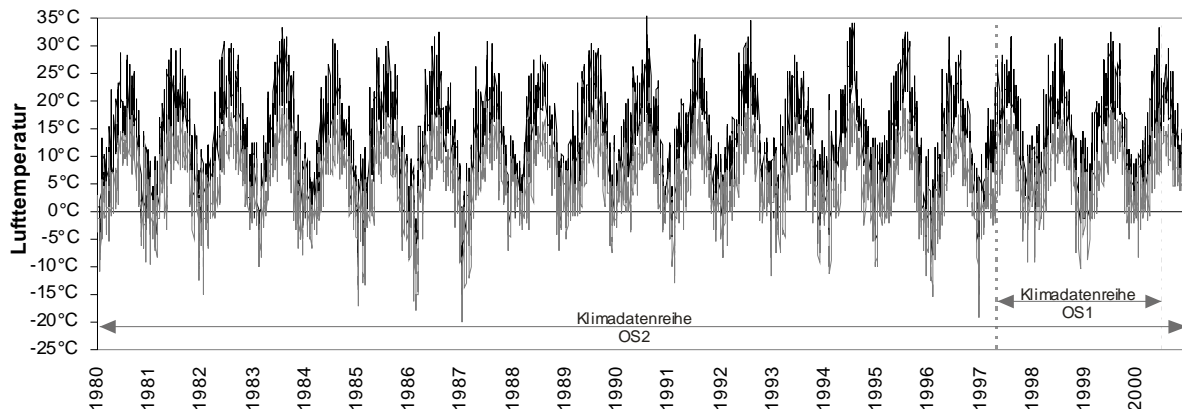
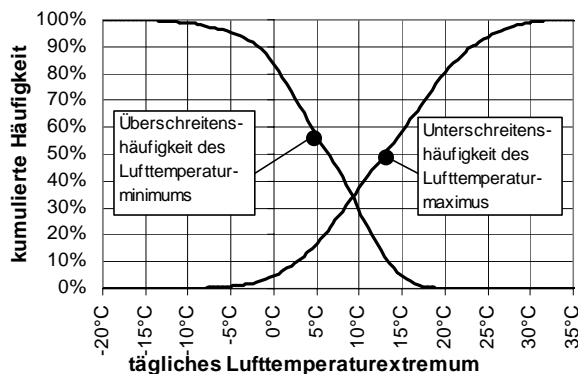


Abbildung 6.6 Tägliche Lufttemperatur-Extrema für den Standort Osnabrück, Zeitreihe OS2, 1980-2000



Statistische Parameter der jährlichen Extremwerte (Momentenmethode):

(n=21 Stichproben)

	Lufttemperatur-	
	minimum	maximum
Mittelwert	-11,8°C	31,65°C
Standardabweichung	4,34K	1,88K
Schiefe	-0,36	-0,16

Abbildung 6.7 Kumulierte Häufigkeit der *täglichen* Extremwerte und Temperaturschwankungen aus Abbildung 6.6 und statistische Parameter der *jährlichen* Extremwerte

Die Extrapolation von Extremwerten wurde auf der Basis verschiedener Vorgehensweisen durchgeführt. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse findet sich in den Tabellen 6.2 und 6.3. Ausgewertet wurden Werte mit der Überschreitenshäufigkeiten R=50, 10, 2 Jahre sowie das Niveau der 5%-Überschreitenshäufigkeit und der quasi ständige Extremwert.

<i>Maximalwerte</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Auftretenshäufigkeit	Empirische Verteilung der 3-Tages-extremwerte	E3-Verteilung der Jahres-extremwerte	E3-Verteilung der 3-Tages-extremwerte (Monate Juni bis August)	Komponentenmodell mit 3-Tagesextremwerten Iteration der Gleichung (5.21)	Komponentenmodell mit Generierung eines AR[1]-Prozesses
50 Jahre	-	35.5°C	37.8°C	38.6°C	36.4°C
10 Jahre	34.2°C	34.5°C	36.0°C	36.4°C	34.3°C
2 Jahre	32.6°C	31.8°C	33.6°C	33.5°C	32.1°C
5% Überschreitung	28.0°C	34.6°C	31.8°C	29.1°C	25.3°C
Quasi ständig	14.9°C	31.6°C	23.3°C	14.8°C	12.9°C

Tabelle 6.2 Extrapolation der maximalen Lufttemperatur mit unterschiedlichen Verfahren auf der Basis der Zeitreihe OS2, 1980-2000

<i>Minimalwerte</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Auftretenshäufigkeit	Empirische Verteilung der 3-Tages-extremwerte	E3-Verteilung der Jahres-extremwerte	E3-Verteilung der 3-Tages-extremwerte (Monate Dezember bis Februar)	Komponentenmodell mit 3-Tagesextremwerten Iteration der Gleichung (5.21)	Komponentenmodell mit Generierung eines AR[1]-Prozesses
50 Jahre	-	-23.4°C	-24.1°C	-24.4°C	-22.4°C
10 Jahre	-20.0°C	-17.6°C	-19.1°C	-20.1°C	-19.3°C
2 Jahre	-15.5°C	-11.1°C	-14.7°C	-15.0°C	-15.5°C
5% Überschreitung	-6.5°C	-19.7°C	-12.3°C	-8.0°C	-5.0°C
Quasi ständig	+4.3°C	-11.8°C	+1.7°C	+4.3°C	+5.8°C

Tabelle 6.3 Extrapolation der minimalen Lufttemperatur mit unterschiedlichen Verfahren auf der Basis der Zeitreihe OS2, 1980-2000

Empirische Verteilung der 3-Tages-Extremwerte (Spalte 1): Aus der empirischen Verteilung der 3-Tages-Extremwerte können nur Extremwerte bis maximal der halben Stichprobendauer abgeschätzt werden. Eine Extrapolation eines 50-jährigen Ereignisses aus der 21 Jahre umfassenden Stichprobe ist daher nicht möglich.

Verteilung der Jahresextremwerte (Spalte 2): Die Jahresextremwerte der Lufttemperaturzeitreihe können an die E3- und P3-Verteilung angepasst werden. Für die Temperaturminima könnten zusätzlich eine E1-Verteilung für Kleinstwerte unterstellt werden. Mit den in Abbildung 6.7 gegebenen statistischen Verteilungsparametern sind die Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode für Fraktile nach Gleichung (5.14) bestimmt worden. Die ausschließliche Berücksichtigung der Jahresextremwerte vernachlässigt, dass im jeweiligen Jahr weitere Extremwerte großer Wiederkehrperiode aufgetreten sein könnten. Deshalb ergeben sich bei Extrapolation mittels der Jahresextremwerte niedrigere Extremwerte als bei der Berücksichtigung des gesamten Jahresganges. Liegen nur vergleichsweise kurze Jahreszeitreihen von drei bis fünf Jahren vor, ist eine plausible Extrapolation charakteristischer Extremwerte (R=50 Jahre) nicht möglich.

E3/P3-Verteilung aus partiellen dreimonatigen Zeitreihen (Spalte 3): Wertet man die 3-Tages-Extremwerte des Zeitraums Juni-August bzw. Dezember-Februar entsprechend der Vorgehensweise in [29] aus, so ergeben sich nach Anpassung an die Extremwertverteilung Typ-3 die in Spalte 3 ausgewiesenen Werte. Die Lufttemperaturen mit mehrjähriger Wiederkehrperiode liegen oberhalb der Werte in Spalte 2 (Jahresmaximalwerte). Durch die Auswahl eines

dreimonatigen Sommer- bzw. Winter-Zeitraumes gelten die in Spalte 3 aufgeführten Temperaturen nur innerhalb des festgelegten Sommer- bzw. Winterzeitraumes. Eine andere Zeitraumauswahl (bspw. um einen halben Monat versetzt) würde de facto andere Extremwerte liefern. Diese sind somit nur für den gewählten Zeitraum repräsentativ.

Komponentenmodell mit iterativer Bestimmung der Extremwerte (Spalte 4): Die in dieser Arbeit zugrunde gelegten Extrapolationsmethoden erfassen die Extremwerte des gesamten Jahreszeitraumes. Bei dem auf der Bestimmung der Überschreitenswahrscheinlichkeit basierenden Verfahren (Abschnitt 5.6.5) wird nach der Extraktion der 3-Tages-Extremwerte und deren Zerlegung in die periodischen und zufälligen Komponenten der stochastische Anteil monatsweise an die Pearson-3-Verteilung angepasst. Mit der iterativen Bestimmung der Extremwerte nach Gleichung (5.21) ergeben sich die in Spalte 4 der Tabellen 6.2 und 6.3 aufgeführten Extremwerte. Für $R=2..50$ Jahre ergeben sich vergleichbare Ergebnisse wie mit der zuvor genannten partiellen Auswahl dreimonatiger Zeitabschnitte. Das häufige und quasi-ständige Beanspruchungsniveau bezieht sich aber nunmehr auf den gesamten Jahreszeitraum und weist somit vergleichbare Temperaturwerte auf, wie sie mit der empirischen Stichprobenverteilung bestimmt wurden (Spalte 1). Aufgrund der Verwendung von 3-Tages-Extremwerten fließen die jeweils niedrigeren Tagesmaxima nicht in die Berechnung mit ein. Daher ergeben sich geringfügig höhere, in Sinne des konstruktiven Ingenieurbaus auf der sicheren Seite liegende Einwirkungswerte.

Komponentenmodell mit Generierung eines AR-Prozesses (Spalte 5): Mit dem in Abschnitt 5.7 dargelegten Verfahren werden die repräsentativen Extremwerte mittels einer Monte-Carlo-Simulation extrapoliert. Dabei werden die Temperatureinwirkungen als Summe aus einem saisonalen Grundanteil und einem AR[p]-Prozess generiert. Für die Lufttemperaturzeitreihe ist der Grad $p=1$. Die in den Tabellen 6.2 und 6.3 Spalte 5 aufgeführten Extremwerte sind aus der Generierung von 10000 Jahreszyklen abgeleitet worden. Die Extrapolationsergebnisse fallen durchweg niedriger aus als die Ergebnisse des Verfahrens mit iterativer Bestimmung der Extremwerte, da die Datenbasis nicht aus den 3-Tages-Extremwerten sondern allen Tagesextremwerten gebildet wird. Dieser Sachverhalt bestätigt sich auch bei Extrapolationsrechnungen für Temperatureinwirkungen.

Die Gegenüberstellung der Verfahren zeigt, dass mit beiden in dieser Arbeit umgesetzten Vorgehensweisen Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode bestimmt werden können, wobei stets der gesamte Jahresgang der Zeitreihen verwendet wird. Das iterative Verfahren verwendet (autokorrelierte) 3-Tages-Extremwerte und liefert somit gegenüber der zweiten Methode geringfügig höhere Extrapolationswerte. Die Anwendung der Monte-Carlo-Methode fußt auf statistisch unabhängigen Stichproben. Eine Komplettierung dieses Verfahrens bestünde in der umfassenden Testung der angesetzten AR-Prozesse durch Testverfahren wie in [8] und [96] beschrieben.

Wie aus Abbildung 6.6 hervorgeht, umfasst die Klimadatenreihe OS1 einen Zeitraum von drei Jahren. In diesem Zeitraum lagen vergleichsweise milde Wintermonate vor. Die Temperaturspanne umfasst den Bereich $-10,7^{\circ}\text{C}$ bis $33,1^{\circ}\text{C}$. Die Extrapolation charakteristischer Lufttemperaturen ergibt charakteristische Extremwerte von $-14,00$ bis $41,5^{\circ}\text{C}$. Der Vergleich mit den oben berechneten Extremwerten zeigt, dass mit der Vergrößerung der verfügbaren Datenbasis die Prognosegenauigkeit, aber auch die Berechnungsdauer steigt.

7 Temperaturbeanspruchungen von Plattenbalken

7.1 Allgemeines

Bei den Tragwerkbemessungen von Straßen- und Eisenbahnbrücken beschränkt sich die Erfassung der klimatischen Temperatureinwirkungen auf die Bauwerksmitteltemperatur ΔT_N und den linearen vertikalen und ggf. horizontalen Temperaturunterschied ΔT_{MY} und ΔT_{MZ} . Weitere Temperaturfeldanteile, die eine Torsion oder Profilverformung bewirken, finden im gegenwärtigen Normenwerk keinen Niederschlag, sind aber dennoch vorhanden. Eine ausführliche Behandlung dieser Beanspruchungen findet sich in [58]. Werden die Betrachtungen dennoch auf die Temperaturschwankung ΔT_N und den vertikalen Temperaturunterschied ΔT_{MY} reduziert, so stellt sich die Frage, in welcher Kombination ΔT_N und ΔT_{MY} gemeinsam angesetzt werden müssen. Für Bauwerksbeanspruchungen, die nicht auf die Veränderung des einen oder anderen Anteiles reagieren liegt die Antwort auf der Hand: es ist keine Überlagerung erforderlich. Andernfalls darf nach dem DIN Fachbericht 101 [14] das gleichzeitige Auftreten von Temperaturschwankung und vertikalem Temperaturunterschied berücksichtigt werden, „wenn vorausgesetzt wird, dass sowohl der konstante Temperaturanteil ΔT_N als auch der lineare vertikale Temperaturunterschied ΔT_{MY} gleichzeitig betrachtet werden“. Es ist die in Gleichung (4.20) auf Seite 88 wiedergegebene Kombinationsregel $\Delta T_N \oplus \Delta T_{MY}$ mit den Faktoren $\omega_N=0,35$ und $\omega_M=0,75$ zu verwenden.

Aus den Herleitungen in Abschnitt 4 kann entnommen werden, dass die Reduktion der Kombinationsregel auf zwei Faktoren prinzipiell möglich ist. Es zeigt sich aber auch, dass aus unterschiedlichen Gründen keine verallgemeinerbaren Faktoren im Sinne einer prozentualen Abminderung bestimmt werden können.

Am Beispiel von Straßenbrücken mit Plattenbalkenquerschnitt soll mit dem Verfahren nach Kapitel 4 das gleichzeitige Auftreten von Temperaturschwankungen ΔT_N und vertikalem Temperaturunterschied ΔT_{MY} bestimmt und der Normenregelung gegenübergestellt werden. Plattenbalkenquerschnitte finden sich sowohl im Stahlbrückenbau als auch Verbund- und Massivbrückenbau. Deshalb sollen die Untersuchungen an je einem Vertreter erfolgen. Ziel der Analyse ist, für eine fest vorgegebene Situation das kombinierte Auftreten der genannten Temperaturanteile darzustellen.

Mit dem Berechnungsverfahren instationärer Temperaturfelder nach dem Abschnitt 2 wird zu diesem Zweck das Temperaturverhalten dieser Brückenquerschnitte infolge der Wetterverhältnisse Osnabrücks mit der Klimadatenreihe OS1 berechnet. Über das Zerlegungsverfahren aus Abschnitt 3.3 lassen sich für jeden berechneten Zeitschritt aus dem nichtlinearen Temperaturzustand jedes Querschnittes die schnittgrößenbezogenen Temperaturanteile $\Delta T_N = DT_N$ und $\Delta T_{MY} = h \cdot DT_{MY}$ (h =Bauwerkshöhe) extrahieren. Zur Beschreibung des kombinierten Auftretens werden daraus zusätzlich die gemischten Kombinationstemperaturanteile im Anteilswertverhältnis $a_{\psi,N} = a_{\psi,MY} = 0,5$ gebildet, so dass gilt: $T_{K\{++\}} = 0,5 \cdot (\Delta T_N + \Delta T_{MY})$ und $T_{K\{+-\}} = 0,5 \cdot (\Delta T_N - \Delta T_{MY})$. Aus den Zeitreihen ΔT_N , ΔT_{MY} , $T_{K\{++\}}$ und $T_{K\{+-\}}$ sind anschließend mit dem Verfahren nach Kapitel 5 repräsentative Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode abzuleiten. Aus diesen Extremwerten kann die Kombinationsfläche des gemeinsamen

Auftretens von ΔT_N und ΔT_{MY} ermittelt werden. Abschließend werden Kombinationsfaktoren analog [14] bezüglich einer Referenztemperatur 10°C ermittelt.

Wegen der vielfältigen Einflussparameter sind die Analysen mit konstanten Material- und Umgebungsparametern durchgeführt worden. Für die Positionierung und die thermische Einbettung der Bauwerke werden die in Tabelle 7.1 angegebenen Parameter verwendet. Tabelle 7.2 enthält die thermophysikalischen und mechanischen Materialeigenschaften. Diese entsprechen den gewählten Annahmen in [58]. Als geographischer Standort wird entsprechend der verwendeten Klimadatenreihe OS1 der Standort Osnabrück gewählt. Aufgrund des Einflusses der Brückenorientierung auf die Stegbesonnung und damit auf den vertikalen Temperaturunterschied sind alle Berechnungen für vier unterschiedliche Bauwerksazimutwinkel $-45^\circ, \pm 0^\circ, +45^\circ$ und $+90^\circ$ durchgeführt worden. In den vorgenommenen Untersuchungen wird von konstanten Untergrundverhältnissen ausgegangen, d.h. die Reflexionseigenschaften des Untergrundes für kurzweilige Sonnenstrahlung werden unverändert angenommen. Real wird bei Schnee bis zu 90% der Sonnenstrahlung reflektiert und steigert im Winter den negativen vertikalen Temperaturunterschied (Unterseite wärmer als Oberseite).

Den Berechnungen werden Brückenquerschnitte in Anlehnung an [29] und [58] zugrunde gelegt. Diese sind in den Abbildungen 7.1 bis 7.3 dargestellt. Die gegebenen 2 m kurzen Kragarme bewirken eine insgesamt häufigere und ausgedehntere Stegbesonnung mit der entsprechenden Auswirkung auf den horizontalen, vertikalen und torsionswirksamen Temperaturunterschied als größere Kragarmlängen von 3m oder 4m. Der Fahrbahnbelag beträgt einheitlich 50mm und entspricht damit der Bezugsgröße der Beanspruchungswerte für den vertikalen Temperaturunterschied in [14]. Der Fahrbahnbelag und die Gesimskappen müssen bei der Bestimmung der Temperaturfelder berücksichtigt werden. Für die Bestimmung der idealisierten Temperaturanteile wird nur der Nettoquerschnitt herangezogen.

Reflexionszahl kurzweiliger Strahlung am Untergrund $\rho_{\text{Untergrund}}$	0,25
Emissionszahl des Erdbodens $\epsilon_{\text{Untergrund}}$	0,99
Emissionszahl der Atmosphäre $\epsilon_{\text{Atmosphäre}}$	Gl. (2.83)
Höhe über Untergrund h	20 m
Bauwerksazimutwinkel α_B	$-45^\circ; 0^\circ; 45^\circ$ und 90°
Geographische Position	$52^\circ 15'$

Tabelle 7.1 Parameter der Bauwerkspositionierung und der thermischen Einbettung

	Stahl	Beton	Asphalt
Wärmeleitfähigkeit λ	46,0 W/m·K	1,5 W/m·K	1,0 W/m·K
spez. Wärmekapazität c	460,0 J/kg·K	960,0 J/kg·K	920,0 J/kg·K
Dichte ρ	7840,0 kg/m ³	2400,0 kg/m ³	2240,0 kg/m ³
Emissionsverhältnisse			
ϵ_K	0,60	0,65	0,90
ϵ_L	0,80	0,88	0,60
Wärmedehnzahl α_T	$1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/K	$1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/K	–
Elastizitätsmodul	21000,0 kN/cm ²	3700,0 kN/cm ²	–

Tabelle 7.2 Thermophysikalische Kennwerte der Wärmespeicherung und Wärmeleitung

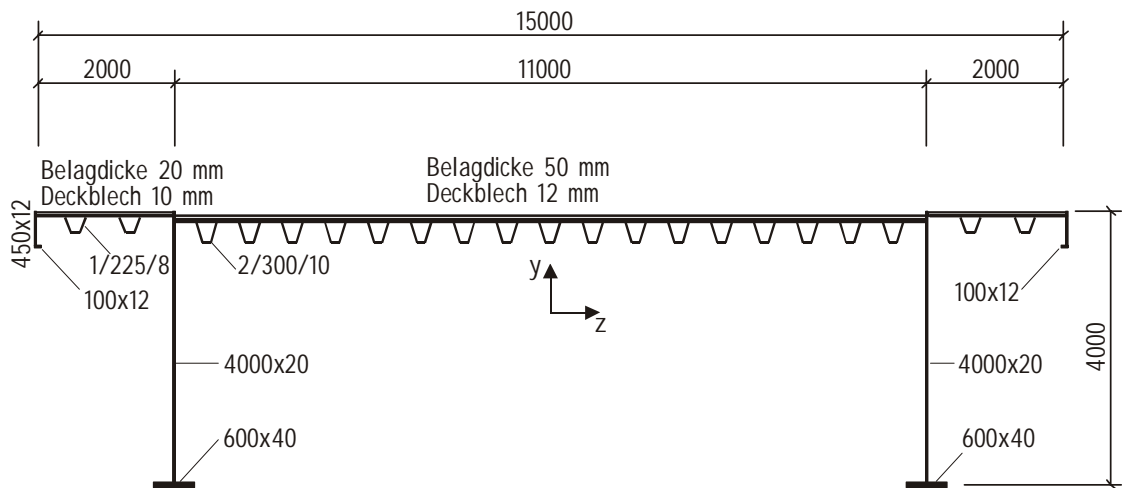


Abbildung 7.1 Querschnitt *Stahlbrücke*

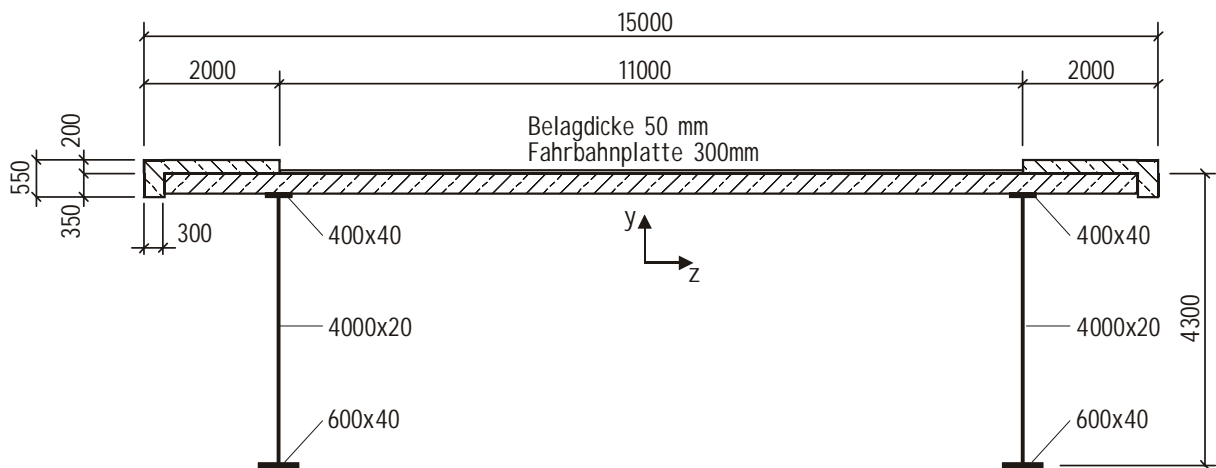


Abbildung 7.2 Querschnitt *Verbundbrücke*

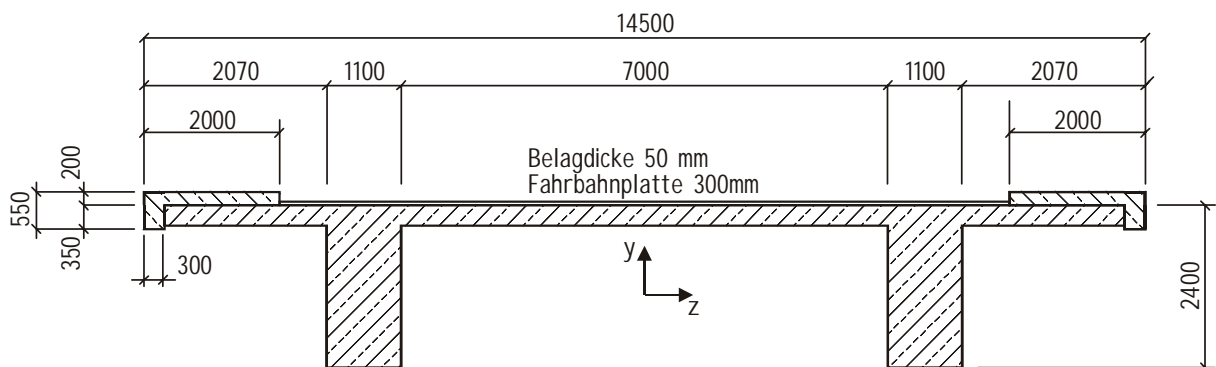


Abbildung 7.3 Querschnitt *Stahlbetonbrücke*

7.2 Analyse des Temperaturverhaltens

7.2.1 Allgemeines zum Temperaturverhalten der Querschnitte

Die äußeren meteorologischen und topographischen Randbedingungen sind für die gewählten Brückenquerschnitte identisch. Das Temperaturverhalten ist somit durch die jeweilige materielle und geometrische Brücken-Konstellation geprägt.

Der tägliche Verlauf der mittleren Bauwerkstemperatur ΔT_N kann charakterisiert werden durch die Erwärmung des Baukörpers am Tage wegen des Lufttemperaturanstiegs und die einwirkende Sonnenstrahlung. Nach dem Abfall der Sonnenstrahlung nach Mittag nimmt die zugeführte Wärmeenergie ab und die weitere Bauwerkserwärmung wird abgebremst, bis in den Nachmittags- bzw. Abendstunden das Bauwerk wieder abkühlt. Diese Abkühlung setzt sich bis zum Sonnenaufgang des Folgetages fort. Mit Zunahme der Massigkeit eines Brückenquerschnittes nimmt die tägliche Schwankung der Schwerpunkttemperatur ab. Zugleich verzögert sich der Auftretenszeitpunkt der Temperaturextrema. Dies spiegelt sich in den Tagesgängen des Temperaturanteiles ΔT_N der untersuchten Brückenquerschnitte wieder (Abbildung 7.4a). Dort sind die gemittelten Verläufe für die Monate Januar und Juli dargestellt.

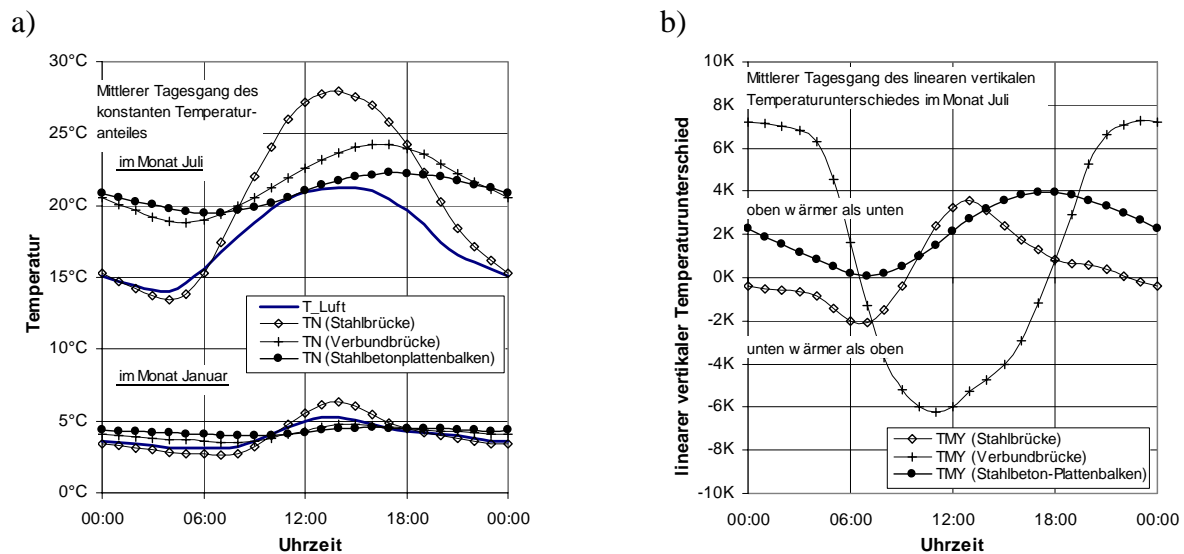


Abbildung 7.4 Mittlerer Tagesgang des konstanten Temperaturanteiles ΔT_N in den Monaten Juli und Januar sowie des linearen vertikalen Temperaturunterschiedes ΔT_{MY} im Monat Juli

Die Stahlbrücke weist sowohl im Sommer als auch im Winter die stärkste Erwärmung auf und kühlt nachts auf niedrigere Werte als die Lufttemperatur aus. Es ist festzustellen, dass die Verbundbrücke und der Stahlbetonplattenbalken im Mittel einen Tagesgang oberhalb der mittleren Lufttemperatur aufweisen.

Der lineare vertikale Temperaturunterschied wird hervorgerufen sowohl durch die tages- und jahreszeitlich unterschiedlichen Temperatureinwirkungen auf Fahrbahnplatte und Brückenstege+Untergurt als auch durch das unterschiedliche Temperaturreaktionsvermögen der eingesetzten Werkstoffe. Für den Stahl-, Stahlverbund- und Stahlbetonplattenbalken ergeben sich

daher sehr unterschiedliche Tagesgänge. In Abbildung 7.4b ist der gemittelte Verlauf im Monat Juli einer nord-süd-orientierten Brücke dargestellt.

Die Stahlbrücke ist nach Sonnenaufgang im unteren Querschnittsbereich wärmer als in der Fahrbahnplattenebene, da die ostseitigen Plattenbalkenstege großflächig von der flachen Sonne bestrahlt und erwärmt werden (Abbildung 7.5). Mit zunehmender Sonnenhöhe vergrößert sich der Wärmeeintrag auf die Fahrbahnplatte, die Stege werden immer mehr durch die Kragarme verschattet, so dass sich ein Temperaturunterschied „oben wärmer als unten“ einstellt. Die nachmittägliche Bestrahlung des westseitigen Brückensteiges führt zu einem raschen Abfall dieses Temperaturunterschiedes und bewirkt an strahlungsreichen Tagen wieder einen Vorzeichenwechsel des Temperaturunterschiedes, der dann bei Sonnenuntergang einen Maximumpunkt erreichen würde.

Bereits der optische Vergleich der Tagesgänge in Abbildungen 7.4a und b für die drei Plattenbalken lässt voneinander abweichende $\Delta T_N - \Delta T_M$ -Kombinationsflächen erwarten.

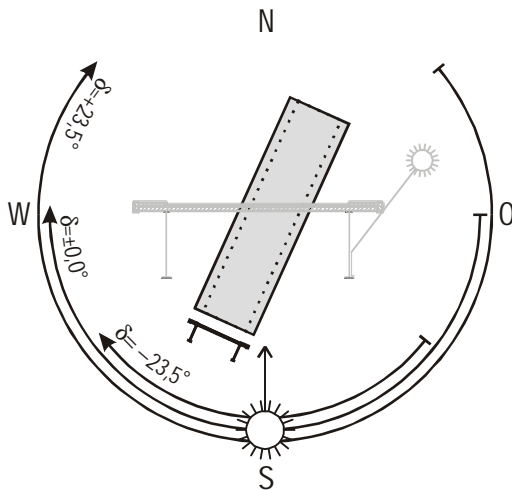


Abbildung 7.5
 Die Stegbesonnung ist von Bauwerksausrichtung, Kragarmlänge, Steghöhe, Tageszeit, Jahreszeit und Sonnenstrahlungsintensität abhängig

Stahlbetonplattenbalken reagieren aufgrund deren Massigkeit deutlich abgemindert. Abbildung 7.4b zeigt für den untersuchten Plattenbalkenquerschnitt einen nahezu affinen Tagesgang zum konstanten Temperaturanteil.

Der Verbundbrückenquerschnitt zeigt zu diesem Tagesverlauf gravierende Unterschiede. Ursächlich hierfür ist das wärmeträge Verhalten der Stahlbetonfahrbahnplatte gegenüber den Stahlstegen. Daher sind tagsüber die Stahlstege wärmer als die Fahrbahnplatte, trotz intensiver Sonnenbestrahlung der Brückenoberseite. Nachts kühlen die Stege schneller ab als die massigere Fahrbahnplatte und die Temperaturverhältnisse kehren sich.

Dieser Abkühlmechanismus verschärft sich bei kurzfristigen Temperaturstürzen in hochsommerlichen Wittersituationen. Solche treten insbesondere bei Konvektionsgewittern an schwülheißen Sommertagen auf: Sonnenstrahlung und Lufttemperatur sinken innerhalb kürzester Zeit ab, was sich im schnellen Temperaturabfall der Stahlstege widerspiegelt. Durch den auflebenden Wind und dem damit erhöhten Konvektionswärmeübergang wird diese Abkühlung zusätzlich verstärkt.

In numerischen Langzeitsimulationen mit gemessenen Klimadaten werden solche Einzelergebnisse ansatzweise mit erfasst werden. Der Einfluss des Niederschlags bleibt allerdings unberücksichtigt. Abbildung 7.6 zeigt für den Verbundbrückenquerschnitt die simulierten Auswirkungen eines in der Klimadatenreihe OS1 enthaltenen Gewitterereignisses in den Abendstunden des 18.07.1999. Der lineare vertikale Temperaturunterschied erreicht kurzzeitig einen Maximalwert von +21K oben wärmer als unten. Dieses singuläre Ereignis bildet sich auch in den weiter unten dargestellten Zeitreihen im Juli 1999 für den vertikalen Temperaturunterschied ΔT_{MY} ab (Abbildung 7.12, S. 131).

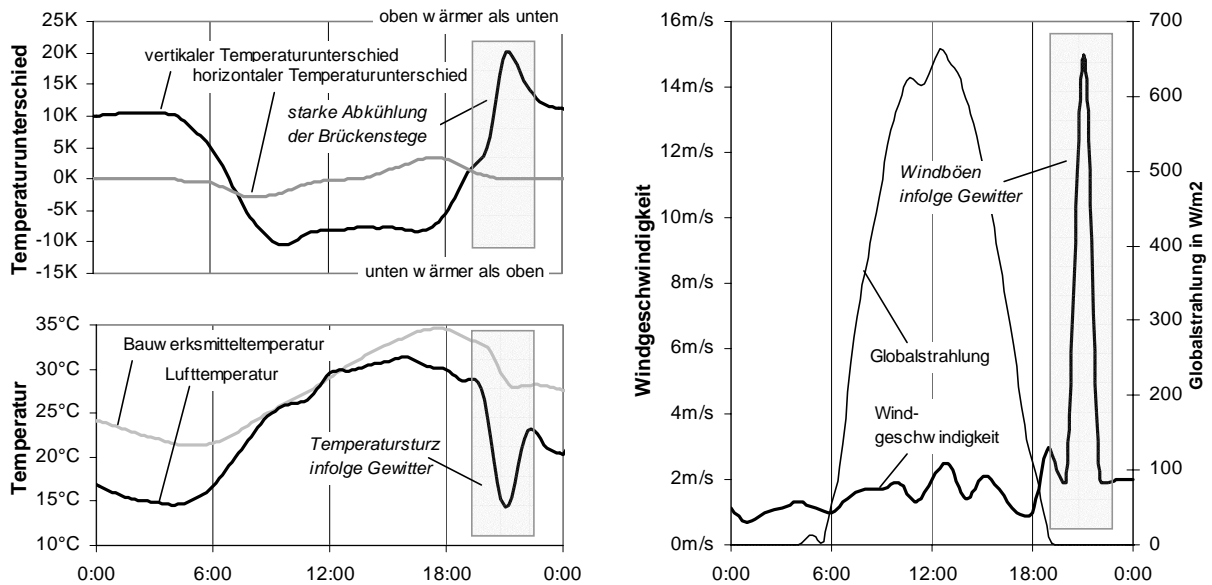


Abbildung 7.6 Auswirkungen eines Gewitterereignisses auf den vertikalen Temperaturunterschied der Verbundbrücke; Klimadatenreihe OS1, 18.07.1999

Konvektionsgewitterereignisse oder Frontgewitter sind von der Auftretenshäufigkeit zwischen dem „häufigen“ und „weniger häufigen“ Ereignis einzustufen. Damit wirft sich die Frage auf, ob solche Einzelergebnisse bei der Ermittlung von Kombinationsbeiwerten für Verkehrs- und Temperaturlasten mit berücksichtigt werden müssen, insofern sie wie gezeigt hohe Temperaturbeanspruchungen verursachen. Der vorwiegend nachmittägliche oder abendliche Auftretenszeitpunkt von Gewitterereignissen deckt sich mit dem Zeitraum hohen Verkehrsaufkommens. Es ist allerdings hervorzuheben, dass die Abkühlung der Verbundbrückenstege günstigerweise einen positiven Temperaturunterschied verursacht, d.h. bei Durchlaufträgern wirkt sich das im Stützenbereich in der Fahrbahnplatte tendenziell als Druckkraft und nicht als zusätzliche Zugkraft aus. Allerdings ist die im Feldbereich ggf. auftretende Druckkraft im Untergurt hinsichtlich einer Stabilitätsgefährdung seitlichen Stegauseweichens zu untersuchen.

Stahl- und Stahlbetonplattenbalken reagieren wegen der homogenen Werkstoffverteilung mit einem Ausgleich der Temperaturen und weisen damit in dieser Witterungssituation weniger kritische Temperaturfelder auf.

7.2.2 Einfluss von Querschnittsabstufungen im Brückenlängsverlauf

Üblicherweise sind die Querschnittsabmessungen von Brücken dem Verlauf der Feld- und Stützmomente angepasst. Diese Abstimmung kann bei Stahl- und Verbundbrücken durch Veränderung der Steghöhe und der Variation der Untergurtabmessungen erfolgen. Entsprechend

der Querschnittsabstufung stellen sich im Brückenlängsverlauf unterschiedliche Temperaturschwankungen und Temperaturunterschiede ein, denn verstärkte Querschnittsbereiche reagieren langsamer auf Temperaturänderungen.

Querschnittsabstufungen verändern nicht den prinzipiellen Tagesverlauf der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY} , sondern nur Größe und zeitliche Phasenlage.

In der praxisbezogenen Anwendung von Temperaturlasten wird für die gesamte Brücke ein einheitlicher Lastansatz angestrebt, was letztlich nur durch eine Zusammenfassung und Wichtung der jeweiligen Querschnitts-Temperaturreaktionen erreicht werden kann. Abbildung 7.7 zeigt für einen Zweifeldträger, der im mittleren Stützbereich über die Länge $\xi \cdot L$ verstärkt ist, die Zusammenfassung der Temperaturunterschiede $\Delta T_{MY,1}$ und $\Delta T_{MY,2}$ zu dem Wert ΔT_{MY} . Die Wichtung nach Gleichung (7.1) ist derart gestaltet, dass der vereinheitlichte Anteil ΔT_{MY} das gleiche Stützmoment hervorruft wie die einzelnen Temperaturunterschiede. Unter der vereinfachten Annahme, dass über die Gesamtlänge des Zweifeldträgers die Querschnittshöhe, die Wärmeausdehnungskoeffizienten und das Trägheitsmoment konstant sind, ergibt sich eine Wichtung entsprechend Gleichung (7.1) mit einem von ξ abhängigen Anteilsfaktor a_2 nach der Beziehung (7.2).

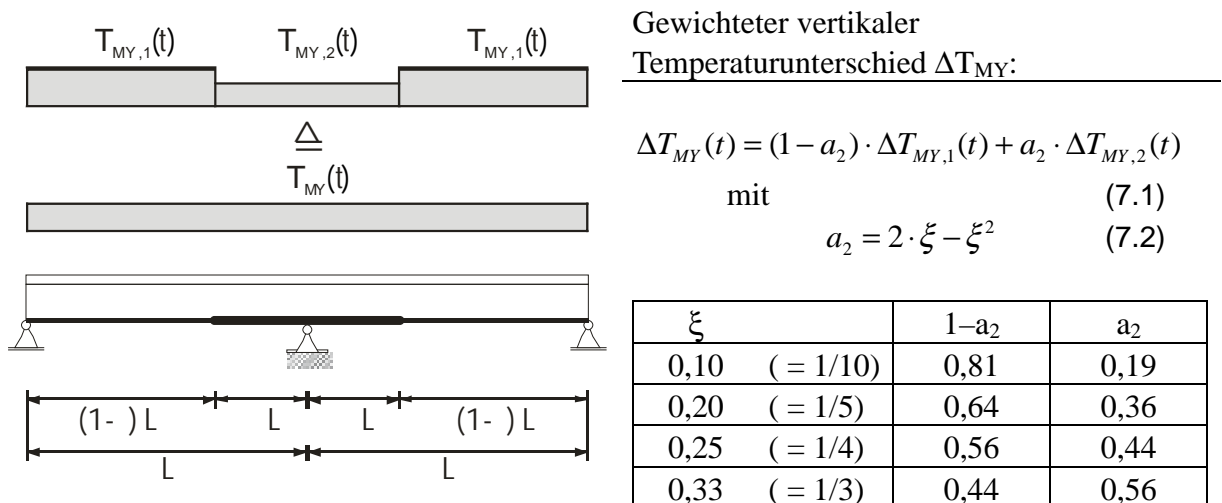


Abbildung 7.7 Wichtung des vertikalen Temperaturunterschiedes bei einstufiger Variation des Querschnittes

Um den Einfluss dieser Wichtung für den Stahl- und Stahlverbundbrückenquerschnitt zu untersuchen, wurden Langzeitsimulationen durchgeführt, in denen die Untergurtabmessungen des Basisquerschnittes mit 600x40mm und für den Stützbereich auf 600x80mm vergrößert angenommen wurden. Für die Länge der Verstärkung ist $\xi=0,33$ gewählt worden.

Die täglichen Extremwerte des Basisquerschnittes $\Delta T_{MY,1}$ und des gewichteten Temperaturunterschiedes ΔT_{MY} weichen wie zu erwarten voneinander ab. Wird die Differenz ($\Delta T_{MY} - \Delta T_{MY,1}$) gegenüber dem Tagesextremum des Basisquerschnittes aufgetragen, so ergibt sich das umseitig wiedergegebene Bild 7.8. Extreme positive Temperaturunterschiede reduzieren sich bei Stahlbrücken nach der Wichtung marginal. Bei milderer Einwirkungssituationen fällt der Ansatz des gewichteten Temperaturunterschiedes ungünstiger aus. Für den Fall, dass der Untergurt- und Stegbereich der Stahlbrücke wärmer ist als die Plattenebene, fällt der

tergurt- und Stegbereich der Stahlbrücke wärmer ist als die Plattenebene, fällt der gewichtete Temperaturunterschied im Mittel um den Faktor 0,69 geringer aus.

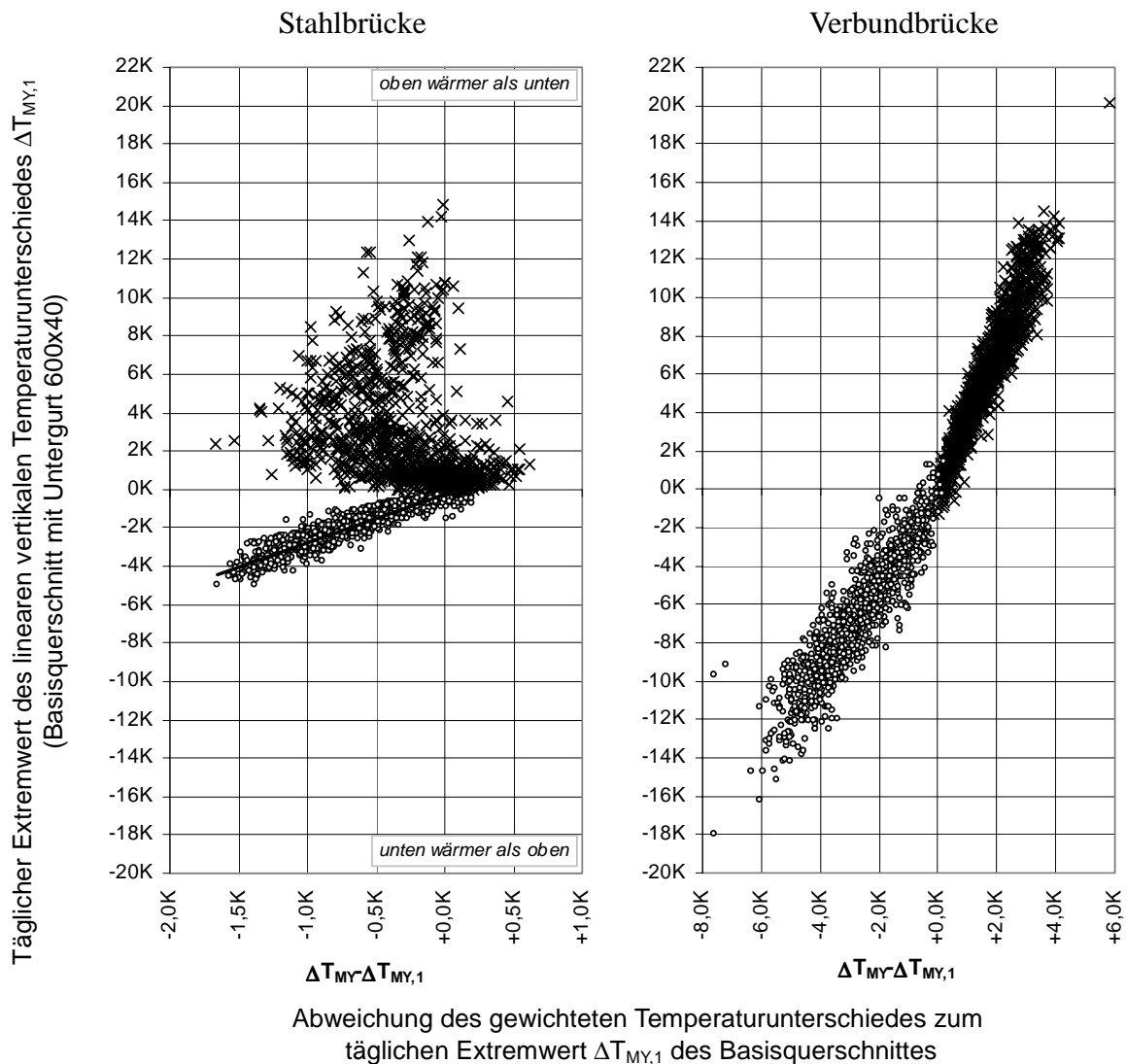


Abbildung 7.8 Einfluss der Untergurtverstärkung im Stützbereich eines Zweifeldträgers, Trassenorientierung $\pm 0^\circ$ (Nord-Süd)

Ein linearer Zusammenhang lässt sich auch für den Verbundbrückenquerschnitt feststellen. Der stärkere Untergurt bewirkt eine Abminderung der vertikalen Temperaturunterschiede. Aus der untersuchten Situation ergibt sich für den Verbundquerschnitt, dass der gewichtete positive vertikale Temperaturunterschied $\Delta T_{My, pos}$ im Mittel das 0,75-fache des Basisquerschnittes beträgt. Für den positiven Temperaturunterschied $\Delta T_{My, neg}$ liegt der Abminderungsfaktor bei 0,66.

Temperaturfeldberechnungen mit den Basisquerschnitten des Stahl- und Stahlverbundquerschnittes liefern deshalb gegenüber einer gewichteten Betrachtung höhere lineare vertikale Temperaturunterschiede. Für die Bestimmung des kombinierten Auftretens von Temperaturschwankung und vertikalem Temperaturunterschied wird eine Querschnittsabstufung hier jedoch nicht mit berücksichtigt.

7.2.3 Langzeitsimulation der Temperaturfelder

Ausgangspunkt der Ermittlung der Temperaturbeanspruchungen ist die numerische Langzeitsimulation mit den Klimadaten OS1 unter der gewählten Parametersituation. In allen Simulationen ist für jeden berechneten 10-Minuten-Zeitschritt der ungleichmäßige Erwärmungszustand des Brückenquerschnittes verfügbar. In den Abbildungen 7.9, 7.11 und 7.13 sind solche Temperaturfelder für einen Tag in hochsommerlicher Schönwetterlage beispielhaft dargestellt. Aus diesen Feldern werden die für die gegebene Fragestellung benötigten schnittgrößen-bezogenen Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY} extrahiert. Deren Tagesextrema sind unterhalb der eben genannten Temperaturfeld-Darstellungen für den gesamten Berechnungszeitraum wiedergegeben. Zusätzlich ist das tägliche Extremum des horizontalen Temperaturunterschiedes $|\Delta T_{MZ}|$ abgebildet.

Wie zu erkennen ist, spiegeln sich die saisonalen Schwankungen der Klimaeinwirkungen in den Temperaturreaktionen wieder. Die täglichen Maxima und Minima des konstanten Temperaturanteiles weisen in den Sommermonaten Maximalwerte auf und erreichen im Zeitraum Dezember bis Februar Minimalwerte – parallel zum Jahresgang der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlungsintensität. Es ist festzustellen, dass das tägliche Temperaturmaximum eine Korrelation mit der maximalen Bauwerksmitteltemperatur aufweist. Die lineare Regression liefert nachfolgend angegebene Zusammenhänge. Die Extrapolation von ΔT_N auf die charakteristische Lufttemperatur für Deutschland von 37°C ([14]) ist ebenfalls angegeben. Eine vergleichbare regressive Extrapolation der minimalen Bauwerkstemperatur ergibt keine brauchbaren Ergebnisse.

Stahlbrücke: $\max \Delta T_N = 1,35 \cdot \max T_{\text{Luft}} + 0,14\text{K}$
 $(\max T_{\text{Luft}} = 37^\circ\text{C} \rightarrow \max \Delta T_N = 50,0^\circ\text{C})$

Verbundbrücke: $\max \Delta T_N = 1,13 \cdot \max T_{\text{Luft}} - 0,81\text{K}$
 $(\max T_{\text{Luft}} = 37^\circ\text{C} \rightarrow \max \Delta T_N = 41,0^\circ\text{C})$

Stahlbetonbrücke $\max \Delta T_N = 1,00 \cdot \max T_{\text{Luft}} + 3,27\text{K}$
 $(\max T_{\text{Luft}} = 37^\circ\text{C} \rightarrow \max \Delta T_N = 36,7^\circ\text{C})$

Auch der vertikale Temperaturunterschied unterliegt saisonalen Schwankungen. Dies fällt besonders für den positiven Extremwert „Oberseite wärmer als Unterseite“ auf, der hauptsächlich von dem jahreszeitlichen Sonnenlauf abhängt. Der negative Extremwert weist für den Stahl- und Stahlverbundbrückenquerschnitt geringere saisonale Unterschiede auf und variiert zudem mit der Brückenorientierung. Je nach Ausrichtung führt die morgendliche Sommersonne im Osten oder die tief stehende Mittagssonne im Winter im Süden zu einer (einseitigen) Stegbesonnung. Dem folgt ein ausgeprägter horizontaler Temperaturunterschied und Wölbtemperaturunterschied (\rightarrow S. 69) im Brückenquerschnitt. Gleiches gilt auch für den negativen vertikalen Temperaturunterschied.

Dieser Effekt kann besonders am horizontalen Temperaturunterschied verdeutlicht werden. Vergleicht man den dargestellten Jahresgang von $|\Delta T_{MZ}|$ der Stahlbrücke (Trassenrichtung Nord-Süd; Abbildungen 7.10) mit dem der Stahlbetonbrücke (Trassenrichtung Ost-West; Abbildung 7.14), so treten im ersteren Fall im Sommer, und im zweiten Fall im Winter Maximalwerte auf.

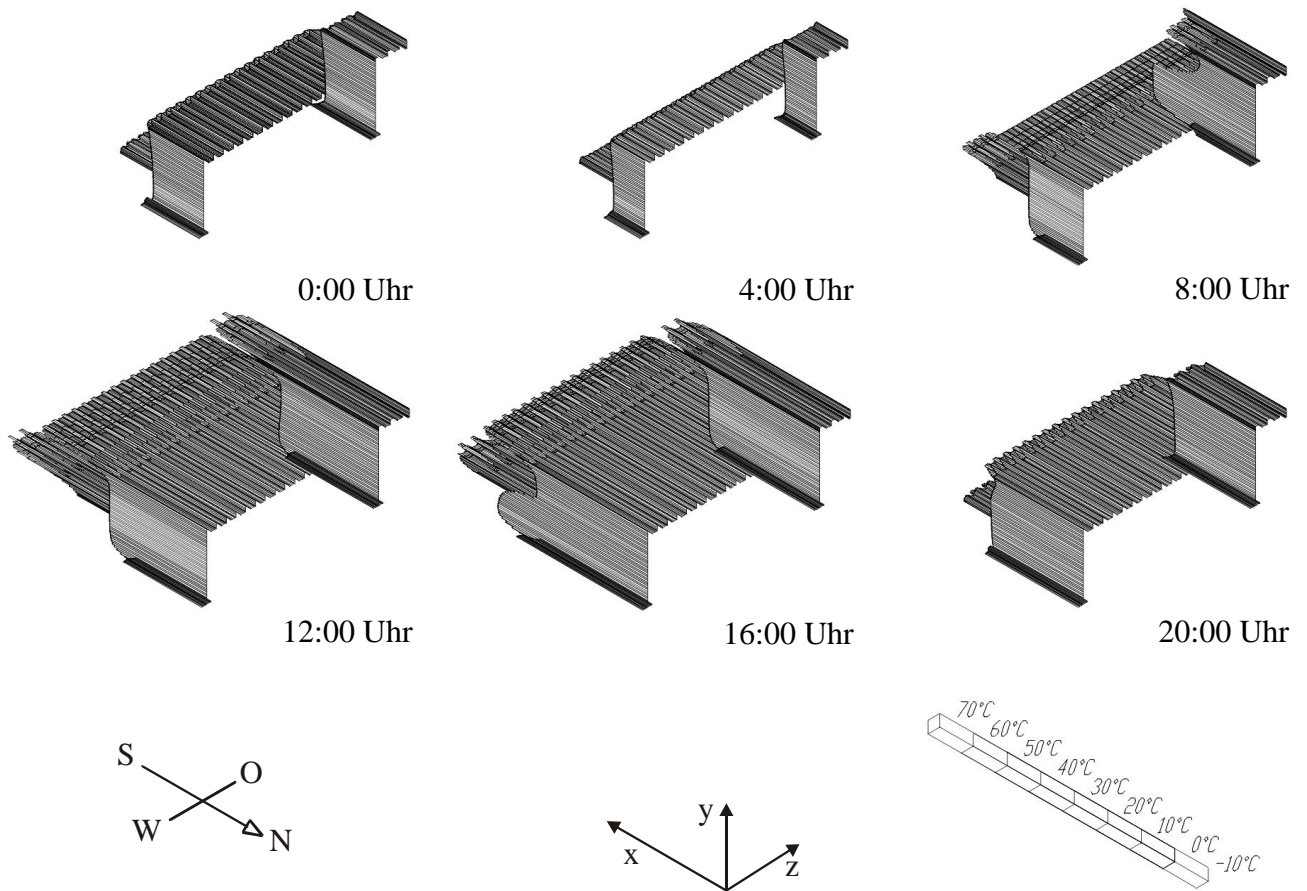


Abbildung 7.9 **Stahlbrücke** - Temperaturfelder bei sommerlicher Schönwetterlage
 Trassenrichtung $\pm 0^\circ$ (Nord - Süd - Orientierung)

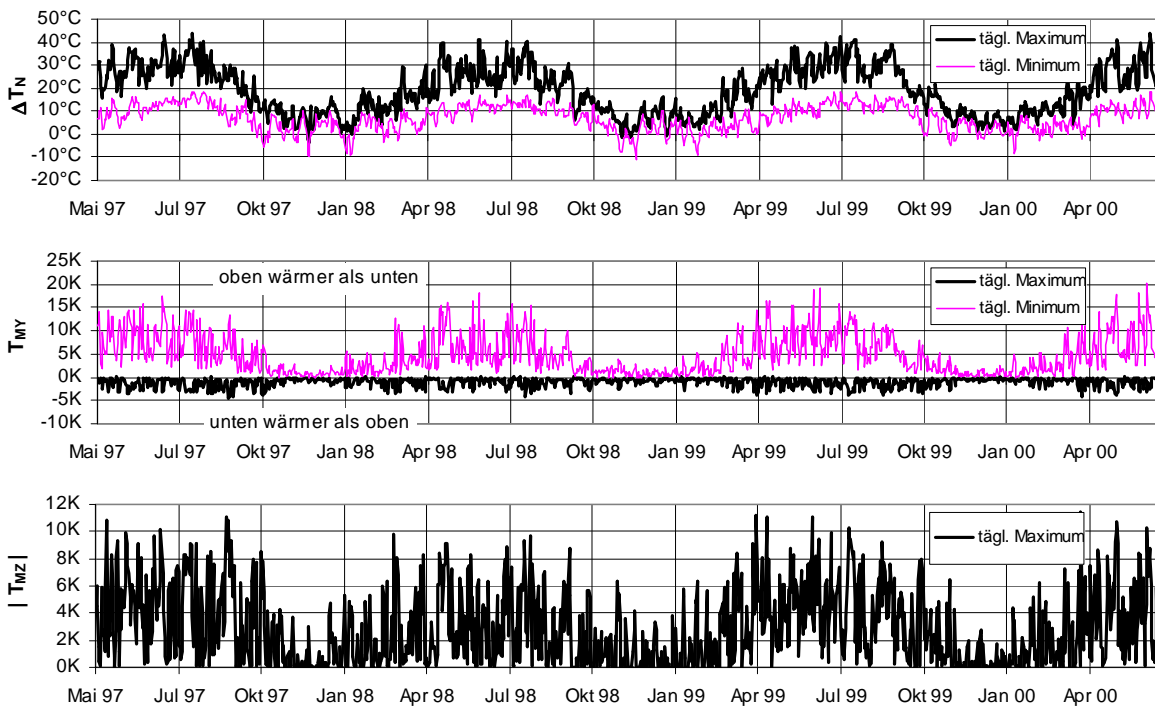


Abbildung 7.10 Berechnete tägliche Extremwerte der Temperaturanteile ΔT_N , ΔT_{MY} und $|\Delta T_{MZ}|$

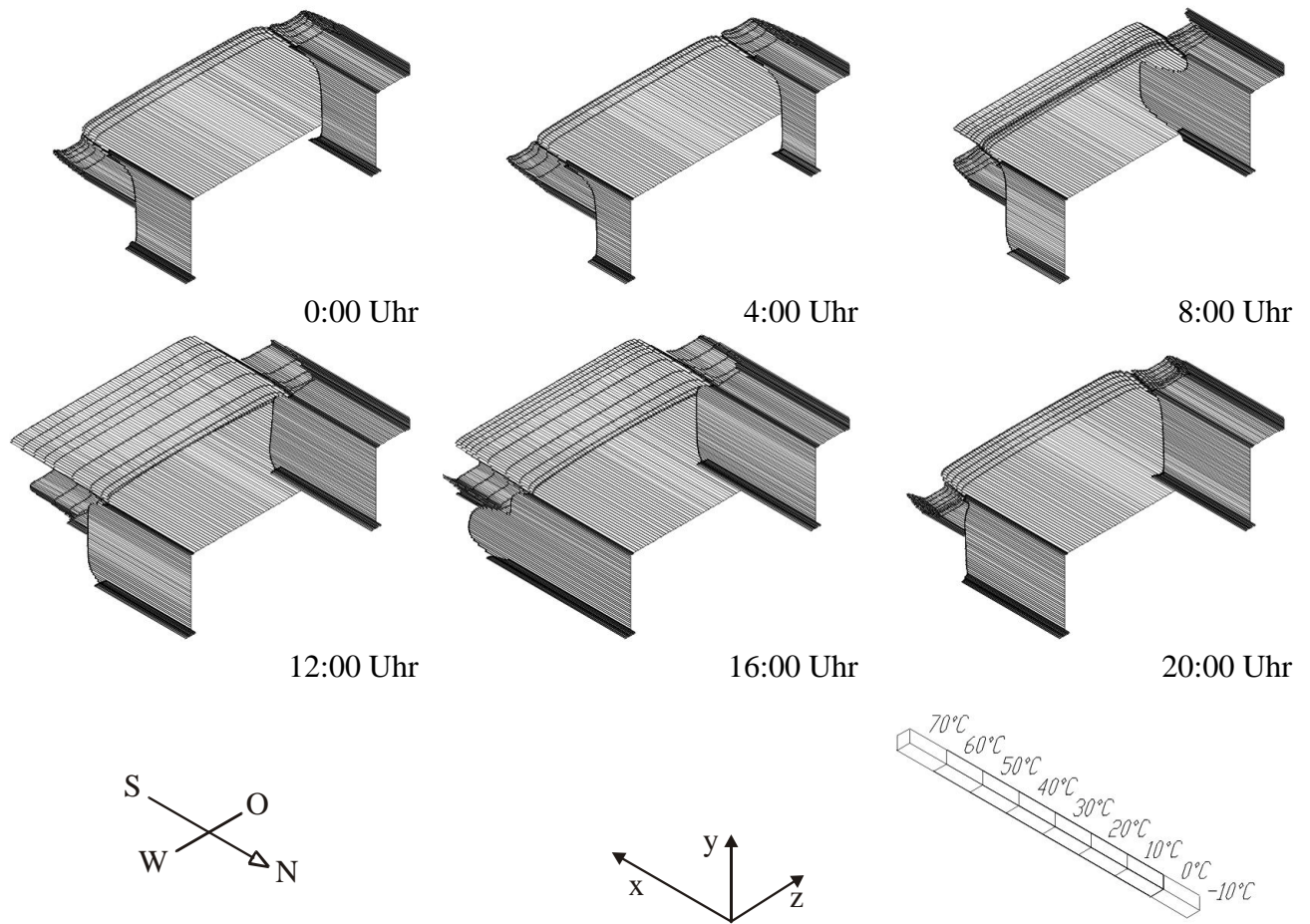


Abbildung 7.11 **Verbundbrücke** - Temperaturfelder bei sommerlicher Schönwetterlage
 Trassenrichtung $\pm 0^\circ$ (Nord - Süd - Orientierung)

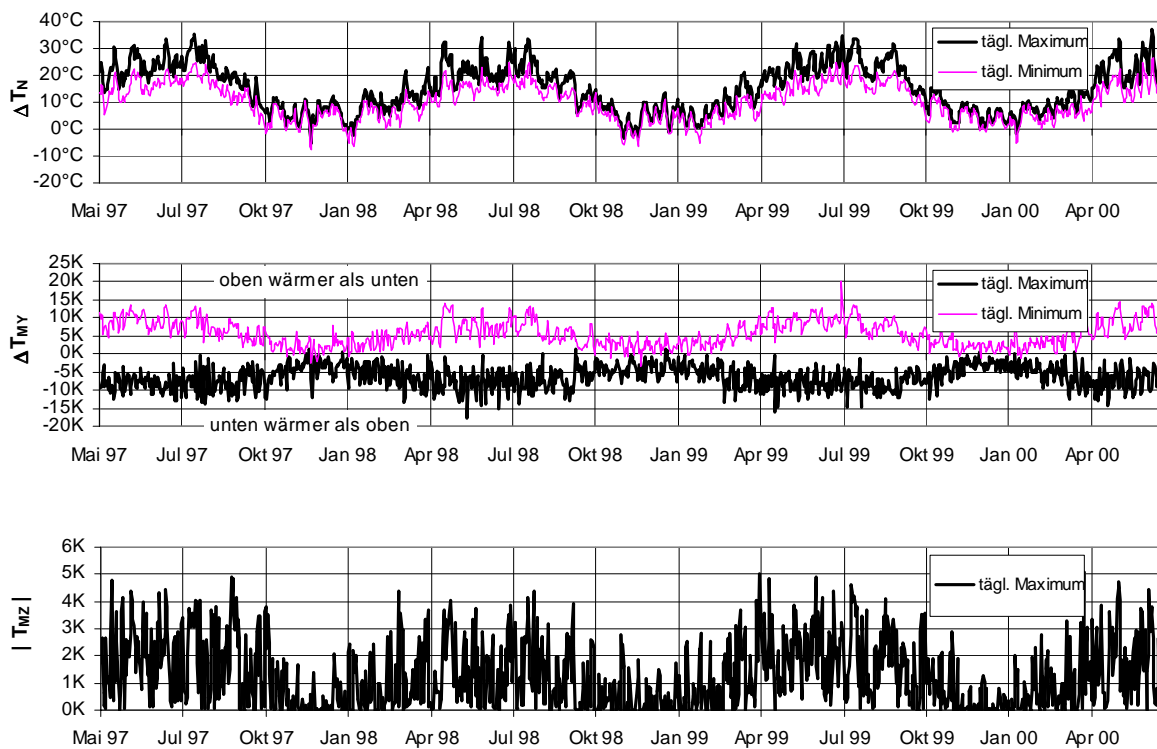


Abbildung 7.12 Berechnete tägliche Extremwerte der Temperaturanteile ΔT_N , ΔT_{MY} und $|\Delta T_{MZ}|$

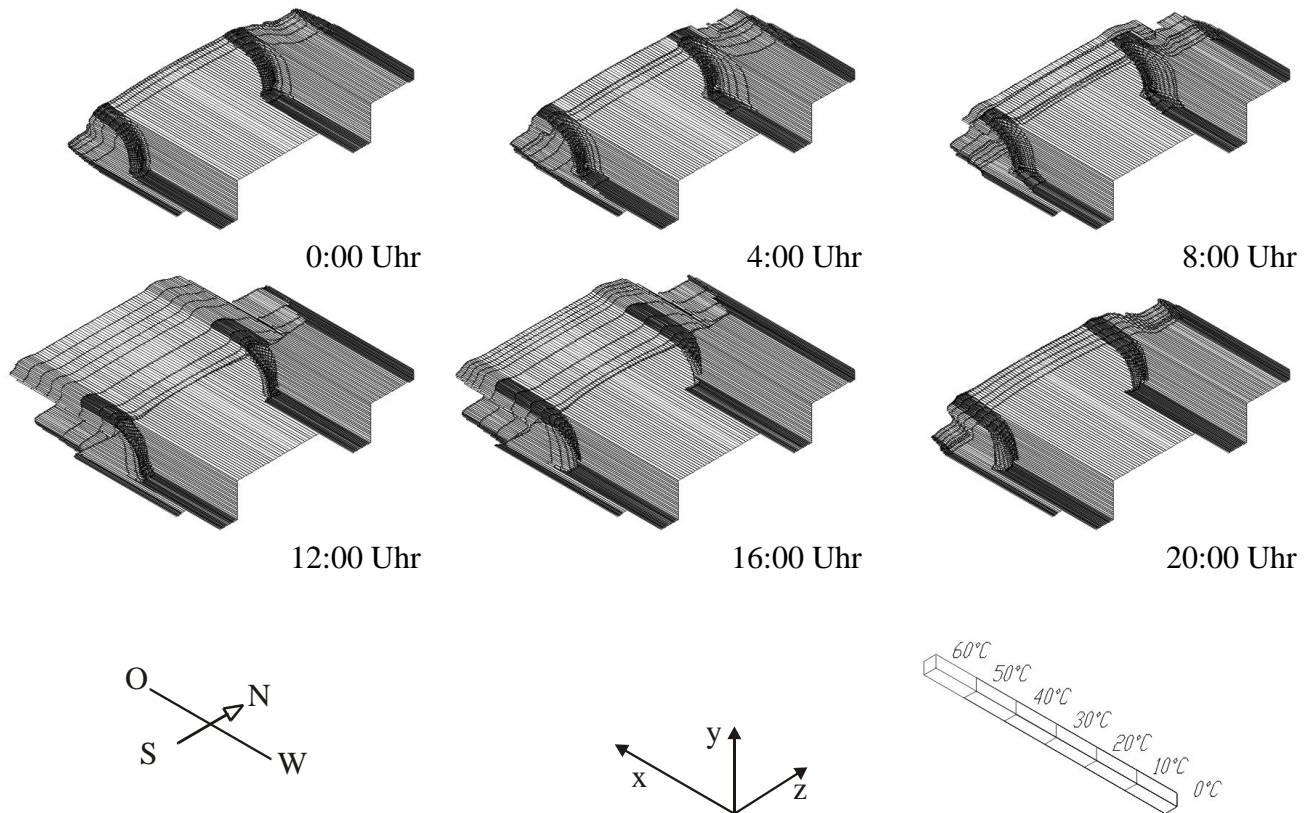


Abbildung 7.13 **Stahlbetonbrücke** - Temperaturfelder bei sommerlicher Schönwetterlage
 Trassenrichtung +90° (Ost - West - Orientierung)

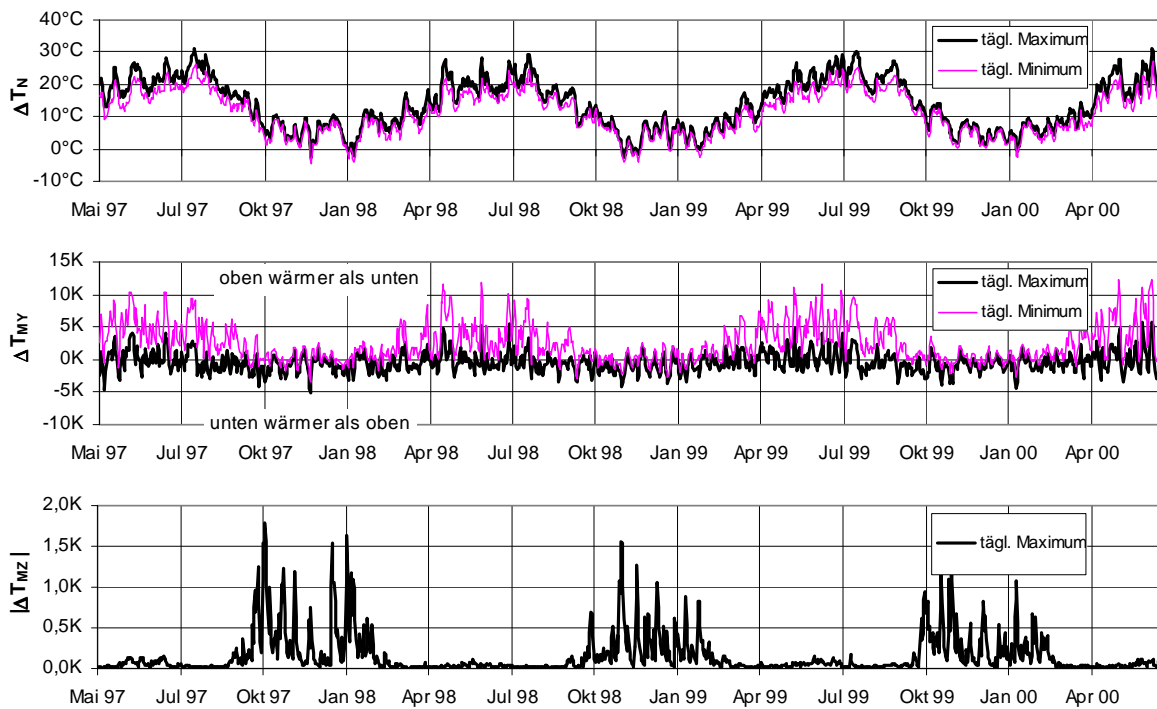


Abbildung 7.14 Berechnete tägliche Extremwerte der Temperaturanteile ΔT_N , ΔT_{MY} und $|\Delta T_{Mz}|$

Es wird deutlich, dass eine jahreszeitliche Lokalisierung, wann bestimmte Temperaturreaktionen verstärkt auftreten, nicht immer eindeutig festzulegen ist. Abbildung 7.15 verdeutlicht dies am Beispiel des negativen vertikalen Temperaturunterschiedes der Stahlbrücke.

Für die Erfassung des kombinierten Auftretens mehrerer Temperaturanteile ist eine qualifizierte Vorhersage nicht möglich, da hierfür zusätzlich aus allen Anteilen gemischte Kombinationstemperaturanteile T_K gebildet und ausgewertet werden müssen. Es ist daher ein eindeutiger Vorteil, wenn zur Extrapolation repräsentativer Extremwerte grundsätzlich der gesamte Jahresgang berücksichtigt wird und saisonale Schwankungen quasi automatisch einbezogen werden.

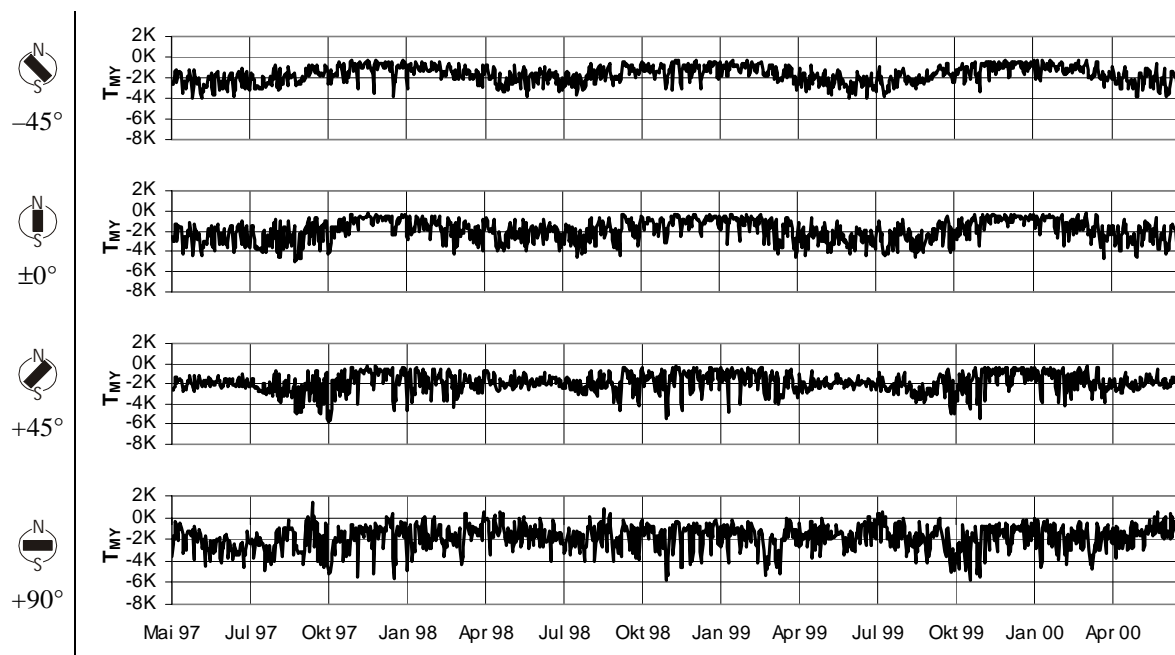


Abbildung 7.15 Stahlbrückenquerschnitt – Jahresgänge des negativen vertikalen Temperaturunterschiedes ΔT_{MY} bei unterschiedlichen Brückenausrichtungen

7.2.4 Extrapolation von saisonaler und jährlicher Extremwerte

Aus den berechneten Zeitreihen wurden entsprechend des Verfahrens nach Kapitel 5.6 Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode ermittelt. Hierzu erfolgte für die täglichen Minimal- und Maximalwerte der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY} eine Komponentenzerlegung in den periodischen Grundanteil und den stochastischen Anteil der Zeitreihen. Mit dem Extrapolationsverfahren der Bestimmung der Überschreitenswahrscheinlichkeiten (Abschnitt 5.6.5) wurden für jeden Monat und auf das gesamte Jahr bezogene Extremwerte der Temperaturanteile berechnet. Diese sind für die drei untersuchten Brückenquerschnitte auf den nachfolgenden Seiten in den Abbildungen 7.16 bis 7.18 graphisch dargestellt. Der Jahresgang stellt die Extremwerte auf der Basis der monatsweisen Auswertung dar. Für den Bezugszeitraum des Gesamtjahres sind die unterschiedlichen Einwirkungs-niveaus mit durchgezogenen Geraden markiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bauwerksausrichtung einen merklichen Einfluss auf den vertikalen Temperaturunterschied hat. Die Extremwerte der Bauwerksmitteltemperatur werden dagegen nur marginal beeinflusst.

In Tabelle 7.3 sind die berechneten, auf das Gesamtjahr bezogenen charakteristischen Werte ($R=50$ Jahre) der Temperatureinwirkungen ΔT_N und ΔT_{MY} für die drei untersuchten Querschnitte zusammengefasst, wobei jeweils der Maximalwert der untersuchten Bauwerksausrichtungen eingetragen wurde.

Die minimale Bauwerkstemperatur zeigt geringere Extremwerte als zu erwarten ist, da die zugrunde gelegte Klimadatenreihe OS1 aufgrund der ausschließlich milden Winter keine plausible Extrapolation der Bauwerksabkühlung erlaubt. Es ist daher nur folgerichtig, dass der Einsatz einer längeren Klimadatenreihe zur Erhöhung der Prognosegenauigkeit notwendig ist. Dies belegt die Extrapolation der minimalen Lufttemperatur mit 21jährigen Klimadaten im Abschnitt 6.2.

Im Abschnitt 7.2.2 wurde für den Stahl- und Verbundbrückenquerschnitt gezeigt, dass eine massivere Querschnittsausgestaltung im Stützenbereich zu geringeren Beanspruchungswerten führt. Für die Untergurtverstärkung von 600x40mm auf 600x80mm im mittleren Drittel eines Zweifeldträgers ergaben sich folgende Wichtungsfaktoren:

$$\text{Stahlbrücke: } 1,00 \cdot \Delta T_{MY, \text{pos}}, 0,69 \cdot \Delta T_{MY, \text{neg}} ;$$

$$\text{Verbundbrücke: } 0,75 \cdot \Delta T_{MY, \text{pos}}, 0,66 \cdot \Delta T_{MY, \text{neg}}$$

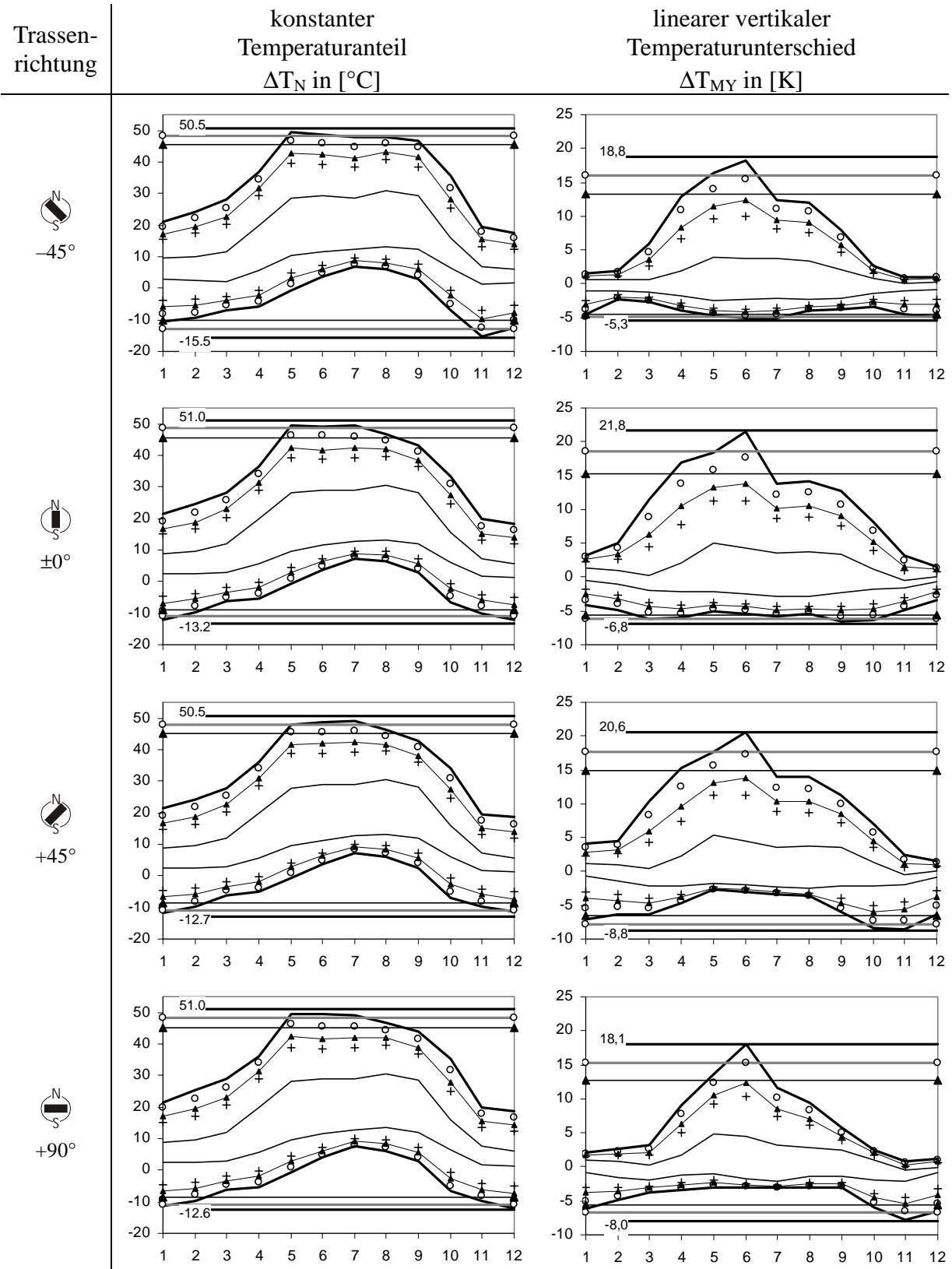
Die so gewichteten Temperaturunterschiede sind zusätzlich in die Tabelle 7.3 eingearbeitet worden und zeigen insbesondere bei dem Verbundquerschnitt eine Abminderung des effektiv wirksamen vertikalen Temperaturunterschiedes.

	Stahlbrücke		Verbundbrücke		Stahlbetonbrücke	
	Berechnung	gewichtet	Berechnung	gewichtet	Berechnung	-
Maximale Bauwerkstemperatur $\Delta T_{N, \text{pos}}$	51°C	-	42°C	-	35°C	-
Minimale Bauwerkstemperatur $\Delta T_{N, \text{neg}}$	-16°C	-	-10°C	-	-7°C	-
Pos. vertikaler Temperaturunterschied (Oberseite wärmer als Unterseite) $\Delta T_{MY, \text{pos}}$	22K	22K	23K	17K	+18K	-
Neg. vertikaler Temperaturunterschied (Unterseite wärmer als Oberseite) $\Delta T_{MY, \text{neg}}$	-9K	-6,2K	-24K	-16K	-6K	-

Tabelle 7.3 Charakteristische Extremwerte der Temperatureinwirkung der drei untersuchten Brückenquerschnitte

Da die Sonnenbestrahlung der Brückenstege naturgemäß nur auf der sonnenzugewandten Brückenseite erfolgen kann, ist der vertikale Temperaturunterschied von linker und rechter Brückenseite unterschiedlich und führt zu einer Torsionsverformung. Da für die Ermittlung der Temperatureinwirkungen jeweils der Gesamtquerschnitt verwendet wird, ist diese Torsionswirkung durch die zusätzliche Auswertung des Wölb-Temperaturanteiles $\Delta T_{M\omega}$ erfassbar (vgl. Abschnitt 3.4.3, S. 69). Eine Alternative besteht darin, den Temperaturunterschied „Unterseite wärmer als Oberseite“ aus dem vertikalen Temperaturunterschied der sonnenzugewandten Brückenquerschnitts-Hälfte zu ermitteln und aus der gegenüberliegenden Hälfte den Temperaturunterschied „Oberseite wärmer als Unterseite“. Der Wertebereich von ΔT_{MY} aus

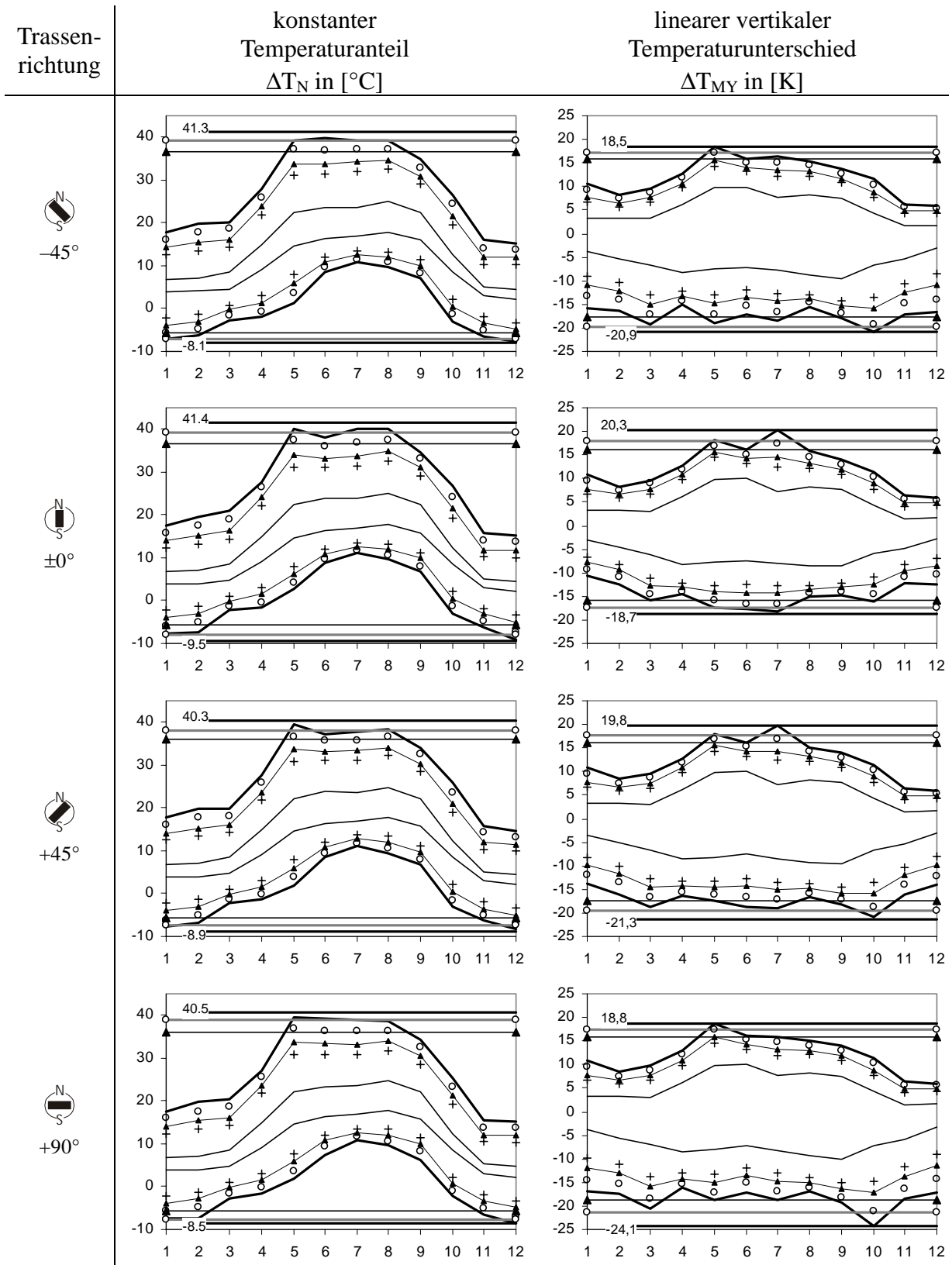
Stahlbrücke - Monatliche und jährliche Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode
 (50mm Fahrbelag, Bauwerkshöhe 4.0m, Bauwerksbreite 15.0m; Klimadatenreihe OS1)



— selten (R=50J) ○—○ R=10J ▲—▲ weniger häufig (R=2J) + häufig (5%) — quasi ständig

Abbildung 7.16 Stahlbrücke – Monatliche und jährliche Extremwerte

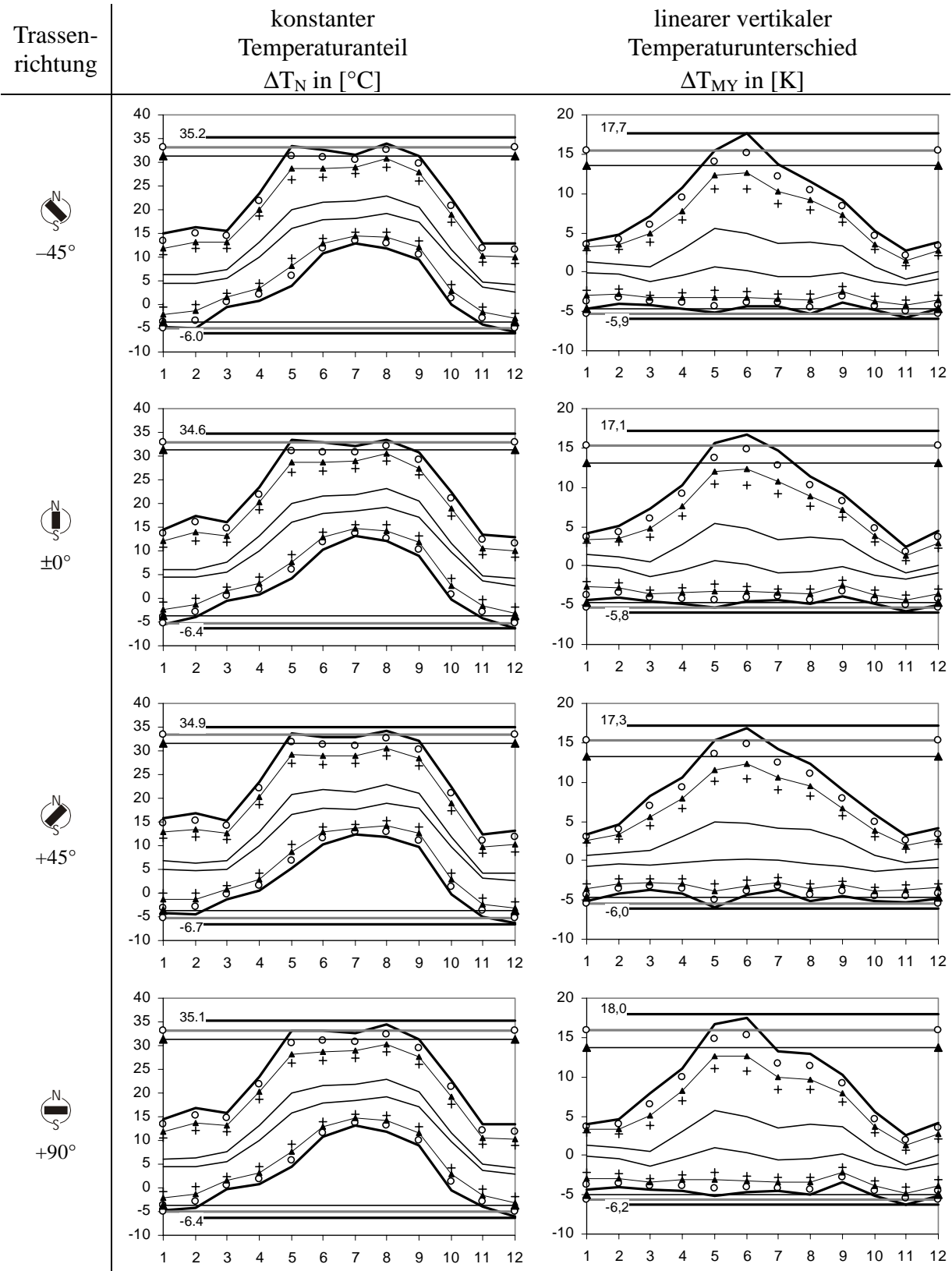
Verbundbrücke - Monatliche und jährliche Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode
(50mm Fahrbelag, Bauwerkshöhe 4.3m, Bauwerksbreite 15.0m; Klimadatenreihe OS1)



— selten (R=50J) ○—○ R=10J ▲—▲ weniger häufig (R=2J) + häufig (5%) — quasi ständig

Abbildung 7.17 Verbundbrücke – Monatliche und jährliche Extremwerte

Stahlbetonbrücke - Monatliche und jährliche Extremwerte unterschiedlicher Wiederkehrperiode
 (50mm Fahrbelag, Bauwerkshöhe 2.4m, Bauwerksbreite 14.5m; Klimadatenreihe OS1)



— selten (R=50J) ○—○ R=10J ▲—▲ weniger häufig (R=2J) + häufig (5%) — quasi ständig

Abbildung 7.18 Stahlbetonbrücke – Monatliche und jährliche Extremwerte

Tabelle 7.3 würde sich damit vergrößern. Die Vertikalverkrümmungen Brückenquerschnittes aus Torsion ließen sich damit als Näherung mit berücksichtigen. Im Sinne der inneren Konsistenz der hier durchgeführten Untersuchungen wird hiervon aber abgesehen.

Mit den durchgeführten Berechnungen wird die zielgerichtete Bestimmung der Temperatureinwirkungen für eine konkret vorgegebene Situation bis hin zur Darstellung der Temperatureinwirkung durch eine Kombinationsregel verfolgt. Es steht fest, dass für eine Festlegung von allgemeinen Normenwerten eine Variation der Querschnittsgestaltung und der zahlreichen Randparameter erforderlich ist (Bauwerksgeometrie Emissionsverhältnisse, Standort, veränderte terrestrische Umgebungsbedingungen, Wärmedehnung, E-Moduli, usw.).

Die im EC 1 [22] und DIN Fachbericht 101 [14] angegebenen die Werte der Temperatureinwirkungen resultieren aus der Auswertung vieler Querschnitte mit der entsprechenden Variation der Systemparameter sowie einer statistischen Auswertung dieser Berechnungsergebnisse. Ein direkter Vergleich der oben berechneten mit den gegenwärtigen gültigen normativen Temperatureinwirkungen ist daher nicht möglich. Letztere sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten charakteristischen Temperatureinwirkungen übersteigen deshalb z.T. die in Tabelle 7.4 angegeben Extremwerte. Ursächlich hierfür ist: Durch die Mitführung des Windgeschwindigkeitsverlaufs bei der Temperaturfeldsimulation weisen die täglichen Extremwerte der einzelnen Temperaturanteile eine größere Streuung auf als bei Ansatz eines saisonalen Windgeschwindigkeitsmittelwerts. Dies wirkt sich auf die Verteilung der Extremwerte aus und somit auch auf die Extrapolation selten auftretender Extremwerte. Zusätzlich bilden sich auch singuläre Ereignisse wie Gewitter oder auch niedrige Windgeschwindigkeiten besonders heißer Tage in den Berechnungsergebnissen ab (siehe S. 126). Das zugrunde gelegte erweiterte Modell des konvektiven Wärmeübergangs liefert insbesondere bei niedrigen Windgeschwindigkeiten höhere Oberflächentemperaturen als ein einfacherer Konvektionsansatz. Durch die Einbeziehung des gesamten Jahresganges bei der Extrapolation ergeben sich höhere Extrapolationswerte der Temperatureinwirkung, was allerdings bei seltenen Ereignissen nicht so stark ins Gewicht fällt.

	Stahlbrücke	Verbundbrücke	Stahlbetonbrücke
	<i>DIN FB 101 / EC 1</i>		
Maximale Bauwerkstemperatur $\Delta T_{N, \text{pos}}$	+53°C	+41°C	+38°C
Minimale Bauwerkstemperatur $\Delta T_{N, \text{neg}}$	-26°C	-20°C	-16°C
Pos. vertikaler Temperaturunterschied (Oberseite wärmer als Unterseite) $\Delta T_{MY, \text{pos}}$	+18K	+15K	+15K
Neg. vertikaler Temperaturunterschied (Unterseite wärmer als Oberseite) $\Delta T_{MY, \text{neg}}$	-13K	-18K	-8K

Tabelle 7.4 Extremwerte der Temperatureinwirkungen nach DIN Fachbericht 101 [14]

In den o.g. Regelwerken ist für Stahlbeton und Baustahl der Bezugs-Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_{T,0}=1,0 \cdot 10^{-5}/K$ angegeben. Dies weist indirekt darauf hin, dass die Variationsbreite dieses Materialparameters in die Temperaturangaben eingearbeitet ist. Es muss allerdings hinterfragt werden, ob die Einbeziehung dieser Variabilität tatsächlich durchgängig in den Temperatureinwirkungen enthalten ist. Dies bedeutete nämlich, dass

z.B. die charakteristische maximale Bauwerkstemperatur von Massivbrücken bei nur 30°C läge - bei einer Aufstelltemperatur von 10°C gilt dann $\alpha_T \cdot \Delta T_N = 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot (38^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot (30^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$. Im Anhang A.9 ist zur Verwendung eines Bezugs-Wärmeausdehnungskoeffizienten und den damit verbundenen Schwierigkeiten eine kurze Erörterung enthalten.

7.2.5 Bildung der Kombinationsfläche $\Delta T_N \oplus \Delta T_{MY}$ der Plattenbalken

Im Sinne einer praxisorientierten Beschreibung des kombinierten Auftreten von ΔT_N und ΔT_{MY} wird der krummlinig begrenzte Bereich der Kombinationsfläche nach einer festen Vorschrift linearisiert. Dies reduziert zusätzlich den Berechnungsaufwand, so dass neben der statistischen Auswertung der beiden Grund-Temperaturanteile nur die Bestimmung der zwei weiteren Zeitreihen $0,5 \cdot (\Delta T_N(t) \pm \Delta T_{MY}(t))$ erforderlich ist. Die insgesamt acht Extremwerte je Wiederkehrperiode werden entsprechend Tabelle 7.5 kompakt zusammengefasst.

$(\frac{1}{2}T_N - \frac{1}{2}T_{MY})_{neg}$	$T_{MY, pos}$	$(\frac{1}{2}T_N + \frac{1}{2}T_{MY})_{pos}$
$T_{N, neg}$	$\Delta T_N \oplus \Delta T_{MY}$	$T_{N, pos}$
$(\frac{1}{2}T_N + \frac{1}{2}T_{MY})_{neg}$	$T_{MY, neg}$	$(\frac{1}{2}T_N - \frac{1}{2}T_{MY})_{pos}$

Tabelle 7.5 Prinzipielle Darstellung der Kombinationsfläche $\Delta T_N \oplus \Delta T_{MY}$

Wie zu erwarten war, ergaben die Auswertungen für die drei untersuchten Brückenquerschnitte individuelle Kombinationsflächen. Diese sind in den Abbildungen 7.19 bis 7.21 graphisch und tabellarisch zusammengefasst. Die dargestellten Kombinationsflächen umschließen denjenigen Bereich, in dem die Extremwerte von ΔT_N und ΔT_{MY} mit der gekennzeichneten Auftretenshäufigkeit auftreten. Dieser Bereich ist umso größer, je seltener das Ereignis der Temperaturbelastung ist. Die jeweils acht Punkte markieren die für die Bauwerksbemessung bedeutsamen Punkte.

Jeder der drei untersuchten Brückenquerschnitte weist eine individuelle Form der Kombinationsfläche auf. Es kann zudem festgestellt werden, dass sich die prinzipielle Form der Kombinationsflächen für die variierten Ausrichtungen nicht unterscheidet.

Die Flächen zeigen für unterschiedliche Wiederkehrperioden ein konzentrisches Verdichten zu einem nicht im Koordinatenursprung liegenden Bereich. Dieser umgrenzt die quasi-ständigen Extremwerte der betrachteten Temperaturanteile. Der Schwerpunkt dieser Fläche könnte als mittlerer Temperaturzustand des Brückenbauwerkes aufgefasst werden.

Ferner ist festzustellen, dass sowohl für den Stahlbrückenquerschnitt und den Stahlbetonplattenbalken keine Bauwerksabkühlung unter 0°C bei gleichzeitig positivem vertikalem Temperaturunterschied auftritt. Liegt die Referenztemperatur der Bemessung über 10°C, könnte demnach die Überlagerung der Bauwerksabkühlung mit dem positiven Temperaturunterschied „Obergurtt wärmer als der Untergurt“ entfallen. Dies gilt nicht für den Verbundbrückenquerschnitt.

	DIN FB 101 [14]	Stahlbrücke	Verbundbrücke	Stahlbetonplattenbalken
ω_N	0,35	0,84	0,67	0,92
ω_{MY}	0,75	0,69	0,54	0,89

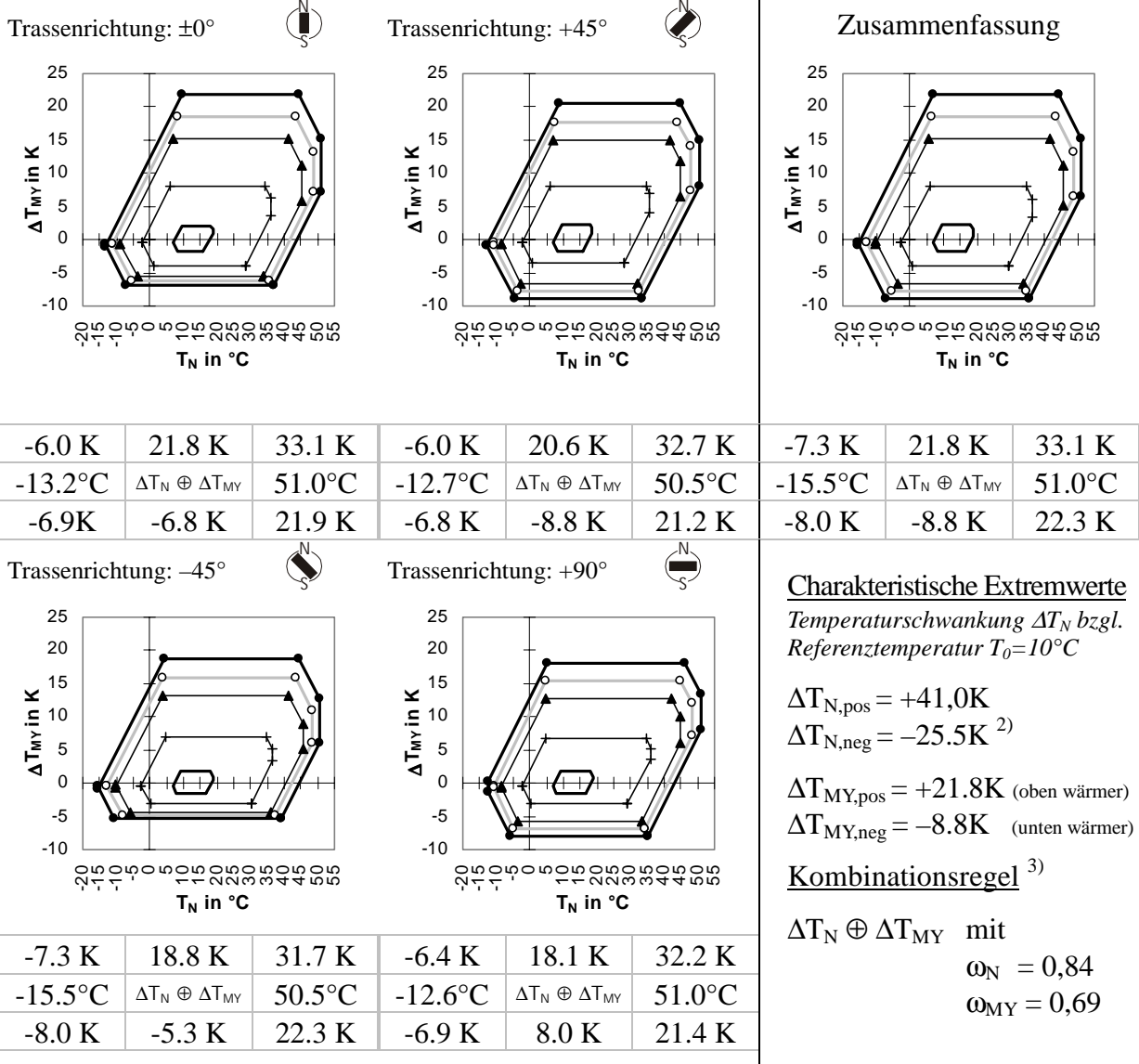
Tabelle 7.6 Ermittelte Kombinationsfaktoren $\Delta T_N \oplus \Delta T_{MY}$ bei einer Referenztemperatur 10°C

In Tabelle 7.6 sind aus den berechneten 50-jährigen Extremwerten Kombinationsfaktoren auf der Verallgemeinerungsstufe 3 und der Referenztemperatur 10°C dargestellt.

Stahlbrücke – Kombiniertes Auftreten der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY}

Bezugszeitraum: ganzes Jahr

Linearisierte $\Delta T_N - \Delta T_{MY}$ - Kombinationsflächen und charakteristische Kombinations-Temperaturen



● selten (R=50J) ○ R=10J ▲ weniger häufig (R=1J) + häufig (5%) — quasi ständig

- 1) Prinzipielle Darstellung der Kombinationsfläche durch acht Extremwerte siehe Tabelle 7.5 auf Seite 139
- 2) Bauwerkabkühlung ist infolge zu kurzer Klimadatenreihe OS1 zu gering
- 3) Die Kombinationsregel nach der Verallgemeinerungsstufe 3 gilt nur für die angegebenen charakteristischen Extremwerte.

Kombinationsregeln nach der Verallgemeinerungsstufe 1, Referenztemperatur $T_0=10^\circ\text{C}$

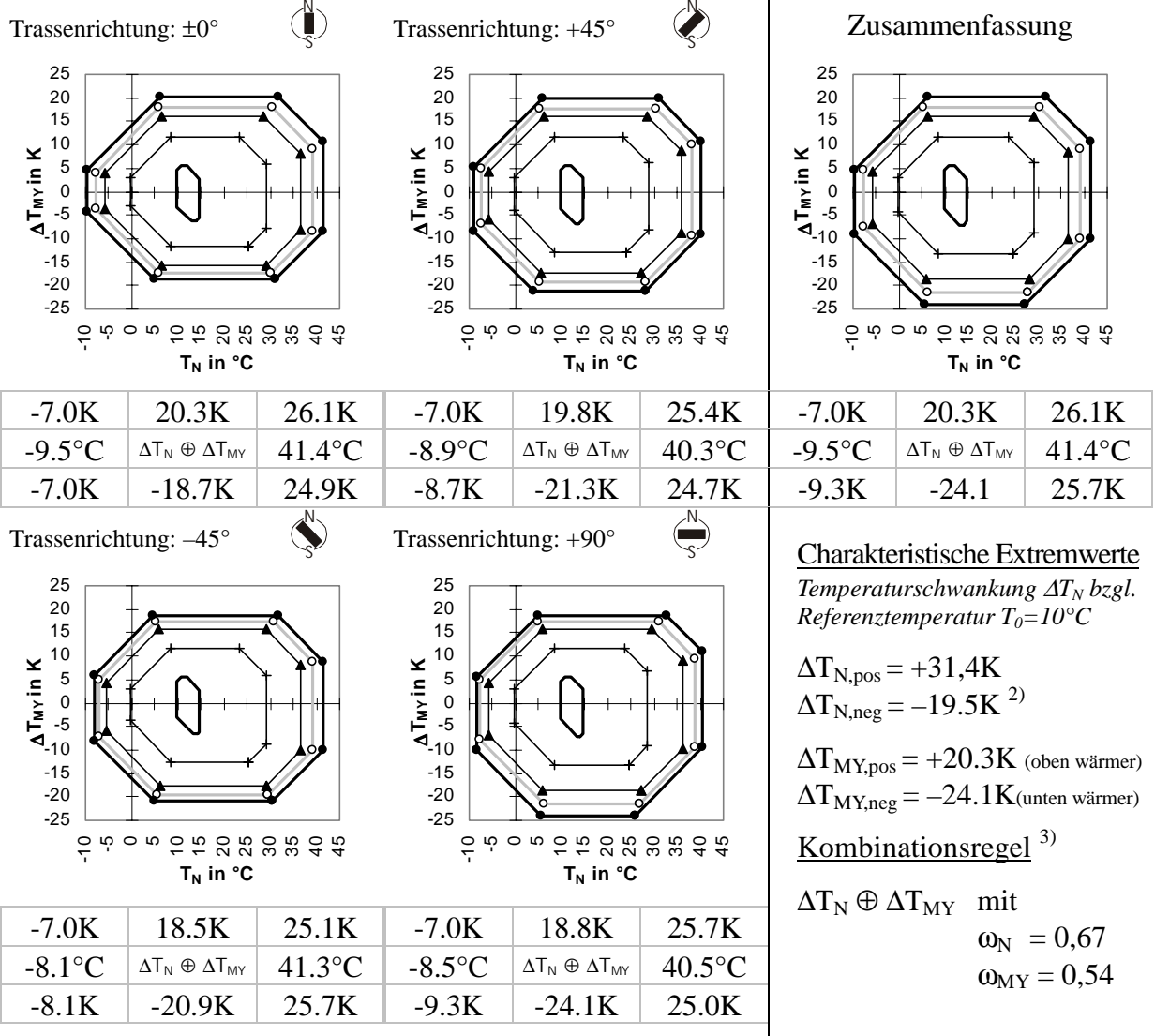
i :	$\Delta T_{N,pos} \oplus 0,69 \cdot \Delta T_{M,pos}$	iii :	$\Delta T_{N,pos} \oplus 0,00 \cdot \Delta T_{M,neg}$
	$0,84 \cdot \Delta T_{N,pos} \oplus \Delta T_{M,pos}$		$0,63 \cdot \Delta T_{N,pos} \oplus \Delta T_{M,neg}$
ii :	$\Delta T_{N,neg} \oplus 0,06 \cdot \Delta T_{M,neg}$	iv :	$\Delta T_{N,neg} \oplus 0,00 \cdot \Delta T_{M,pos}$
	$0,68 \cdot \Delta T_{N,neg} \oplus \Delta T_{M,neg}$		$0,11 \cdot \Delta T_{N,neg} \oplus \Delta T_{M,pos}$

Abbildung 7.19 Stahlbrücke - Kombiniertes Auftreten der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY}

Verbundbrücke – Kombiniertes Auftreten der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY}

Bezugszeitraum: ganzes Jahr

Linearisierte $\Delta T_N - \Delta T_{MY}$ - Kombinationsflächen und charakteristische Kombinations-Temperaturen



- selten (R=50J)
 R=10J
 weniger häufig (R=1J)
 häufig (5%)
 quasi ständig
- 1) Prinzipielle Darstellung der Kombinationsfläche durch acht Extremwerte siehe Tabelle 7.5 auf Seite 139
 - 2) Bauwerkabkühlung ist infolge zu kurzer Klimadatenreihe OS1 zu gering
 - 3) Die Kombinationsregel nach der Verallgemeinerungsstufe 3 gilt nur für die angegebenen charakteristischen Extremwerte.

Kombinationsregeln nach der Verallgemeinerungsstufe 1, Referenztemperatur $T_0=10^\circ\text{C}$

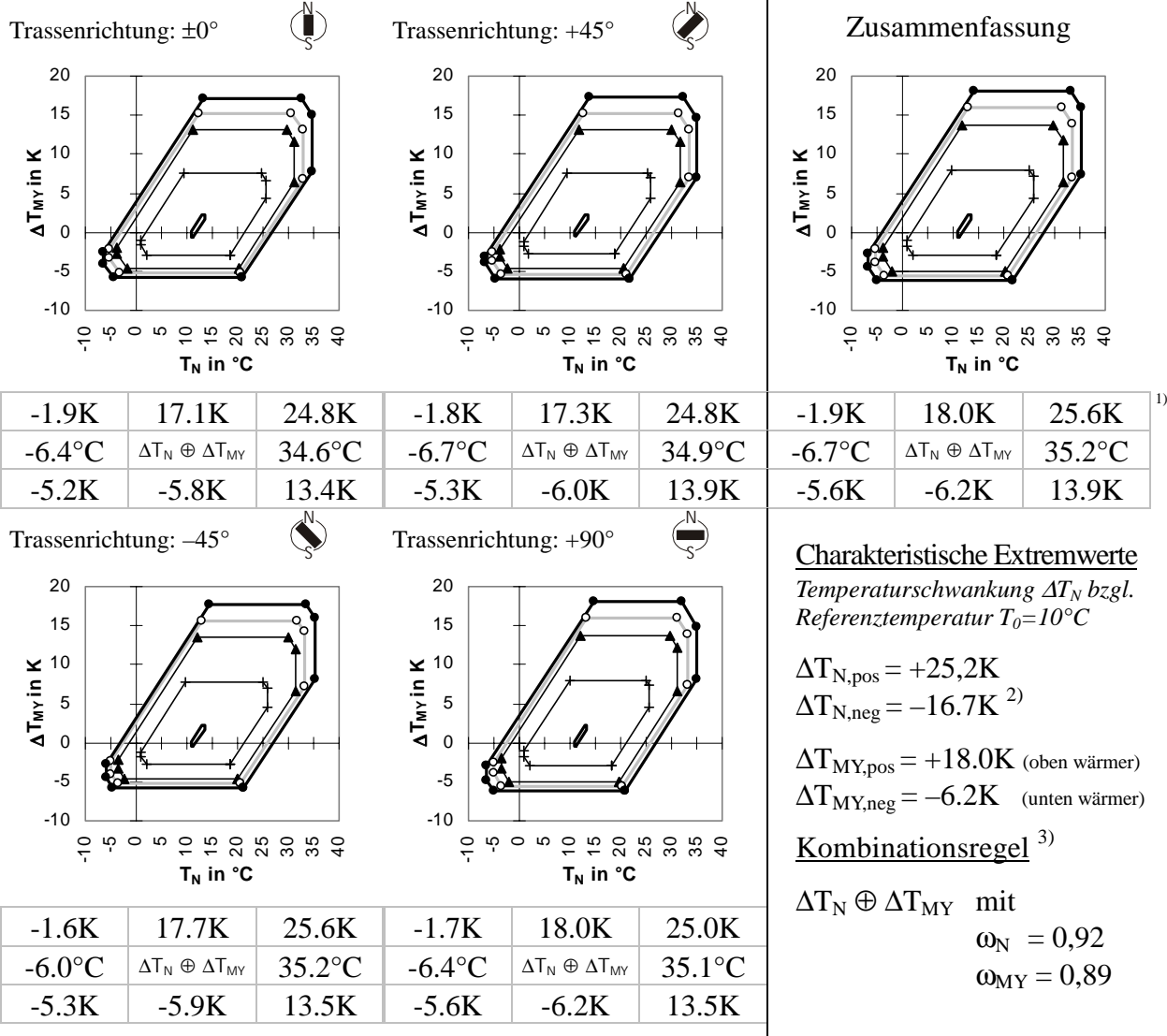
i : $\Delta T_{N,pos} \oplus 0,54 \cdot \Delta T_{M,pos}$ $0,67 \cdot \Delta T_{N,pos} \oplus \Delta T_{M,pos}$	iii : $\Delta T_{N,pos} \oplus 0,40 \cdot \Delta T_{M,neg}$ $0,54 \cdot \Delta T_{N,pos} \oplus \Delta T_{M,neg}$
ii : $\Delta T_{N,neg} \oplus 0,38 \cdot \Delta T_{M,neg}$ $0,23 \cdot \Delta T_{N,neg} \oplus \Delta T_{M,neg}$	iv : $\Delta T_{N,neg} \oplus 0,33 \cdot \Delta T_{M,pos}$ $0,23 \cdot \Delta T_{N,neg} \oplus \Delta T_{M,pos}$

Abbildung 7.20 Verbundbrücke - Kombiniertes Auftreten der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY}

Stahlbetonbrücke – Kombiniertes Auftreten der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY}

Bezugszeitraum: ganzes Jahr

Linearisierte ΔT_N - ΔT_{MY} - Kombinationsflächen und charakteristische Kombinations-Temperaturen



● selten (R=50J) ○ R=10J ▲▲ weniger häufig (R=1J) + häufig (5%) — quasi ständig

- 1) Prinzipielle Darstellung der Kombinationsfläche durch acht Extremwerte siehe Tabelle 7.5 auf Seite 139
- 2) Bauwerkabkühlung ist infolge zu kurzer Klimadatenreihe OS1 zu gering
- 3) Die Kombinationsregel nach der Verallgemeinerungsstufe 3 gilt nur für die angegebenen charakteristischen Extremwerte.

Kombinationsregeln nach der Verallgemeinerungsstufe 1, Referenztemperatur $T_0=10^\circ\text{C}$

i :	$\Delta T_{N,pos} \oplus 0,89 \cdot \Delta T_{M,pos}$	iii :	$\Delta T_{N,pos} \oplus 0,00 \cdot \Delta T_{M,neg}$
	$0,92 \cdot \Delta T_{N,pos} \oplus \Delta T_{M,pos}$		$0,46 \cdot \Delta T_{N,pos} \oplus \Delta T_{M,neg}$
ii :	$\Delta T_{N,neg} \oplus 0,74 \cdot \Delta T_{M,neg}$	iv :	$\Delta T_{N,neg} \oplus 0,00 \cdot \Delta T_{M,pos}$
	$0,90 \cdot \Delta T_{N,neg} \oplus \Delta T_{M,neg}$		$0,00 \cdot \Delta T_{N,neg} \oplus \Delta T_{M,pos}$

Abbildung 7.21 Stahlbetonbrücke - Kombiniertes Auftreten der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY}

Die Referenztemperatur von 10°C wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den normativ vorgegebenen Faktoren gewählt. Aus der Gegenüberstellung in Tabelle 7.6 geht hervor, dass insbesondere der berechnete Faktor ω_N signifikant größere Werte annimmt als der in [14] angegeben ($0,35 \leftrightarrow 0,67 \dots 0,92$). Auch ergeben sich erwartungsgemäß für jeden der drei untersuchten Bauweisen unterschiedliche Kombinationsregeln, so wie auch deren Temperaturverhalten unterschiedlich ist.

Die maßgebliche Situation für die Wahl der Kombinationsfaktoren entstammt stets einer hochsommerlichen Wetterlage mit hohem Eintrag an Sonnenstrahlung. Sie ruft eine Bauwerkserwärmung $\Delta T_{N, \text{pos}}$ und einen positiven vertikalen Temperaturunterschied $\Delta T_{MY, \text{pos}}$ hervor („Oberseite wärmer als Unterseite“).

Interessanterweise werden für die Stahlbetonbrücke vergleichsweise große Faktoren ermittelt, was sich aber aus den affinen Tagesgängen von ΔT_N und ΔT_{MY} erklärt (vgl. Abbildung 7.4 auf Seite 124). Dies trifft allerdings nicht auf Massivbrücken mit Hohlkastenquerschnitt zu, da der Kastenboden einen anderen tageszeitlichen Verlauf von ΔT_{MY} bewirkt [26]. Für diese Querschnittstypen sind deutlich geringere Faktoren als 0,9 zu erwarten.

Die Auswertungen für den Verbundbrückenquerschnitt ergeben, dass in allen vier Quadranten der Kombinationsfläche Bemessungspunkte liegen. Sowohl bei extrem warmen als auch extrem kalten Wetterlagen treten vertikale Temperaturunterschiede beiderlei Vorzeichens auf. Dies kann vor allem bei der Festlegung erforderlicher Lagerwege von Bedeutung sein, welche bei Durchlaufträgersystemen eine alternierende Verschiebungsrichtung aufweisen.

7.2.6 Schlussfolgerung

Mit der Durchführung von Langzeitsimulationen gelingt es, neben der Bestimmung charakteristischer Extremwerte von Temperaturbelastungen das simultane Wirken aller Lastkomponenten zu erfassen. Neben brückenspezifischen Angaben und Parametern der topographischen Lage sind mehrjährige Klimadaten erforderlich, die für den Brückenstandort repräsentativ sind. Die Simulation mit gemessenen Klimadaten ist zur praktikablen Bestimmung von Kombinationsregeln unerlässlich.

Durch Variation maßgebender Querschnitts-, Material-, Umgebungs- und Positionsparameter kann sukzessive der Bereich möglicher Temperaturbelastungen ermittelt werden. Zur praxisgerechten Anwendung werden Temperaturbeanspruchungen durch konkrete Bemessungspunkte abgegrenzt.

Wie aus den Untersuchungsergebnissen der Plattenbalken zu entnehmen, sollten in der Tragwerksbemessung Temperaturschwankung und vertikaler Temperaturunterschied stets als simultan wirkende Einwirkungen berücksichtigt werden. Es bleibt zu bemerken, dass zur wirklichkeitsnahen Berücksichtigung klimatisch bedingter Temperaturbeanspruchungen weitere, mehrachsige Beanspruchungszustände auftreten als die hier näher betrachteten.

8 Schluss

8.1 Zusammenfassung

Zu den veränderlichen Lasten auf Brückentragwerke zählen die klimatisch bedingten Temperatureinwirkungen. Dabei werden nicht die Klimateinwirkungen aus der Umgebung sondern die aus ihnen resultierenden Temperaturverteilungen im Bauwerk als „indirekte“ Last berücksichtigt. Zur Bestimmung der Temperaturverteilungen stehen deterministische Rechenverfahren zur Verfügung oder es werden Temperaturmessungen am Bauwerk durchgeführt.

Um hierbei den stochastischen Charakter der Klimadaten zu berücksichtigen, erfolgt in dieser Arbeit die numerische Berechnung von Temperaturfeldern auf der Basis gemessener Klimadaten. Zur Ermittlung nichtlinearer instationärer Temperaturfelder konnte auf ein Berechnungsverfahren zurückgegriffen werden, welches für die spezielle Thematik der klimatisch bedingten Temperaturbeanspruchungen entwickelt worden ist [58]. Das Verfahren zur Simulation der Temperaturfelder wurde so aufbereitet, dass als klimatische Eingangsparameter real gemessene, mehrjährige Klimadaten von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung verwendet werden können. Energieanteile, die nicht als gemessene Größen vorliegen, werden entsprechend der in [58] verwendeten theoretischen Ansätze ersetzt. Durch eine zielgerichtete Analyse der langwelligen atmosphärischen Strahlung konnte das Kopplungsmodell verbessert werden. Die Ergänzung der äußeren thermischen Randbedingungen durch detailliertere Ansatzfunktionen erhöht die Modellgüte.

Für die Simulation des Temperaturverhaltens von Brückenbauwerken standen mehrjährige Klimadatenreihen mit stündlichen Messdaten zur Verfügung. Wegen der erforderlichen Kontinuität erfolgte die Schließung von Messdatenlücken durch idealisierte Ansätze der jeweiligen Klimakomponenten.

Nichtlinear begrenzte Temperaturfelder lassen sich in idealisierte Temperaturanteile zerlegen, die entweder den Temperaturzustand in vereinfachter Form wiedergeben oder an spezielle mechanische Auswirkungen gekoppelt sind. Auf der Basis von Formfunktionen wurde eine Zerlegungsregel realisiert, die für alle Reaktionen in prismatischen Brückenquerschnitten angewendet werden kann. Mit der Zerlegung der ungleichmäßigen Erwärmungszustände erhält man eine Datenbasis in Form mehrerer Zeitreihen, welche zur Ermittlung charakteristischer Temperaturbelastungen unterschiedlicher Wiederkehrperiode nutzbar ist.

Da diese Temperaturanteile simultan wirken, ist die Berechnungsbasis zur Ableitung entsprechender Kombinationsregeln erarbeitet worden. Durch eine Linearisierung der krummlinig begrenzten Kombinationsfläche, welche das gleichzeitige Auftreten von extremen Temperaturbelastungen darstellt, ist die eine Formulierung als Combination-Amplification-Factor-Kombinationsregel möglich. Es konnte gezeigt werden, dass sich für n Temperaturanteile insgesamt $n \cdot 2^n$ Kombinationsgleichungen ergeben, deren Kombinationsbeiwerte nicht verallgemeinerbar sind.

Durch die Verwendung gemessener Klimadaten bleibt der zufällige Charakter der klimatischen Temperatureinwirkungen in den Berechnungsergebnissen einer Temperaturfeldsimula-

tion erhalten. Kurzzeitige Schwankungen der äußeren Einwirkungen, die wesentlich für die Beanspruchung sein können, werden damit ebenfalls berücksichtigt. Durch Aufspaltung der Temperaturanteile in einen zeitlich periodischen und einen zufälligen Anteil lassen sich die saisonalen und stochastischen Eigenschaften der Temperaturbelastungen beschreiben. Analysen haben ergeben, dass der zufällige Restanteil ein autoregressiver Prozess ist, d.h. Wettergeschehen und Tragwerk besitzen ein zeitlich begrenztes „Erinnerungsvermögen“. Die monatsweise Bestimmung der Zufallseigenschaften liefert die notwendigen Daten, anhand derer eine Extremwertprognose von Temperaturbelastungen unterschiedlicher Wiederkehrperiode durchgeführt werden kann. Das zugrunde gelegte Komponentenmodell ermöglicht auch saisonal bezogene Aussagen über die Temperaturbelastungen.

Zum Nachweis der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit beschränkt sich das gegenwärtige Normenwerk auf die Berücksichtigung der Temperaturschwankungen ΔT_N sowie die vertikalen bzw. horizontalen Temperaturunterschiede ΔT_M . Dieser Ansatz wurde in der Arbeit beibehalten. Für zweistegige Plattenbalkenquerschnitte wurde für eine gegebene Bauwerks- und Umgebungskonstellation der Bereich dieser Temperaturanteile unter den gegebenen Wetterdaten berechnet und die zugehörigen Kombinationsregeln erarbeitet. Es ist festzustellen, dass Stahlbrücken, Verbundbrücken und Massivbrücken unterschiedlich ausgeprägte Temperaturbeanspruchungen und Kombinationsflächen aufweisen. Für den untersuchten Verbundbrückenquerschnitt konnte gezeigt werden, dass sich auch kurzzeitige Wetterereignisse wie ein Gewitter ungünstig auf die Temperaturbelastung auswirken können.

Mit der Bestimmung von charakteristischen Temperaturkenngrößen für Brückentragwerke können die Tragwerksreaktionen hinreichend sicher abgeschätzt werden. Eine Temperaturfeldanalyse flächenhafter Tragstrukturen von Kanalbrücken ist in den Arbeiten [62] und [64] enthalten. Eine Anwendung zur Temperaturoptimierung von Einfeldträgern findet sich in [68].

8.2 Ausblick

Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag geleistet werden, die Auswirkungen klimatischer Temperatureinwirkungen auf Brückenbauwerke realitätsnah zu erfassen. Die vorgestellten Verfahren geben die Möglichkeit zur projektspezifischen Analyse des Temperaturverhaltens von prismatischer Brückenquerschnitte unter lokalen, spezifischen Klimateinwirkungen auf der Grundlage der von den Wetterstationen zur Verfügung gestellten Klimadaten. Das vorgestellte Verfahren wurde beispielhaft für die in den Regelwerken berücksichtigten Auswirkungen der Temperaturschwankungen sowie die vertikalen Temperaturunterschiede demonstriert. Zur wirklichkeitsnahen Berücksichtigung klimatisch bedingter Temperaturbelastungen in speziellen Bauwerken müssen weitere mehrachsige Beanspruchungszustände einbezogen werden. Charakteristische Kennzahlen hierfür lassen sich mit den EDV-technisch aufbereiteten Verfahren adäquat ermitteln.

Die Aufstelltemperatur spielt im vorgenannten Problemkreis keine Rolle. Es wird aber als notwendig erachtet, diesem nicht eindeutig in Zeitpunkt, Größe und Wirkung bekannten Temperaturzustand mehr Beachtung zu schenken als bisher. Bei der Brückenmontage wird der

augenblicklich vorherrschende Temperaturzustand „eingefroren“ und führt zu Zusatzbelastungen der Tragstruktur, die durch die Bemessung ausreichend abgedeckt sein müssen [69], [66], [44].

Neben den klimatischen Temperaturbeanspruchungen treten auf Brücken hohe Temperaturlasten auch während des Heißeinbaus von Fahrbahnbelag auf. Diese überlagern sich mit den saisonalen, witterungsbedingten Temperaturfeldern. Vorstudien zu diesem Lastfall in [65], [70] deuten auf weiteren Forschungsbedarf hin.

9 Literatur

- [1] *Ångström, A. 1916: Meteorologische Zeitschrift, Heft 12(1916)*
- [2] *Argyris, J.H.; Warnke, E.P.; Willam, K. 1977: Berechnung von Temperatur- und Feuchtefeldern in Massivbauten nach der Methode der Finiten Elemente. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 278, W. Ernst & Sohn, Berlin*
- [3] *Barsotti, R.; Froli, M. 2000: Statistical Analysis of Thermal Actions on a Concrete Segmental Box-Girder Bridge. In: Structural Engineering International 2(2000)*
- [4] *Baumgartner, V. 1976: Einführung in die statistische Analyse von Zeitreihen. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2(1976)*
- [5] *BayFORKLIM 1999: Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen. Abschlussbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes*
- [6] *Belke, D. 1980: Analyse und Berechnung oberirdischer Abflüsse. Schriftenreihe des deutschen Verbandes für Wasserbau und Kulturbau, Heft 46, Verlag Paul Parey*
- [7] *Bourges, B. 1992: Yearly variations of the Linke turbidity factor. Climatic Data Handbook of Europe, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers*
- [8] *Box; Jenkins 1970: Time series analysis forecasting and control, San Francisco*
- [9] *Brodbeck, R. 1998: Ballon-borne far-infrared Fabry-Perot spectrometer for astrophysical observations, ETH Zürich, Institut für Quantenelektronik, Dissertation Nr. 12510*
- [10] *BS 5400-2 1978: Steel, concrete and composite bridges. Specification for loads*
- [11] *Churchill, S.W. 1977: A Comprehensive correlating equation for laminar, assisting, forced and free convection. AIChE Journal 23, No. 1(1977)*
- [12] *DAST 1954: Ergebnisse der Versuche und Messungen auf dem Gebiet der Verbundbauweise – Temperatureinfluss, Schwinden und Kriechen, Verbundmittel. Veröffentlichung des Deutschen Stahlbau-Verbandes, Heft 5(1954)*
- [13] *Detting, H. 1962: Die Wärmedehnung des Zementsteins, der Gesteine und der Betone. Schriftenreihe DAfStb, Heft 164, Otto Graf-Institut der TH Stuttgart.*
- [14] *DIN Fachbericht 101 2001: Einwirkungen auf Brücken, Beuth-Verlag GmbH*

- [15] *DIN 1055-7 (Entwurf) 06/2000*: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 7: Temperatureinwirkungen; NABau im DIN e.V.
- [16] *DIN 1055-100 03/2001*: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln; NABau im DIN e.V.
- [17] *DIN 1072 1985*: Straßen- und Wegebrücken, Lastannahmen
- [18] *DIN 4710 1982*: Meteorologischen Daten zur Berechnung des Energieverbrauches von heiz- und raumluftechnischen Anlagen
- [19] *DVWK 1979*: Empfehlung zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft – Merkblätter – Empfehlungen – Richtlinien, Verlag Paul Parey
- [20] *Dyck, S. 1976*: Angewandte Hydrologie I und II. VEB Verlag für Bauwesen Berlin
- [21] *Emerson, M. 1982*: Thermal movements of concrete bridges: Field measurements and methods of prediction. SuS Rep. 747, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, England
- [22] *ENV 1991-2-5 08/1997*: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2-5: Einwirkungen auf Tragwerke: Temperatureinwirkungen. NABau im DIN
- [23] *Fießler, B. 1983*: Entwicklung von Regeln zur Kombination stochastischer Lasten für die Tragwerksbemessung. TU München, Lehrstuhl für Massivbau
- [24] *Fischer, L. 2000*: Sicherheitskonzept für neue Normen – ENV und DIN-neu. In: Bautechnik 77, Heft 1(2000)
- [25] *Fleischer, D. 1988*: Praktische Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit von Baukonstruktionen, Grundlagen Theorie Anwendung. Universität der Bundeswehr München
- [26] *Fouad, N. A. 1998*: Rechnerische Simulation der klimatisch bedingten Temperaturbeanspruchungen von Bauwerken. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Technische Universität Berlin, Heft 28
- [27] *Franke, H. 1970*: Temperaturverteilung und Wärmefluss in mehrschichtigen Wänden bei instationären Umgebungslufttemperaturen und Sonnenbestrahlung. In: Bautechnik 47, Heft 8(1970)
- [28] *Frenzel, B. 1991*: Beitrag zur Kombination der stochastischen Lasten Verkehr und Temperatur an Spannbetonbrücken, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar

- [29] *Frenzel; Freundt; König; Mangerig; Merzenich; Novak; Sedlacek; Sukhov 1996*: Bestimmung von Kombinationsbeiwerten und -regeln für Einwirkungen auf Brücken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 715. Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr
- [30] *Friederich, P. 1980*: Zur Berechnung dreidimensionaler instationärer Temperatur- und Wärmespannungsfelder mit der Methode der finiten Elemente. Dissertation, Universität Stuttgart
- [31] *Gassel, A. 1997*: Beiträge zur Berechnung solarthermischer und exergieeffizienter Energiesysteme. Dissertation, Technische Universität Dresden
- [32] *Gerstengarbe; Österle; Werner 1999*: Wie erkennt man signifikante Klimaänderungssignale? Klimastatusbericht 1999, Deutscher Wetterdienst
- [33] *Gertis 1997*: Können wir die weltweite Klimaveränderung durch Heizenergieeinsparung im Bauwesen noch stoppen? In: Bauingenieur 72(1997)
- [34] *Graf; Henning; Stange; Wilrich 1987*: Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik. Springer-Verlag
- [35] *Graße, W. 1992*: Zur Lastkombinationsregel nach DIN 18800 Teil 1. In: Stahlbau 61, Heft 5(1992)
- [36] *Häfner; Köckritz; Sitz; Voigt 1989*: Berechnung der Temperatur-Eigenspannungen in massigen Betonbauwerken. In: Bautechnik 66(1989)
- [37] *Hahn 1985*: Elastizitätstheorie – Grundlagen der linearen Theorie und Anwendung auf eindimensionale, ebene und räumlich Probleme. B.G. Teubner Stuttgart
- [38] *Hamfler, Holger 1988*: Berechnung von Temperatur-, Feuchte- und Verschiebungsfeldern in erhärtenden Betonbauteilen nach der Methode der Finiten Elemente. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 395
- [39] *Hammer, A. 2000*: Anwendungsspezifische Solarstrahlungsinformationen aus Meteosat-Daten. Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
- [40] *Hasenfratz, E. 1998*: Sonnenstrahlung und Großwetterlagen – Zur witterungsklimatologisch bedingten Variabilität der Globalstrahlung im westdeutschen Raum. Landauer Universitätsschriften, Umweltwissenschaft und Umweltbildung, Band 4, Knecht Verlag
- [41] *Heindl W.; Koch, A. 1976*: Die Berechnung von Sonnenstrahlungsintensitäten für wärmetechnische Untersuchungen im Bauwesen“, In: Gesundheits-Ingenieur, Heft 12(1976)
- [42] *Hell, F. 1979*: Grundlagen der Wärmeübertragung. VDI-Verlag GmbH Düsseldorf

- [43] *Helm, M. 2002*: Schleusenanlage Rothensee - Anforderungen an den Beton und Ergebnisse der Eigenüberwachung. In: Beton, Heft 2(2002)
- [44] *Hellmich, K. 1984*: Einfluss der Hydratationswärme des Betons auf die Lagerver-schiebung bei Spannbetonbrücken. In: Beton- und Stahlbetonbau, Heft 2(1984)
- [45] *Kasten, Fritz 1993*: Statistik der Globalstrahlung an acht Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Deutscher Wetterdienst
- [46] *Kehlbeck, F. 1975*: Einfluss der Sonnenstrahlung bei Brückenbauwerken. Werner-Verlag Düsseldorf
- [47] *Kluge, Christian 1996*: Wahrscheinlichkeitsanalyse von Hochwasserdurchflüssen – Statistische Verfahren zur Anpassung ausgewählter Verteilungsfunktionen, TU Dres-den, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Dresdner Berichte 7
- [48] *Knabenschuh, H. 1993*: Temperaturunterschiede an Betonbrücken. Berichte der Bun-desanstalt für Straßenwesen, Heft B3
- [49] *Kollbrunner; Basler 1965*: Statik der Wölb-torsion und der gemischten Torsion. Verlag Schweizer Stahlbau-Vereinigung
- [50] *Königer, Wolfgang 1981*: Die Anwendung der Extremal-3-Verteilung bei der Regen-auswertung und der Niedrigwasseranalyse. In: gwf-wasser/abwasser 122, Heft 10(1981)
- [51] *Köppel 1987*: Infrarot-Meßtechnik und Bauthermografie. In: Bauingenieur 62(1987)
- [52] *Krebs; Böllinger 1981*: Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper. Bundesminister für Verkehr - Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 347
- [53] *Kreyszig, E. 1975*: Statistische Methoden und ihre Anwendung, Vandhoeck & Rup-recht Göttingen
- [54] *Kuchling, H. 1983*: Physik. Nachschlagebuch für Grundlagenfächer, VEB Fachbuch-verlag Leipzig
- [55] *Lebek, D.E. 1969*: Bericht über Brückentemperaturen und Brückenbewegungen. Bun-desanstalt für Straßenwesen

- [56] *Lebek; Knabenschuh 1976*: Messungen von Temperaturunterschieden an Stahlbrücken, 1. Zwischenbericht: Untersuchungen über Temperaturbelastungen von Stahlbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte und ihrer Korrosionsschutzsysteme beim Einbau von bituminösen Fahrbahnbelägen. Forschungsarbeit im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (F.A. 11.203)
- [57] *Lebet; Badoux 1988*: Temperaturänderungen an Brücken. In: Bauingenieur 63(1988)
- [58] *Mangerig, I. 1986*: Klimatische Temperaturbeanspruchungen von Stahl- und Stahlverbundbrücken. Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 86-4, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Ruhr, Universität Bochum
- [59] *Mangerig, Beucher, Burger, Lichte, Retze, Sandner, Zapfe 2002*: Studie zum temperaturoptimierten Einfeld-Fahrwegträger im Weiterentwicklungsprogramm Magnetschwebbahntechnologie, WEP-Projekt 28 im Auftrage des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
- [60] *Mangerig; Lichte 1999*: Berechnung vertikaler Temperaturunterschiede in Massivbrücken auf der Basis gemessener Klimadaten. Universität der Bundeswehr München, Forschungsarbeit im Auftrag der TU München,
- [61] *Mangerig; Lichte 2000*: Gutachterliche Stellungnahme, Lehrter Bahnhof Berlin – Temperaturschwankungen der Brücken 12, 13, 14 und 15. Universität der Bundeswehr München
- [62] *Mangerig; Lichte 2000*: Klimatische Temperaturbeanspruchungen der Kanalbrücke Minden. Universität der Bundeswehr München, Forschungsarbeit im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- [63] *Mangerig; Lichte 2001*: Gutachterliche Stellungnahme, Lehrter Bahnhof Berlin – Temperaturbewegungen der Brückenlager und Relativverschiebungen zwischen Ost-West-Dächern und Brücken. Universität der Bundeswehr München
- [64] *Mangerig; Lichte 2002*: Klimatische Temperaturbeanspruchung von Kanalbrücken mit geneigten Trogwänden am Beispiel der Leineflutbrücke. Universität der Bundeswehr München, Forschungsarbeit im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- [65] *Mangerig; Lichte 2002*: Grundsätzliche Untersuchungen zum Lastfall „Asphaltieren“, Universität der Bundeswehr Neubiberg, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (interne Veröffentlichung)
- [66] *Mangerig; Lichte 2002*: Lehrter Bahnhof - Verschiebungsmessungen an der Brücke 15a in Achse 11 und Bewertung der verfügbaren Lagerwege, Universität der Bundeswehr Neubiberg, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

- [67] *Mangerig; Lichte; Retze; Zapfe 2000*: Transrapid Langsamfahrweiche, Klimatische Temperaturbeanspruchungen. Universität der Bundeswehr München, Forschungsarbeit im Auftrag der Thyssen Transrapid System GmbH, Kassel
- [68] *Mangerig; Lichte; Zapfe et al 2002*: Studie zum temperaturoptimierten Einfeld-Fahrwegträger im Weiterentwicklungsprogramm Magnetschwebbahntechnologie. WEP-Projekt 28, Bundesministerium für Verkehr
- [69] *Mangerig; Zapfe 2000*: Auswirkungen klimatischer Temperaturbeanspruchungen auf den Einbau von Brückenlagern, Darmstädter Stahlbautreffen 2000
- [70] *Mangerig; Beucher; Lichte 2003*: Temperatureinwirkungen beim Heißeinbau von Fahrbahnbelag auf Straßenbrücken. Seminar „DIN Fachberichte im Brückenbau – Stahlbrücken und Verbundbrücken“, Bayerische Ingenieurekammer Bau
- [71] *Maniak; Plewa; Prellberg 1978*: Quantitative wasserwirtschaftliche Untersuchungen von Niedrigwasser. 16. Seminar – Kuratorium für Wasser und Kulturbauwesen
- [72] *Marek, G 1999*: Probabilistische Verfahren in der Bemessung von Stahltragwerken. Stahlbau 68, Heft 1(1999)
- [73] *Matthies, M. 2001*: Offshore: Kombination der Lasten von Wind und Wellen – Ein mathematisches Modell ermittelt Zusammenspiel von Wind und Seegang. In: Erneuerbare Energien, Heft 3(2001)
- [74] *Meteorologische Daten 1989-1997*: Wetterstation Garching, Meteorologisches Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München, 1998
- [75] *Meteorologische Daten 10/1999-02/2001*: Wetterstation Garching, Meteorologisches Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München
- [76] *Meteorologische Daten 1997-2000*: Wetterstationen 10317 und 1516 Osnabrück, Deutscher Wetterdienst (01.05.1997 bis 30.06.2000)
- [77] *Meteorologische Daten 1951-2000*: Station Hannover-Herrenhausen (Lufttemperatur), Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover
- [78] *Noakowski; Kupfer 1977*: Bemessungsverfahren für die horizontale Temperaturbeanspruchung von Stahlbetonschornsteinen. Forschungsreihe der Bauindustrie, Band 35, Hauptverband der Bauindustrie
- [79] *Noakowski; Kupfer 1978*: Die Bewehrung von Stahlbetonbauteilen bei Zwangsbeanspruchung infolge Temperatur. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 296
- [80] *Pamp, Reiner 1991*: Zur Auswirkung der Hydratation bei Verbundbrücken. Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 91-2, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Ruhr, Universität Bochum

- [81] *Petersen, Christian 1985: Stahlbau – Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. Vieweg-Verlag*
- [82] *Plasil, I. 1981: Temperaturbedingte Zwängungen in Trägerrostkonstruktionen. In: Bauingenieur 56(1981)*
- [83] *Plate, E. 1993: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. Verlag Ernst & Sohn Berlin*
- [84] *Pfohl 1983: Reaktionskraft am Festpunkt von Brücken aus Bremslast und Bewegungswiderständen der Lager. In: Bauingenieur 58(1983)*
- [85] *Pottharst 1977: Zur Wahl eines einheitlichen Sicherheitskonzepts für den Konstruktiven Ingenieurbau. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn*
- [86] *Priestley, Buckle 1978: Ambient Thermal Response of Concrete Bridges. Bridge Seminar 1978, Summary Vol. 2*
- [87] *Rahlwes; Maurer 1995: Lagerung und Lager von Bauwerken. In: Betonkalender 1995, Teil II*
- [88] *Rackwitz; Fießler 1978: Structural reliability under combined random load sequences. Computers & Structures – Great Britain 9 (1978)*
- [89] *Readymix Beton Bayern/Thüringen: Frischbeton- und Lufttemperaturmessdaten (unveröffentlicht)*
- [90] *Recknagel 1993: Klima+Heizung Energieeinsparung in der Gebäudetechnik – Baukörper und technische Systeme der Energieverwendung. Vogel-Fachbuch*
- [91] *Röhling, St. 2002: Temperaturverhältnisse und Rissgefahr in erhärtenden Stahlbetonwänden. In: Beton 5(2002)*
- [92] *Roik, K.; Mangerig, I. 1983: Ermittlung von Lastannahmen für Temperaturdifferenzen zur Berücksichtigung in der DIN 1072 für Stahl- und Verbundbrücken, Forschungsarbeit im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, (FA. 15.115, R81)*
- [93] *Schaumann, P. 1984: Zur Berechnung stählerner Bauteile und Rahmentragwerke unter Brandbeanspruchung. Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 84-4, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Ruhr, Universität Bochum*
- [94] *Schirmer 1980: Meyers kleines Lexikon – Meteorologie. Meyers Lexikonverlag*
- [95] *Schleicher, W. 2001: Verschweißte Temperaturverformungen von Brücken. In: Stahlbau 70, Heft 8(2001)*

- [96] *Schlittgen, Streitberg 1991: Zeitreihenanalyse.* R. Oldenbourg Verlag München Wien
- [97] *Schneider, K.-J. 1994: Bautabellen für Ingenieure.* Werner-Verlag
- [98] *Scholz; Knoblauch 1995: Baustoffkenntnis.* Werner-Verlag
- [99] *Schönwiese, C. D. 1979: Klimaschwankungen. Verständliche Wissenschaft,* Springer-Verlag
- [100] *Schönwiese, C. D. 1988: Grundlagen und neue Aspekte der Klimatologie,* J.W. Goethe-Universität Frankfurt, Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B Bd. 2
- [101] *Schönwiese; Grieser 2000: Statistische Analysen zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes. Berichte des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/Main*
- [102] *Schöppel; K. 1993: Entwicklung der Zwangspannungen im Beton während der Hydratation. Dissertation, TU München, Berichte aus dem Baustoffinstitut 1/1993*
- [103] *Schueller, G. I. 1981: Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken.* Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn
- [104] *Schulze, R. 1970: Strahlenklima der Erde.* Deutscher Wetterdienst, Dr. Dietrich Steinkopff Verlag
- [105] *Sönning; Keidel 1993: Wolkenbilder - Wettervorhersage,* BLV-Verlags-gesellschaft mbH
- [106] *Spaethe, G. 1987; Combination Rules in Codified Design. In: Reliabilitybased Design of Structural,* Jablonna
- [107] *Spaethe, G. 1992: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen.* Springer-Verlag
- [108] *Springer, O. 1992: Zur Bedeutung der Querschnittsverformung für das Tragverhalten und die Konstruktion von stählernen Straßenbrücken. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau 6/92, TU München*
- [109] *Steinbuch, R. 1997: Finite Elemente – Ein Einstieg.* Springer Verlag
- [110] *Steinhauser 1934: Die mittlere Trübung der Luft an verschiedenen Orten, beurteilt nach LINKeschen Trübungsfaktoren. Beitrag zur Geophysik 42*
- [111] *Steinrücken, B. 2000: Sonne, Mond und Erde – Eine kurze Einführung in die geozentrische Himmelskunde. Universität Dortmund – Fachbereich Physik*

- [112] *Stranghöner; Sedlacek; Stötzel; Dahl; Langenberg 1997*: Sprödbruchkonzept – Teilsicherheitsbeiwerte im Eurocode 3 statistisch ermitteln. In: Materialprüfung 39, Heft 9(1997)
- [113] *Sukhov, D. 1993*: Statistical Analysis of linear Temperature Differences in Concrete Bridges. Darmstadt Concrete – Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, Vol. 8
- [114] *Sukhov, D. 1995*: Representative Values of the Uniform Temperature Component in Concrete Bridges. Darmstadt Concrete – Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, Vol. 10
- [115] *Tong, M.; Tham, L. G. 2000*: Numerical modelling for temperature distribution in steel bridges. In: Computers & Structures 79 (2000), S. 583-593
- [116] *VDI 1997*: VDI-Wärmeatlas – Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. Springer-Verlag
- [117] *Vockrodt 1995*: Ermittlung der Bauwerksmitteltemperatur von Betonbrückenüberbauten zur exakten Voreinstellung von Lager- und Übergangskonstruktionen. In: Bautechnik 72, Heft 11(1995)
- [118] *Wagner, W. 1981*: Wärmeübertragung. Kamprath-Verlag
- [119] *Weigler, K. 1989*: Beton – Arten-Herstellung-Eigenschaften. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften
- [120] *Wlassow, W. S. 1964*: Dünnwandige elastische Stäbe. VEB Verlag für Bauwesen Berlin
- [121] *Zeller, Ch. 1979*: Eine Finite-Elemente-Methode zur Berechnung der Verwölbungen und Profilverformungen von Stäben mit beliebigen Querschnittsformen. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen 79-7, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Ruhr-Universität Bochum.
- [122] *Zellner; Schmidts 1979*: Bemessung von Betonbrücken unter Temperaturbeanspruchung. In: Bauingenieur 54(1979), S. 93-94
- [123] *Zichner, T. 1976*: Temperaturunterschied infolge Witterungseinfluss und Beheizung von massiven Brücken. Bundesminister für Verkehr - Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 212
- [124] *Zichner, T. 1982*: Ermittlung von Lastannahmen für Temperaturdifferenzen $\Delta\vartheta$ zur Berücksichtigung in DIN 1072 für Massivbrücken. Forschungsarbeit im Auftrag des Bundesministers für Verkehr (F.A. 15.112 R 81 F)
- [125] *Zichner, König 1984*: Temperaturunterschied infolge Witterungseinfluss bei Deckbrücken in Massivbauweise. In: Bautechnik 61, Heft 5(1984)

- [126] *Zilch, Hennecke, Buba 1999*: Kombinationsregeln für Ermüdung – Untersuchung der Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise bei Spannbetonbrücken. Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau, Forschungsbericht 15.290/1997/FRB

- [127] *Zumbroich, H. 1981*: Neues Temperaturbelastungsmodell zur Berechnung von Wärmeeigenstressungen in Außenbauteilen. In: Bauphysik 6(1981)

- [128] Bauphysik für Bauingenieure, Vorlesungsbegleitende Unterlagen zum Studienfach, Lehrstuhl für Haustechnik und Bautechnik, TU München

10 Bezeichnungen

Die Unterscheidung gleichartiger Bezeichnungen für unterschiedliche Größen ist aus dem Zusammenhang ersichtlich. Hier nicht aufgeführte Größen oder Bezeichnungen werden explizit im Text erläutert.

Lateinische Bezeichnungen

A	Fläche [m ²]
A _d	Ereignis an einem laufenden Tag d [-]
a	Abmessung, Entfernung [m]
a _x	Regressionskoeffizient des Prozesses X [1/d]
a _ψ	Anteilswert [-]
a ₀ , a ₁ ,...	Fourierkoeffizienten des Linienspektrums
B	Bewölkungsgrad [-]
b ₁ , b ₂ ,...	Fourierkoeffizienten des Linienspektrums
b	Abmessung, Entfernung, Breite [m]
C _s	Strahlungszahl des schwarzen Körpers [W/m ² K ²]
C ^(s)	Gesamtübertragungsfaktor Last–Systemreaktion für die Bemessungsstelle (s)
\tilde{C}_{sx}	Schiefekoeffizient der Stichprobe X (bias-korrigiert)
\hat{c}_{ψ}	Last-Übertragungsfaktor für ein Temperaturfeld der Formfunktion Ψ
c	spezifische Wärmekapazität [J/kg·K]
$\frac{DT_{\psi}}{DT_{\psi}}$	Temperaturanteil der Form Ψ [K]
$\frac{DT_{\psi,k}}{DT_{\psi,k}}$	effektiver Temperaturanteil der Form Ψ [K]
DT _{ψ,k} ⁱ	Temperaturanteil der Form Ψ_k , der in einem Temperaturfeld T _{ψ,i} enthalten ist [K]
d	laufender Tag im Jahr [d]
h	Abmessung, Entfernung, Höhe [m]
exp(α·m)	Faktor zur Berücksichtigung durchstrahlter Luftmasse
[E]	Einheitsmatrix
E	Strahlungsenergieinhalt [J]
E	Elastizitätsmodul [N/m ²]
e _{dir} , e _{diff}	Extinktionsfaktoren für direkte und diffuse Sonnenstrahlung [-]
F	Wahrscheinlichkeitsfunktion
F _d	Wahrscheinlichkeitsfunktion, Bezugszeitraum ist der d-te Tag jeden Jahres
f	Wahrscheinlichkeitsdichte
f _ψ	Faktor zur Formfunktion Ψ
f _D	Diffusfunktion
G _{0d}	extraterrestrische Globalstrahlungssumme eines Tages [Wh/m ²]
G _d	terrestrisch eintreffende Globalstrahlungssumme eines Tages [Wh/m ²]
H	Höhe über dem Untergrund [m]
h _{Wand}	Wandhöhe [m]
I _{λ,T}	Strahlungsintensität bei Wellenlänge λ und Temperatur T [W/m]
I ₀	extraterrestrische Sonnenstrahlung [W/m ²]
I _{dir} , I _{diff}	diffuse und direkte Sonnenstrahlung [W/m ²]
I _ψ	Formmoment [m ²]
i	Laufvariable
j	Laufvariable

K	Ansatzfunktion zum Resampling von Klimadaten
$k_{j,i}$	Polynomkoeffizient j der Klimadaten-Ansatzfunktion K zur Tagesstunde i
\bar{k}_i	Mittelwert bzw. Stundensumme einer Klimakomponente zur Tagesstunde i
k	Laufvariable
l	Abmessung, Entfernung [m]
[L]	Wärmeleitfähigkeitsmatrix
m	Masse [kg]
m	Laufvariable
n	Anzahl der Stichproben, Laufvariable
P	Wahrscheinlichkeit [-]
P_d	Wahrscheinlichkeit, Bezugszeitraum ist der d-te Tag jeden Jahres [-]
P_a	Wahrscheinlichkeit, Bezugszeitraum ist das gesamte Jahr [-]
p	Periodendauer [d]
p	Grad des AR-Prozesses [-]
Q	Wärmemenge [J]
\dot{q}	Wärmestromdichte [W/m^2]
[R]	Randbedingungsmatrix
r	Radius [m]
r_d	Autokorrelationskoeffizient
$r_{d,\alpha}$	Konfidenzgrenze des Autokorrelationskoeffizienten mit auf dem Signifikantniveau α
R	Wiederkehrperiode [a]
s	Abmessung, Entfernung [m]
\tilde{s}_x	Standardabweichung der Stichprobe X
$S_{\text{Atmosphäre}}$	Strahlung der Atmosphäre (langwellig) [W/m^2]
$S_{\text{Untergrund}}$	Strahlung der terrestrischen Umgebung (langwellig) [W/m^2]
$S^{(s)}$	Auswirkung infolge einer Temperatureinwirkung an der Bemessungsposition (s)
S_ψ	Auswirkung infolge der Temperatureinwirkung T_ψ
T_{Li}	Linkescher Trübungsfaktor [-]
T	absolute Temperatur [K]
$T(x,y,z,t)$	Temperaturfeld [K] oder [$^{\circ}\text{C}$]
T_ψ	Temperaturfeld der Form Ψ mit Intensität DT_ψ [K]
T_{Luft}	Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
ΔT_N	konstanter Temperaturanteil [$^{\circ}\text{C}$] (schnittgrößenbezogen)
ΔT_S	konstanter Temperaturanteil [$^{\circ}\text{C}$] (temperaturbezogen)
ΔT_{MY}	linearer vertikaler Temperaturunterschied [K] (schnittgrößenbezogen)
ΔT_Y	linearer vertikaler Temperaturunterschied [K] (temperaturbezogen)
ΔT_N	konstanter Temperaturanteil [$^{\circ}\text{C}$] (schnittgrößenbezogen)
ΔT_{MZ}	linearer horizontaler Temperaturunterschied [K] (schnittgrößenbezogen)
ΔT_Z	linearer horizontaler Temperaturunterschied [K] (temperaturbezogen)
T_K	Kombinationstemperaturkennwert [K]
T_k	charakteristischer Kennwert der Temperatureinwirkung (R=50 Jahre)
T_R	Kennwert einer Temperatureinwirkung mit Wiederkehrperiode R
t	Zeitvariable
t_{SA}, t_{SU}	Zeitpunkt des Sonnenaufganges bzw. Sonnenunterganges
t_0	Startzeitpunkt
t_x	Prüfgröße der t-Verteilung

t_α	Prüfwert bei Irrtumswahrscheinlichkeit α
u	Längsverschiebung [m]
V	Volumen [m ³]
v	Windgeschwindigkeit [m/s]
v_ψ	Vorzeichenfaktor [± 1]
$[W]$	Wärmekapazitätsmatrix
w	Vertikalverschiebung [m]
X	Basisvariable
X, X_t, X_p, X_z	Basisvariable; gesamte, transiente, periodische und zufällige Komponente
x, x_t, x_p, x_g	Stichprobenwerte der Basisvariablen X ; gesamte, trans., per. und zufällige Komponente
x_e	White-Noise-Prozess
$x(i)$	i -ter Stichprobenwert
x_R	Extremwert mit Wiederkehrperiode R
x_0	oberer oder unterer Grenzwert einer Verteilung
\bar{x}	Mittelwert der Basisvariablen X
x, y, z	Ortskoordinate [m]
Z	Zeitfunktion [i]

Griechische Bezeichnungen

α	Irrtumswahrscheinlichkeit / Signifikanzniveau
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient [1/K]
α_K	Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² ·K]
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Parameter des AR-Prozesses x_e
α_B	Winkel der Trassenorientierung gegenüber der Südrichtung [rad]
α_S	Azimutwinkel der Sonne [rad]
α_w	Azimutwinkel der Flächennormalen gegenüber der Südrichtung [rad]
β	Winkel [deg] bzw. [rad]
β_S	Lotabweichung des auf die Normalebene einer Fläche projizierten Sonnenstrahls [deg]
γ	Schubverzerrung
γ	Winkel [deg] bzw. [rad]
γ_S	Sonnenhöhenwinkel [rad]
γ_w	Neigung der Flächennormalen gegenüber der Horizontalebene [rad]
δ_S	Sonnendeklinationwinkel [deg]
$\delta(m) \cdot m$	Faktor zur Berücksichtigung der durchstrahlten Luftmasse
ε	Dehnung
ε	Emissionskoeffizient [-]
ε_L	Emissionskoeffizient für langwellige Strahlung [-]
ε_K	Emissionskoeffizient für kurzwellige Strahlung [-]
ε_{Atm}	Emissionskoeffizient der langwelligen Strahlung der Atmosphäre
$\varepsilon_{Untergrund}$	Emissionskoeffizient der langwelligen Strahlung der terrestrischen Umgebung
$\zeta_{dir}, \zeta_{diff}$	Abminderungsfaktoren der untergrundseitigen Reflexionsstrahlung [-]
ϑ	Temperatur [°C]
ϑ_{Id}	ideelle Temperatur, mehrere Temperatureinwirkungen zusammenfassend [°C]
$\vartheta_L, \vartheta_{Luft}, T_{Luft}$	Lufttemperatur [°C]
$\vartheta_{Innenluft}$	Lufttemperatur im Inneren eines Hohlkastens [°C]
ϑ_O	Oberflächentemperatur [°C]

κ_B	Abminderungsfaktor für Bewölkung [-]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K] oder Wellenlänge [m]
λ_{geo}	geographischer Längengrad östlicher Länge [deg]
ξ	relative Ortskoordinate
ρ	Dichte [kg/m ³]
$\rho_{\text{Untergrund}}$	Albedo der terrestrischen Umgebung
σ_s	Boltzmann-Konstante [W/m ² K ²]
σ	Normalspannung [N/m ²]
σ_x	Standardabweichung der Basisvariablen X (Grundgesamtheit)
μ	Querdehnzahl [-]
τ	Schubspannung [N/m ²]
τ_D	Transmissionsfunktion
τ_h	Stundenwinkel [deg]
φ	Winkel [rad]
φ_e	Ekliptikale Länge [deg]
$\varphi_{i,k}$	Einstrahlzahl von Fläche i auf Fläche k [-]
φ_{Himmel}	Einstrahlzahl für Strahlungsaustausch mit sichtbarem Bereich der Himmelshalbkugel
$\varphi_{\text{Untergrund}}$	Einstrahlzahl für Strahlungsaustausch mit sichtbarem Bereich terrestrischen Umgebung
φ_{geo}	geographischer Breitengrad der nördlichen Erdhemisphäre [deg]
$\Psi(y,z)$	Formfunktion [-]
ψ	Kombinationsbeiwert unterschiedlicher Einwirkungs niveaus
ω_ψ	Kombinationsfaktor für den Temperaturanteil DT_ψ
ω	Wölbordinaten

{+±..±} Vorzeichenkombination mehrerer Vorzeichenfaktoren v_ψ

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Gliederung von Temperatureinwirkungen.....	1
Abbildung 1.2	Wirkungskette der klimatisch bedingten Temperatureinwirkungen.....	2
Abbildung 1.3	Linearisierte Ersatztemperaturverteilungen: Temperaturschwankung und vertikaler Temperaturunterschied, [58]	4
Abbildung 2.1	Element i mit Nachbarelementen k des diskretisierten Systems, [58]	11
Abbildung 2.2	Wärmeübergang an einer Wand	14
Abbildung 2.3	Gegenüberstellung der Ansätze zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs: Wärmestromdichte bei 20°C Lufttemperatur und 2 m/s Überströmgeschwindigkeit bzw. Windstille.....	18
Abbildung 2.4	Energieverteilung der schwarzen Strahlung in Abhängigkeit der Temperatur und der Wellenlänge, [42].....	19
Abbildung 2.5	Lambertsches Kosinusetz.....	22
Abbildung 2.6	Geometrie zweier beliebig zueinander angeordneter Flächenelemente ΔA_1 und ΔA_2	22
Abbildung 2.7	Graphische Veranschaulichung der Einstrahlzahl $\varphi_{1,2}$ durch das Verhältnis der schraffierten Fläche zum Flächeninhalt der gesamten Kreisfläche, [42].....	24
Abbildung 2.8	Strahlungsaustausch eines Flächenelementes mit streifenförmigen diffus strahlenden Flächenbereichen: dem Untergrund, der himmelseitigen Diffusstrahlung und der vom Bauwerk ausgehenden Wärmestrahlung	24
Abbildung 2.9	Geometrie für die Berechnung der Einstrahlzahl $\varphi_{1,2}$ des Strahlungsaustauschs eines Flächenelementes ΔA_1 mit einer streifenförmigen, unendlich ausgedehnten Fläche ΔA_2	25
Abbildung 2.10	Einstrahlzahlbestimmung für ein Stegflächenelement	26
Abbildung 2.11	Verteilung der Einstrahlzahlen für den Strahlungsaustausch mit dem Untergrund und mit dem Himmelshalbraum	26
Abbildung 2.12	Meteorologische Randbedingungen eines Außenbauwerkes, nach [58].....	29
Abbildung 2.13	Abweichung der wahren Ortszeit von der mittleren Ortszeit im Jahresgang	31
Abbildung 2.14	Jahresgang des Sonnendeklinationwinkels nach Gleichung (2.53).....	32
Abbildung 2.15	Definition des Einstrahlwinkels β_S in Abhängigkeit der bei $(\alpha_S; \gamma_S)$ positionierten Sonne auf eine α_w orientierte Fläche.....	33
Abbildung 2.16	Jahresgang der extraterrestrischen Solarstrahlung I_0	33
Abbildung 2.17b	Sonnen-Höhenwinkel-Diagramm.....	34
Abbildung 2.18	Jahresgang der Tagessumme der Globalstrahlung, diffusen und direkten Sonnenstrahlung sowie der extraterrestrischen Globalstrahlung aus dem Jahre 1997, Station 1516 (Osnabrück); a) Tagessummenwerte in Wh/m^2 , b) Ausgewertete Relativwerte der Strahlungskomponenten	36
Abbildung 2.19	Mittlerer Jahresgang des Linkeschen Trübungsfaktors T_{Li} nach Gleichung (2.62).....	38

Abbildung 2.20	Gegenüberstellung gemessener Sonnenstrahlungsdaten in Osnabrück und den zugehörigen deterministischen Strahlungsverläufen nach den Gleichungen (2.64) und (2.76)	41
Abbildung 2.21	Reflexionskoeffizienten $\rho_{\text{Untergrund}}$ für verschiedene Untergrundverhältnisse	42
Abbildung 2.22	Abminderung ζ der Sonnenstrahlung in der Umgebung des Brückenbauwerkes durch einen idealisierten quaderförmigen Brückenquerschnitt.....	43
Abbildung 2.23	Verminderung ζ_{diff} der einfallenden Diffusstrahlung unterhalb und neben einer Brücke in Abhängigkeit des Verhältnisses von Brückenbreite b zur Höhe über dem Untergrund h	43
Abbildung 2.24	Abminderungsfaktoren $\phi_{\text{Untergrund,diff}}$ und $\phi_{\text{Untergrund,dir}}$ für den Strahlungseintrag kurzweiliger Reflexionsstrahlung auf die Unterseite eines quaderförmig idealisierten Brückenquerschnittes.....	44
Abbildung 2.25	Abhängigkeit der Monatsmittel der relativen Globalstrahlung RG vom Bewölkungsgrad C für Hamburg, Kassel, Würzburg und Hohenpeißenberg, [40].....	46
Abbildung 2.26	Häufigkeitsverteilung der gemessenen Stundenmittelwerte ϵ_{Atm} ; Messreihe GAR2, Periode 10/1999 bis 02/2001	47
Abbildung 2.27	Zusammenhang zwischen dem mittleren täglichen Emissionskoeffizienten ϵ_{Atm} mit a) der täglichen relativen Globalstrahlung RG bzw. b) der Spanne der täglichen Lufttemperaturschwankung	48
Abbildung 2.28	Gegenüberstellung gemessener langweiliger Ausstrahlung des Untergrundes und dem Näherungsansatz nach Gleichung (2.84) [104]; Monatsmittel für Februar und Juni 2000, Datenbasis: Messreihe GAR2, Lufttemperatur 2m über Untergrund.....	49
Abbildung 2.29	Idealisierung des Lufttemperaturverlaufes und des Windgeschwindigkeitsverlaufes mittels Kosinus-Funktionen.....	50
Abbildung 2.30	Beispiel: drei gemessene Tagesgänge von Lufttemperatur und Sonnenstrahlung	53
Abbildung 2.31	Monatliche Extrem- und Mittelwerte der Klimadatenreihen GAR1 und OS1, tabelliert in Anhang A.1	55
Abbildung 2.32	Resampling von Messwerten aus Stundenmittelwerten; Gegenüberstellung von Messwerten und Resampling-Werten; a) Lufttemperatur b) Globalstrahlung.....	58
Abbildung 3.1	Aufteilung eines Temperaturprofiles in vier Anteile nach [15], [22]	60
Abbildung 3.2	Beispiele normativ idealisierter Temperaturfelder [10], [15], [22], [86]	60
Abbildung 3.3	Definition gleichartiger Querschnittsbereiche einer Kanalbrücke mit geneigten Trogwänden, [64].....	61
Abbildung 3.4	Beispiel von Formfunktionen zur Zerlegung eines Temperaturfeldes in Anlehnung an Abbildung 3.2c.....	63
Abbildung 4.1	Unterschiede der Extremwerte in Größe und Auftretenszeitpunkt von Prozessfunktionen $X_1(t)$ und $X_2(t)$ sowie deren Summe $X_1(t)+X_2(t)$	72
Abbildung 4.2	Einfeldträger in horizontal statisch bestimmter Lagerung	73

Abbildung 4.3	Unterschied der Zeitpunkte der Tagesextrema von Temperatureinwirkungen und der durch diese verursachten Lagerverschiebungen	74
Abbildung 4.4	Ableitung von Kombinations-Temperaturkennwerten aus der zweidimensionalen Wahrscheinlichkeitsdichte	81
Abbildung 4.5	Kombinationskurven für zwei zu kombinierende Temperaturanteile $T_{\psi,1}$ und $T_{\psi,2}$: positiven und negativen Extremwerte der Vorzeichenkombinationen $\{++\}$ und $\{+-\}$ bei variablen Anteilswertverhältnissen a_{ψ}	82
Abbildung 4.6	Linearisierung der gekrümmten Kombinationskurve $T_{\{++\},pos}$ durch zwei Geraden g_1 und g_2 mit Schnittpunkt beim Anteilswert $a_{\psi,1}=a_{\psi,2}=0,5$	85
Abbildung 4.7	Linearisierten Kombinationskurven bei Anwendung der Verallgemeinerungsstufe 3	88
Abbildung 4.8	8 Bemessungspunkte zweier Temperaturanteile, siehe Anhang A.7	89
Abbildung 5.1	repräsentative Werte einer zeitlich veränderlichen Last, Prinzipdarstellung nach [24]	90
Abbildung 5.2	Beispiel unterschiedlicher Wiederkehrperioden der maximalen Lufttemperatur in Hannover, basierend auf den Jahresmaximaltemperaturen von 1951 bis 2000	92
Abbildung 5.3	Schematische Darstellung repräsentativer Werte der saisonal veränderlichen Temperatureinwirkungen.....	93
Abbildung 5.4	Zerlegung der Zeitreihen durch ein Komponentenmodell zur Ermittlung repräsentativer Extremwerte	98
Abbildung 5.5	Zeitreihenzerlegung der täglichen Lufttemperaturmaxima in Osnabrück, Zeitreihe OS1, Jahr 2000	109
Abbildung 5.6	Transformation einer gleichverteilten Zufallsvariable z_n in eine Variable x_{ε} mit der Verteilungsfunktion $F(z)$	110
Abbildung 5.7	Abfolge der Ermittlung von repräsentativen Extremwerten und der Zusammenstellung einer Kombinationsregel für eine definierte	113
Abbildung 6.1	Gegenüberstellung der an der Leineflutbrücke und der Kanalbrücke Minden gemessenen Lufttemperatur und dem Lufttemperaturverlauf in Osnabrück im Zeitraum Februar-März 1999, zur besseren Vergleichbarkeit Anhebung der gemessenen Luftschattentemperaturen um +5K bzw. +10K	114
Abbildung 6.2	Querschnitt der Leineflutbrücke 253 (MLK) und Temperaturmesspunkte.....	115
Abbildung 6.3	Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe infolge klimatischer Temperatureinwirkungen für einen Deckblechpunkt (TN2) .	116
Abbildung 6.4	Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe infolge klimatischer Temperatureinwirkungen für einen Untergurtpunkt (TN13) .	116
Abbildung 6.5	Vergleichende Gegenüberstellung des Zusammenhangs zwischen der maximalen täglichen Deckblechtemperatur und der maximalen Temperaturdifferenz zwischen dem Deckblech und dem Untergurt.....	117
Abbildung 6.6	Tägliche Lufttemperatur-Extrema für den Standort Osnabrück, Zeitreihe OS2, 1980-2000	118

Abbildung 6.7	Kumulierte Häufigkeit der <i>täglichen</i> Extremwerte und Temperaturschwankungen aus Abbildung 6.6 und statistische Parameter der <i>jährlichen</i> Extremwerte.....	118
Abbildung 7.1	Querschnitt Stahlbrücke	123
Abbildung 7.2	Querschnitt <i>Verbundbrücke</i>	123
Abbildung 7.3	Querschnitt <i>Stahlbetonbrücke</i>	123
Abbildung 7.4	Mittlerer Tagesgang des konstanten Temperaturanteiles ΔT_N in den Monaten Juli und Januar sowie des linearen vertikalen Temperaturunterschiedes ΔT_{MY} im Monat Juli	124
Abbildung 7.5	Die Stegbesonnung ist von Bauwerks-ausrichtung, Kragarmlänge, Steghöhe, Tageszeit, Jahreszeit und Sonnenstrahlungsintensität abhängig	125
Abbildung 7.6	Auswirkungen eines Gewitterereignisses auf den vertikalen Temperaturunterschied der Verbundbrücke; Klimadatenreihe OS1, 18.07.1999	126
Abbildung 7.7	Wichtung des vertikalen Temperaturunterschiedes bei einstufiger Variation des Querschnittes.....	127
Abbildung 7.8	Einfluss der Untergurtverstärkung im Stützbereich eines Zweifeldträgers, Trassenorientierung $\pm 0^\circ$ (Nord-Süd).....	128
Abbildung 7.9	Stahlbrücke - Temperaturfelder bei sommerlicher Schönwetterlage Trassenrichtung $\pm 0^\circ$ (Nord - Süd - Orientierung).....	130
Abbildung 7.10	Berechnete tägliche Extremwerte der Temperaturanteile ΔT_N , ΔT_{MY} und $ \Delta T_{MZ} $	130
Abbildung 7.11	Verbundbrücke - Temperaturfelder bei sommerlicher Schönwetterlage Trassenrichtung $\pm 0^\circ$ (Nord - Süd - Orientierung).....	131
Abbildung 7.12	Berechnete tägliche Extremwerte der Temperaturanteile ΔT_N , ΔT_{MY} und $ \Delta T_{MZ} $	131
Abbildung 7.13	Stahlbetonplattenbalken - Temperaturfelder bei sommerlicher Schönwetterlage Trassenrichtung $+90^\circ$ (Ost - West - Orientierung)	132
Abbildung 7.14	Berechnete tägliche Extremwerte der Temperaturanteile ΔT_N , ΔT_{MY} und $ \Delta T_{MZ} $	132
Abbildung 7.15	Stahlbrückenquerschnitt – Jahrgänge des negativen vertikalen Temperaturunterschiedes ΔT_{MY} bei unterschiedlichen Brückenausrichtungen	133
Abbildung 7.16	Stahlbrücke – Monatliche und jährliche Extremwerte	135
Abbildung 7.17	Verbundbrücke – Monatliche und jährliche Extremwerte.....	136
Abbildung 7.18	Stahlbetonplattenbalken – Monatliche und jährliche Extremwerte	137
Abbildung 7.19	Stahlbrücke - Kombiniertes Auftreten der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY}	140
Abbildung 7.20	Verbundbrücke - Kombiniertes Auftreten der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY}	141
Abbildung 7.21	Stahlbetonplattenbalken - Kombiniertes Auftreten der Temperaturanteile ΔT_N und ΔT_{MY}	142

12 Anhang

A.1 – Monatsstatistik der Klimadatenreihen GAR1 und OS1

Klimadatenreihe GAR1 [74], Zeitraum 01.01.1989 – 31.12.1997								
Klimakenngröße Lufttemperatur [°C]								
Monat	Tagesminimum			Tagesmittelwert		Tagesmaximum		
	Minimum	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung
1	-14.6	-3.0	4.9	-0.4	5.0	18.0	2.1	5.5
2	-16.6	-2.0	4.7	1.2	4.8	19.6	4.6	5.7
3	-9.2	1.6	3.8	5.2	4.2	22.5	9.1	5.2
4	-3.5	3.9	3.4	7.8	4.2	26.0	11.7	5.5
5	1.0	8.4	2.8	13.2	3.3	29.0	17.8	4.3
6	3.1	11.3	2.7	15.5	3.4	31.0	19.7	4.5
7	8.0	13.4	2.4	18.0	3.0	32.7	22.5	4.1
8	4.1	13.3	2.6	18.0	3.2	33.9	22.8	4.4
9	1.8	9.2	2.9	13.2	2.8	29.3	17.5	4.0
10	-4.4	5.4	4.0	8.8	4.1	23.7	12.4	5.0
11	-12.0	1.1	4.2	3.5	4.4	21.3	6.0	5.1
12	-18.4	-1.9	5.2	0.3	5.2	16.7	2.6	5.7

Klimadatenreihe GAR1, Zeitraum 01.01.1989 – 31.12.1997								
Klimakenngröße Windgeschwindigkeit [m/s]								
Monat	Tagesminimum			Tagesmittelwert		Tagesmaximum		
	Minimum	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung
1	0.0	1.4	1.2	2.8	2.0	16.4	4.5	3.1
2	0.0	1.4	1.0	3.0	1.9	20.4	5.1	3.3
3	0.0	1.6	1.2	3.4	2.0	19.1	5.6	3.0
4	0.0	1.2	0.8	2.9	1.3	11.5	4.9	2.0
5	0.0	1.1	0.5	2.4	0.9	11.8	4.2	1.6
6	0.0	1.0	0.5	2.3	0.8	9.6	4.1	1.5
7	0.0	1.0	0.5	2.3	0.7	10.0	3.9	1.5
8	0.0	0.9	0.5	2.1	0.8	9.2	3.7	1.5
9	0.0	1.0	0.5	2.2	0.9	12.7	3.8	1.7
10	0.0	1.1	0.6	2.2	1.2	10.9	3.8	2.0
11	0.0	1.2	0.9	2.6	1.5	13.6	4.4	2.4
12	0.0	1.5	1.3	2.9	1.9	16.6	4.7	3.0

Klimadatenreihe GAR1, Zeitraum 01.01.1989 – 31.12.1997			
Klimakenngröße Globalstrahlung [Wh/m ²]			
Monat	Tägliche Globalstrahlungssumme		
	Mittelwert	Standard-abweichung	Maximum
1	904	461	2309
2	1662	837	3749
3	2665	1194	5378
4	3714	1782	7158
5	5424	1936	8779
6	5048	2001	8549
7	5437	1946	8249
8	4894	1752	7730
9	3220	1377	6052
10	1869	1030	4130
11	919	566	2542
12	654	376	1618

Klimadatenreihe OS1 [76], Zeitraum (01.05.1997 – 30.06.2000)								
Klimakenngröße Lufttemperatur [°C]								
Monat	Tagesminimum			Tagesmittelwert		Tagesmaximum		
	Minimum	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung
1	-8.5	1.8	4.0	4.0	3.8	14.6	6.0	3.9
2	-9.1	2.4	4.2	4.5	3.9	15.4	6.9	3.9
3	-3.2	3.4	3.0	6.5	2.9	22.2	9.7	3.8
4	-1.9	5.9	3.5	9.8	3.4	24.4	13.8	4.1
5	1.7	9.2	2.9	14.0	3.5	28.4	18.5	4.4
6	5.6	11.3	2.8	16.0	3.1	33.1	20.5	4.1
7	8.8	13.4	1.9	17.7	2.8	32.6	22.1	4.1
8	8.4	13.5	2.7	18.2	3.5	31.9	22.8	4.7
9	3.5	11.4	3.2	15.5	3.0	30.6	20.0	3.9
10	-5.5	6.3	4.2	9.2	3.8	20.9	12.3	3.7
11	-7.6	2.3	4.0	4.6	3.9	17.0	6.9	3.9
12	-10.7	1.5	4.0	3.5	3.9	12.8	5.5	4.0

Klimadatenreihe OS1, Zeitraum (01.05.1997 – 30.06.2000)								
Klimakenngröße Windgeschwindigkeit [m/s]								
Monat	Tagesminimum			Tagesmittelwert		Tagesmaximum		
	Minimum	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung
1	0.0	2.5	1.4	4.4	1.7	12.9	6.4	2.2
2	0.0	2.7	1.4	4.5	1.5	12.0	6.5	1.9
3	0.0	2.0	1.3	3.8	1.6	11.3	5.9	2.1
4	0.0	1.3	0.9	3.2	1.0	8.0	5.3	1.4
5	0.0	1.3	0.9	3.1	1.0	11.0	5.2	1.5
6	0.0	1.3	0.8	3.1	0.8	8.7	5.3	1.3
7	0.0	1.3	0.9	3.0	1.0	15.0	5.0	1.7
8	0.0	1.1	0.8	2.7	0.9	8.0	4.6	1.2
9	0.0	1.3	1.0	2.8	1.1	10.3	4.5	1.6
10	0.0	2.2	1.2	3.9	1.5	11.3	5.9	1.9
11	0.0	1.6	1.1	3.2	1.2	10.8	5.1	1.8
12	0.0	2.7	1.4	4.5	1.7	12.0	6.5	2.2

Klimadatenreihe OS1, Zeitraum (01.05.1997 – 30.06.2000)			
Klimakenngröße Globalstrahlung [Wh/m ²]			
Monat	Tägliche Globalstrahlungssumme		
	Mittelwert	Standard-abweichung	Maximum
1	623	424	1954
2	1241	677	2811
3	2030	1311	5113
4	3513	1544	7154
5	5010	1856	8091
6	5296	1824	8665
7	4836	1756	7775
8	4274	1739	7320
9	3126	1100	5481
10	1558	800	3276
11	812	445	2043
12	435	298	1187

A.2 – Mittlere Windgeschwindigkeiten ausgewählter Orte DIN 4710 [18]

Zeitraum: 1951-1970

		Regensburg	Mannheim	Gießen	Stuttgart- Flughafen	Nürnberg- Flughafen	München-Riem	Frankfurt/ Main-Fligh	Trier- Petrisberg	Braunschweig	Berlin - Tempelhof	Essen	Hamburg- Fuhlsbüttel	Bremerhaven
Mittel (ohne Windstillen) [m/s]	Jan	1.8	2.0	2.2	2.0	2.4	2.7	2.5	3.3	3.4	3.8	4.6	4.4	4.6
	Feb	2.4	2.6	2.7	2.9	2.9	3.6	3.3	3.8	3.9	4.1	4.4	4.7	5.2
	Mrz	2.4	2.5	2.6	2.8	2.9	3.3	3.2	3.7	4.2	4.4	4.0	4.9	5.2
	Apr	2.6	2.9	3.0	3.3	3.3	3.7	3.9	4.0	4.0	4.0	4.2	4.6	5.8
	Mai	1.9	2.5	2.4	2.6	2.8	3.1	3.3	3.2	3.6	3.9	3.6	4.2	4.9
	Jun	1.7	2.5	2.3	2.5	2.6	3.0	3.1	3.0	3.3	3.9	3.4	3.8	4.8
	Jul	1.6	2.3	2.4	2.3	2.5	2.8	3.2	2.9	3.4	3.6	3.4	4.0	5.3
	Aug	1.6	2.2	2.1	2.2	2.3	2.7	2.9	2.9	3.0	3.4	3.3	3.4	4.4
	Sep	1.4	2.2	2.1	1.9	2.1	2.4	3.1	3.1	3.2	3.0	3.5	3.7	4.6
	Okt	1.6	2.2	2.2	2.5	2.5	3.3	3.0	3.0	3.5	3.5	3.7	3.9	4.7
	Nov	2.3	2.9	3.1	3.0	3.1	3.8	3.7	4.2	4.7	5.0	5.0	5.6	6.7
	Dez	2.2	2.5	2.6	2.5	2.9	3.3	4.0	3.7	4.3	4.0	4.7	5.0	5.9
	Jahr	2.0	2.4	2.5	2.5	2.7	3.1	3.3	3.4	3.7	3.9	4.0	4.3	5.2

A.3 – Stationsliste

[59]

Datenumfang 01.01.1980-30.12.2000, stündliche Messwerte von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Diffusstrahlung

	Stations- kennung	Station	Geogr.Br.	Geogr.L	H.ü.N.N.[m]	MEZ-MOZ [+ min,s]
Bo	1178	Bocholt	51° 50′	6° 32′	21	33:33
Ha	1459	Hamburg - Fuhls.	53° 38′	9° 59′	11	22:02
Os	1516	Osnabrück	52° 15′	8° 03′	95	27:49
Ka	1576	Kassel	51° 18′	9° 27′	231	21:59
Tr	2276	Trier	49° 45′	6° 40′	265	33:25
Fr	2311	Freiburg i. Br.	48° 00′	7° 51′	269	28:35
Wü	2674	Würzburg	49° 46′	9° 58′	268	20:16
Ma	2695	Mannheim	49° 31′	8° 33′	96	26:09
St	2743	Stuttgart	48° 50′	9° 12′	314	23:18
Br	3304	Berlin	52° 31′	13° 25′	37	6:22
Bs	3916	Braunschweig	52° 18′	10° 27′	81	17:51
Wh	4117	Weihenstephan	48° 24′	11° 42′	470	12:55

A.4 - Auswertung der maximalen jährlichen relativen Globalstrahlung (betrachteter Zeitraum 10.Juni – 21.Juni)

Jahr	Bocholt	Hamburg	Osnabrück	Kassel	Trier	Freiburg	Würzburg	Mannheim	Stuttgart	Berlin	Braunschweig	Weihenstephan
1980	0.65	0.48	0.60	0.56	0.58	0.64	0.66	0.68	0.61	0.57	0.62	0.71
1981	0.65	-	0.71	0.70	0.70		0.72	0.73	0.70	0.67	0.65	0.65
1982	0.63	0.60	0.59	0.54	0.68	0.70	0.65	0.69	0.63	0.58	0.52	0.66
1983	0.71	0.70	0.68	0.67	0.66	0.63	0.63	0.66	0.57	0.70	0.73	0.68
1984	0.72	0.	0.60	0.67	0.73	0.70	0.71	0.71	0.71	0.56	0.66	0.70
1985	0.49	0.58	0.55	0.51	0.52	0.59	0.70	0.58	0.60	0.54	0.52	0.70
1986	0.74	0.77	0.73	0.60	0.72	0.70	0.72	0.70	0.69	0.69	0.73	-
1987	0.10	0.49	0.52	0.05	0.09	0.60	0.57	0.51	0.58	0.52	0.05	0.65
1988	0.72	0.77	0.10	0.71	0.69	0.68	0.74	0.67	0.71	0.10	0.06	0.71
1989	0.72	0.74	0.74	0.72	0.73	0.69	0.72	0.71	0.72	0.70	0.74	0.69
1990	0.66	0.51	0.63	0.61	0.63	0.79	0.67	-	0.65	0.58	-	0.71
1991	0.59	0.40	0.09	0.70	0.56	0.70	0.64	0.63	0.68	0.61	0.50	0.71
1992	0.70	0.72	0.70	0.68	0.67	0.71	0.69	0.70	0.69	0.62	0.65	0.70
1993	0.09	-	0.68	0.57	0.67	0.73	0.59	0.63	0.68	0.09	0.60	0.70
1994	0.58	0.68	0.66	0.71	0.69	0.72	0.70	0.66	0.71	0.66	0.68	0.67
1995	0.68	0.60	0.63	0.59	0.65	0.62	0.63	0.65	0.56	0.68	0.57	0.58
1996	0.72	0.65	0.72	0.69	0.76	0.76	0.65	0.75	0.75	0.63	0.72	0.74
1997	0.70	0.73	0.70	0.73	0.69	0.70	0.72	0.66	0.68	0.72	0.72	0.71
1998	0.63	0.64	0.68	0.58	0.53	0.72	0.54	-	0.62	0.64	0.64	0.61
1999	0.75	0.73	0.75	0.60	0.73	-	0.63	0.63	0.67	0.64	0.71	0.68
2000	0.75	0.72	0.75	0.71	0.75	-	0.77	0.75	0.80	0.74	0.72	0.74
Mittelwert	0.62	0.56	0.61	0.61	0.64	0.60	0.67	0.61	0.67	0.58	0.56	0.66
Standardabweichung	0.18	0.22	0.18	0.14	0.14	0.22	0.06	0.18	0.06	0.17	0.22	0.13
Maximum	0.75	0.77	0.75	0.73	0.76	0.79	0.77	0.75	0.80	0.74	0.74	0.74

A.5 – Jahresmaximalwerte der Lufttemperaturen am Standort Osnabrück (Station 1516)

Jahr	Max T _{Luft} in °C	Min T _{Luft} in °C
1980	28.7	-11.0
1981	29.8	-12.6
1982	30.8	-14.9
1983	33.6	-9.9
1984	31.1	-6.9
1985	30.8	-17.1
1986	32.5	-18
1987	30.9	-20.4
1988	28.1	-7.2
1989	30.5	-7.5

1990	35.2	-3.8
1991	32.0	-13.1
1992	34.3	-8.5
1993	28.4	-11.7
1994	34.2	-11.2
1995	32.7	-11.8
1996	31.8	-16.4
1997	31.9	-19.2
1998	31.6	-10.7
1999	32.6	-8.7
2000	33.1	-8.1

A.6 – Parameter zur Extrapolation

Parameter für die Extrapolation der maximalen Lufttemperatur am Standort Osnabrück (Station 1516) im Kapitel 5.7.2 und 6.2.

Maximale Lufttemperatur	Minimale Lufttemperatur
-------------------------	-------------------------

Periodischer Grundanteil entsprechend Gl. (5.9), S. 102

$a_0 = 25,17$		$a_0 = 11,34$	
$a_1 = -8,90$	$b_1 = -8,90$	$a_1 = -6,11$	$b_1 = -2,73$
$a_2 = -0,30$	$b_2 = -0,30$	$a_2 = 0,16$	$b_2 = 0,46$
$a_3 = 0,38$	$b_3 = 0,38$	$a_3 = 0,09$	$b_3 = -0,05$

Monatsweise Verteilungsparameter der 3-Tagesextremwerte, Verfahren nach Abschnitt 5.6

Anpassung an P3-Verteilung

Monat	Mittelwert	Standard-abweichung	Schiefe	Mittelwert	Standard-abweichung	Schiefe
Jan	0,08	4,94	-0,69	0,01	5,16	-0,95
Feb	0,04	4,65	0,22	0,06	4,57	-0,71
März	-0,15	3,94	0,12	0,03	3,41	-0,10
Apr	0,13	4,47	0,47	0,17	3,31	0,26
Mai	-0,01	4,82	0,26	-0,03	3,14	0,08
Jun	0,15	4,38	0,44	-0,07	2,68	0,30
Jul	0,05	4,47	0,44	-0,03	2,51	0,24
Aug	0,18	4,22	0,39	-0,16	2,53	0,03
Sept	0,05	3,40	0,61	0,02	2,81	0,01
Okt	-0,09	3,25	0,60	0,09	3,36	-0,34
Nov	0,00	3,67	-0,16	0,18	3,87	-0,07
Dez	-0,11	4,28	-0,09	0,02	4,49	-0,26

Parameter der AR[1]-Prozesse, Verfahren nach Abschnitt 5.7

Anpassung an P3-Verteilung

Monat	α_1	Mittelwert	Standard-abweichung	Schiefe	α_1	Mittelwert	Standard-abweichung	Schiefe
Jan	0,8343	-0,01	2,55	-0,06	0,8259	-0,01	2,69	0,05
Feb	0,8268	0,00	2,52	0,31	0,8101	0,01	2,69	0,37
März	0,7379	0,01	2,60	0,06	0,7025	0,01	2,35	0,67
Apr	0,6802	0,00	3,13	-0,13	0,7096	-0,03	2,26	0,56
Mai	0,7108	0,00	3,18	-0,26	0,6750	-0,01	2,18	0,29
Jun	0,6805	-0,04	3,12	0,08	0,6378	0,00	1,99	0,54
Jul	0,6738	0,06	3,08	0,08	0,6565	0,02	1,90	0,33
Aug	0,6698	-0,04	2,95	-0,07	0,5956	-0,02	1,98	0,43
Sept	0,6907	0,03	2,48	0,16	0,6569	0,03	2,06	0,05
Okt	0,7021	-0,03	2,38	0,28	0,6520	-0,01	2,45	0,29
Nov	0,7453	-0,02	2,35	0,16	0,7357	-0,03	2,42	0,46
Dez	0,7813	0,04	2,51	0,34	0,7881	0,05	2,47	0,46

A.7 – Möglichkeiten der Darstellung von Kombinations-Temperaturkennwerten

Darstellung von $n=1$ bis $n=3$ miteinander zu kombinierenden Temperaturanteilen

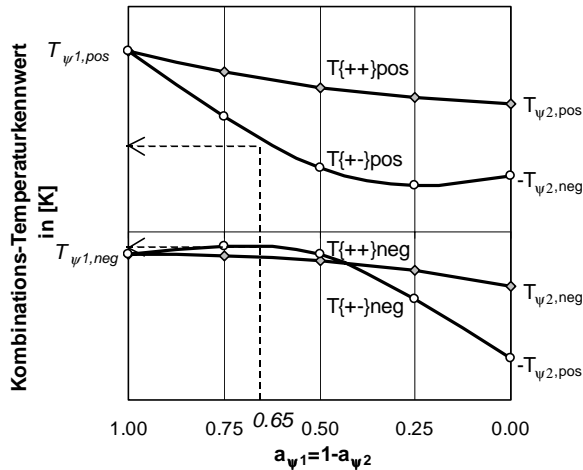
$n=1$:

Für einen Temperaturanteil genügt die Angabe der Extremwerte:

$$T_{\{+\}\text{pos}} = 25\text{K}$$

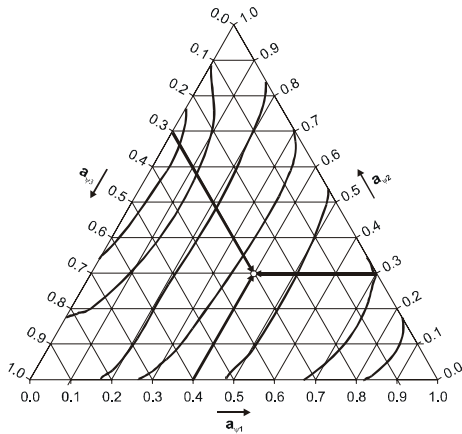
$$T_{\{+\}\text{neg}} = -10\text{K}$$

$n=2$:



Bei zwei Temperaturanteilen können die Kombinationskurven in einem Diagramm abgebildet werden, in welchem für jeden Anteilswert $a_{\psi,1}$ der Kombinations-Temperaturkennwert T_K aufgetragen wird. Für eine Bemessungsposition (s) sind somit der Gesamtübertragungsfaktor $C^{(s)}$, die zutreffende Vorzeichenkombination $\{v_{\psi,i}\}$ und die Anteilswerte $a_{\psi,i}$ zu bestimmen. Aus dem Diagramm können die zugehörigen repräsentativen Werte T_K für die Bestimmung der Bauwerksreaktion $S^{(s)}$ nach Gleichung (4.11) entnommen werden.

$n=3$:



Für die graphische Darstellung der Kombinations-Temperaturkennzahlen T_K bei drei Temperaturanteilen bietet sich ein Dreieckskoordinatennetz an. Jeder Kombination von Anteilswerten ($a_{\psi,1} + a_{\psi,2} + a_{\psi,3} = 1$) ist ein eindeutiger Punkt zugeordnet. Die Kennzahlen werden als Isolinien in das Netz eingetragen. Zur vollständigen Beschreibung der möglichen Kombinationen ist allerdings *ein Satz von 8 Diagrammen erforderlich*, die für alle 4 Vorzeichenkombinationen die positiven und negativen Kombinations-Temperaturkennzahlen enthalten.

Abbildung A.7.1 Möglichkeiten der Darstellung von Kombinations-Temperaturkennwerten für $n=1$ bis $n=3$ drei gleichzeitig zu berücksichtigende Temperaturanteile

A.8 – Bestimmungsgleichungen der Kombinationswerte für 2 miteinander zu kombinierende Temperaturanteile

Bestimmung der repräsentativen Extremwerte:

$T_{\psi,1,pos}$, $T_{\psi,1,neg}$, $T_{\psi,2,pos}$ und $T_{\psi,2,neg}$ sind die positiven und negativen Extremwerte der Zeitreihen der Temperaturanteile

$$T_{\psi,1}(t) \text{ und } T_{\psi,2}(t).$$

$T_{K,\{++\},pos}(a_{\psi 1} = 0,5)$ und $T_{K,\{++\},neg}(a_{\psi 1} = 0,5)$ sind die positiven und negativen Extremwerte der Zeitreihe

$$T_{\{++\}}(t) = 0,5 \cdot T_{\psi,1}(t) + 0,5 \cdot T_{\psi,2}(t)$$

$T_{K,\{+-\},pos}(a_{\psi 1} = 0,5)$ und $T_{K,\{+-\},neg}(a_{\psi 1} = 0,5)$ sind die positiven und negativen Extremwerte der Zeitreihe

$$T_{\{+-\}}(t) = 0,5 \cdot T_{\psi,1}(t) - 0,5 \cdot T_{\psi,2}(t)$$

Bestimmung der Kombinationsbeiwerte:

Verallgemeinerungs-Stufe 1

Vorzeichenkombination $\{++\}$:

$\omega_{\psi,1,\{++\},pos} = \frac{2 \cdot T_{K,\{++\},pos}(a_{\psi 1} = 0,5) - T_{\psi,2,pos}}{T_{\psi,1,pos}}$	$\omega_{\psi,2,\{++\},pos} = \frac{2 \cdot T_{K,\{++\},pos}(a_{\psi 1} = 0,5) - T_{\psi,1,pos}}{T_{\psi,2,pos}}$
$\omega_{\psi,1,\{++\},neg} = \frac{2 \cdot T_{K,\{++\},neg}(a_{\psi 1} = 0,5) - T_{\psi,2,neg}}{T_{\psi,1,neg}}$	$\omega_{\psi,2,\{++\},neg} = \frac{2 \cdot T_{K,\{++\},neg}(a_{\psi 1} = 0,5) - T_{\psi,1,neg}}{T_{\psi,2,neg}}$

Vorzeichenkombination $\{+-\}$:

$\omega_{\psi,1,\{+-\},pos} = \frac{2 \cdot T_{K,\{+-\},pos}(a_{\psi 1} = 0,5) + T_{\psi,2,neg}}{T_{\psi,1,pos}}$	$\omega_{\psi,2,\{+-\},pos} = \frac{2 \cdot T_{K,\{+-\},pos}(a_{\psi 1} = 0,5) - T_{\psi,1,pos}}{-T_{\psi,2,neg}}$
$\omega_{\psi,1,\{+-\},neg} = \frac{2 \cdot T_{K,\{+-\},neg}(a_{\psi 1} = 0,5) - T_{\psi,2,pos}}{T_{\psi,1,neg}}$	$\omega_{\psi,2,\{+-\},neg} = \frac{2 \cdot T_{K,\{+-\},neg}(a_{\psi 1} = 0,5) - T_{\psi,1,neg}}{-T_{\psi,2,pos}}$

Verallgemeinerungs-Stufe 2

$\omega_{\psi,1,pos} = \max(\omega_{\psi,1,\{++\},pos}; \omega_{\psi,1,\{+-\},pos})$	$\omega_{\psi,2,pos} = \max(\omega_{\psi,2,\{++\},pos}; \omega_{\psi,2,\{+-\},pos})$
$\omega_{\psi,1,neg} = \max(\omega_{\psi,1,\{++\},neg}; \omega_{\psi,1,\{+-\},neg})$	$\omega_{\psi,2,neg} = \max(\omega_{\psi,2,\{++\},neg}; \omega_{\psi,2,\{+-\},neg})$

Verallgemeinerungs-Stufe 3

$\omega_{\psi,1} = \max(\omega_{\psi,1,\{++\},pos}; \omega_{\psi,1,\{+-\},pos}; \omega_{\psi,1,\{++\},neg}; \omega_{\psi,1,\{+-\},neg})$
$\omega_{\psi,2} = \max(\omega_{\psi,2,\{++\},pos}; \omega_{\psi,2,\{+-\},pos}; \omega_{\psi,2,\{++\},neg}; \omega_{\psi,2,\{+-\},neg})$

Verallgemeinerungs-Stufe 4

$\omega_{\psi,i} = 1,0$

Zusammenfassende Darstellung der repräsentativen Extremwerte

$T_{K,\{+-\},neg}$	$T_{\psi,2,pos}$	$T_{K,\{++\},pos}$	$\omega_{\psi,1,\{+-\},neg}$	$\omega_{\psi,2,\{+-\},neg}$	$\omega_{\psi,1,\{++\},pos}$	$\omega_{\psi,2,\{++\},pos}$
$T_{\psi,1,neg}$	$T_{\psi,1} \oplus T_{\psi,2}$	$T_{\psi,1,pos}$	$\omega_{\psi,1,\{++\},neg}$	$\omega_{\psi,2,\{++\},neg}$	$\omega_{\psi,1,\{+-\},pos}$	$\omega_{\psi,2,\{+-\},pos}$
$T_{K,\{++\},neg}$	$T_{\psi,2,neg}$	$T_{K,\{+-\},pos}$				

Bemessungspunkte:

Vorzeichenkombination	Extremum	Kombinationsregeln i-iv bzw. Bemessungspunkte 1- 8				
{++}	positives	i	1	$T_{\psi,1,pos}$	\oplus	$\omega_{\psi,2,\{++\},pos} \cdot T_{\psi,2,pos}$
			2	$\omega_{\psi,1,\{++\},pos} \cdot T_{\psi,1,pos}$	\oplus	$T_{\psi,2,pos}$
	negatives	ii	3	$T_{\psi,1,neg}$	\oplus	$\omega_{\psi,2,\{++\},neg} \cdot T_{\psi,2,neg}$
			4	$\omega_{\psi,1,\{++\},neg} \cdot T_{\psi,1,neg}$	\oplus	$T_{\psi,2,neg}$
{+-}	positives	iii	5	$T_{\psi,1,pos}$	\oplus	$\omega_{\psi,2,\{+-\},pos} \cdot T_{\psi,2,neg}$
			6	$\omega_{\psi,1,\{+-\},pos} \cdot T_{\psi,1,pos}$	\oplus	$T_{\psi,2,neg}$
	negatives	iv	7	$T_{\psi,1,neg}$	\oplus	$\omega_{\psi,2,\{+-\},neg} \cdot T_{\psi,2,pos}$
			8	$\omega_{\psi,1,\{+-\},neg} \cdot T_{\psi,1,neg}$	\oplus	$T_{\psi,2,pos}$

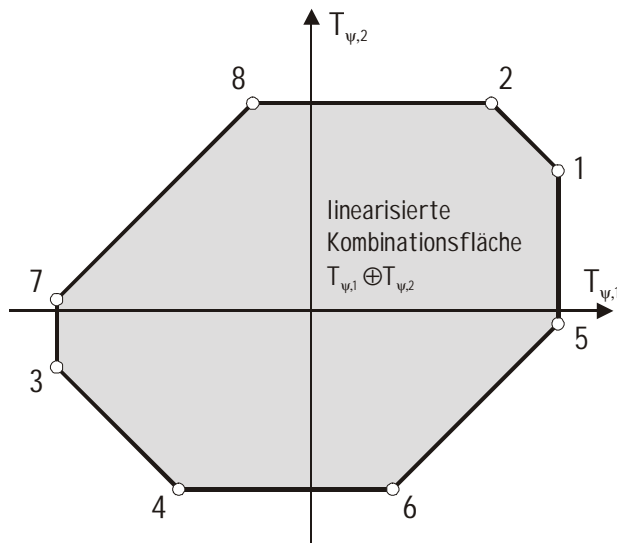


Abbildung
Graphische Darstellung der Bemessungspunkte

A.9 – Für und Wider eines Bezugs- Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T,0}$

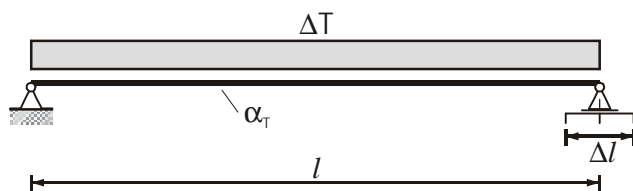
Allgemeines

Die Wärmedehnzahl α_T ist eine Materialeigenschaft, welche direkt proportional mit den Auswirkungen der Temperatureinwirkungen zusammenhängt. Bei der Auslegung von Bauwerken muss berücksichtigt werden, dass α_T eine streuende Größe ist. Dies trifft insbesondere auf Stahlbeton zu. Der üblicherweise angesetzte Mittelwert ist $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$, wobei Werte im Bereich $\alpha_T = 0,6 \cdot 10^{-5}$ bis $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ auftreten [46], was 40% größere Bauwerksreaktionen bedeuten kann. Zur Berücksichtigung dieser Variabilität gibt es prinzipiell zwei Ansätze:

- Es wird mit der maximalen Wärmedehnzahl $\alpha_{T,\max}$ gerechnet (Fraktilwert oder Nennwert).
- Es wird mit einer einheitlichen Bezugswärmedehnzahl $\alpha_{T,0}$ gerechnet und die Variationsbreite von α_T ist in der Temperatureinwirkung ΔT eingearbeitet

Am Beispiel der Längsverformung eines Einfeldträgers wird diskutiert, welche dieser beiden Varianten zweckmäßiger ist. Die Längsverformung ist für die Lagerdimensionierung und die Positionierung des Verschiebungslagers von Bedeutung.

Die Berechnung der Längsdehnung eines Einfeldträgers infolge Temperaturänderung erfolgt über die vergleichsweise einfache Beziehung (12.1):



$$\Delta l = \alpha_T \cdot l \cdot \Delta T \quad (12.1)$$

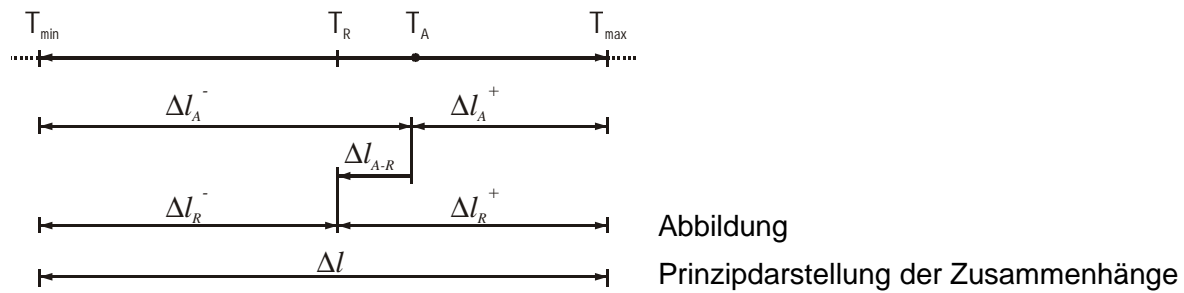
Der nicht sofort zu durchschauende Problempunkt liegt in der notwendigen Festlegung des Lagerweges Δl und der Einrichtung des Lagers bei der Aufstelltemperatur T_A . Für die o.g. Ansätze beiden nachfolgend dargelegten Vorgehensweisen wird von der folgenden Situation ausgegangen:

- Der Einfeldträger soll bei der Referenztemperatur T_R die Länge l aufweisen.
- Der Wärmeausdehnungskoeffizient des Materials kann maximal $\alpha_{T,\max}$ betragen.
- Die maximale Temperatur des Trägers beträgt T_{\max} und die minimale Temperatur T_{\min} .
- Die Einrichtung des Verschiebungslagers erfolgt bei der Aufstelltemperatur T_A , welche exakt bekannt ist.

a) Verwendung des möglichen Maximalwertes des Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T

Die erste Variante verwendet direkt die auftretenden Extremtemperaturen T_{\max} und T_{\min} sowie $\alpha_{T,\max}$. Der maximal mögliche und bemessungstechnisch erforderliche Lagerweg beträgt dann:

$$\Delta l = \alpha_{T,\max} \cdot l \cdot (T_{\max} - T_{\min}) \quad (12.2)$$



Abbildung

Prinzipdarstellung der Zusammenhänge

Weist der Träger die Temperatur T_R auf, so sind die notwendigen Verschiebungswege:

$$\begin{aligned} \text{für eine Erwärmung:} \quad & \Delta l_R^+ = \alpha_{T,\max} \cdot l \cdot (T_{\max} - T_R) \quad \text{und} \\ \text{für eine Abkühlung:} \quad & \Delta l_R^- = \alpha_{T,\max} \cdot l \cdot (T_{\min} - T_R) \end{aligned} \quad (12.3)$$

Damit diese Positionierung auch eingehalten wird, muss beim Einrichten des Lagers die Aufstelltemperatur T_A ermittelt werden. Das Lager muss so positioniert werden, dass die vorhandenen Verschiebungswegen wie folgt sind:

$$\begin{aligned} \text{für eine Erwärmung:} \quad & \Delta l_A^+ = \alpha_{T,\max} \cdot l \cdot (T_{\max} - T_A) \\ \text{für eine Abkühlung:} \quad & \Delta l_A^- = \alpha_{T,\max} \cdot l \cdot (T_{\min} - T_A) \end{aligned} \quad (12.4)$$

Alternativ wird das Lager um Δl_{A-R} neben dem Referenzpunkt bei T_R eingerichtet:

$$\Delta l_{A-R} = \alpha_{T,\max} \cdot l \cdot (T_A - T_R) \quad (12.5)$$

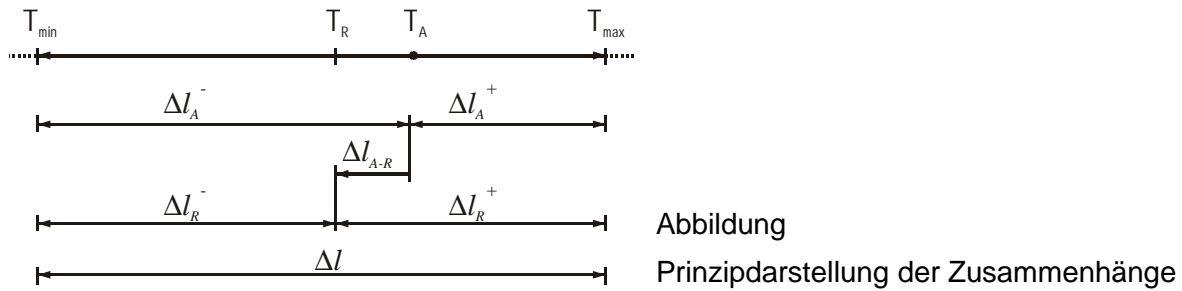
Wird nach diesem Prozedere vorgegangen und ist die tatsächliche Wärmezahl nicht $\alpha_{T,\max}$ sondern α_T mit $\alpha_T < \alpha_{T,\max}$, dann sind in jedem Fall ausreichende Verschiebungswegen vorhanden, denn der für die Erwärmung bzw. Abkühlung benötigte Verschiebungsweg ist in jedem Falle kleiner als der bemessene:

$$\begin{aligned} \text{Erwärmung:} \quad & \alpha_T \cdot l \cdot (T_{\max} - T_A) < \alpha_{T,\max} \cdot l \cdot (T_{\max} - T_A) \\ \text{Abkühlung:} \quad & \alpha_T \cdot l \cdot (T_{\min} - T_A) < \alpha_{T,\max} \cdot l \cdot (T_{\min} - T_A) \end{aligned} \quad (12.6)$$

b) Alternative: Verwendung eines Bezugs-Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T,0}$

In der Normung ([14], [22]) wird von einem einheitlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T,0} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ ausgegangen. Die Variabilität der Wärmeausdehnungskoeffizienten muss daher in der gegebenen Temperatureinwirkung einberechnet sein. Der maximal mögliche Wert $\alpha_{T,\max}$ soll in keiner Weise in die Bemessung eingehen, sondern nur der Bezugswert $\alpha_{T,0}$. Dies geht indirekt aus dem Fehlen eines Hinweises möglicher größerer Wärmeausdehnungskoeffizienten hervor. Grundvoraussetzung für eine solche Vorgehensweise ist auch hier, dass unter keinen Umständen eine Überschreitung der bemessenen Lagerwege auftritt.

Um eine ausreichende Verschiebungsmöglichkeit ohne Überschreitung der Lagerwege zu gewährleisten, ist es notwendig, ein fiktives $\alpha_{T,\text{fik}} (> \alpha_{T,\max})$ zu bestimmen. Dieses $\alpha_{T,\text{fik}}$ kompensiert die generalisierte Reduzierung der Bemessung auf $\alpha_{T,0}$. Die Begründung für $\alpha_{T,\text{fik}}$ ergibt nachfolgende Herleitung.



Der zu bemessende Lagerweg beträgt:

$$\Delta l = \alpha_{T, fik} \cdot l \cdot (T_{\max} - T_{\min}) = \alpha_{T,0} \cdot l \cdot (T_{\max, fik} - T_{\min, fik}) \quad (12.7)$$

Weist der Träger die Temperatur T_R auf, so sind die notwendigen Verschiebungsreserven:

$$\begin{aligned} \text{für eine Erwärmung:} \quad \Delta l_R^+ &= \alpha_{T,0} \cdot l \cdot \left(\left(\frac{\alpha_{T, fik}}{\alpha_{T,0}} T_{\max} \right) - T_R \right) \quad \text{und} \\ \text{für eine Abkühlung:} \quad \Delta l_R^- &= \alpha_{T,0} \cdot l \cdot \left(\left(\frac{\alpha_{T, fik}}{\alpha_{T,0}} T_{\min} \right) - T_R \right) \end{aligned} \quad (12.8)$$

Der Klammerausdruck $(\alpha_{T, fik}/\alpha_{T,0} \cdot T)$ ist eine Umrechnung der Temperatureinwirkung auf die Basis $\alpha_{T,0}$. Die Größe von $\alpha_{T, fik}$ ergibt sich aus den nachfolgenden Zusammenhängen.

Der real maximal benötigte Lagerweg berechnet sich zu:

$$\begin{aligned} \text{für eine Erwärmung:} \quad \Delta l_{R, \max}^+ &= \alpha_{T, \max} \cdot l \cdot (T_{\max} - T_R) \quad \text{und} \\ \text{für eine Abkühlung:} \quad \Delta l_{R, \max}^- &= \alpha_{T, \max} \cdot l \cdot (T_{\min} - T_R) \end{aligned} \quad (12.9)$$

Analog zum zuerst gezeigten Vorgehen wird nachfolgend die Aufstelltemperatur T_A eingerechnet. Das Lager ist so festzusetzen, dass folgende Verschiebungswege vorhanden sind:

$$\begin{aligned} \text{für eine Erwärmung:} \quad \Delta l_A^+ &= \alpha_{T,0} \cdot l \cdot \left(\left(\frac{\alpha_{T, fik}}{\alpha_{T,0}} T_{\max} \right) - T_A \right) \quad \text{und} \\ \text{für eine Abkühlung:} \quad \Delta l_A^- &= \alpha_{T,0} \cdot l \cdot \left(\left(\frac{\alpha_{T, fik}}{\alpha_{T,0}} T_{\min} \right) - T_A \right) \end{aligned} \quad (12.10)$$

Real werden maximal jedoch nur benötigt:

$$\begin{aligned} \text{für eine Erwärmung:} \quad \Delta l_{A, \max}^+ &= \alpha_{T, \max} \cdot l \cdot (T_{\max} - T_A) \\ \text{für eine Abkühlung:} \quad \Delta l_{A, \max}^- &= \alpha_{T, \max} \cdot l \cdot (T_{\min} - T_A) \end{aligned} \quad (12.11)$$

Das Gleiche ergibt sich, wenn das Lager um Δl_{A-R} neben dem Referenzpunkt bei T_R eingerichtet wird:

$$\Delta l_{A-R} = \alpha_{T,0} \cdot l \cdot (T_A - T_R) \quad (12.12)$$

Der durch die Verwendung von $\alpha_{T,\text{fik}}$ berechnete Verschiebungsweg Δl_A^\pm muss in jedem Fall größer oder gleich dem real maximal möglichen Verschiebungsweg $\Delta l_{A,\text{max}}^\pm$ sein, so dass gilt:

$$\begin{aligned} \text{für eine Erwärmung:} \quad & +\Delta l_A^+ \geq +\Delta l_{A,\text{max}}^+ \quad \text{und} \\ \text{für eine Abkühlung:} \quad & -\Delta l_A^- \geq -\Delta l_{A,\text{min}}^- \end{aligned} \quad (12.13)$$

Damit diese Bedingungen eingehalten werden, sind die Ungleichungen (12.13) nach $\alpha_{T,\text{fik}}$ aufzulösen. Es ergeben sich daraus zwei einzuhaltende Bedingungen für $\alpha_{T,\text{fik}}$:

$$\alpha_{T,\text{fik}} \geq \frac{1}{T_{\text{max}}} \cdot (\alpha_{T,0} \cdot T_A + \alpha_{T,\text{max}} \cdot (T_{\text{max}} - T_A)) \quad \text{und} \quad (12.14a)$$

$$\alpha_{T,\text{fik}} \geq \frac{1}{T_{\text{min}}} \cdot (\alpha_{T,0} \cdot T_A - \alpha_{T,\text{max}} \cdot (T_A - T_{\text{min}})) \quad (12.14b)$$

Geht man davon aus, dass $T_{\text{min}} \leq T_A \leq T_{\text{max}}$ gilt, so können in diese Ungleichungen für T_A alternativ die Werte T_{max} und T_{min} eingesetzt werden. Es folgt:

$$\alpha_{T,\text{fik}} \geq \begin{cases} \frac{1}{T_{\text{max}}} \cdot (\alpha_{T,0} \cdot T_{\text{min}} + \alpha_{T,\text{max}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})) & (T_{\text{min}} \text{ eingesetzt in Gl. (12.14)a}) \\ \frac{1}{T_{\text{min}}} \cdot (\alpha_{T,0} \cdot T_{\text{max}} - \alpha_{T,\text{max}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})) & (T_{\text{max}} \text{ eingesetzt in Gl. (12.14)b}) \end{cases} \quad (12.15)$$

Das $\alpha_{T,\text{fik}}$, welches diese beiden Bedingungen erfüllt, ist diejenige Wärmedehnzahl, die für die Umrechnung der Temperaturgrenzwerte T_{max} und T_{min} anzuwenden ist. Die $\alpha_{T,0}$ -bezogenen Temperaturwerte sind dann:

$$T_{\text{max},\text{fik}} = \left(\frac{\alpha_{T,\text{fik}}}{\alpha_{T,0}} \cdot T_{\text{max}} \right) \quad \text{und} \quad T_{\text{min},\text{fik}} = \left(\frac{\alpha_{T,\text{fik}}}{\alpha_{T,0}} \cdot T_{\text{min}} \right) \quad (12.16)$$

Es ist leicht einzusehen, wenn $\alpha_{T,0} = \alpha_{T,\text{max}}$ gewählt wird, wird auch $\alpha_{T,\text{fik}} = \alpha_{T,\text{max}}$. Gleiches gilt, wenn in den Ungleichungen (12.14)a und b die Aufstelltemperatur $T_A = 0$ ist. In allen anderen Fällen gilt $\alpha_{T,\text{fik}} > \alpha_{T,\text{max}}$. Dies ist aber gleichbedeutend mit einem größeren erforderlichen Lagerweg Δl (vgl. Gl. (12.7)) gegenüber dem Verfahren a). Der Wert von $\alpha_{T,\text{fik}}$ kann zwar verringert werden, wenn nicht die extremen Werte T_{max} und T_{min} als mögliche Grenzen für die Aufstelltemperatur T_A eingesetzt werden. Dennoch gilt weiterhin $\alpha_{T,\text{fik}} > \alpha_{T,\text{max}}$.

Die vorangegangenen Überlegungen lassen sich auf jede andere Temperaturein- und -auswirkung übertragen. Bei den horizontalen und vertikalen Temperaturunterschieden wird oft davon ausgegangen, dass $T_A = 0$ ist ($\rightarrow \alpha_{T,\text{fik}} = \alpha_{T,\text{max}}$), im Gegensatz zum konstanten Temperaturanteil, für den i.d.R. $T_A \neq 0$ gilt.

Beispiel

Ein Stahlbeton-Durchlaufträger der Länge $l = 60\text{m}$ und unbekanntem Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T weist eine charakteristische Schwankung des konstanten Temperaturanteiles ΔT_N zwischen $T_{\min} = -15^\circ\text{C}$ und $T_{\max} = +35^\circ\text{C}$ auf. Es wird angestrebt, dass der Einfeldträger bei der Referenztemperatur $T_R = +10^\circ\text{C}$ die oben angegebene Länge aufweist.

Gesucht ist der unter dem Aspekt der Temperaturschwankung minimal erforderliche Lagerweg und die Einstellung des Lagers, wenn die Trägertemperatur beim Feststellen des Lagers $T_A = 25^\circ\text{C}$ beträgt.

Variante a)

Da der Wärmeausdehnungskoeffizient α_T nicht bekannt ist, wird von dem ungünstigsten Wert $\alpha_T = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ ausgegangen. Der erforderliche Lagerweg ist dann nach Gleichung (12.2):

$$\Delta l = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (35 - (-15)) = 42\text{mm}$$

Die Einstellposition für die Nulllage des Lagers bei der Temperatur T_R ergibt sich aus den Beziehungen (12.3):

$$\Delta l_R^+ = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (35 - 10) = +21\text{mm} \quad \Delta l_R^- = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (-15 - 10) = -21\text{mm}$$

Bei der Feststellung des Lagers beträgt die Aufstelltemperatur (per Aufgabenstellung) $T_A = 25^\circ\text{C}$. Das Lager muss demnach gegenüber der Nulllage um $\Delta l_R = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (25 - 10) = +12,6\text{mm}$ ($\approx 13\text{mm}$) in Richtung Brückenausdehnung positioniert werden. Die verfügbaren Lagerwege sind demnach bei T_A nach Gleichung (12.4):

$$\Delta l_A^+ = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (35 - 25) = +8,4\text{mm} \quad \Delta l_A^- = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (-15 - 25) = -33,6\text{mm}$$

Beträgt der tatsächliche Wärmeausdehnungskoeffizient nur $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$, so werden nur die geringeren Verschiebungswege $+6\text{mm} \dots -24,0\text{mm}$ vom Bauwerk in Anspruch genommen. Der Lagerweg beträgt 42mm und ist in diesem Fall 40% größer als tatsächlich ausgenutzt.

Variante b)

Die Vorgehensweise b) sieht die Umrechnung der Temperatureinwirkungen auf einen Bezugs-Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T,0} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ vor. Da grundsätzlich die Aufstelltemperatur T_A nicht als bekannt vorauszusetzen ist, muss die Bestimmung der Umrechnungswärmeausdehnungskoeffizient mit den Ungleichungen (12.15) erfolgen:

$$\alpha_{T, \text{fik}} = \max \begin{cases} \frac{1}{35} \cdot (1,0 \cdot 10^{-5} \cdot (-15) + 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot (35 - (-15))) = 1,57 \cdot 10^{-5} \text{ [1/K]} \\ \frac{1}{-15} \cdot (1,0 \cdot 10^{-5} \cdot 35 - 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot (35 - (-15))) = 2,33 \cdot 10^{-5} \text{ [1/K]} \end{cases}$$

(Wäre $T_A = 25^\circ\text{C}$ als bekannt vorauszusetzen, so wäre $\alpha_{T, \text{fik}} = 2,06 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ ($> 1,4 \cdot 10^{-5}!$))

Die auf $\alpha_{T,0}$ bezogenen Temperatureinwirkungen sind folglich $T_{\max, \text{fik}} = 2,33/1,0 \cdot 35 = 81,55^\circ\text{C}$ und $T_{\min, \text{fik}} = 2,33/1,0 \cdot (-15) = -34,95^\circ\text{C}$. Auf eine hier angebrachte Rundung dieser Werte wird im Rahmen dieses Beispiels im Sinne der Nachvollziehbarkeit verzichtet. Der erforderliche Lagerweg berechnet sich nach Gleichung (12.7):

$$\Delta l = 2,33 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (35 - (-15)) = 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (81,55 - (-34,95)) = 69,9 \text{ mm}$$

Dieser ist damit 66% größer als der unter a) berechnete Lagerweg.

Damit das Lager bei $T_R = 10^\circ\text{C}$ in der Nullposition ist, müssen die Verschiebungswege wie folgt sein (Gleichung (12.8)):

$$\Delta l_R^+ = 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (81,55 - 10) = +42,93 \text{ mm} \quad \Delta l_R^- = 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (-34,95 - 10) = -26,97 \text{ mm}$$

Beim Festsetzen der Lager beträgt die Aufstelltemperatur $T_A = 25^\circ\text{C}$. Mit der Bezugswärmedehnzahl folgt, dass die Lagereinrichtung um +9mm gegenüber der Nullposition erfolgen muss:

$$\Delta l_A = 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (25 - 10) = +9,0 \text{ mm}$$

Ist das Lager so eingerichtet worden, stehen im Moment der Lagereinrichtung 42,93-9,00 = +33,93mm für eine Brückenverlängerung und $-(26,97+9) = -35,97\text{mm}$ für eine Brückenverkürzung zur Verfügung. Davon werden jedoch real höchstens +8,4mm für die Brückenverlängerung und -33,6m für die Brückenverkürzung infolge Abkühlung in Anspruch genommen:

$$\begin{aligned} \Delta l_A^+ &= 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (35 - 25) = +8,4 \text{ mm} \\ \Delta l_A^- &= 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 60000 \cdot (25 - (-15)) = -33,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

(Anmerkung: Nur im angenommenen Grenzfall $T_A = 35^\circ\text{C}$ würde die Wegreserve bei einer Brückenabkühlung und $T_A = -15^\circ\text{C}$ bei einer Brückenerwärmung voll ausgeschöpft werden)

Als problematisch ist folgender Umstand anzusehen: Wäre anstatt $\alpha_{T, \text{fik}} = 2,33 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ nur der Wert $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ zur Umrechnung der Temperatureinwirkungen verwendet worden, so wäre der bemessene Lagerweg auch wie in a) nur 42mm anstatt 69,9mm groß. Durch die Lagerdimensionierung stünden dann als Verkürzungsweg statt -35,97mm lediglich -26,7mm zur Verfügung. Durch Nachrechnung kann leicht überprüft werden, dass dies letztlich eine Überschreitung des Lagerweges von 6mm zur Folge hätte.

Dieses Beispiel kann vom Prinzip her auf jeden anderen Temperaturanteil und auch Bemessungsgröße übertragen werden, wobei dann in der Regel die Aufstelltemperatur mit $T_A = 0\text{K}$ angenommen wird. Das Abweichen von T_A von Null ist in Form von Sicherheitsanteilen zu berücksichtigen, zu deren Bestimmung die gleichen formalen Zusammenhänge anzuwenden sind. Auch hier ist die Verfahrensweise a) vorteilhafter und transparenter.

Schlussfolgerung

Es kann geschlussfolgert werden, dass es zweckmäßiger ist, das Berechnungsprozedere a) anzuwenden – die Verwendung des maximalen Wärmedehnungskoeffizienten $\alpha_{T,\max}$ bei der Bemessung (Dann gilt nämlich auch $\alpha_{T,0}=\alpha_{T,\max}=\alpha_{T,\text{fik}}$).

Folgende Punkte sprechen dafür:

- Es werden Temperaturgrenzwerte als solche verwendet und nicht umgerechnete Extremwerte, welche keinen fassbaren Bezug zu den real auftretenden Temperaturverhältnissen ermöglichen (siehe Beispiel: $T_{\max,\text{fik}}=81,55^\circ\text{C}$ und $T_{\min,\text{fik}} = -34,95^\circ\text{C}$)
- Es ist kein fiktiver Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_{T,\text{fik}}$ notwendig, welcher selbst wiederum von $\alpha_{T,\max}$, T_{\min} und T_{\max} abhängig ist.
- Der maximale Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_{T,\max}$ fließt direkt in die Berechnung der Temperaturbeanspruchungen ein. Der Ansatz eines geringeren Wertes kann durch Vorgabe bestimmter Materialzusammensetzungen (z.B. beim Beton) ohne weiteres berücksichtigt werden, da $\alpha_{T,\max}$ nicht in den Temperatureinwirkungswerten eingerechnet ist.
- Die berechneten Extremen Temperatúrauswirkungen sind geringer als bei der Vorgehensweise b).