

Grundlagen zur Erfassung der Temperaturbedingungen für eine analytische Bemessung von Asphaltbefestigungen

FA 4.198

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. habil. F. Wellner)

Bearbeiter: Kayser, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: November 2007

1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes FA 4.198 wurden seitens des Auftragnehmers, der Technischen Universität Dresden, umfangreiche Untersuchungen zur Temperaturproblematik in flexiblen Straßenbefestigungen aus Asphalt durchgeführt. Ziel war neben der Erarbeitung einer für freie Bemessungsverfahren anwendbare Klimaindizierte Straßentemperaturzonenkarte, die Auskunft über Oberflächentemperaturhäufigkeiten und deren regionale Unterschiede geben soll, auch die Prüfung der bis dato verwendeten 13 Temperaturverläufe.

2 Analyse der maßgebenden Temperaturverläufe

Die bisher im freien Bemessungsverfahren PADESTO (Kiehne) berücksichtigten Temperaturverläufe in Asphaltstraßen werden

durch monoton verlaufende Funktionen, welche in direkter Abhängigkeit zur Oberflächentemperatur stehen, abgebildet (Hess, 1998). Jedem dieser 13 oberflächentemperaturabhängigen Temperaturverläufe ist dabei eine bestimmte Auftretenshäufigkeit zugeordnet.

Zur Analyse der Gültigkeit dieser Temperaturverläufe sowie deren Klassifizierung wurden eine Vielzahl von stündlichen Temperaturverläufen numerisch berechnet. Basis dieser Berechnungen bilden Messwerte von Fahrbahnoberflächentemperaturen, die im Rahmen des Straßenzustands- und Wetterinformationssystems (SWIS) deutschlandweit erfasst werden. Insgesamt wurden für die Gültigkeitsanalyse sowie für die Ausarbeitung charakteristischer Temperaturverläufe ca. 450 000 Temperaturverläufe von 74 Messstellen über einen Zeitraum von teilweise 2002 bis 2005 herangezogen.

Es konnte gezeigt werden, dass eine solch strikte Zuordnung von Temperaturverläufen zu Oberflächentemperaturen weder begründbar noch zweckmäßig zu sein scheint.

Vielmehr sind, bestätigt durch thermodynamische Gesetzmäßigkeiten, andere Kriterien, wie der Zeitpunkt, zu dem das Temperaturprofil betrachtet wird sowie die Intensität der täglichen Temperaturänderung, maßgebendere Klassifizierungsgrößen zur Bildung charakteristischer Temperaturverläufe.

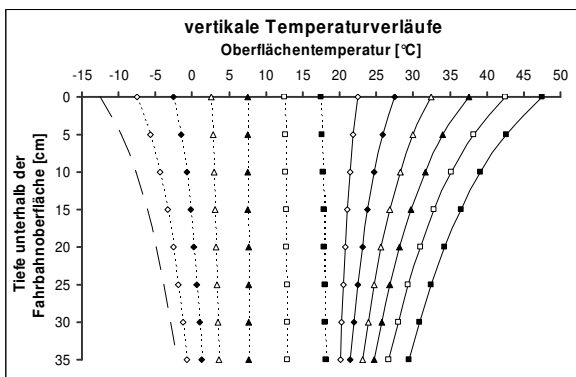


Bild 1: Darstellung der 13 oberflächentemperaturabhängigen vertikalen Temperaturverläufe

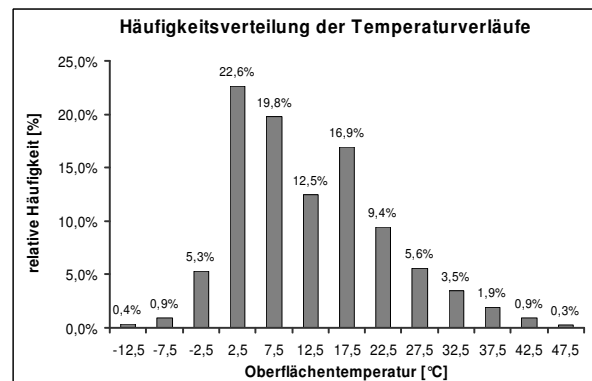


Bild 2: Häufigkeitsverteilung der 13 Oberflächentemperaturverläufe

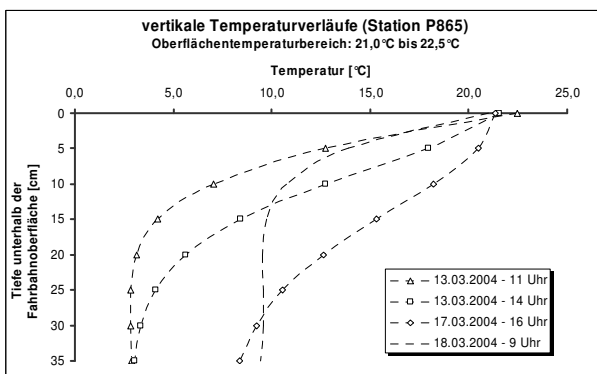


Bild 3: Vertikale Temperaturverläufe unterschiedlicher Tage und Uhrzeiten für eine Oberflächentemperatur von 21,0 °C bis 22,5 °C (Station: P865 – Inntal Dreieck)

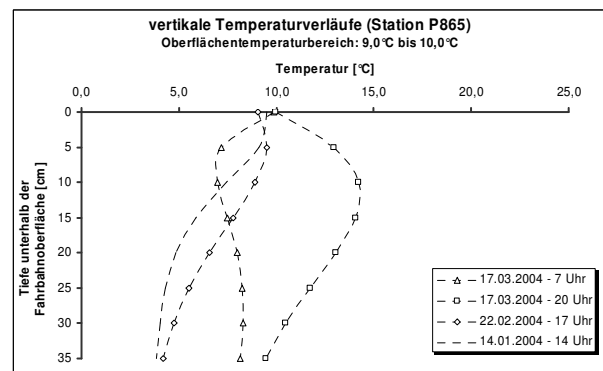


Bild 4: Vertikale Temperaturverläufe unterschiedlicher Tage und Uhrzeiten für eine Oberflächentemperatur von 9,0 °C bis 10,0 °C (Station: P865 – Inntal Dreieck)

3 Erarbeitung charakteristischer Temperaturverläufe

Neben den zur Bildung der charakteristischen Temperaturverläufe notwendigen Klassifikationen blieb zu klären, inwieweit die unterschiedlichen Schichten des Asphaltpakets sowie die Gesamtdicke des Asphaltpakets berücksichtigt werden müssen.

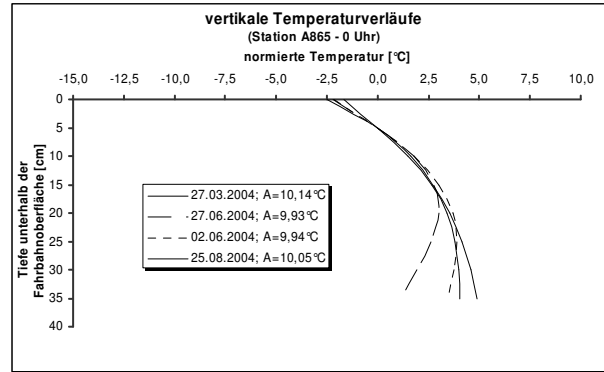
In verschiedener Literatur (z. B. Krebs u. a., 1981 und Wistuba, 2004) wird darauf verwiesen, dass bei Temperaturberechnungen für eine Straßenbefestigung aus Asphalt mit hinreichender Genauigkeit auf die Unterteilung in Deck-, Binder- und Tragschicht verzichtet werden kann. Die einzelnen Temperaturleitfähigkeiten können demnach vernachlässigt werden. Weitergehende Sensibilitätsrechnungen, die im Rahmen dieses FA-Vorhabens durchgeführt wurden, bestätigten diese Aussage. Für drei unterschiedliche theoretische Konstruktionsvarianten mit teilweise erheblich abweichenden Temperaturleitfähigkeiten (von 12,0 cm²/h bis 20,57 cm²/h) lagen die mittleren Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Varianten bei maximal 0,5 K für alle Schichttiefen sowie 3,5 K für die maximale Temperaturdifferenz. Analysiert wurden dabei weit über 30 000 Temperaturverläufe.

Den bis dato aktuellen Temperaturverläufen (Bild 1) ist zur genauen Berechnung der Temperaturen in Abhängigkeit der Tiefe unterhalb der Fahrbahnoberfläche eine Funktion hinterlegt. Dabei wird nicht berücksichtigt, wie dick das gesamte Asphaltpaket ist. Untersuchungen im Rahmen dieses FA-Vorhabens bestätigten diese Herangehensweise. Es zeigte sich, dass durch nur eine Funktion je charakteristischen Temperaturverlauf das gesamte laut "Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen", (RStO 01) mögliche Asphaltpaketdickenspektrum beschrieben werden kann. Diese Aussage stützt sich auf Berechnungen und Untersuchungen, die an fünf verschiedenen Asphaltbauvarianten, deren Paketdicken zwischen 15 und 35 cm lagen, durchgeführt wurden. Mit einer Häufigkeit von mehr als 90 % für maximale Temperaturdifferenzen der fünf untersuchten Varianten, die kleiner oder gleich 0,5 K sind, lässt sich ableiten, dass die Asphaltpaketdicke für die Festlegung maßgebender charakteristischer Temperaturverläufe keine Bedeutung hat.

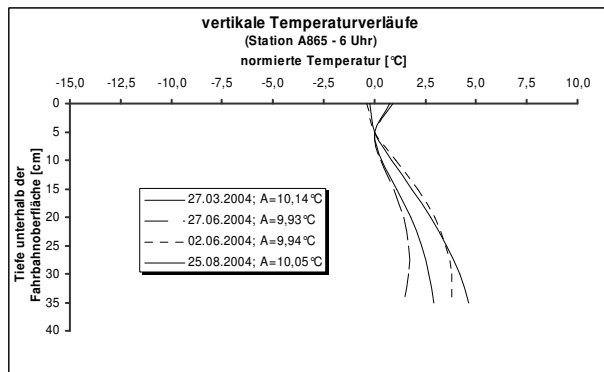
Die Stunde des Tages sowie die Amplitude der täglichen Änderung der Oberflächentemperatur, welche als Klassifizierungskriterien zur Erarbeitung der charakteristischen Temperaturverläufe herangezogen wurden, ermöglichen eine weitaus detailliertere Darstellung und Abbildung bezüglich des qualitativen Verlaufes der tatsächlichen Temperaturzustände im Asphaltpaket.

Für die erarbeiteten Klassifizierungskriterien zur Bildung der maßgebenden charakteristischen Temperaturverläufe wurden mithilfe des statistischen Partitionierungsverfahrens, der Clusteranalyse, die Klassengrenzen festgelegt. Dabei wurde auf das Partitionierungsverfahren *k-means* zurückgegriffen. Die Anwendung dieses Verfahrens erfolgte computergestützt durch das Programm STATISTIKA.

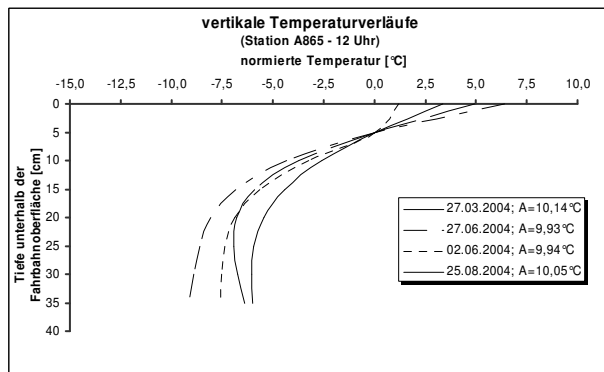
Beim Partitionierungsverfahren *k-means* werden die Cluster iterativ durch eine zu Beginn vorgegebene Anzahl von Clustern ermittelt. Jedem dieser Cluster wird zu Beginn ein zufällig gewähltes Clusterzentrum (d. h., ein zufällig gewählter Temperaturverlauf) zugeordnet. Anschließend werden die verbleibenden Objekte (Temperaturverläufe) in dem jeweils ihnen am nächsten liegenden Cluster zugeordnet und dessen Mittelwert (*k-means*) bestimmt. Dies wiederholt sich solange, bis sich die Zuordnung der Objekte nicht mehr ändert.



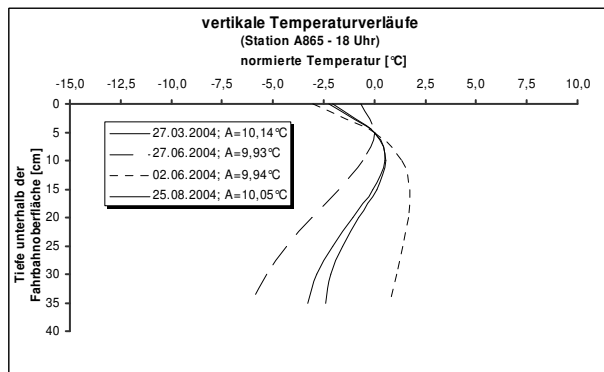
a)



b)



c)



d)

Bild 5: Aus gemessenen Oberflächentemperaturen berechnete vertikale Temperaturverläufe der Station A865 für eine tägliche Temperaturamplitude von $\Delta A_{24} \sim 10$ °C sowie für unterschiedliche Uhrzeiten; a) 0 Uhr; b) 6 Uhr; c) 12 Uhr; d) 18 Uhr

Die Festlegung der Klassengrenzen beider Klassifizierungskriterien erfordert eine 2-fache Durchführung der Clusteranalyse. Da das Kriterium der Amplitude ein Maß für die quantitative Veränderung eines normierten Temperaturverlaufes ist und das Kriterium des betrachteten Zeitpunktes den qualitativen Temperaturverlauf bestimmt, empfiehlt es sich, mit der ersten Clusteranalyse die Grenzen der Amplitudenklassen festzulegen und anschließend für jede dieser Amplitudenklassen die notwendigen Zeitbereiche zu definieren.

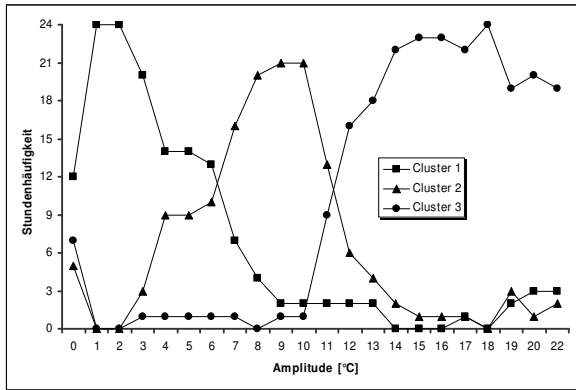


Bild 6: Clusterbezogene normierte absolute Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Vorgabe von 3 Clustern

Die entsprechenden Grenzen der drei Amplitudenklassen ergeben sich aus Bild 6 infolge der Amplitudenbereiche für die jeweils ein Cluster bezogen auf die übrigen beiden Cluster die maximale Häufigkeit aufweist:

- kleine Amplituden: $\Delta A_{\vartheta} < 6,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- mittlere Amplituden: $6,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta A_{\vartheta} < 11,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- große Amplituden: $\Delta A_{\vartheta} \geq 11,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Für jede der drei gebildeten Amplitudenklassen mussten entsprechend maßgebende Stundenklassen festgelegt werden. Die Erarbeitung dieser Klassen erfolgte analog zur Bildung der Amplitudenbereiche.

Da mit zunehmender Amplitude der Fahrbahnoberflächen-temperatur auch die Temperaturbandbreite, innerhalb derer die stündlichen vertikalen Temperaturverläufe liegen, ansteigt, muss auch die Anzahl notwendiger Stundenklassen mit zunehmender Amplitude größer werden. Als Ergebnis dieses Verfahrens ergaben sich für die drei Amplitudenbereiche folgende notwendige Stundenklassen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Anzahl der aus den Clusteranalysen resultierenden Stundenklassen in Abhängigkeit der drei Amplitudenbereiche

Amplitudenbereich	Anzahl notwendiger Stundenklassen
kleine Amplituden	2
mittlere Amplituden	7
große Amplituden	8

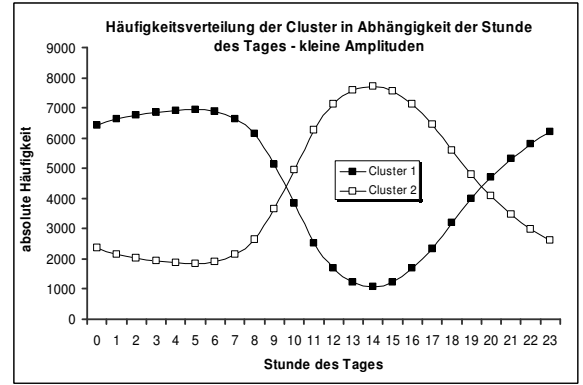


Bild 7: Clusterbezogene absolute Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Stunde des Tages für kleine Amplituden $\Delta A_{\vartheta} < 6,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einer Vorgabe von 2 Clustern

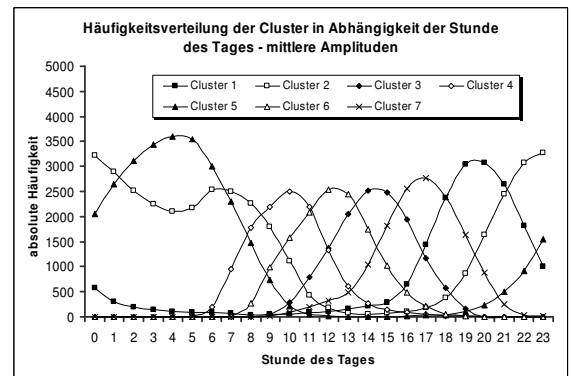


Bild 8: Clusterbezogene absolute Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Stunde des Tages für mittlere Amplituden $6,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta A_{\vartheta} < 11,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einer Vorgabe von 7 Clustern

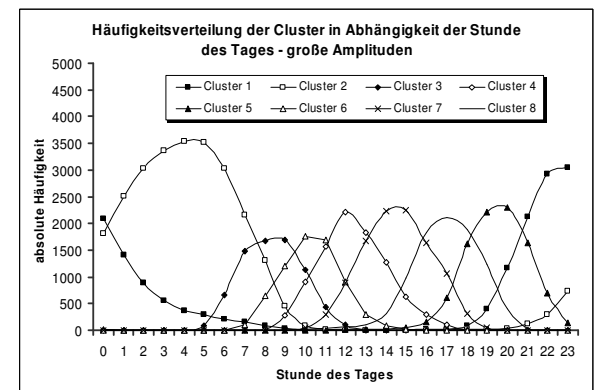


Bild 9: Clusterbezogene absolute Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Stunde des Tages für große Amplituden $\Delta A_{\vartheta} \geq 11,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einer Vorgabe von 8 Clustern

Die sich infolge dieser Klassengrenzen ergebenden maßgebenden charakteristischen Temperaturverläufe wurden in einem letzten Schritt visuell ausgewertet und nochmals auf letztlich insgesamt 12 normierte Temperaturverläufe zusammengefasst (Bild 10).

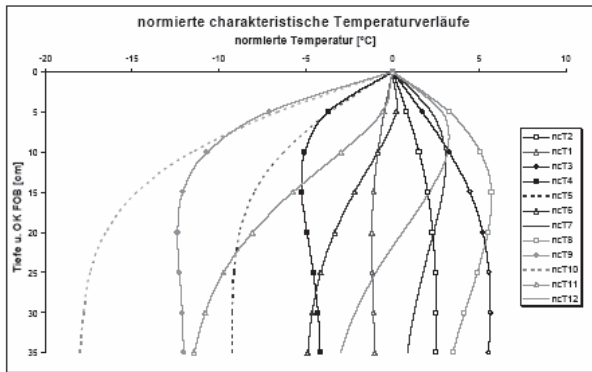


Bild 10: Normierte charakteristische Temperaturverläufe der 12 Klassen

Jeder dieser 12 charakteristischen Temperaturverläufe wurde anschließend durch eine mathematische Funktion abgebildet. Hierbei stellte sich die Verwendung von Polynomen maximal 5. Grades als zweckmäßig heraus.

$$\vartheta(x) = k_5 \cdot |x|^5 + k_4 \cdot |x|^4 + \dots + k_1 \cdot |x|$$

$\vartheta(x)$ Temperatur [°C]

k_i Koeffizienten nach Tabelle 3

x Tiefe u. der Fahrbahnoberfläche [cm]

Für die Berücksichtigung des Temperaturverlaufes in Asphaltpaketen bei Dimensionierungsrechnungen von Straßenbefestigungen mit Asphalt sind absolute Temperaturverläufe als Eingangsgrößen notwendig. Durch die Temperaturfunktion in Verbindung mit den Koeffizienten nach Tabelle 3 lassen sich die normierten, also von absoluten Temperaturen unabhängigen, charakteristischen Temperaturverläufe berechnen. In Überlagerung mit den Oberflächentemperaturen werden diese in absolute charakteristische Temperaturverläufe überführt. Die Temperaturfunktion muss somit um ein absolutes Glied, welches die Fahrbahnoberflächentemperatur darstellt, ergänzt werden.

$$\vartheta(x) = k_5 \cdot |x|^5 + k_4 \cdot |x|^4 + \dots + k_1 \cdot |x| + \vartheta_{FO}$$

Die Auftretenshäufigkeit jedes absoluten Temperaturverlaufes wird letztlich über die amplituden- und stundenklassenabhängige Häufigkeit der Oberflächentemperaturklassen bestimmt. Diese Häufigkeiten bilden somit die Grundlage für die Erarbeitung der KIST-Zonen-Karte.

Tabelle 2: Bezeichnung und Klassenbereiche der normierten charakteristischen Temperaturverläufe

normierter charakteristischer Temperaturverlauf	Amplitudenbereich	Zeitbereich
ncT1	$\Delta A_\theta < 6,5^\circ\text{C}$	10–19 Uhr
ncT2	$\Delta A_\theta < 6,5^\circ\text{C}$	20–9 Uhr
	$6,5^\circ\text{C} \leq \Delta A_\theta < 11,5^\circ\text{C}$	22–1 Uhr 7–8 Uhr
ncT3	$6,5^\circ\text{C} \leq \Delta A_\theta < 11,5^\circ\text{C}$	2–6 Uhr
	$\Delta A_\theta \geq 11,5^\circ\text{C}$	2–7 Uhr
ncT4	$6,5^\circ\text{C} \leq \Delta A_\theta < 11,5^\circ\text{C}$	9–11 Uhr
	$\Delta A_\theta \geq 11,5^\circ\text{C}$	8–9 Uhr
ncT5	$6,5^\circ\text{C} \leq \Delta A_\theta < 11,5^\circ\text{C}$	12–15 Uhr
ncT6	$6,5^\circ\text{C} \leq \Delta A_\theta < 11,5^\circ\text{C}$	16–18 Uhr
ncT7	$6,5^\circ\text{C} \leq \Delta A_\theta < 11,5^\circ\text{C}$	19–21 Uhr
ncT8	$\Delta A_\theta \geq 11,5^\circ\text{C}$	21–1 Uhr
ncT9	$\Delta A_\theta \geq 11,5^\circ\text{C}$	10–11 Uhr
ncT10	$\Delta A_\theta \geq 11,5^\circ\text{C}$	12–15 Uhr
ncT11	$\Delta A_\theta \geq 11,5^\circ\text{C}$	16–18 Uhr
ncT12	$\Delta A_\theta \geq 11,5^\circ\text{C}$	19–20 Uhr

Tabelle 3: Koeffizienten der Temperaturfunktion

normierter charakteristischer Temperaturverlauf	Koeffizienten k_i				
	k_5 * 10^{-8} [°C/cm ⁵]	k_4 * 10^{-5} [°C/cm ⁴]]	k_3 * 10^{-4} [°C/cm ³]]	k_2 * 10^{-4} [°C/cm ²]]	k_1 * 10^{-4} [°C/cm]
ncT1	0	-0,15	0,75	13,80	-1046,64
ncT2	0	0,20	-1,08	-16,73	1772,06
ncT3	0	0,58	-3,88	10,90	3484,09
ncT4	0	1,87	-19,32	711,20	-10444,00
ncT5	0	0	-2,78	270,69	-8695,53
ncT6	37	-4,99	25,42	-552,20	2614,52
ncT7	0	-0,88	10,47	-435,71	6431,31
ncT8	0	-0,18	5,65	-386,43	8379,71
ncT9	0	2,14	-24,49	1033,69	-18776,82
ncT10	0	0	-4,72	468,62	-15753,33
ncT11	63	-8,31	41,56	-864,89	2282,53
ncT12	0	-1,88	20,71	-778,89	9081,79

4 Berechnung von Oberflächentemperaturen

Die Erstellung der Klimaindizierten Straßentemperaturzonenkarte basiert auf berechneten Oberflächentemperaturen. Die Temperaturberechnungen erfolgten mithilfe der Wärmebilanzgleichung, wobei verschiedenste klimatische Umgebungsbedingungen die Randbedingungen zur Lösung dieser Bilanzgleichung darstellen. Grundlage der KIST-Zonen-Karten bilden Temperaturanalysen von 54 Stationen in Deutschland über einem Zeitraum von 15 Jahren (1991 bis 2005). Für die Berechnungen der Oberflächentemperaturen gehen die folgenden Klimaparameter, die seitens des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung gestellt wurden, als Eingangsgrößen in die Wärmebilanzgleichung ein:

- Lufttemperatur in °C,
- relative Luftfeuchtigkeit in %,
- Windgeschwindigkeit in m/s,
- Bewölkungsgrad und
- Niederschlagshöhe in mm/h.

Umfangreiche Validationsrechnungen ergaben die in Tabelle 4 abgebildeten und für die anschließend durchgeführten Temperaturberechnungen verwendeten Materialparameter.

Tabelle 4: Übersicht der Materialparameter der Vorzugskombination

Parameter	Wert / Modell
Wärmeleitfähigkeit	1,05 W/(m*K)
Spezifische Wärmekapazität	878 W*s/(kg*K)
Dichte	2240 kg/m ³
kurzwelliges Albedo	15 %
langwelliges Albedo	5 %
Wärmübergangskoeffizient	lt. Ähnlichkeitstheorie

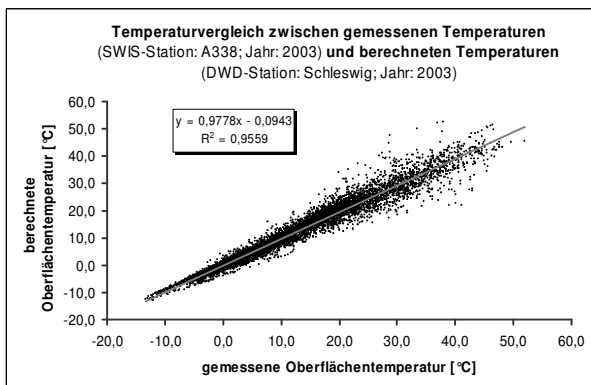


Bild 11: Vergleich der gemessenen (Station: A338; Jahr: 2003) und mit den Parametern des Vorzugsmodells berechneten (Station: Schleswig; Jahr: 2003) Fahrhahnoberflächentemperaturen

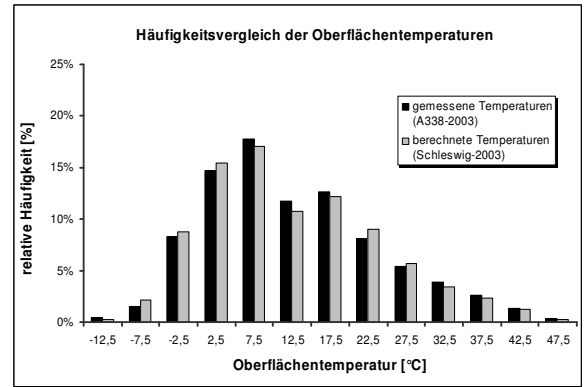


Bild 12: Häufigkeitsvergleich der gemessenen (Station: A338; Jahr: 2003) und mit den Parametern des Vorzugsmodells berechneten (Station: Schleswig; Jahr: 2003) Fahrhahnoberflächentemperaturen

5 KIST-Zonen-Karten

Die ausgearbeiteten KIST-Zonen-Karten basieren auf mehr als 7 Mio. berechneten Oberflächentemperaturen.

Die Festlegung der Zonengrenzen erfolgte über Splines – Verbindung der Distanzhalbierenden zweier benachbarter Stationen unterschiedlicher Zonenzugehörigkeit (Bild 13 und Bild 14). Dabei wurde dem Polygon, welches sich aus der Verbindung der Distanzhalbierungspunkte ergibt, eine Splinefunktion angenähert (Bild 13 und Bild 14). Die Distanzhalbierungspunkte bilden hierbei die Stützstellen dieser Splinefunktion.

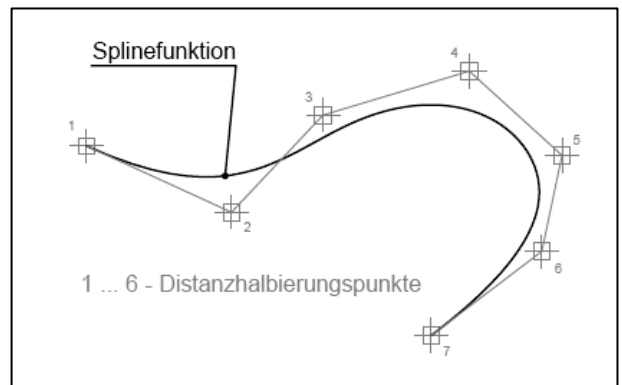


Bild 13: Grafische Erläuterung zur Bildung der Zonengrenzen mithilfe von Splinefunktionen

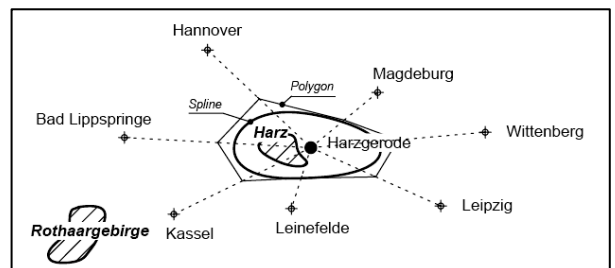


Bild 14: Beispiel zur Bildung einer Zonengrenze mithilfe von Splinefunktionen

Die Erarbeitung der KIST-Zonen erfolgte mithilfe des Partitionierungsverfahrens *k-means*. Die durch das iterative Lösen der Wärmebilanzgleichung für jede Stunde der 54 untersuchten Stationen über den Zeitraum von 1991 bis 2005 berechneten Oberflächentemperaturen wurden gemäß der im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten und dargelegten Klassifizierungskriterien der maßgebenden charakteristischen Temperaturverläufe gruppiert und ausgewertet. Für jeden der 12 normierten Temperaturverläufe wurden die berechneten Oberflächentemperaturen jeder Station einer Häufigkeitsanalyse bezüglich der 13 Temperaturklassen unterzogen. Daraus ergeben sich für jede Station 12 maßgebende Häufigkeitsverteilungen, welche die Grundlage der Erarbeitung von Straßentemperaturzonen bilden.

Die Erarbeitung der KIST-Zonen erfolgte auf zwei Wegen.

5.1 Häufigkeitsbasierte KIST-Zonen-Karten

Zum einen wurden die Oberflächentemperaturhäufigkeitsverteilungen der 54 Stationen bezüglich ihrer Ähnlichkeit gruppiert. Die Gruppierung einzelner Stationen erfolgte auf Basis der 156 Einzelhäufigkeiten (13 Temperaturklassen x 12 Häufigkeitsverteilungen). Die Analyse wurde insgesamt 5-mal, mit jeweils 2, 3, 4, 5 und 6 Clustern, durchgeführt. Die Beschränkung auf maximal 6 Cluster resultierte aus parallel durchgeführten Untersuchungen der Temperaturhäufigkeiten der einzelnen Cluster. Als maßgebend wurde hier die über alle Zonen resultierende mittlere Quadratdifferenz der Temperaturhäufigkeiten gewählt. Während zwischen zwei bis fünf Straßentemperaturzonen die mittlere Quadratdifferenz der Temperaturhäufigkeiten fast linear 0,0013 % pro zusätzlicher Zone abnimmt, beträgt der Unterschied zwischen fünf und sechs Straßentemperaturzonen lediglich nur noch 1/10 davon. Aufgrund dessen wurde die Clusteranalyse mit maximal sechs vorgegebenen Clustern durchgeführt.

Die aus der Clusteranalyse resultierenden repräsentativen Häufigkeitsverteilungen jeder Zone wurden anschließend als Eingangsgrößen in das Dimensionierungsprogramm PADESTO implementiert. Durch umfangreiche Serienrechnungen (alle Bauweisen, Bauklassen einschließlich B-Zahl-Grenzen der Bauklassen der Tafel 1 RStO 01) wurde auf Basis der zonenabhängigen Schädigungsraten sowie Schädigungsratenunterschiede zwischen den einzelnen Zonen die entsprechend maßgebende häufigkeitsbasierte KIST-Zonen-Karte ausgearbeitet. Maßgebend für diese häufigkeitsbasierten KIST-Zonen-Karten wurde die Variante mit 4 Straßentemperaturzonen.

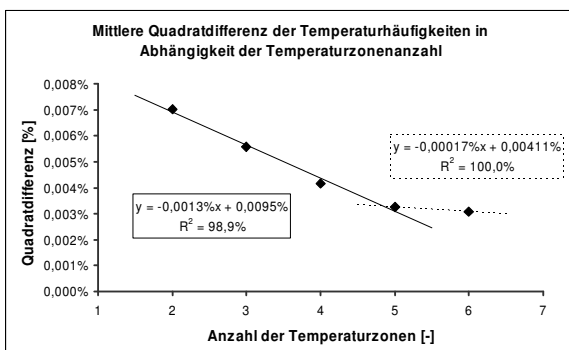


Bild 15: Mittlere Quadratdifferenz der Temperaturhäufigkeiten in Abhängigkeit von der gewählten Anzahl an Straßentemperaturzonen

Temperaturabhängigkeit der Schädigungsraten:

Durch die Bildung von Straßentemperaturzonen auf Basis der clusteranalytischen Gruppierungen der Temperaturhäufigkeitsverteilungen der einzelnen Stationen werden die unterschiedlichen Schädigungseinflüsse der Temperaturklassen vernachlässigt. Unter Zugrundelegung der Gültigkeit nachfolgend aufgeführter Gesetzmäßigkeiten resultiert aus dem Ermüdungsgesetz in Verbindung mit der E-Modul-Kennlinie eines Materials sowie der MINER-Hypothese, dass eine aufgebrauchte Belastung bei höheren Temperaturen eine weitaus höhere Schädigung im Material hervorruft als bei niedrigen Temperaturzuständen.

Ermüdungsgesetz:

$$n = a \cdot \varepsilon^b = N_{zul}$$

Schadenshypothese:

$$S = \sum_i s_i = \sum_i \frac{N_{vorh,i}}{N_{zul,i}}$$

Absoluter Elastizitätsmodul:

$$E(\vartheta) = \frac{\sigma(\vartheta)}{\varepsilon(\vartheta)} \Rightarrow \varepsilon(\vartheta) = \frac{\sigma(\vartheta)}{E(\vartheta)}$$

Temperaturabhängige zulässige Lastwechselzahl:

$$N_{zul}(\vartheta) = a \cdot \varepsilon(\vartheta)^b$$

Temperaturabhängiger Schädigungsanteil:

$$\bar{s}(\vartheta) = \frac{N_{vorh}}{a} \cdot \varepsilon(\vartheta)^b = K \cdot \varepsilon(\vartheta)^b$$

Häufigkeitsgewichteter – temperaturabhängiger Schädigungsanteil:

$$s(\vartheta) = \bar{s}(\vartheta) \cdot Hf_{k,\vartheta}$$

N_{zul} zulässige Lastwechselzahl [-]

N_{vorh} vorhandene Lastwechselzahl [-]

a, b Koeffizienten der Ermüdungsfunktion [-]

ε elastische Anfangsdehnung [-]

S Gesamtschädigung [-]

s_i Teilschädigung im Beanspruchungszustand i [-]

σ Spannung [N/mm²]

E Elastizitätsmodul [N/mm²]

K Konstante [-]

5.2 Ermüdungsbasierte KIST-Zonen-Karten

Im Gegensatz zum häufigkeitsbasierten Ansatz der Erstellung von KIST-Zonen-Karten werden beim ermüdungsbasierten Ansatz nicht die Temperaturhäufigkeitsverteilungen geclustert, sondern die stationsindividuellen Schädigungsraten. Dadurch werden die verschiedenen temperaturspezifischen Schädigungsanteile genauer berücksichtigt.

Als Ausgangswerte der Clusteranalyse wurden wie erwähnt die Schädigungsraten der 54 Stationen gemäß Berechnungskatalog verwendet. Auf Basis dieser Werte wurden die KIST-Zonen mit dem *k-means*-Verfahren gebildet.

Insgesamt wurden 5 ermüdungsbasierte KIST-Zonen-Karten mit jeweils 4, 5, 6, 7 und 8 Straßentemperaturzonen ausgearbeitet. Anschließend wurden die repräsentativen Häufigkeitsverteilungen der Fahrbahnoberflächentemperaturen aus dem Mittelwert aller in einer Zone enthaltenen Stationen und deren Häufigkeitsverteilungen ermittelt.

Die Bewertung der einzelnen ermüdungsbasierten KIST-Zonen-Karten erfolgte wiederum durch Prüfung der signifikanten Unterschiede der Schädigungsraten zwischen den einzelnen Zonen auf Basis der Ergebnisse des Berechnungskataloges. Maßgebend wurde hierbei die ermüdungsbasierte KIST-Zonen-Karte mit 6 Straßentemperaturzonen.

6 Straßentemperaturzonen

-ermüdungsbasiert-

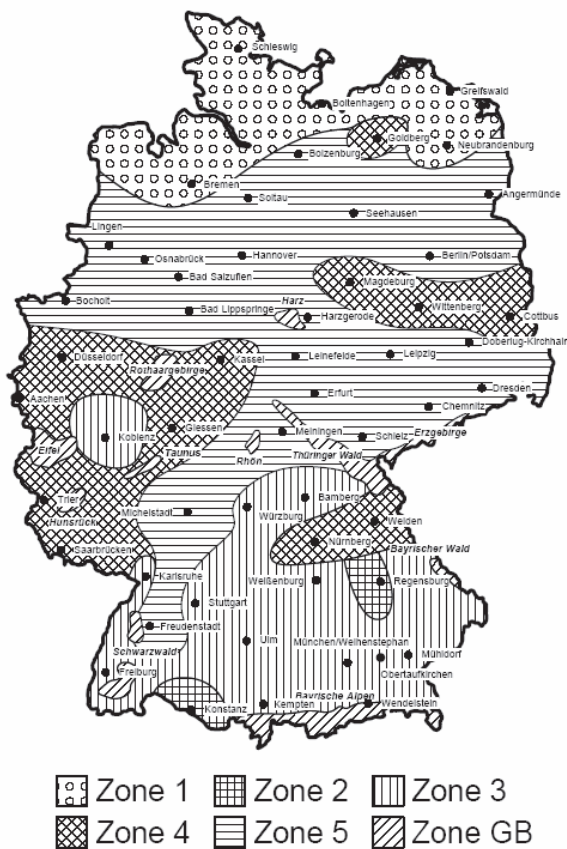


Bild 16: Maßgebende Klimaindizierte Straßentemperaturzonenkarte mit 6 Straßentemperaturzonen

6 Zusammenfassung

Bei der freien rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen ist es nach derzeitigem Stand der Technik sinnvoll, maßgebende Temperaturverläufe in Überlagerung mit der Verkehrsbelastung zu bringen. Eine Berücksichtigung aller möglichen Temperaturzustände ist infolge der Schadensakkumulation entsprechend der Hypothese nach Miner (Miner, 1945) vor allem in Überlagerung mit dem Verkehr kaum möglich. Vielmehr ist die Erarbeitung charakteristischer

Temperaturverläufe im Zusammenhang mit einer Auftretenshäufigkeit zielführend. Dabei sollte die Fahrbahnoberflächen-temperatur entkoppelt vom Temperaturverhalten in der Straßenkonstruktion betrachtet werden. Es zeigte sich, dass kein direkter Zusammenhang zwischen vertikalem Temperaturverlauf im Asphaltpaket und Fahrbahnoberflächentemperatur besteht. Lediglich die zeitabhängige Änderung der Fahrbahnoberflächentemperatur hat Einfluss auf das Temperaturprofil im Straßenkörper. Demnach kann über die Intensität der täglichen Temperaturänderung in Verbindung mit der Uhrzeit eine durchaus genaue Klassifizierung der maßgebenden Temperaturverläufe erfolgen.

Es zeigte sich weiterhin, dass weder die Dicke des Asphaltpaketes noch die thermodynamischen, materialspezifischen Kennwerte des Straßenbaustoffs Asphalt, innerhalb der möglichen Bandbreiten dieser Kennwerte, einen nennenswerten Einfluss auf die Erarbeitung charakteristischer Temperaturverläufe haben.

Die Fahrbahnoberflächentemperatur lässt sich für Langzeitberechnungen ausreichend genau durch die Wärmebilanzgleichung berechnen. Der Genauigkeit dieser Ausgangsgrößen kommt bei solchen Langzeitberechnungen scheinbar nur eine untergeordnete Bedeutung zu.

Bei sinnvoller Annahme dieser Parameter können fehlende Datensätze mit vernachlässigbaren Auswirkungen auf das Berechnungsergebnis ersetzt werden. Eine völlige Vernachlässigung einzelner Parameter ist nicht ratsam.

Die geografischen Unterschiede der klimatischen Umgebungsbedingungen bzw. deren Auswirkungen auf die analytische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen sind in Form einer Straßentemperaturzonenkarte erfasst. Jede der in dieser Karte hinterlegten Straßentemperaturzonen besitzt ein individuelles Häufigkeitsverteilungsprofil der Fahrbahnoberflächentemperaturen.

7 Literatur

Bacher, J. (1996): Clusteranalyse – anwendungsorientierte Einführung, 2. erg. Aufl., München u. a.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2001): Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, RSTO 01, Köln.

Francken, L.; Verstraeten, J. (1974): Methods for predicting moduli and fatigue laws of bituminous road mixes under repeated bending, in: Transportation Research Record, 515, S. 114-123.

Grigull, U.; Sandner, H. (1990): Wärmeleitung, 2. Aufl., Berlin u. a.

Hell, F. (1982): Grundlagen der Wärmeübertragung, 3. neubearb. und erw. Aufl., Düsseldorf.

Hess, R. (1998): Kalibrierung von Verhaltensmodellen für das Straßenerhaltungsmanagement. Diplomarbeit, Universität Hannover, Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau.

Huhn, J. (2004): Technische Thermodynamik – Teil Wärmeübertragung. Vorlesungsskript, Institut für Thermodynamik und technische Gebäudeausrüstung, Technische Universität Dresden.

Kayser, S. (2003): Klimatische Einflüsse bei Bemessungsberechnungen – Erarbeitung einer Vorgehensweise zur Berücksichtigung dieser Einflüsse. Diplomarbeit, Professur für Straßenbau, Technische Universität Dresden.

Kiehne, A. (in Bearbeitung): Rechnerische Bemessung von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise – Entwicklung und Umsetzung eines Verfahrens. Manuskript zur Dissertation, Technische Universität Dresden.

Krebs, H. G.; Böllinger, G. (1981): Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper – Abschätzung der monatlichen Fahrleistungen mit aggressiven Reifen und normalen Reifen, (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik ; 347).

Lichte, U. (2004): Klimatische Temperatureinwirkungen und Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken. Dissertation, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München.

Lücke, H.; Gerlach, A.; David, M. (1980): Gesamtauswertung der Untersuchungen auf der Versuchsstrecke Hilpoltstein, (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik ; 306).

Miner, M. A. (1945): Cumulative damage in fatigue, in: Journal of Applied Mechanics, 12 (1945), Heft 3.

Pohlmann, P. (1989): Simulation von Temperaturverteilungen und thermisch induzierten Zugspannungen in Asphaltstraßen, (Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig ; 9).

Roßberg, K.; Eckert, M.; Carraro, U.; Bader, E. (2000): Einfluss des spektralen Absorptions- und Reflexionsgrades von Mineralstoffen auf die Wärmebilanz von Fahrbahnbefestigungen. Schlussbericht zu FE 04.178/1997/AGB, (Schriftenreihe der Professur für Straßenbau, Technische Universität Dresden ; 10).

Schönwiese, C. D. (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. 3. verb. und erw. Aufl., Berlin u. a.

Wiedenbeck, M.; Züll, C. (2001): Klassifikation mit Clusteranalysen – grundlegende Techniken hierarchischer und k-means-Verfahren. Zusammenfassung, Zentrum für Umfragen, Methoden und Analysen, Mannheim (ZUMA How-to-Reihe ; 10).

Wistuba, M. (2001): Klimakenngrößen für den Straßenoberbau in Österreich, Wien, (Straßenforschung ; 507).

Wistuba, M. (2004): Oberbauverstärkungen von Asphaltstraßen, Wien, (Straßenforschung ; 546).

Tabelle 5: Häufigkeitsverteilungsprofile der Fahrbahnoberflächentemperaturen in Abhängigkeit von der Straßentemperaturzone aus Bild 16

Straßentemperaturzone 1												
θ_{FO} [°C]	ncT1	ncT2	ncT3	ncT4	ncT5	ncT6	ncT7	ncT8	ncT9	ncT10	ncT11	ncT12
-12,5		0,3										
-7,5	0,5	1,6										
-2,5	2,3	5,8	0,3									
2,5	6,2	11,6	0,8				0,2					
7,5	6,3	8,7	1,3	0,2	0,1	0,2	0,4	0,1				
12,5	3,7	6,1	2,5	0,4	0,2	0,3	0,6	0,3				
17,5	2,6	5,1	2,7	0,6	0,5	0,6	1,0	0,6				0,1
22,5	1,9	2,3	1,3	1,1	0,9	0,9	1,1	0,7			0,1	0,2
27,5	0,7	0,5	0,2	1,3	1,3	1,0	0,5	0,4	0,1	0,1	0,2	0,3
32,5	0,1	0,1		0,8	1,3	0,6	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2
37,5				0,3	0,7	0,2			0,3	0,5	0,4	
42,5					0,2					0,2	0,6	0,2
47,5										0,3		
Straßentemperaturzone 2												
θ_{FO} [°C]	ncT1	ncT2	ncT3	ncT4	ncT5	ncT6	ncT7	ncT8	ncT9	ncT10	ncT11	ncT12
-12,5		0,3										
-7,5	0,3	1,7	0,1									
-2,5	2,2	6,0	0,4				0,1					
2,5	5,2	8,9	0,9	0,1		0,1	0,2	0,1				
7,5	4,8	6,8	1,3	0,3	0,1	0,2	0,4	0,2				
12,5	3,2	4,7	1,9	0,5	0,3	0,3	0,5	0,4				0,1
17,5	2,2	3,6	2,8	0,6	0,5	0,5	0,7	0,8	0,1		0,1	0,1
22,5	1,4	2,5	2,7	0,8	0,6	0,6	0,8	1,2	0,1	0,1	0,2	0,2
27,5	0,8	1,1	1,3	1,2	0,8	0,7	0,6	1,3	0,2	0,2	0,3	0,4
32,5	0,2	0,2	0,2	1,1	1,0	0,6	0,3	0,7	0,3	0,3	0,4	0,5
37,5				0,6	0,8	0,3		0,1	0,4	0,5	0,6	0,4
42,5				0,2	0,4	0,1			0,5	0,8	0,7	0,1
47,5					0,1				0,4	1,9	0,6	
Straßentemperaturzone 3												
θ_{FO} [°C]	ncT1	ncT2	ncT3	ncT4	ncT5	ncT6	ncT7	ncT8	ncT9	ncT10	ncT11	ncT12
-12,5		0,5	0,1									
-7,5	0,4	1,9	0,1									
-2,5	2,1	5,7	0,4	0,1			0,1					
2,5	4,9	8,8	1,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1				
7,5	4,9	7,3	1,3	0,3	0,1	0,2	0,4	0,2				
12,5	3,5	5,3	2,0	0,5	0,3	0,4	0,5	0,4				0,1
17,5	2,4	4,1	2,9	0,6	0,5	0,5	0,8	0,7			0,1	0,1
22,5	1,6	2,6	2,4	0,9	0,7	0,7	0,9	1,1	0,1	0,1	0,1	0,2
27,5	0,9	0,9	0,8	1,2	1,0	0,8	0,6	1,1	0,1	0,2	0,3	0,4
32,5	0,2	0,1	0,1	1,0	1,1	0,6	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5
37,5				0,5	0,8	0,3		0,1	0,4	0,5	0,6	0,3
42,5				0,1	0,3	0,1			0,4	0,8	0,6	0,1
47,5					0,1				0,2	1,4	0,4	
Straßentemperaturzone 4												
θ_{FO} [°C]	ncT1	ncT2	ncT3	ncT4	ncT5	ncT6	ncT7	ncT8	ncT9	ncT10	ncT11	ncT12
-12,5	0,1	0,4										
-7,5	0,4	1,7	0,1									
-2,5	2,0	5,5	0,3									
2,5	5,3	9,9	0,8	0,1		0,1	0,1					
7,5	5,7	8,2	1,3	0,2	0,1	0,2	0,4	0,1				
12,5	3,7	5,6	2,1	0,4	0,2	0,3	0,5	0,3				
17,5	2,4	4,5	2,8	0,6	0,5	0,5	0,8	0,6				0,1
22,5	1,7	2,6	2,1	1,0	0,7	0,7	1,0	1,0	0,1		0,1	0,2
27,5	0,9	0,9	0,7	1,2	1,1	0,9	0,7	0,9	0,1	0,1	0,2	0,3
32,5	0,2	0,1	0,1	1,0	1,2	0,7	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
37,5				0,4	0,8	0,3			0,4	0,5	0,5	0,2
42,5				0,1	0,3	0,1			0,3	0,8	0,5	
47,5					0,1				0,1	1,0	0,3	
Straßentemperaturzone 5												
θ_{FO} [°C]	ncT1	ncT2	ncT3	ncT4	ncT5	ncT6	ncT7	ncT8	ncT9	ncT10	ncT11	ncT12
-12,5	0,1	0,5										
-7,5	0,6	2,0	0,1									
-2,5	2,4	6,0	0,4									
2,5	5,7	10,3	0,8	0,1		0,1	0,2					
7,5	5,7	8,3	1,3	0,2	0,1	0,2	0,4	0,1				
12,5	3,7	5,8	2,3	0,4	0,3	0,3	0,6	0,3				
17,5	2,5	4,7	2,8	0,7	0,5	0,5	0,9	0,6				0,1
22,5	1,8	2,4	1,7	1,0	0,8	0,8	1,0	0,9	0,1		0,1	0,2
27,5	0,8	0,7	0,4	1,2	1,2	0,9	0,6	0,6	0,1	0,1	0,2	0,3
32,5	0,2	0,1		0,9	1,2	0,6	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3
37,5				0,3	0,7	0,2			0,3	0,5	0,5	0,1
42,5				0,1	0,2				0,2	0,7	0,3	
47,5									0,1	0,7	0,1	
Straßentemperaturzone 6 (Gebirgszone)												
θ_{FO} [°C]	ncT1	ncT2	ncT3	ncT4	ncT5	ncT6	ncT7	ncT8	ncT9	ncT10	ncT11	ncT12
-12,5	0,6	2,5	0,2									
-7,5	2,9	6,5	0,5				0,1					
-2,5	5,3	10,0	0,9	0,1		0,1	0,3	0,1				
2,5	6,0	9,3	1,9	0,3	0,2	0,3	0,6	0,3				
7,5	4,4	6,9	2,6	0,5	0,3	0,6	0,9	0,6				0,1
12,5	2,9	3,6	2,3	0,8	0,7	0,8	1,0	0,9			0,1	0,2
17,5	1,3	1,1	1,0	1,2	1,1	0,9	0,6	0,8	0,1	0,1	0,2	0,3
22,5	0,3	0,2	0,2	1,1	1,2	0,6	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3
27,5				0,6	1,0	0,3			0,3	0,3	0,4	0,2
32,5				0,2	0,4	0,1			0,3	0,6	0,4	
37,5					0,1				0,2	0,6	0,2	
42,5									0,1	0,4	0,1	
47,5										0,2		