

# Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

ISBS - Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur  
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16592 N**

***Thermografie im Brückenbau -  
Machbarkeitsstudie für die zerstörungsfreie Überprüfung der Verbundwirkung zwischen  
Tragkonstruktion aus Beton und Fahrbahnbelägen aus Asphalt***

(Bewilligungszeitraum: 01.03.2011 - 30.06.2012)

der AiF-Forschungsvereinigung

Deutsches Asphaltinstitut e.V. - DAI

Braunschweig, 28. September 2012  
Ort, Datum

  
Univ.-Prof. DI Dr.techn. M. Wistuba  
Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Wistuba, M. und Lorenzl, H. 2012. Thermografie im Brückenbau - Machbarkeitsstudie für die zerstörungsfreie Überprüfung der Verbundwirkung zwischen Tragkonstruktion aus Beton und Fahrbahnbelägen aus Asphalt. Schlussbericht, 16592 N, Forschungsprojekt i. A. der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschung (AiF), Programm zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>4</b>
2.1	ZIEL DES FORSCHUNGSPROJEKTES .....	4
2.2	AUSGANGSSITUATION.....	4
2.3	ANGABEN ZUR PROJEKTABWICKLUNG UND PROJEKTSTRUKTUR .....	7
<b>3</b>	<b>AUSGEWÄHLTE GRUNDLAGEN ZUR ANWENDUNG DER THERMOGRAFIE</b> .....	<b>10</b>
3.1	MESSPRINZIP.....	10
3.2	STRAHLUNGSEINFLUSS.....	11
3.2.1	<i>Aktive und passive Thermografie</i> .....	11
3.2.2	<i>Strahlungsgesetze</i> .....	12
3.2.3	<i>Strahlung auf Asphaltoberflächen</i> .....	16
3.3	THERMOGRAFIEKAMERA .....	17
3.3.1	<i>Funktionsprinzip und Wahl der Farbskala</i> .....	17
3.3.2	<i>Marktübersicht</i> .....	20
3.3.3	<i>Spezifikation der im Projekt verwendeten Thermografiekamera</i> .....	26
<b>4</b>	<b>PARAMETERSTUDIE ZUM EINSATZ DER THERMOGRAFIE IM BRÜCKENBAU</b> .....	<b>28</b>
4.1	EINFLÜSSE AUS MESSWINKEL UND -ABSTAND.....	28
4.2	ZEITGLEICHE AUFNAHME VON WÄRME- UND DIGITALBILD.....	35
4.3	THERMOGRAFISCHE IDENTIFIKATION VON INHOMOGENITÄTEN IN ASPHALTPLATTEN .....	36
4.3.1	<i>Probplattenherstellung</i> .....	36
4.3.2	<i>Platten-Erwärmung mittels aktiver und passiver Thermografie</i> .....	38
4.3.2.1	<i>Aktive Thermografie</i> .....	38
4.3.2.2	<i>Passive Thermografie</i> .....	39
4.3.3	<i>Messergebnisse</i> .....	39
4.3.3.1	<i>Messabstand</i> .....	39
4.3.3.2	<i>Messergebnisse bei aktiver Thermografie</i> .....	40
4.3.3.3	<i>Messergebnisse bei passiver Thermografie</i> .....	42
4.4	SONSTIGE EINFLÜSSE.....	44
<b>5</b>	<b>ERPROBUNG AN AUSGEWÄHLTEN BAUMAßNAHMEN</b> .....	<b>48</b>
5.1	ENTWICKLUNG EINER MOBILEN MESSANLAGE .....	48
5.2	ERPROBUNG FÜR UNTERSCHIEDLICHE EINSATZZWECKE .....	49
5.2.1	<i>Beispiele 1 und 2: Prüfung der Abdichtungsschicht vor dem Asphalteinbau</i> .....	49
5.2.1.1	<i>Kontrolle der Bitumenschweißbahn auf einem Parkdeck</i> .....	49
5.2.1.2	<i>Kontrolle der Bitumenschweißbahn auf einer Brücke</i> .....	51
5.2.2	<i>Beispiel 3: Baubegleitende Qualitätskontrolle</i> .....	52
5.2.3	<i>Beispiel 4: Nachkontrolle des Asphaltbelags</i> .....	55
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSENDE HINWEISE UND ARBEITSANLEITUNG</b> .....	<b>58</b>
6.1	HINWEISE .....	58
6.2	ARBEITSANLEITUNG.....	58
<b>7</b>	<b>NUTZEN UND ERGEBNISTRANSFER</b> .....	<b>61</b>
7.1	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER NUTZEN FÜR KMU .....	61
7.2	ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT .....	62
<b>8</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>63</b>

# 1 Zusammenfassung

In diesem Forschungsprojekt wird der Einsatz eines thermografischen Messverfahrens im Brückenbau untersucht. Das entwickelte thermografische Messverfahren soll zukünftig beim Bau von bitumengebundenen Schichten auf Brückentragwerken aus Beton zum Einsatz kommen, um im Routinebetrieb zerstörungsfrei und berührungslos die Verbundwirkung der Asphaltsschicht auf der Betonunterlage zuverlässig zu beurteilen. Eventuelle Fehlstellen werden als thermische Inhomogenitäten detektiert. Als Inhomogenität wird eine Hohlstelle bezeichnet, entweder infolge von mangelndem Schichtenverbund oder infolge von Hohlräumen (Blasen, Rissen) in der Schicht.

Mit dem Forschungsprojekt werden die notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen geschaffen zur Beurteilung der Aussagekraft von thermografischen Messmethoden. Mittels Untersuchungen im Prüflabor werden die Randbedingungen zum Einsatz von Thermografie erarbeitet und eventuelle Fehlerquellen systematisch analysiert. Schließlich wird die Umsetzung in die Praxis anhand von ausgewählten Baumaßnahmen erprobt und mittels einer Arbeitsanleitung vorbereitet. **Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**

Als Ergebnis der im Rahmen des Projekts durchgeführten Messungen ist u. a. festzuhalten, dass

- die Randbedingungen der thermografischen Messung das Ergebnis maßgeblich beeinflussen können, insbesondere in Bezug auf Gerätetyp, Messabstand und -winkel und den Temperaturgradienten in der Straßenbefestigung, der sich aus der der Messung zeitlich vorangegangenen Bestrahlung durch die Sonne bzw. von Wärmestrahlern einstellt,
- die über Fehlstellen vorhandene Asphaltsschichtdicke die mögliche Detektion von Inhomogenitäten maßgeblich beeinflusst,
- von den untersuchten Varianten an Asphaltmischgutarten bzw. -sorten hohlraumreiche Varianten keine zuverlässige Aussage zu Inhomogenitäten zulassen, während ansonsten die Art bzw. Sorte das Messergebnis kaum beeinflusst,
- die Verwendung von oberflächenaufhellendem Abstreusplitt die Oberflächentemperatur um bis zu 15 Kelvin reduzieren kann, in der Folge sich in der Asphaltsschicht nur ein geringer Temperaturgradient einstellt und dadurch die Detektion von Inhomogenitäten erschwert,
- die thermografische Messmethode bei Bitumenschweißbahnen aufgrund ihrer geringen Dicke für die Überprüfung der Verklebung zur Unterlage besonders geeignet ist,
- die thermografische Messmethode sowohl punktuell, als auch flächendeckend nach Montage an einem Fahrzeug bei langsamer Überfahrt der zu prüfenden Fläche eingesetzt werden kann. So wurde im Rahmen des Projekts beispielhaft eine Autobahnbrücke mit einer Länge von etwa 1.000 m geprüft.

## **2 Einleitung**

### **2.1 Ziel des Forschungsprojektes**

Die vorliegende Studie setzt sich mit dem Einsatz von Thermografie im Verkehrswegebau auseinander. Zurzeit gibt es kein zuverlässiges zerstörungsfreies und berührungsloses Verfahren zur Überprüfung der Verbundwirkung von Schichten der Straßenkonstruktion. Das Projekt behandelt die Ausführungsqualität des Schichtenverbundes im Brückenbau.

Projektziel ist eine systematische Prüfung und Beurteilung, ob ein thermografisches Messverfahren im Brückenbau im Routinebetrieb anwendbar ist, um zerstörungsfrei und berührungslos die Verbundwirkung von Asphaltsschichten auf einer Betonunterlage zuverlässig zu beurteilen.

Dazu sind die notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen zu schaffen zur Beurteilung der Aussagekraft von thermografischen Messmethoden. Mittels systematischer Untersuchungen im Prüflabor sind eventuelle Fehlerquellen zu analysieren. Schließlich ist die Umsetzung in die Praxis anhand von ausgewählten Baumaßnahmen zu erproben und mittels einer Arbeitsanleitung vorzubereiten.

### **2.2 Ausgangssituation**

Im Allgemeinen sind Brückenbauwerke und der Witterung ausgesetzte Parkdeckflächen mit einer dauerhaften Abdichtung der Tragkonstruktion gegen Wassereinwirkung ausgestattet. Das Technische Regelwerk unterscheidet bei Brücken zwischen Tragwerken aus Beton, Stahl sowie Kombinationen aus beiden. Diese Studie befasst sich ausschließlich mit der Prüfung von bitumengebundenen Brückenbelägen auf Beton mit einer Dichtungsschicht aus einer Bitumen-Schweißbahn gemäß den Zusätzlichen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), (FGSV, 2003). In Teil 7, Abschnitt 1, Bild 7.1.1 dieses Regelwerks ist der Aufbau des Brückenbelages skizziert, siehe Abbildung 1.

Die Aufbringung des bitumengebundenen Brückenbelages erfolgt mittels definierter Schichten oder Lagen in vorgegebener Abfolge unter Beachtung streng formulierter Arbeitsanleitungen und definierter Anforderungen für das Arbeiten bei verträglichen Wetterbedingungen. Oft wird deshalb zur Vermeidung unvorhersehbarer Beeinträchtigungen im Schutze von klimageregelten Umhausungen gearbeitet. Folgende Arbeitsschritte sind dabei auszuführen:

- Behandlung der vorbereiteten Betonoberfläche des Tragwerks (Grundierung, ggf. Versiegelung oder Kratzspachtelung)

- Aufschweißen (Verklebung) der Bitumen-Schweißbahn (Dichtungsschicht) mit der behandelten Betonunterlage im Flämm-Schmelz-Klebeverfahren,
- Einbau der Schutzschicht,
- Einbau der Deckschicht,
- Absplitten der Gussasphaltoberfläche sowohl zur Aufhellung als auch zur Steigerung der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche.

Nach Abschluss der Arbeiten ist gefordert, dass alle Schichten und Lagen mit der jeweiligen Unterlage flächig und dauerhaft verbunden sind. Ziel ist ein ermüdungs- und verformungsresistenter, dauerhaft verklebter und wasserdichter Brückenbelag.

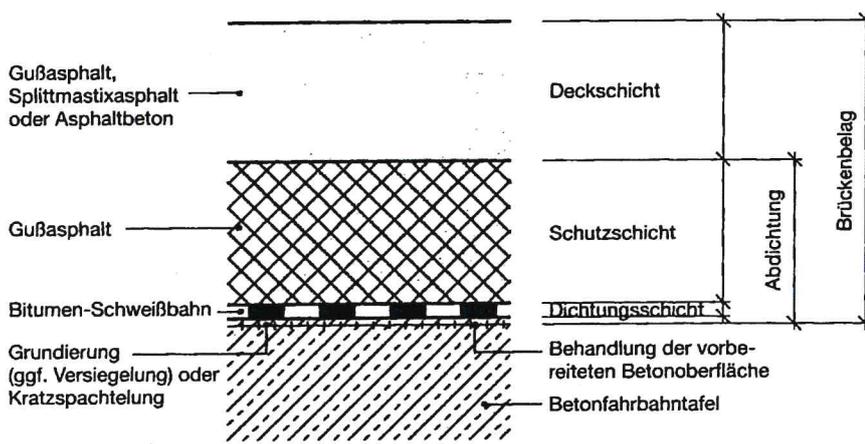


Abbildung 1. Beispiel eines bitumengebundenen Brückenbelages auf Beton (FGSV, 2003).

Da alle Schichten und/oder Lagen für sich alleine betrachtet und auch für die Wirkung des gesamten Systems ohne Mängel eingebaut sein müssen, kommt der flächendeckenden und – vor allem – zerstörungsfreien Kontrolle zur Überprüfung jeder einzelnen Arbeitsleistung noch vor Beginn der nachfolgenden Arbeitsschritte eine hohe Bedeutung zu. Gemäß ZTV-ING, Teil 7, Abschnitt 1, Kap. 6 mit den Anhängen B 1 bis B 4, sind im Rahmen der Eigenüberwachung spezielle Prüfungen durchzuführen. Diese betreffen:

- die äußeren Bedingungen und Taupunkttemperatur nach Teil 1 Abschnitt 3,
- die Oberflächenfeuchte der Unterlage (Betonfahrbahntafel) gemäß Nr. 5.3.1,
- die Rautiefe der vorbereiteten Betonoberfläche nach Nr. B 1,
- die Abreißfestigkeit der Betonoberfläche nach der Oberflächenvorbereitung gemäß Nr. B 2,
- die Oberfläche der einzelnen Schichten nach Augenschein auf Gleichmäßigkeit, Deckvermögen und Fehlstellen,
- die Abreißfestigkeit der behandelten Oberfläche nach Nr. B 2,
- die Hohlstellen- und Blasenfreiheit der Dichtungsschicht nach Nr. B 3,
- die Verklebung der Bitumen-Schweißbahn mit der Unterlage nach Nr. B 4 und
- die Hohlstellen- und Blasenfreiheit der Schutzschicht, z. B. durch Abklopfen.

Die durch die Prüfung zerstörten Bereiche sind instandzusetzen, da ansonsten die Gefahr eines Schadens besteht.

Für Art und Durchführung der Kontrollprüfungen gelten vergleichbare Vorgaben.

Kennzeichnend für die in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien festgeschriebene Prüfsystematik ist die Tatsache, dass in der Regel punktuell, d. h. nicht flächendeckend und/oder nicht zerstörungsfrei geprüft wird.

Der Einsatz eines thermografischen Verfahrens könnte Abhilfe schaffen, ausgehend von folgenden Überlegungen. Eine mangelnde Einbauqualität ist gekennzeichnet durch fehlenden oder unvollständigen Kontakt der übereinander eingebauten Schichten. Im Bereich des „gestörten Körperkontakts“ entsteht ein Hohlraum, der bewirkt, dass der Wärmedurchgang im Vergleich zu jener im Bereich voller Kontaktwirkung abweicht. Im Hohlraum baut sich ein „Wärmestau“ auf, der zu einer abweichenden Wärmebilanz an der Oberfläche führt. Eine an der Oberfläche messbare Temperaturdifferenz zwischen dem Bereich voller Kontaktwirkung und dem Bereich gestörter Kontaktwirkung ist die Folge. Diese Temperaturdifferenz an der Oberfläche soll mittels thermografischer Aufnahmeverfahren lokalisiert, visualisiert und exakt katastermäßig erfasst werden. Handelsübliche mobile thermografische Kameras mit hoher Auflösung innerhalb des relevanten Temperaturmessbereiches sind grundsätzlich für diesen Zweck geeignet.

Eventuelle Fehlstellen werden als thermische Inhomogenitäten detektiert. Als Inhomogenität wird eine Hohlstelle bezeichnet, entweder infolge von mangelndem Schichtenverbund oder infolge von Hohlräumen (Blasen, Rissen) in der Schicht.

Bei Inhomogenitäten in Form von Blasen kann zwischen heißen und kalten Blasen unterschieden werden. Heiße Blasen bilden sich beim Vorhandensein von Wasser während des Herstellungsprozess einer Asphaltbefestigung, kalte Blasen entstehen einige Zeit nach dem Einbau der Asphaltbefestigung durch Temperaturschwankungen bei wechselnden Witterungsverhältnissen.

Ebenso wird zwischen sichtbaren und unsichtbaren Blasen unterschieden. Sichtbare Blasen kennzeichnen sich durch eine Aufwölbung an der Straßenoberfläche und sind zum Beispiel durch das Überrollen mit einem Metallstab feststellbar. Hier bringt die Thermografie nur einen geringen Vorteil gegenüber der visuellen Betrachtung. Unsichtbare Blasen - auch Blasenkeime genannt - sind nur mittels Thermografie aufgrund des Wärmekontrasts infolge eines Wärmestaus zu erkennen. Beide Blasentypen bewirken aufgrund eines höheren Wärmeleitwiderstandes - wegen der eingeschlossenen Luft bzw. des Wassers - gegenüber dem schadlosen Material erhöhte Oberflächentemperaturen. In Abbildung 2 sind auf dem Thermogramm kreisförmige bis ovale Stellen mit erhöhter Temperatur zu erkennen. Diese mit bloßem Auge nicht wahrnehmbaren Inhomogenitäten sind Blasenkeime.

Der Vorteil der Thermografie liegt somit in der Möglichkeit der zerstörungsfreien Lokalisierung einer Fehlstelle, die für den Betrachter mit bloßem Auge nicht sichtbar ist. Exakte Temperaturwerte der Asphaltbefestigung werden für das Identifizieren von Blasen meist nicht benötigt, ein erkennbarer Temperaturunterschied zur Umgebung reicht aus. In Abbildung 2 werden jedoch auch Probleme der Thermografie deutlich. Unterschiedliche Materialien - in diesem Fall: Straßenmarkierung, Randsteine und die Bitumeneinfassung der Flickstelle - besitzen unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten, diese dürfen nicht fälschlicherweise als Fehlstelle interpretiert werden. Zur Vermeidung einer Fehlinterpretation sollte stets eine Foto- oder Videoaufnahme zum späteren Abgleich durchgeführt werden. Der Einfluss von Schatten ist an der linken unteren Seite des Thermogrammes in Abbildung 2 durch kältere Flächen deutlich erkennbar.

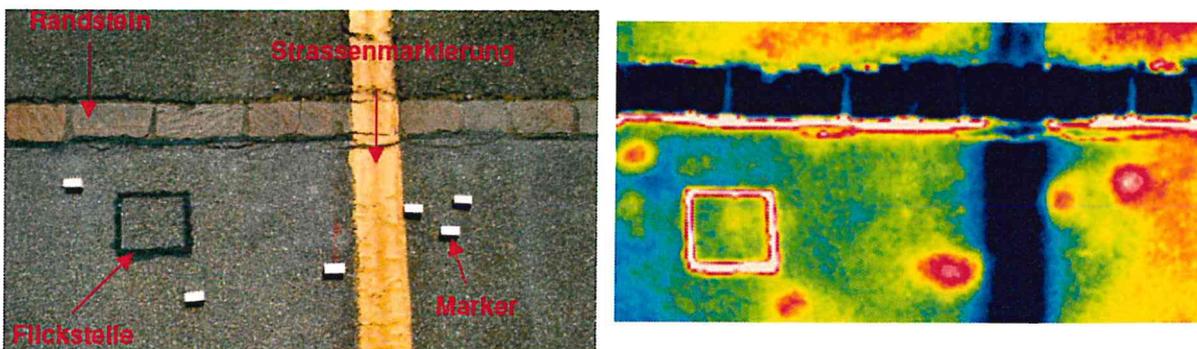


Abbildung 2. Blasen auf einem untersuchten Straßenabschnitt. Die Marker dienen zur Markierung der Fehlstellen (Stimolo, 2001).

### 2.3 Angaben zur Projektabwicklung und Projektstruktur

Auf Antrag des Deutschen Asphaltinstituts (DAI e.V.) wurde ein Forschungsprojekt zum genannten Thema zur Aufnahme in das gemeinsame Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMW) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) vorgeschlagen.

Diesem Antrag wurde am 11.03.2011 stattgegeben, so dass im Zeitraum vom 01.03.2011 bis zum 30.06.2012 das Forschungsprojekt am Institut für Straßenwesen (ISBS) der Technischen Universität Braunschweig bearbeitet werden konnte.

Das IGF-Vorhaben 16592 N des Deutschen Asphaltinstituts (DAI e.V.) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Es wurde ein projektbegleitender Ausschuss eingesetzt, bestehend aus Vertretern der DEUTAG GmbH & Co. KG, der Hastrabau-Wegener GmbH & Co. KG, der Hofmeister Gussasphalt GmbH & Co. KG, der Karl Röfe GmbH & Co. KG, der Schäfer

Consult, des Deutschen Asphaltverbands e.V. und des Instituts für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover. Allen Mitgliedern wird herzlich gedankt für aktive Teilnahme, Anregungen und/oder Ermöglichung zur Erprobung des thermografischen Messverfahrens anhand von realen Bauvorhaben.

Der Projektbericht ist gemäß Forschungsauftrag in folgende drei Hauptteile gegliedert:

- **Teil 1:** Darstellung der physikalischen Grundlagen, Überprüfung der routinemäßigen Anwendbarkeit und Aussagekraft des thermografischen Verfahrens auf wissenschaftlicher Grundlage, Laborversuche zur Identifikation von Einflussgrößen (Kapitel 3 und 4),
- **Teil 2:** Begleitung ausgewählter Baumaßnahmen zur Abdichtung von Brücken, Ableitung von Empfehlungen für den Einsatz von thermografischen Messverfahren (Kapitel 5),
- **Teil 3:** Empfehlungen zur Umsetzung in die Praxis anhand einer Arbeitsanleitung (Kapitel 6).

**Teil 1** enthält die systematische Analyse der routinemäßigen Anwendbarkeit des thermografischen Verfahrens zur Kontrolle der Homogenität und Verbundwirkung von Brückenaufbauten sowie die kritische Aufbereitung möglicher Fehlanwendungen und Fehlinterpretationen der Messergebnisse. Es werden Aufnahme- und Messverfahren identifiziert, die für den speziellen Einsatz zur Untersuchung von Asphaltoberflächen geeignet sind und es wird ein Marktüberblick zu Geräten und Auswertesystemen gegeben. Das berücksichtigte Leistungsspektrum umfasst u. a. Optik, Messgenauigkeit, thermische Empfindlichkeit, Temperatureinsatzbereich, Geräteausführung/-ausstattung, Schnittstellen und softwareseitige Anforderungen. Das im Rahmen des Projekts angewandte System wird näher vorgestellt. Mit Hilfe dieses Geräts wird eine Parameterstudie zum Einsatz der Thermografie unter Laborbedingungen realisiert. Dazu werden anhand von im Labor hergestellten Asphaltprobepplatten (unter Variation der Plattengeometrien und der thermischen Eigenschaften) alle Einflüsse untersucht, die die aufgenommene Thermografieaufnahme mitbestimmen können. Dies betrifft zunächst die Analyse der thermodynamischen Eigenschaften der für den Einbau von Abdichtungssystemen an Brücken eingesetzten Baustoffe. Auch werden alle in der Praxis mögliche Oberflächenbeschaffenheiten wie Mikro- und Makrorauheit, Reflexionsvermögen und Farbtönungen (insbesondere die Differenzierung infolge des scharf abgegrenzten Übergangs zu den extrem hellen Farbtönen von Fahrbahnmarkierungen) berücksichtigt. Zum Zwecke der Plausibilitätskontrolle und vollständigen Visualisierung der geprüften Flächen wird jede Thermografieaufnahme ergänzt durch ein digitales Echtfarbenbild zum gleichen Zeitpunkt und vom gleichen Aufnahme-standpunkt aus. Dieses systematische Vorgehen wird durch ein in der Kamera integriertes System realisiert, das synchron sowohl eine Thermografieaufnahme als auch

ein normales Farbbild registrieren kann. Für die Aufnahmen vor Ort werden die durch die Brennweite des Kameraobjektivs bestimmten geometrischen und optischen Randbedingungen beachtet, wie z. B. die Brennweite des Objektivs, die Abmessungen und die Farbtonung der zu prüfenden Fläche, der Winkel zwischen der Bildachse und abgebildeter Oberfläche (schleifender Schnitt), der Ausgleich der Bildverzerrung bei nicht orthogonaler Aufnahme sowie der Parallaxenausgleich zwischen Echtbild und Thermografieaufnahme bei nicht identischer Bildachse. Alle diese Parameter bestimmen die pro Pixel erfasste Flächeneinheit und die dem jeweiligen Bildpunkt zugeordnete Temperatur. Für alle aus der Bildauswertung getroffenen Aussagen werden - auf der Basis eindeutiger, physikalischer Zusammenhänge - Kriterien zur ziel führenden Überprüfung mittels Plausibilitätskontrollen erarbeitet.

Im **Teil 2** werden mittels Begleitung und Dokumentation repräsentativer Baustellenabläufe die Möglichkeiten und die Grenzen des Praxiseinsatzes des vorgeschlagenen Prüf- und Dokumentationssystems aufgezeigt. So werden die Erfahrungen im Umgang mit dem Messsystem unter Baustellenbedingungen dokumentiert. Thermografieaufnahmen werden sowohl punktuell (Begehung) als auch flächendeckend (Befahrung), vor, während und nach dem Einbau von bitumengebundenen Schichten auf Betonkonstruktionen von Brücken und Parkdecks ausgeführt.

Im **Teil 3** wird eine Arbeitsanleitung ausgearbeitet, die Anforderungen an die apparative Ausrüstung, deren Einsatzbedingungen und -grenzen sowie die erreichbare Präzision der Ergebnisse unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen definiert. Im Speziellen enthält die Arbeitsanleitung:

- Zweck und Anwendungsbereich,
- Beschreibung des Verfahrens und Vorgehensweise,
- Geräte,
- Vorbereitung der Messungen (Aufnahmen),
- Durchführung der Messungen (Aufnahmen),
- Auswertung, Plausibilitätskontrollen und Angabe der Ergebnisse,
- Literaturhinweise,
- Anhänge (wissenschaftliche Grundlagen, Ausführungsbeispiele).

Die Arbeitsanleitung soll sicherstellen, dass alle Anwender mit vergleichbarer Geräteausstattung und nach gleichen Vorgaben arbeiten. So wird die Erstellung eines allgemeingültigen Bewertungshintergrundes möglich, der dann in das Technische Regelwerk (insbesondere in den ZTV-BEL-B Teil 1 und TP-BEL-B Teil 1) als Stand der Technik Aufnahme finden kann.

### 3 Ausgewählte Grundlagen zur Anwendung der Thermografie

Thermografie (auch Thermographie, Infrarotthermographie), wie sie hier eingesetzt wird, ist ein kontaktloses bildgebendes Verfahren bei dem Wärmestrahlung (Infrarotlicht) in elektrische Signale umgewandelt und visualisiert wird. Die Grundlagen zur Anwendung der Thermografie im Brücken-/Straßenbau werden im Folgenden erläutert. Darüber hinaus wird ein Marktüberblick zu Geräten und Auswertesystemen gegeben und das im Weiteren verwendete Messsystem wird näher vorgestellt.

#### 3.1 Messprinzip

Das Messprinzip der Thermografie beruht auf dem physikalischen Effekt, dass jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes von  $-273,15^{\circ}\text{C}$ , dies entspricht  $0\text{ K}$ , eine Eigenstrahlung aussendet. Grund dafür sind die in jedem Körper stattfindenden Molekülbewegungen, die nach ihrem Entdecker Robert Brown auch Brownsche Bewegungen genannt werden. Die Intensität dieser mechanischen Bewegungen ist abhängig von der Temperatur des Körpers. Zugleich treten Ladungsbewegungen auf, so dass der Körper Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung aussendet, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt und sich treu den optischen Gesetzen verhält (Fouad et al., 2009). Diese Strahlung ist für das menschliche Auge nicht sichtbar und dem infraroten Wellenbereich zuzuordnen.

Das Prinzip einer Thermografiekamera besteht darin, die Intensität der abgestrahlten Wärmestrahlung eines Körpers berührungsfrei zu messen und daraus die Temperatur des Körpers zu bestimmen. In Abbildung 3 ist die Einordnung der Spektralbereiche dargestellt.

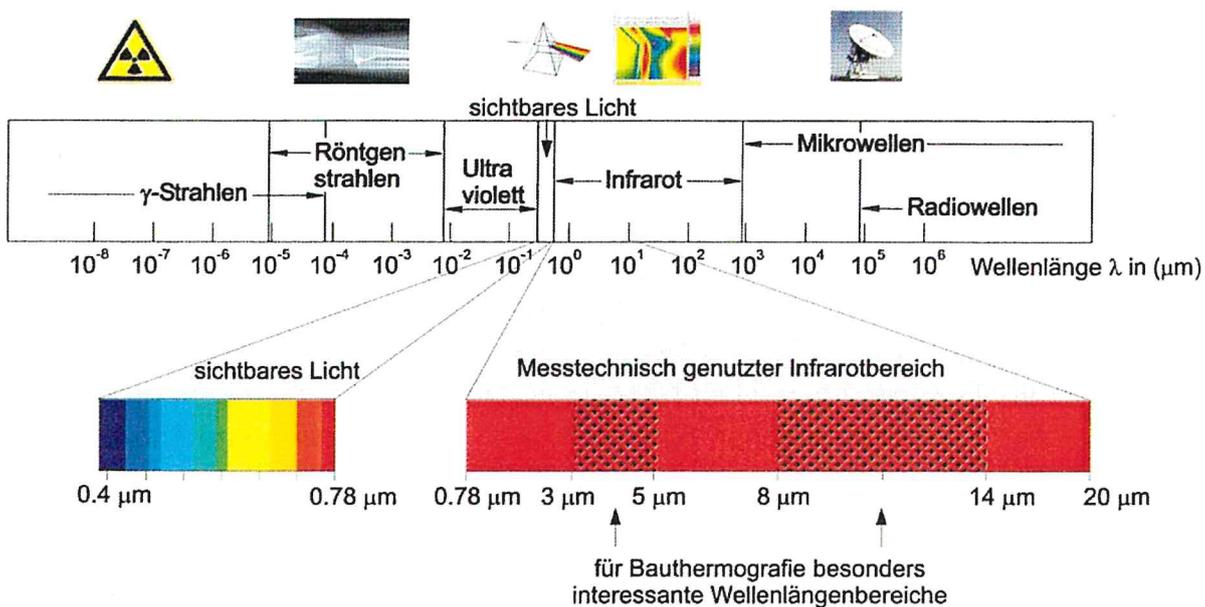


Abbildung 3. Elektromagnetisches Spektrum (Fouad et al., 2009).

Der Bereich des für das menschliche Auge sichtbaren Lichts liegt zwischen den Wellenbereichen  $\lambda = 0,38 \mu\text{m}$  und  $0,78 \mu\text{m}$ . Farblich wird die Strahlung bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 0,38$  blau, bei  $\lambda = 0,55$  grün, bei  $\lambda = 0,60$  gelb und bei  $\lambda = 0,78$  als rot wahrgenommen. Wellenlängen unter- bzw. oberhalb des genannten Bereiches sind für das menschliche Auge nicht sichtbar.

Der Wellenlängenbereich der infraroten Strahlung erstreckt sich von  $\lambda = 0,78 \mu\text{m}$  bis ungefähr  $1000 \mu\text{m}$ . Für die Thermografie besonders geeignete Wellenlängenbereiche befinden sich im mittleren bzw. langwelligen Infrarotbereich zwischen  $\lambda = 3 \mu\text{m}$  bis  $5 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 8 \mu\text{m}$  bis  $14 \mu\text{m}$ . Bereiche der nahen und fernen Infrarotstrahlung haben keine Bedeutung in der thermografischen Messtechnik. Bei der Messung wird mittels Kameraobjektiv der Messbereich auf ein Mikrobolometer-Array mit definierter Anzahl von Bildpunkten abgebildet. Die Brennweite des Objektivs bestimmt Bildfeld und Auflösung/Messfleckgröße (FGSV, 1999). Die elektrischen Signale des Detektor-Arrays lassen sich durch die interne Elektronik zu einer Thermografieaufnahme (Falschfarbenbild) weiterverarbeiten, das Objekt-Temperaturen von z. B.  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $+1200 \text{ }^\circ\text{C}$  mit hoher Präzision auf ca.  $0,2 \text{ K}$  genau erfassen und wiedergeben kann.

## 3.2 Strahlungseinfluss

### 3.2.1 Aktive und passive Thermografie

Grundlegend wird zwischen der aktiven und der passiven Thermografie unterschieden. Für die Anwendung der Thermografie im Straßenbau sind beide Methoden von Bedeutung.

Bei der aktiven Thermografie (Wärmefluss-Thermografie) wird die Oberfläche des Messobjektes durch Einsatz einer künstlichen Wärmequelle – beispielsweise eines Infrarotstrahlers – erwärmt. Der Wärmefluss im betrachteten Objekt, also die zeitabhängige Wärmeverteilung im Körperinneren, wird in Verbindung mit unterschiedlichen thermischen Anregungsarten gezielt beeinflusst und mittels thermografischer Aufnahme verfolgt. Inhomogenitäten im Material mit geringerer Wärmeleitfähigkeit behindern den Wärmetransport, die Oberfläche bleibt über diesen Bereichen länger warm. Mittels Wärmebild werden Temperaturunterschiede sichtbar und geben berührungslos und zerstörungsfrei Hinweise auf strukturelle Schwächen wie z. B. mangelnder Haftverbund, Risse, Blasen und Hohlräume/Lufteinschlüsse.

Bei der passiven Thermografie (oder Abkühlungsthermografie) wird die Temperaturabnahme eines bereits erwärmten Objekts gemessen. Es wird somit die Eigenwärme des Messobjektes gemessen. Das passive Verfahren nutzt den vorhandenen Temperaturgradienten, um diesen mit Hilfe eines im Infrarot-Wellenlängenbereich empfindlichen Kamerasystems in ein sichtbares Bild umzuwandeln (Huschek et al., 2008). Als Wärmequelle für Fahrbahnoberflächen dient die Sonne bzw. die Temperatur der Umgebung.

### 3.2.2 Strahlungsgesetze

Das Ergebnis der thermografischen Messung hängt von der elektromagnetischen Strahlungsintensität des Messobjektes ab. Ein schwarzer Körper ist ein idealer Strahlungskörper. Er besitzt von allen Körpern gleicher Temperatur die größtmögliche Intensität der abgegebenen Strahlung. Bestandteil eines schwarzen Körpers ist ein rußgeschwärtzter, kugelförmiger Hohlraum, welcher vorne mit einer kleinen Öffnung versehen ist (vgl. Abbildung 4). Aufgrund von undurchlässigen Außenwänden steht der schwarze Körper in einem so genannten thermischen Gleichgewicht (Schuster, 1999), das heißt die Wandtemperatur ist konstant und nicht mit der Zeit veränderlich. Ein Strahlungsaustausch mit der Umgebung kann somit nur über die kleine Öffnung stattfinden. Folglich muss die Temperatur der emittierten Strahlung der von außen und von der rußgeschwärtzten Innenwand absorbierten Strahlung entsprechen.

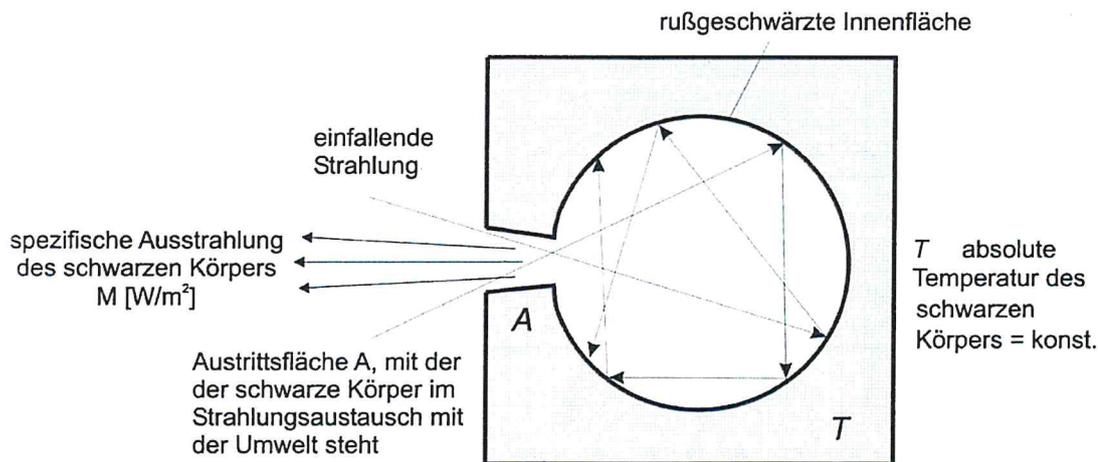


Abbildung 4. Modellvorstellung eines schwarzen Körpers (Fouad et al., 2009).

Stefan und Boltzmann ermittelten Ende des 19. Jahrhunderts, dass die Eigenstrahlung  $M$  des schwarzen Körpers durch die kleine Öffnung lediglich von seiner Innentemperatur abhängig ist:

$$M = \sigma \cdot T^4 = C_s \cdot (T/100)^4 \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad \text{Gl. 1}$$

mit:  $\sigma$  = Stefan – Boltzmannsche Konstante =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ,  
 $C_s$  = Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers =  $5,67 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ,  
 $T$  = absolute Temperatur  $T$  [K] =  $273,15 + \theta$  [°C].

Die über das gesamte Wellenlängenspektrum summierte Energie wird mit der in Gl. 1 beschriebenen Eigenstrahlung  $M$  wiedergegeben. Der Wert der Eigenstrahlung des schwarzen Körpers für eine vorgegebene Wellenlänge ist mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes (Gl. 2, Abbildung 5) bestimmbar.

$$M_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1} \quad [\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})] \quad \text{Gl. 2}$$

mit:  $C_1 = 1. \text{ Strahlungskonstante} = 3,7418 \cdot 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$ ,  
 $C_2 = 2. \text{ Strahlungskonstante} = 1,4388 \cdot 10^4 \text{ K} \cdot \mu\text{m}$ ,  
 $T = \text{absolute Temperatur } T \text{ [K]} = 273,15 + \theta \text{ [}^\circ\text{C]}$ ,  
 $\lambda = \text{Wellenlänge } [\mu\text{m}]$ .

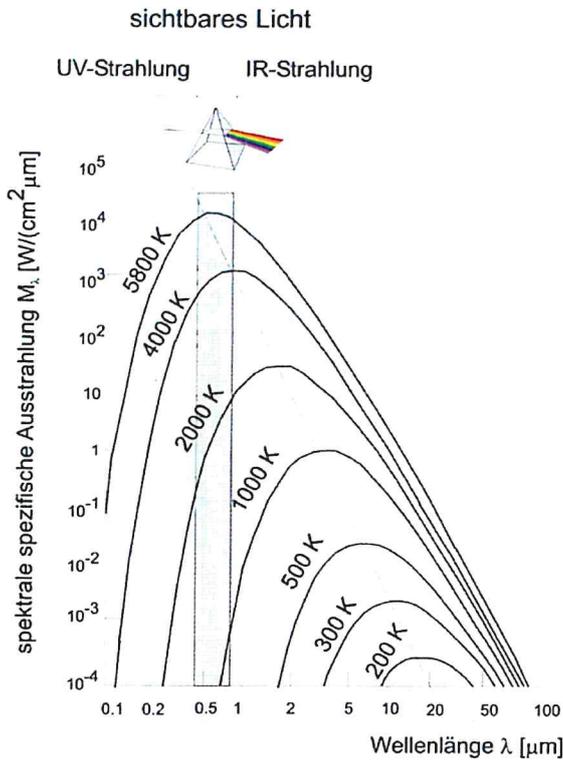


Abbildung 5. Plancksches Strahlungsgesetz (Fouad et al., 2009).

In Abbildung 5 sind verschiedene absolute Strahlungstemperaturen dargestellt. Die Kurvenformen sind zueinander ähnlich, schneiden sich nicht. Zugleich ist der für das menschliche Auge sichtbare Bereich eingezeichnet. Die Eigenstrahlung der Sonne ( $T = 5500 \text{ K}$ ) in diesem Bereich ist im Vergleich zum langwelligen Infrarotbereich (8 bis  $14 \mu\text{m}$ ) etwa 400-fach so groß. Dies stellt eine besondere Herausforderung für die Technik von thermografischen Geräten dar, weil diese mit einer geringen vorhandenen Energie auskommen müssen (Schuster, 1999). Die Abbildung 5 zeigt, dass lediglich sehr heiße Körper ( $T \geq 900 \text{ K}$ ) in einem Wellenlängenbereich strahlen, der für den Menschen sichtbar ist. Ab dieser Temperatur beginnt beispielsweise Stahl erst für das menschliche Auge zu glühen, wobei der Stahl schon bei wesentlich geringeren Temperaturen energiereiche Strahlung abgibt (die der Mensch als Wärme wahrnehmen kann). Die in Abbildung 5 gestrichelt dargestellte Linie beschreibt die jeweiligen spezifischen Strahlungsmaxima. Bei einer steigenden absoluten Strahlungstemperatur ist erkennbar, dass sich das spezifische Strahlungsmaximum zu immer kürzer werdenden Wellenlängen verschiebt (Fouad et al., 2009). Die Berechnung der Wellenlänge für das Ausstrahlungsmaximum eines Körpers kann mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz (Gl. 3) berechnet werden:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \text{ K} \cdot \mu\text{m}}{T} \quad [\mu\text{m}] \quad \text{Gl. 3}$$

mit:  $\lambda_{\max}$  = Wellenlänge [ $\mu\text{m}$ ], bei der das Ausstrahlungsmaximum erreicht ist,  
 $T$  = absolute Temperatur  $T$  [K] =  $273,15 + \theta$  [ $^{\circ}\text{C}$ ].

In der Bauthermografie ist im Allgemeinen von einem Temperaturbereich von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$  auszugehen. Asphaltstraßenoberflächen können sich im Sommer aufgrund von Sonneneinstrahlung stark aufheizen, so dass Temperaturen von  $+50^{\circ}\text{C}$  erreicht werden. Das Ausstrahlungsmaximum liegt damit in einem Bereich von etwa  $9,0 \mu\text{m}$  bis  $11,4 \mu\text{m}$ . Diese Temperaturbereiche liegen ebenfalls im langwelligen Infrarotbereich.

Treffen elektromagnetische Strahlen auf einen realen Körper, werden Strahlungsanteile absorbiert und in Wärme umgewandelt oder reflektiert. Handelt es sich um einen durchlässigen Körper, kann auch ein Teil der Strahlung transmittiert werden. Der Zusammenhang ist in Abbildung 6 dargestellt und wird mit Gl. 4 beschrieben.

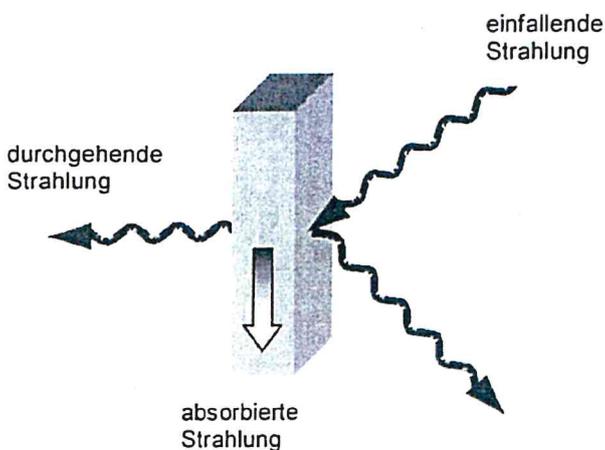


Abbildung 6. Absorption, Reflexion und Transmission (Busse, 2000).

$$M = A + R + T \quad \text{Gl. 4}$$

mit:  $M$  = einfallende Strahlung,  
 $A$  = absorbierende Strahlung,  
 $R$  = reflektierende Strahlung,  
 $T$  = transmittierte (durchgehende) Strahlung.

Aus Gl. 4 lässt sich Gl. 5 formulieren:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad \text{Gl. 5}$$

mit:  $\alpha$  = Absorptionsgrad als Funktion der Wellenlänge,  
 $\rho$  = Reflexionsgrad als Funktion der Wellenlänge,  
 $\tau$  = Transmissionsgrad des Körpers als Funktion der Wellenlänge.

Bei einem schwarzen Körper wird die auftreffende Strahlung vollständig absorbiert. Reale Körper hingegen emittieren weniger Strahlung als ein schwarzer Körper. Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz (Gl. 6) stellt einen Zusammenhang zwischen realen und dem schwarzen Körper her (Fouad et al., 2009):

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_{\text{real}}}{M_{\text{schw. Körper}}} = \frac{\alpha}{\alpha_s} \quad \text{Gl. 6}$$

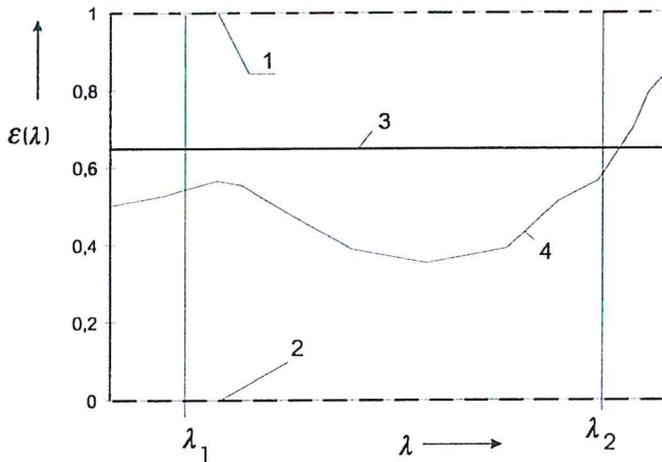
mit:  $\varepsilon$  = Emissionsgrad eines realen Körpers,  
 $M_{\text{real}}$  = Strahlungsemission des realen Körpers,  
 $M_{\text{schw. Körper}}$  = Strahlungsemission des schwarzen Körpers,  
 $\alpha$  = Absorptionsgrad eines realen Körpers,  
 $\alpha_s$  = Absorptionsgrad des schwarzen Körpers.

Das Kirchhoffsche Gesetz (Gl. 6) besagt für einen Körper, der sich im thermischen Gleichgewicht befindet, dass der Absorptionsgrad  $\alpha(\lambda)$  gleich dem Emissionsgrad  $\varepsilon(\lambda)$  ist (Schuster, 1999). Um die Eigenstrahlung eines realen Körpers und damit seine exakte Temperatur bestimmen zu können, wird der Emissionsgrad  $\varepsilon$  des realen Körpers benötigt, da die spezifische Ausstrahlung eines jeden realen Körpers unter jener des schwarzen Körpers liegt. Der Emissionsgrad ist vom Einfluss nachfolgend genannter Parameter abhängig (Fouad et al., 2009):

- Materialzusammensetzung,
- Temperatur,
- Abstrahlwinkel (Winkel zur Horizontalen),
- Oberflächenqualität,
- Wellenlänge.

Auf Grundlage der in Gl. 5 dargestellten Zusammenhänge zeigt Abbildung 7 charakteristische Funktionen der Wellenlänge für den Emissionsgrad. Ist der Emissionsgrad über die Wellenlänge nicht konstant, liegt ein selektiver Strahler (4) vor. Bei einem grauen Strahler (3) ist der Emissionsgrad über einen Wellenlängenbereich konstant.

Grenzfälle stellen der schwarze Strahler mit dem Emissionsgrad von  $\varepsilon = 1$  und ein idealer Spiegel mit dem Emissionsgrad  $\varepsilon = 0$  dar. Für die unterschiedlichen Asphaltarten ergeben sich laut den Angaben der Hersteller von Thermografiekameras Emissionsgrade zwischen etwa  $\varepsilon = 0,90$  bis  $\varepsilon = 0,99$ .



1...schwarzer Strahler  $\varepsilon(\lambda) = 1$ , 2...idealer Spiegel ( $\rho = 1$ ) und ideales Fenster ( $\tau = 1$ ),  
 3...grauer Strahler  $\varepsilon(\lambda) = \text{konst.}$ , 4...selektiver Strahler.

Abbildung 7. Idealisierte Emissionsgradverläufe über der Wellenlänge.

### 3.2.3 Strahlung auf Asphaltoberflächen

Die Globalstrahlung gibt die Gesamtmenge der elektromagnetischen Sonnenstrahlung an, die auf die Erdoberfläche trifft. Dabei wird zwischen der *Direktstrahlung*, die auf dem kürzesten Weg von der Sonne zur Erde gelangt, und der *Diffusstrahlung* unterschieden, die nach Streuung an Partikeln in der Atmosphäre (Wasserdampf, Staub, Pollen) die Erde erreicht. Die Intensität der Globalstrahlung hängt von der Aktivität der Sonne, dem Vorhandensein von Partikeln in der Atmosphäre und dem Stand der Erde - in Bezug auf Jahres- und Tageszeiten - zur Sonne ab. Die Globalstrahlung ist demnach wetter- und tageszeitbedingt starken Schwankungen unterworfen. Auch hängt sie - vor allem bei der Direktstrahlung - von ihrem Einfallswinkel ab, der sich durch die Stellung der Erdachse und durch die Rotation der Erde stetig verändert. Sie ist deshalb in der Regel mittags intensiver als morgens und abends. Jahreszeitlich gesehen ist sie im Sommer stärker als zu den anderen Jahreszeiten. In Mitteleuropa erreicht die Globalstrahlung mittags an einem Sommertag bei wolkenlosem Himmel circa  $900 \text{ W/m}^2$ . Bei trübem, wolkigem Wetter besteht die Globalstrahlung nur aus dem Anteil der Diffusstrahlung und sinkt somit auf Werte um bzw. sogar unter  $100 \text{ W/m}^2$ .

Die Auswirkung der Globalstrahlung ermöglicht überhaupt erst die thermografische Betrachtung von Asphaltoberflächen. Durch sie wird der Asphalt mit Strahlungsenergie versorgt (Abbildung 8). Asphalt ist physikalisch betrachtet ein Konglomerat von organischen und anorganischen Stoffen, das aufgrund seiner Beschaffenheit nicht selbst Wärme erzeugen kann. Die Globalstrahlung ist der entscheidende Faktor für die Qualität von thermografischen Aufnahmen an Asphaltoberflächen. Nur bei ausreichender Intensität der Globalstrahlung sind aussagekräftige Aufnahmen zu erwarten.

Neben der Globalstrahlung tragen weitere Wärmeströme zur Energiebilanz von Straßenoberflächen bei, siehe Abbildung 8.

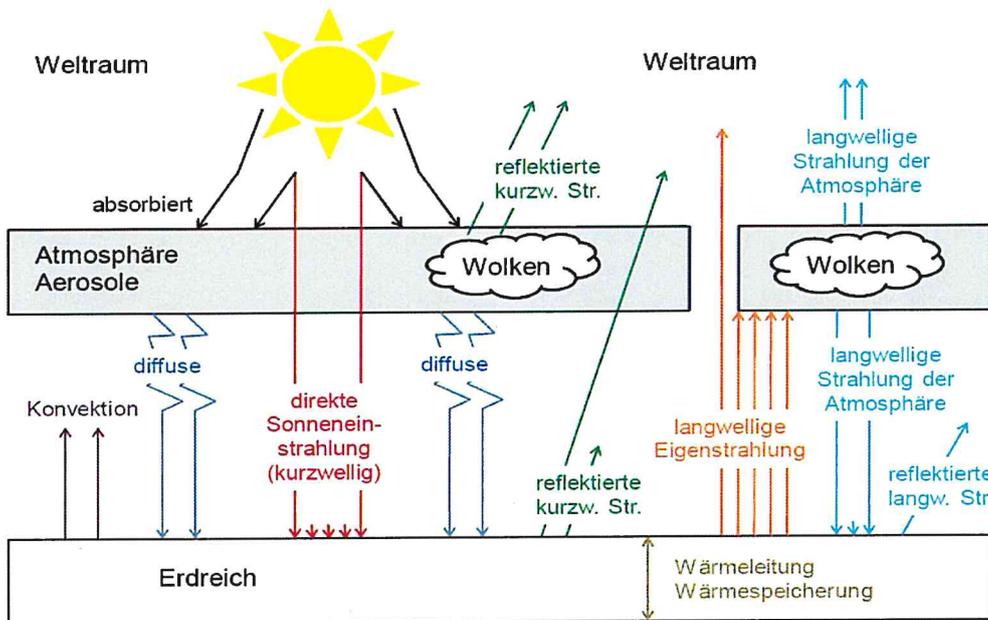


Abbildung 8. Schematische Darstellung der Wärmetransportvorgänge an der Fahrbahnoberfläche (Müller et al., 2007).

Die Bilanzgleichung des Wärmehaushalts an einer irdischen Oberfläche ergibt sich zu:

$$Q + B + L + V = 0 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \text{Gl. 7]}$$

- mit: Q = Strahlungsbilanz,  
 B = Bodenwärmestrom,  
 L = Wärmeübergang zur Luft,  
 V = Wärmefluss infolge Verdunstung und Kondensation von Wasser.

Die Strahlungsbilanz Q umfasst dabei alle betrachteten Strahlungsgewinne und Strahlungsverluste. Laut Pohlmann (1989) kann an Asphaltoberflächen der Wärmefluss infolge Verdunstung und Kondensation von Wasser vernachlässigt werden. Eine Parameterisierung der Energieströme für Straßenkonstruktionen findet sich bei Wistuba et al. (2001) bzw. bei Wistuba (2003).

### 3.3 Thermografiekamera

#### 3.3.1 Funktionsprinzip und Wahl der Farbskala

Eine Thermografiekamera (oder Wärmebild-, oder Infrarot- bzw. IR-Kamera) ist ähnlich wie eine Digitalkamera aufgebaut, siehe Tabelle 1 (Wagner, 2011). Das Messobjekt wird durch eine Optik auf eine Matrix von Detektoren abgebildet (nicht wie beim

Strahlungsthermometer auf einen Einzeldetektor). Diese Detektoren wandeln die elektromagnetische Strahlung in elektrische Signale um, die dann (im Gehirn oder in einem Computer) weiterverarbeitet werden können.

**Tabelle 1: Vergleich zwischen dem Auge, einer Digitalkamera und einer Thermografiekamera (nach Wagner, 2011)**

	<b>Auge</b>	<b>Video/Digitalkamera</b>	<b>Thermografiekamera</b>
Wellenlänge	0,38 bis 0,78 $\mu\text{m}$	0,2 bis 0,9 $\mu\text{m}$	8 bis 12 $\mu\text{m}$
Optik	Augenlinse	Glaslinsenobjektive mit Autofokus/Zoom	Germaniumlinsen Festobjektive
Sensoren zur Umwandlung von Licht in elektrische Signale	organisch Bildpunkte Zapfen: 6 bis 7 Mio., Stäbchen: 75 bis 100 Mio.	Silizium-Chip Bildpunkte 2.592 x 1.944 = 5 Megapixel	Sondermaterialien Bildpunkte 640 x 480 = 307.200 Pixel 320 x 240 = 76.800 Pixel 160 x 120 = 19.200 Pixel
Bildverarbeitung	Großhirn	Computer Bildformate: jpg, tif u. a.	Computer spezielle Bildformate mit radiometrischen Daten 14 bzw. 16 bit
Anzeige	Bild im Sehzentrum	Display	Display
Bildverarbeitung	Bildererkennung geometrische Parameter	Bildererkennung geometrische Parameter	Temperatur Strukturen
Besonderheiten	-	-	Alte Kameras besitzen eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff.
Preis	-	200 bis 2.000 €	15.000 bis 45.000 € 3.000 bis 7.500 €

Folgende grundsätzliche Parameter sollten bei der Auswahl der Thermografiekamera vor der Kaufentscheidung beachtet werden. Es empfiehlt sich die Ausleihe und das Testen anhand realer Anwendungsfälle.

- **Objektiv:**
  - Normalobjektiv: Bildfeld ca. 20 bis 25° für normale Aufnahmen,
  - Weitwinkelobjektiv: Bildfeld ca. 40 bis 45° für Aufnahmen aus kurzer Distanz,
  - Teleobjektiv: Bildfeld ca. 10 bis 15° für Detailaufnahmen,
- **Temperaturbereich:** bis 110 °C,
- **Software:**

- Berichtssoftware kompatibel zu Microsoft-Office für die Standardberichterstellung,
- Analysesoftware für weitergehende Untersuchungen (z. B. Erstellung von Temperatur-Profilen).

Eine Thermografiekamera liefert gleichzeitig etwa über 75.000 Temperaturwerte (320 x 240 Bildpunkte). Um aus dieser Vielzahl von Messwerten Baustrukturen mit z. B. erhöhten Wärmeverlusten identifizieren zu können, werden die Messwerte mit einer Farbskala codiert und in einem zweidimensionalen Bild als sogenanntes Wärmebild (oder Thermogramm, Thermografiebild, -aufnahme) dargestellt.

Die Farbpalette und die Temperaturskala können dabei willkürlich gewählt werden. In der Regel werden dunkle Farben für niedrige Temperaturen und helle Farben für hohe Temperaturen eingesetzt.

Der optische Eindruck, den ein Wärmebild erzeugt, hängt von der Wahl der Farbpalette und der Temperaturskala ab. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die gleiche Oberfläche, wobei nur die Skalierung verändert wurde. Trotz identer Ausgangswerte entsteht ein unterschiedlicher Eindruck. Für die Bewertung ist jedoch nicht die jeweilige Farbgebung, sondern ausschließlich die Oberflächentemperatur entscheidend, die unabhängig von der Farbgebung ist und die an jedem einzelnen Bildpunkt über die Computersoftware abgefragt werden kann.

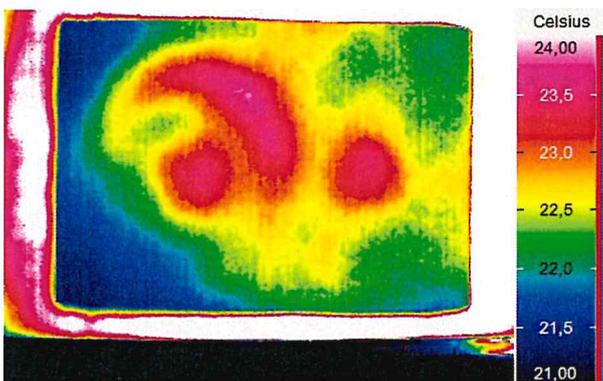


Abbildung 9. Beispiel zur Farbwahl: Oberflächentemperaturen mit Skalierung von 21 bis 24°C.

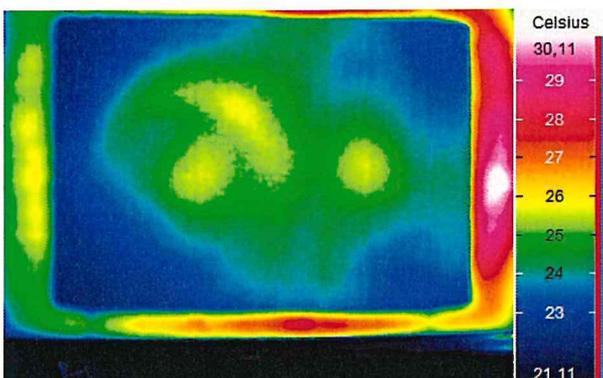


Abbildung 10. Beispiel zur Farbwahl: Oberflächentemperaturen mit Skalierung von 21 bis 31°C.

Alle im Weiteren dargestellten Thermogramme stellen jeweils den optimalen Temperaturbereich dar, um eine objektive Bewertung der aufgenommenen Fläche zu gewährleisten. Die Skalierung wurde so gewählt, dass auf dem Thermogramm die geringsten und höchsten Temperaturen um 3 Kelvin unter- bzw. überschritten werden.

### 3.3.2 Marktübersicht

Tabelle 2 gruppiert unterschiedliche Kameramodelle, Tabelle 3 bis Tabelle 7 zeigen eine Marktübersicht (zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung).

**Tabelle 2: Übersicht zu verschiedenen Kameramodellen (Zugriff auf Internetquelle: 23.09.2011) (Wagner, 2011)**

Anwenderklasse	Kameramodell	Kontakt
Einsteiger 160 x 120 Bildpunkte Preis: 3.000 bis 7.500 €	FLiR b50 FLUKETiR1 mobile IR M3 SAT HOTFIND testo 880-3 Testboy TV303	<a href="http://www.f1ir.de">http://www.f1ir.de</a> <a href="http://www.f1uke.de">http://www.f1uke.de</a> <a href="http://www.infratec.net">http://www.infratec.net</a> <a href="http://www.goratec.com">http://www.goratec.com</a> <a href="http://www.testo.de">http://www.testo.de</a> <a href="http://www.testboy.de">http://www.testboy.de</a>
Fortgeschrittene 320 x 240 Bildpunkte Preis: 7.500 bis 15.000 €	AVIO TVS 200ex DIAS MIDAS 320 L FLiR 200 -400 FLUKE TiR3FT IMPAC IVN 780 P Jenoptik VarioCAM basiclinspec 480 NECTH 7700 Testboy TV304 TROTEC S280	<a href="http://www.goratec.com">http://www.goratec.com</a> <a href="http://www.dias-infrared.de">http://www.dias-infrared.de</a> <a href="http://www.flir.de">http://www.flir.de</a> <a href="http://www.fluke.de">http://www.fluke.de</a> <a href="http://www.impadnfrared.com">http://www.impadnfrared.com</a> <a href="http://www.infratec.net">http://www.infratec.net</a>  <a href="http://www.irpod.net">http://www.irpod.net</a> <a href="http://www.testboy.de">http://www.testboy.de</a> <a href="http://www.trotec.de">http://www.trotec.de</a>
Wissenschaftler 640 x 480 Bildpunkte Preis: 15.000 bis 45.000 €	Electrophysics Hotshot HD-Serie FLiR B660 VarioCAM hr inspec 640 NECTH 9260	<a href="http://www.goratec.com">http://www.goratec.com</a>  <a href="http://www.f1ir.de">http://www.f1ir.de</a> <a href="http://www.infratec.net">http://www.infratec.net</a> <a href="http://www.irpod.net">http://www.irpod.net</a>

**Tabelle 3: Marktübersicht Thermografiekameras, Teil 1**

Hersteller oder Vertriebsorganisation/ Internetadresse	EBS AUTOMATISIERTE THERMOGRAPHIE UND SYSTEMTECHNIK GMBH NEC AVIO SALES & TECHNICAL SERVICE UND KALIBRATION ZENTRUM FÜR ZENTRALEURO-PA	FLIR SYSTEMS GMBH	
Produktname	NEC Thermal Imager InfReC R300 	i3 i5 i7 	E30bx E40bx E50bx E60bx 
Sensor-/ Detektortyp	uFPA Mikrobolometer	Mikrobolometer/Focal Plane Array (FPA)	Mikrobolometer/Focal Plane Array (FPA)
Detektormaterial	vax NEC Detektor	Vanadiumoxid (Vax)	Vanadiumoxid (Vax)
Detektorauflösung (in Pixel)	H = 1.280 oder V = 960 (4 x 320 x 240)	60 x 60 80 x 80 120 x 120	160 x 120 160 x 120 240 x 180 320 x 240
Temperaturmessbereich (in °C)	-40 bis +2.000	-20 bis +250	-20 bis + 120
Einsatzbereich (in °C)	-15 bis +50	0 bis +50	-15 bis +50
Thermische Auflösung (in K bei 30°C)	0,050 (0,03 SN-mode)	0,150 0,100 0,100	< 0,100 < 0,045 < 0,045 < 0,045
reale Messfleckgröße	H 3,8 cm und V 2,9 cm bei einer Auflösung von minimal 0,12 mm bei FAA 10 cm ohne aktiven Zoom	11 mm bei 1 m Abstand	8 mm 8 mm 5,5 mm 4 mm bei 1 m Abstand
Messgenauigkeit, absolut (in K oder %)	+/-1 K bzw. +/-1 % of reading	2 K oder 2 %	2 K oder 2 %
Objektive	Das Standardobjektiv kann mit Wechselobjektiven ergänzt werden. Weitwinkel- und Teleobjektive sind im Lieferumfang optional enthalten.	Standardoptik 25°	Standardoptik 24° (optional: Weitwinkel 45°, Tele 1S*)
Basisfunktionen	Panorama, Echtzeitrecording für Video- und Infrarot auf radiometrischen JPG mit Voliauto fokus	fester Messpunkt, Messbereich mit Min./Max.-Funktion, Isotherme, Korrektur des Emissionsgrads, Korrektur der reflektierten Umgebungstemperatur	Messpunkt(e), Messbereich(e) mit Min./Max.-Funktion, Isotherme, Taupunktalarm, Wärmebrückenalarm, Korrektur des Emissionsgrads, Korrektur der reflektierten Umgebungstemperatur, Infrarotfenster Auto Korrektur, Sprachkommentare, Bild-in-Bild und Bildfusion, Digitalzoom, Laserpointer
Aufnahme radiometrischer Videos (ja/nein)	ja (inklusive Tageslichtvideos)	nein	ja
Anwendungsgebiete	vorbeugende Instandhaltung, Gebäudethermografie und Blowerdoor, Solarzelleninspektion, PV-Anlagen Fehlersuche und Effizienzprüfung, Elektrothermografie, Qualitätssicherung	Einsteigermodell für: Sachverständige, Architekten + Planer, Bauüberwachung, Leckageortung, Heizungs-/ Lüftungs-/ Klimabau, Sanitär und Klempnerei, Dachdecker und Fensterbauer	Kompaktmodell für: Sachverständige, Architekten + Planer, Bauüberwachung, Leckageortung, Heizungs-/ Lüftungs-/ Klimabau, Sanitär und Klempnerei, Dachdecker und Fensterbauer, Facility Manager
Kalibrierung	Werkskalibrierung im Intervall von 1-2 Jahren durch Service Center Deutschland	Herstellerekalibrierung und Reparaturen im Service-Center Frankfurt	Herstellerekalibrierung und Reparaturen im Service-Center Frankfurt
Fokussierung	Voll-Autofokus für Infrarot- und Tageslicht video	fest	manuell
Displayart und -größe	Antireflex-Display und Eye-piece-Viewer	LCD-Display 2,8"	LCD-Touch-Screen 3,5" mit 320 x 240 Pixel
Speicher-medium und -größe (in GB)	SD-Card (beliebig)	MiniSD-Karte 2 GB	MicroSD-Karte 2 GB
Datenübertragung	High speed USB für Infrarot- und Tageslicht video (Echtzeitverarbeitung)	USB	USB, Composite Video, WLAN
Spannungsversorgung	Li-Ion-Akkus (3 h) oder wahlweise 110 V/220 V Netzspannung bzw. 12 Volt Kfz	Lithium-Ionen-Akku, austauschbar	Lithium-Ionen-Akku, austauschbar
Betriebszeit (in h)	3-4 h Laufzeit mit Standard-Akkus, bis 10 h (ext. Akkus)	5h	5 h
Schulungs-, Zertifizierungsangebote	TRAIN E (Einsteiger) TRAIN A (Applikation) TRAIN 5W (Reporting) Level/Stufe I (EN473) Level/Stufe 11 (EN473) Level/Stufe 111 (EN473)	durch eigenes Schulungszentrum (ITC Germany)	durch eigenes Schulungszentrum (ITC Germany)

Tabelle 4: Marktübersicht Thermografiekameras, Teil 2

Hersteller oder Vertriebsorganisation/ Internetadresse	FLIR SYSTEMS GMBH		ICODATA GMBH
Produktname	B425 	B660 	S80HR/Real Time 
Sensor-/ Detektortyp	Mikrobolometer/Focal Plane Array (FPA)	Mikrobolometer/Focal Plane Array (FPA)	uFPA
Detektormaterial	Vanadiumoxid (VOx)	Amorphes Silizium (a-Si)	Amorphes Silizium
Detektorauflösung (in Pixel)	320 x 240	640 x 480	384 x 288
Temperaturmessbereich (in °C)	-20 bis +350	-40 bis + 120 (optional bis 2.000)	-20 bis + 250, optional bis +600, 1.000 oder 1.500
Einsatzbereich (in °C)	-15 bis +50	-15 bis +50	von ca. -20 bis +50
Thermische Auflösung (in K bei 30°C)	0,05	< 0,030	0,1
reale Messfleckgröße	4 mm bei 1 m Abstand	2 mm bei 1 m Abstand	0,11 x 0,11 cm IFOV
Messgenauigkeit, absolut (in K oder %)	2 K oder 2 %	1 K oder 1 %	+/-2 ° K oder 2 %
Objektive	Standardoptik 25° (optional Weitwinkel-(45°, 90°) oder Teleoptiken (6°, 15°) und Makrooptiken (1-fach, 2-fach, 4-fach)	Standardoptik 24° oder Weitwinkel 45° oder Tele 12° und Makrooptiken (1-fach, 2-fach, 4-fach)	Standardobjektiv 24° x 18° ,Wechselobjektiv: Weit-winkel bzw. Teleobjektiv optional
Basisfunktionen	Messpunkte, Messbereiche mit Min./Max-Funktion, Isotherme, Taupunktalarm, Wärmebrückenalarm, Automatische Hot-/Coldspoterkennung, Korrektur des Emissionsgrads, Korrektur der reflektierenden Umgebungstemperatur, Infrarotfenster Auto-Korrektur, Text- und Sprachkommentare, Bild-in-Bild und Bildfusion, Digitalzoom, Laserpointer	Messpunkte, Messbereiche mit Min./Max-Funktion, Isotherme, mitlaufende Linie, Taupunktalarm und Wärmebrückenalarm, Automatische Hot-/Coldspoterkennung, Automatische Kontrastoptimierung (DDE), Korrektur des Emissionsgrads, Korrektur der reflektierenden Umgebungstemperatur, Infrarotfenster Auto-Korrektur, eingebautes GPS, Text- und Sprachkommentare, Bild-in-Bild und Bildfusion, Digitalzoom, Laserpointer	Echtzeitaufnahme von Infrarotsequenz mit radio metrischen Daten, Mindestfokusdistanz nur 100 mm, Linienprofile, Isotherme, Korrektur von Emissionsgrad und Umgebungstemperatur, schwenkbares Display
Aufnahme radiometrischer Videos (ja/nein)	ja	ja	ja, mit Version S80Hr Real Time
Anwendungsgebiete	Expertenkamera für: Energieberatung, Leckageortung, Heizungs-/Lüftungs-/Klimabau, Sanitär und Klempnerei, Dachdecker und Fensterbauer, Facility Manager	Profikamera für: Dienstleister, Energieberatung, Leckageortung, Heizungs-/Lüftungs-/Klimabau, Sanitär und Klempnerei, Facility Manager	Bauthermografie
Kalibrierung	Herstellerekalibrierung und Reparaturen im Service Center Frankfurt	Herstellerekalibrierung und Reparaturen im Service Center Frankfurt	externe Werkskalibrierung erforderlich
Fokussierung	automatisch oder manuell	automatisch oder manuell	manuell
Displayart und -größe	LCD-Touch-Screen 3,5" mit 320 x 240 Pixel	Breitband-Display 5,6" mit 1.024 x 600 Pixel oder integrierter, neigbarer Sucher	Schwenkbares Display 3,5"
Speicher-medium und -größe (in GB)	MicroSD-Karte 2 GB	SD-Karte 4 GB	Speicherkarte 2 GB
Datenübertragung	USB, WiFi, Bluetooth	USB, Composite Video, IrDA, WLAN, optional FireWire	mit USB-5schnittstelle und USB-5 Speicherkarte
Spannungs-versorgung	Lithium-Ionen-Akku, austauschbar	Lithium-ionen-Akku, austauschbar	Akku oder Netzteil
Betriebszeit (in h)	4h	3h	ca. 2,5 Stunden
Schulungs-, Zertifizierungsangebote	durch eigenes Schulungszentrum (ITC Germany)	durch eigenes Schulungszentrum (ITC Germany)	Operator Kurs, Bauthermografie, industriethermografie, Stufe 1, 2

Tabelle 5: Marktübersicht Thermografiekameras, Teil 3

Hersteller oder Vertriebsorganisation/ Internetadresse	INFRATEC GMBH		
Produktname	<p>Jenoptik VarioCAM hr basic</p> 	Jenoptik VarioCAM hr inspect 480	Jenoptik VarioCAM hr inspect 680
Sensor-/ Detektortyp	uFPA	uFPA	uFPA
Detektormaterial	a-Si	aSi	aSi
Detektorauflösung (in Pixel)	320 x 240	384 x 288, opt. 768 x 576	640 x 480, opt. 1.280 x 960
Temperaturmessbereich (in °C)	-40 bis 120, opt. bis 1.200	-40 bis 1.200, opt. bis 2.000	-40 bis 1.200, opt. bis 2.000
Einsatzbereich (in °C)	-15 bis + 50	-15 bis +50	-15 bis +50
Thermische Auflösung (in K bei 30°C)	0,05, opt. 0,03S	0,D35	0,D3
reale Messfleckgröße	0,14 cm (aus 1 m Entfernung)	0,14 cm (aus 1 m Entfernung)	0,08 cm (aus 1 m Entfernung)
Messgenauigkeit, absolut (in K oder %)	1,5K,2%	1,5 K, 2%	1 K in ausgewählten Temperaturbereichen, sonst 1,5 K, 2 %
Objektive	25 mm Standardobjektiv, verschiedene Objektive optional möglich	25 mm Standardobjektiv, verschiedene Objektive optional möglich	30 mm Standardobjektiv, verschiedene Objektive optional möglich
Basisfunktionen	vielfältige Automatikfunktionen, z. B. Autospeichern, Leichtmetallgehäuse, 60. Hz, Akku mit Ladestandsanzeige	Bildüberlagerung, Tageslichtbild, Video-ED, Laserpointer, Sprachaufzeichnung, interner Echtzeitspeicher, Sucher	Bildüberlagerung, Tageslichtbild, VideoLED, Laserpointer, Sprachaufzeichnung, interner Echtzeitspeicher, Sucher
Aufnahme radiometrischer Videos jaa/nein)	optional	ja	ja
Anwendungsgebiete	Gebäudethermografie, Elektrothermografie, Instandhaltung	Gebäudethermografie, Elektrothermografie, Instandhaltung, F/E	Gebäudethermografie, Elektrothermografie, Instandhaltung, F/E
Kalibrierung	Werkskalibrierung bei Jenoptik	Werkskalibrierung bei Jenoptik	Werkskalibrierung bei Jenoptik
Fokussierung	motorisierter Fokus, Autofokus, manuell, intern gekapselt	motorisierter Fokus, Autofokus, manuell, intern gekapselt	motorisierter Fokus, Autofokus, manuell, intern gekapselt
Displayart und -größe	3,5", dreh-und schwenkbar	3,5", dreh-und schwenkbar	3,S", dreh-und schwenkbar
Speichermedium und -größe (in GB)	SD-Karte 2 GB	SD-Karte 2 GB	SD-Karte 2 GB
Datenübertragung	PAUNTSC-FBAS, S-Video, RS232, opt. FireWire (IEEE 1394)	PAUNTSC-FBAS, S-Video, RS232, FireWire (IEEE 1394), WLAN	PAUNTSC-FBAS, S-Video, RS232, FireWire (IEEE 1394), WLAN
Spannungsversorgung	Standard Li-Ion-Akku, opt. Weitbereichsnetzadapter	Standard Li-Ion-Akku, Weitbereichsnetzadapter	Standard Li-Ion-Akku, Weitbereichsnetzadapter
Betriebszeit (in h)	bis 5 h	bis 5 h	bis 5 h
Schulungs-, Zertifizierungsangebote	Kundenschulung, Gebäudethermografie, Fotovoltaikanlagenthermografie, Level 1 nach DIN 54162 und EN 473 jeweils im Schulungszentrum Dresden	Kundenschulung, Gebäudethermografie, Fotovoltaikanlagenthermografie, Level 1 nach DIN 54162 und EN 473 jeweils im Schulungszentrum Dresden	Kundenschulung, Gebäudethermografie, Fotovoltaikanlagenthermografie, Level 1 nach DIN 54162 und EN 473 jeweils im Schulungszentrum Dresden

Tabelle 6: Marktübersicht Thermografiekameras, Teil 4

Hersteller oder Vertriebsorganisation/ Internetadresse	INFRATEC GMBH		TESTO AG
Produktname	mobileIR E4 	mobileIR M8 	testo 876 
Sensor-/ Detektortyp	uFPA	uFPA	FPA
Detektormaterial	aSi	aSi	aSi
Detektorauflösung (in Pixel)	160 x 120	160 x 120	160 x 120 Pixel
Temperaturmessbereich (in °C)	-20 bis 2S0, opt. bis 1.200	-20 bis 2S0, opt. bis 1.200	-20 bis +280
Einsatzbereich (in °C)	-10 bis +S0	-10 bis +60	-IS bis +40
Thermische Auflösung (in K bei 30°C)	0,1	0,08	< 0,08
reale Messfleckgröße	0,23 cm (aus 1 m Entfernung)	0,23 cm (aus 1 m Entfernung)	Mit Standardobjektiv 32": bei Abstand bei Abstand 10m: 10 cm
Messgenauigkeit, absolut (in K oder %)	2K,2%	2 K, 2%	+/-2 °C (2 %) vom Messwert
Objektive	11 mm Standardobjektiv, verschiedene Objektive optional möglich	11 mm Standard~bje1<ativ, verschiedene Objektive optional möglich	Standardobjektiv 32° x 23°, optional wechselbares Teleobjektiv: 9° x r
Basisfunktionen	Bildüberlagerung, Tageslichtbild, Laserpointer, Sprachaufzeichnung	Bildüberlagerung, Tageslichtbild, Laserpointer, Sprachaufzeichnung	Camcorder Design mit flexiblen Schwenk-Display, Intuitive Einhandbedienung, Integrierte Digitalkamera, Sprachaufzeichnung, Motorfokus, Isothermenanzeige, Min-max-on-Area-Berechnung, Auto-hot-cold-Erkennung, spez. Messmodus für schimmelgefährdete Stellen
Aufnahme radiometrischer Videos (ja/nein)	nein	optional	nein
Anwendungsgebiete	Gebäudethermografie, Elektrothermografie, Instandhaltung	Gebäudethermografie, Elektrothermografie, Instandhaltung	Gebäudethermografie: Baumängel aufspüren, Dachleckagen orten, Gebäudehüllen analysieren, Solaranlagen prüfen, Rohrbrüche lokalisieren, Feuchteschäden untersuchen, Heizungen prüfen, Schimmelbildung vorbeugen, Luftdichtheit prüfen, gen, Elektrothermografie, vorbeugende Instandhaltung
Kalibrierung	Werkskalibrierung	Werkskalibrierung	interner Abgleich, optional erhältlich: ISO-Kalibrierzertifikate
Fokussierung	motorisierter Fokus, Autofokus, manuell	motorisierter Fokus, Autofokus, manuell	manuell und Motorfokus (ermöglicht nung)
Displayart und -größe	3,6"	2,5"-Touchscreen, schwenkbar	3,5"-Klapp- und Schwenk-LCD mit 320 x 240 Pixel
Speicher-medium und -größe (in GB)	SD-Karte 2 GB	Mini-SD-Karte 2 GB	SD-Karte 2 GB
Datenübertragung	PAL/NTSC-FBAS, USB	PAL/NTSC-FBAS, USB	USB 2.0
Spannungsversorgung	Standard AA-NiMH Akkus, Ladeteil	Li-ion-Akku, Weitbereichsnetzadapter	5V/4 A (via 220-V-Netzteil/Ladestation Kfz-Ladeadapter)
Betriebszeit (in h)	bis 3,5 h	bis 4 h	ca. 4 h
Schulungs-, Zertifizierungsangebote	Kundenschulung, Gebäudethermografie, Fotovoltaikanlagenthermografie, Level 1 nach DIN S4162 und EN 473 jeweils im Schulungszentrum Dresden	Kundenschulung, Gebäudethermografie, Fotovoltaikanlagenthermografie, Level 1 nach DIN S4162 und EN 473 jeweils im Schulungszentrum Dresden	Stufe 1 Schulung nach DIN 54162/EN 473 mit optionalem Zertifikat durch die Personalzertifizierstelle PersCert TÜV des TÜV Rheinland, Stufe 2-3 Schulung nach DIN 54162/EN 473 direkt beim Verband für angewandte Thermografie möglich, Operatorschulung für Elektro- und Industriethermografie, Operatorschulung für Bauhermografie

Tabelle 7: Marktübersicht Thermografiekameras, Teil 5

Hersteller oder Vertriebsorganisation/ Internetadresse	TESTO AG	TROTECGMBH	
Produktname	testo 882 	EC 060 	IC 080 LV 
Sensor-/ Detektortyp	FPA	Focal Plane Array (FPA), ungekühlter Mikrobolometer	FPA
Detektormaterial	aSi	Amorphes Silizium	aSi
Detektorauflösung (in Pixel)	320 x 240 Pixel	160 x 120 Pixel	320 x 240 Pixel
Temperaturmessbereich (in °C)	-20 bis +350, optional erweiterbar bis +550	-20 bis +250	-20 bis +350, optional erweiterbar bis +550
Einsatzbereich (in °C)	-15 bis +40	-15 bis + 50	-15 bis +40
Thermische Auflösung (in K bei 30°C)	< 0,06	0,1	< 0,06
reale Messfleckgröße	Mit Standardobjektiv 32°: bei Abstand 1 m: 0,5 cm, bei Abstand 10m: 5 cm	2,2 mm bei 1 m Abstand	Mit Standardobjektiv 32°: bei Abstand 1 m: 0,5 cm, bei Abstand 10m: 5 cm
Messgenauigkeit, absolut (in K oder %)	+/-2 °C (2 %) vom Messwert	+/-2 % vom Messwert	+/-2 °C (2 %) vom Messwert
Objektive	Standardobjektiv 32° x 23°	Standardobjektiv, verschiedene Wechselobjektive	Standardobjektiv 32° x 23°
Basisfunktionen	Bildwiederholffrequenz 33 Hz, Integrierte Power-LEDs, Laser, Intuitive Einhandbedienung, Integrierte Digitalkamera, Sprachaufzeichnung, Motorfokus, Iso, thermenanzeige, Min-m'ax-on-Area-{} Berechnung, Auto-hot-cold-Erkennung, spez. Messmodus für schimmelgefährdete Stellen	Großes schwenkbares Farbdisplay, Bildaufzeichnung von bis zu 50/60 Hz, Integrierter Laserpointer, Digitalkamera, Fotoleuchte, Automatische Temperaturverfolgung	Bildwiederholffrequenz 33 Hz, Integrierte Power-LEDs, Laser, Intuitive Einhandbedienung, Integrierte Digitalkamera, Sprachaufzeichnung, Motorfokus, Iso, thermenanzeige, Min-m'ax-on-Area-{} Berechnung, Auto-hot-cold-Erkennung, spez. Messmodus für schimmelgefährdete Stellen
Aufnahme radiometrischer Videos (ja/nein)	nein	ja, mit der EC 060 V+ in Verbindung mit der USB-RealTime SW	nein
Anwendungsgebiete	Gebäudethermografie: Baumängel aufspüren, Dachleckagen orten, Gebäudehüllen analysieren, Solaranlagen prüfen, Rohrbrüche lokalisieren, Feuchteschäden untersuchen, Heizungen prüfen, Luftdichtigkeit prüfen, Schimmelbildung vorbeugen, Elektrothermografie, Vorbeugende Instandhaltung	Produktionskontrolle und Anlagenwartung, Elektrothermografie, Leckageortung, Gebäudethermografie, Energieberatung	Gebäudethermografie: Baumängel aufspüren, Dachleckagen orten, Gebäudehüllen analysieren, Solaranlagen prüfen, Rohrbrüche lokalisieren, Feuchteschäden untersuchen, Heizungen prüfen, Luftdichtigkeit prüfen, Schimmelbildung vorbeugen, Elektrothermografie, Vorbeugende Instandhaltung
Kalibrierung	interner Abgleich, optional erhältlich: ISO-Kalibrierzertifikate	externe Werkskalibrierung	interner Abgleich, optional erhältlich: ISO-Kalibrierzertifikate
Fokussierung	manuell und Motorfokus (ermöglicht Einhandbedienung)	manuell	manuell und Motorfokus (ermöglicht Einhandbedienung)
Displayart und -größe	3,5"-LCD mit 320 x 240 Pixel	Bewegliches 2,5"-TFT-LCD; 6 Farbpaletten	3,5"-LCD mit 320 x 240 Pixel
Speichermedium und -größe (in GB)	SD-Karte 2 GB	2 GB Mini-SD-Karte	SD-Karte 2 GB
Datenübertragung	USB 2,0	Composite Video	USB 2,0
Spannungsversorgung	5 W/4 A (via 220-V-Netzteil/Ladestation oder 12-V-Kfz-Ladeadapter)	Standard, Li-Ion, wiederaufladbar, austauschbar, Netzbetrieb optional	5 W/4 A (via 220-V-Netzteil/Ladestation oder 12-V-Kfz-Ladeadapter)
Betriebszeit (in h)	ca, 4 h	-2,5 h	ca, 4 h
Schulungs-, Zertifizierungsangebote	Stufe 1 Schulung nach DIN 54162/EN 473 mit optionalem Zertifikat durch die Personalzertifizierstelle PersCert TÜV des TÜV Rheinland, Stufe 2-3 Schulung nach DIN S4162/EN 473 direkt beim Verband für angewandte Thermografie möglich, Operatorschulung für Elektro- und Industriethermografie, Operatorschulung für Bauthermografie	1-Tages-Seminar "Thermographie im Bauwesen"	Stufe 1 Schulung nach DIN 54162/EN 473 mit optionalem Zertifikat durch die Personalzertifizierstelle PersCert TÜV des TÜV Rheinland, Stufe 2-3 Schulung nach DIN S4162/EN 473 direkt beim Verband für angewandte Thermografie möglich, Operatorschulung für Elektro- und Industriethermografie, Operatorschulung für Bauthermografie

### 3.3.3 Spezifikation der im Projekt verwendeten Thermografiekamera

Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen wurde die Thermografiekamera VarioCAM hr inspec 640 der Firma Jenoptik verwendet. VarioCAM® hr (high resolution) ist ein Thermografiesystem für den langwelligen infraroten Spektralbereich (LWIR) von (7,5 bis 14)  $\mu\text{m}$ . Das Objektiv bildet die Objektszenarie auf ein Mikrobolometer-Array mit 384 x 288 Bildpunkten ab. Das elektrische Signal des Detektor-Arrays wird durch die interne Elektronik weiterverarbeitet. Die Elektronik beinhaltet dabei alle für den Kamerabetrieb erforderlichen Funktionen wie Ansteuerung des Mikrobolometer-Array, A/D-Wandlung, Offset- und Gainkorrektur, Pixelkorrektur sowie Ansteuerung der Video- und PC-Interfaces.

Die Bedienung erfolgt wahlweise direkt über die integrierte Folientastatur auf Oberseite und Rückseite des Thermografiesystems sowie den Joystick an der Rückseite oder über optionale PC-Schnittstellen. Als Schnittstellen sind RS232 und FireWire (IEEE 1394) verfügbar. Zur Nutzung dieser ausstattungsabhängig vorhandenen Interfaces sind spezielle Softwarepakete erforderlich.

Das Kameraobjektiv erfasst die vom Messobjekt ausgesandte IR-Strahlung im Bildfeld und bildet diese auf dem Detektor-Array ab. Bildfeld (FOV, Field of View) und Auflösung/Messfleckgröße (IFOV, Instantaneous Field of View) werden bei gleicher Entfernung von der Brennweite  $f$  des verwendeten Objektivs bestimmt. Folgende Objektive stehen für die Untersuchungen zur Verfügung, siehe Tabelle 8.

**Tabelle 8: Objektive mit einer Auflösung von 384 x 288 Pixel**

Optik	Brennweite (mm)	min. Fokus (m)	IFOV (mrad)	FOV (°)
Weitwinkelobjektiv	12,5	0,2	2,8	(57 x 44)
Normalobjektiv	25	0,3	1,4	(30 x 23)

Die VarioCAM<sup>®</sup> hr verfügt über einen ungekühlten Mikrobolometer-FPA-Detektor (uncooled Focal Plane Array). Der Detektor wird mittels Peltier-Element thermisch hochgenau stabilisiert und ist somit von der Umgebungstemperatur unabhängig. Die einzelnen Elemente des Detektors sind mikroskopisch kleine Dünnschichtwiderstände auf hauchdünnen Membranen, die freitragend einige Mikrometer über dem Silizium-Ausleseschaltkreis angeordnet sind. Die Wärmestrahlung der Szene wird von der Optik des Thermografiesystems auf diese Detektorelemente abgebildet und von diesen absorbiert. Die daraus resultierende Temperaturänderung der Detektorelemente führt zu elektronisch auswertbaren Signalen, die über einen Ausleseschaltkreis zeilen- und spaltenweise ausgelesen werden. Der Einsatz eines ungekühlten Detektors gewährleistet eine schnelle Verfügbarkeit der Kamerafunktion nach dem Einschalten (Startzeit < 60 Sekunden) und eine hohe Standzeit (MTTF) im Dauereinsatz.

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die technischen Daten der VarioCAM.

**Tabelle 9: Technische Daten der VarioCAM high resolution**

Spektralbereich	(7,5 ... 14) $\mu\text{m}$
Temperaturmessbereich	(-40 ... 1.200) $^{\circ}\text{C}$ , optional > 2.000 $^{\circ}\text{C}$
Temperaturaufösung @ 30 $^{\circ}\text{C}$	besser als 0,08 K, bis zu 0,05 K (Premium Mode)
Messgenauigkeit	$\pm 1,5$ K (0 ... 100) $^{\circ}\text{C}$ ; $\pm 2$ % (< 0 bzw. > 100) $^{\circ}\text{C}$
Emissionsgrad	einstellbar von 0,1 bis 1,0 in Schritten von 0,01
Aufnahmeverfahren, Bildformat (Pixel)	Focal Plane Array , (320 x 240) oder (384 x 288), Resolution Enhancement auf (768 x 576)
Detektor	ungekühltes Mikrobolometer Focal Plane Array
IR-Bildfrequenz	50/60 Hz
Normalobjektiv (Bildfeld)	1.0/25 mm (25 x 19) $^{\circ}$ bei (320 x 240) 1.0/25 mm (30 x 23) $^{\circ}$ bei (384 x 288) 1.0/30 mm (30 x 23) $^{\circ}$ bei (640 x 480)
Zoomfunktion	bis 8-fach digital, stufenlos
A/D-Wandlung	16 Bit
Bildspeicherung	SD-Karte, FireWire (IEEE 1394) bis 50/60 Hz, interner Echtzeitspeicher
Sprachaufzeichnung/Textkommentar	bildintegriert
Schnittstellen	PAL/NTSC-FBAS, S-Video, VGA, RS232, WLAN FireWire (IEEE 1394), Headset
Integrierte digitale Farb-Videokamera	1,3 Megapixel, LED-Videoleuchte
Stromversorgung	Lithium-Ionen-Akku, Netzadapter, FireWire (IEEE 1394)
Akkusystem	Lithium-Ionen, schnellladefähig, mit Statusanzeige, Netz- und Kfz-Ladeadapter
Betriebszeit mit Akku	bis ca. 3 h
Arbeitstemperaturbereich	(-15 ... 50) $^{\circ}\text{C}$
Lagertemperaturbereich	(-40 ... 70) $^{\circ}\text{C}$
Feuchtigkeit bei Betrieb und Lagerung	relative Feuchte 5 % bis 95 %, nicht kondensierend
Abmessungen (Vollausstattung)	(133 x 106 x 110) mm
Gewicht (Vollausstattung)	ca. 1,5 kg
Stativ-Anschluss	1/4"-Fotogewinde
Display	tageslichttaugliches, digitales 3,5"-Aktiv-Farb-TFT-Display
Sucher	integrierter hochauflösender Farb-TFT-Sucher mit Dioptrienausgleich
Bedienelemente	4 Tasten, Multifunktions-Joystick
Laser	Halbleiterlaser Rot, Laserschutzklasse 2
Anzeigefunktionen	Thermogramm, Bedienerführung, Menü, Ergebnisse, Status, Temperaturbereich
Messfunktionen	max. 10 frei wählbare ROI, Auto-Hot/Cold-Spot-Anzeige, Isothermen
Automatikfunktionen	Autofokus, Autoimage, Autolevel, Autorange, Alarm, Auto-NUC, Auto-Linsenerkennung, Premium Snap, Sequenzspeicherung, Resolution Enhancement
Schutzgrad im Betrieb	IP 54, IEC 529
Stoßbelastbarkeit	25 G, IEC 68-2-29
Vibrationsbelastbarkeit im Betrieb	2 G, IEC 68-2-6

## 4 Parameterstudie zum Einsatz der Thermografie im Brückenbau

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Parameterstudie zum Einsatz der Thermografie im Brücken-/Straßenbau erläutert. Zunächst werden anhand von Vergleichsmessungen die Einflüsse aus Messwinkel und Messabstand analysiert und praxistaugliche Vorgaben (für das gewählte Messsystem) abgeleitet. Ferner wird auf die parallele Verwendung von Thermografie- und digitaler Kamera hingewiesen. Nachfolgend wird die Parameterstudie vorgestellt, die zur Untersuchung von Erwärmungseffekten an im Labor hergestellten Asphaltplatten durchgeführt wurde.

### 4.1 Einflüsse aus Messwinkel und -abstand

Zur Prüfung des Einflusses des Messwinkels (Kamerawinkels) wurde ein Messstativ hergestellt. Mit Hilfe des Stativs samt Dreifuß und Kippaufsatz ist die Möglichkeit der Verwendung der Thermografiekamera unter gleichen Bedingungen bei verschiedenen Winkeleinstellungen gegeben, siehe Abbildung 11. Zur Erleichterung des Aufstellens und Verschiebens des Stativs wurde eine Stativspinne verwendet, in der die Stativbeine fixiert werden können.



Abbildung 11. Stativ mit Dreifuß, Kippaufsatz und Stativspinne (links), Dreifuß und Kippaufsatz im Detail (Mitte), Bohrloch zur Befestigung der Thermografiekamera im Kippaufsatz (rechts).

Um zu vermeiden, dass die Stativbeine in die Aufnahme hineinreichen, ist die Thermografiekamera 72 cm entfernt vom Mittelpunkt des Stativs angebracht, siehe Abbildung 12. Dazu ist auf dem Kippaufsatz eine Holzlatte (von 130 cm Länge, 4 cm Breite und 2 cm Höhe) befestigt, auf deren vorderen Ende die Thermografiekamera über einen Lochwinkel im Winkel von  $90^\circ$  zur Horizontalen verschraubt ist. Die Objektivlinse ist bei waagerechter Stellung der Holzlatte 191 cm von der Messoberfläche entfernt. Zur Absturzsicherung der Kamera sind zwei Haken auf der Holzlatte angebracht, an denen das Kameraband straff fixiert ist, siehe Abbildung 13 links.

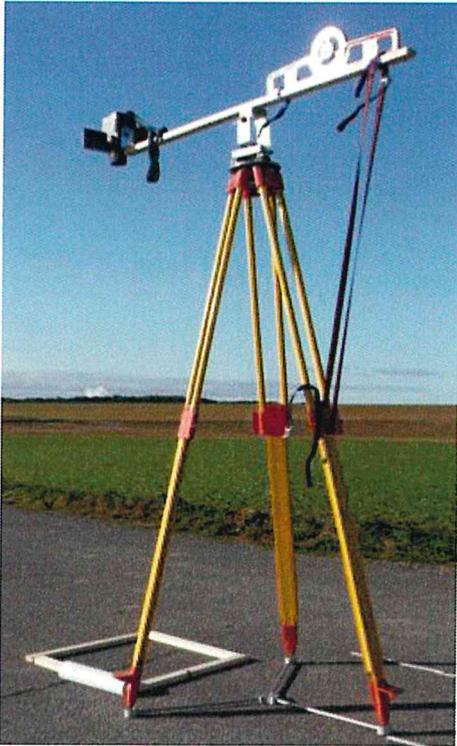


Abbildung 12. Messaufbau.

Zur Bestimmung des Winkels zur Horizontalen ist eine Wasserwaage mit Winkelmesser auf der Holzlatte befestigt, siehe Abbildung 13 rechts. Zum Einstellen des jeweils gewünschten Winkels ist ein Sicherheitsgurt am unteren Ende des hinteren Stativbeines angebracht und durch die Wasserwaage geführt. So ist ein mögliches Kippen der Holzlatte ausgeschlossen.

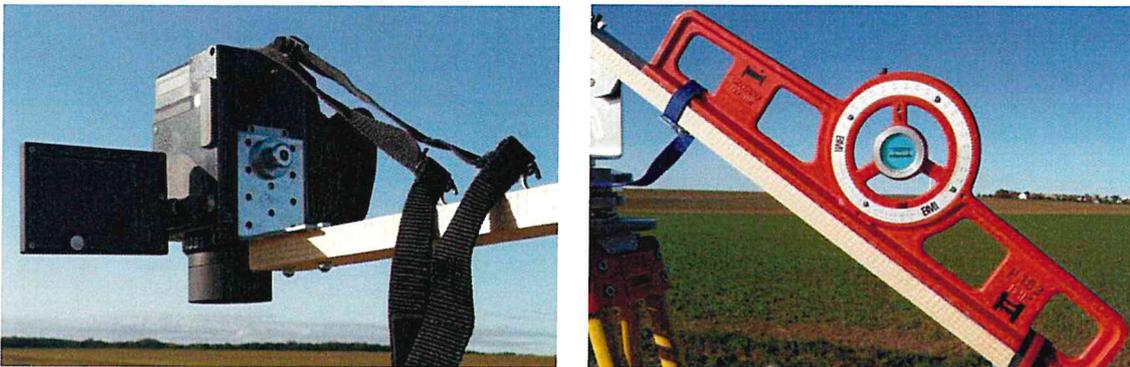


Abbildung 13. Messbereite Position der Thermografiekamera (links), Wasserwaage mit Winkelmesser (rechts).

Für die Untersuchung des Einflusses des Kamerawinkels wurden mehrere Messdurchgänge an verschiedenen Teststrecken bei unterschiedlicher Witterung durchgeführt. Als Vergleich zu den thermografischen Messungen in situ wurde ein Messdurchgang im Labor durchgeführt, um die Beeinflussung der Messergebnisse durch die Witterung zu prüfen.

Innerhalb eines Messdurchgangs wurden für einen ausgewählten Bereich einer Asphaltbefestigung unter den Winkeleinstellungen von  $90^\circ$  bis  $20^\circ$  in  $5^\circ$ -Schritten zur Horizontalen nacheinander Thermogramme erstellt. Geringere Winkeleinstellungen wurden von der Untersuchung ausgeschlossen, da sie für eine thermografische Messung in der Praxis keine Relevanz haben. Es wurde mit der Messung der Temperaturen unter dem  $90^\circ$ -Winkel begonnen und mit dem  $20^\circ$ -Winkel geendet.

Um die Betrachtung desselben Bereiches einer Asphaltbefestigung während eines Messdurchgangs unter verschiedenen Winkeleinstellungen realisieren zu können, muss der Messaufbau jeweils um eine definierte Strecke verschoben werden. Diese Situation ist beispielhaft für den Winkel  $90^\circ$  in Abbildung 14, für den Winkel  $80^\circ$  in Abbildung 15 und für den Winkel  $30^\circ$  in Abbildung 16 dargestellt. Um zu garantieren, dass unter jedem Winkel stets derselbe Bereich der Asphaltbefestigung ausgewählt wird, wurde ein zusammensteckbarer Rahmen mit den Abmessungen  $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$  hergestellt und vor Beginn des Messdurchgangs auf der Straße positioniert. Aufgrund der Größe des Bildausschnittes der Thermografiekamera ist die Kantenlänge des Rahmens beschränkt. In den folgenden drei Abbildungen ist dieser Rahmen jeweils in oranger Farbe eingezeichnet.

Abbildung 14 zeigt den Messaufbau für den  $90^\circ$ -Winkel zur Horizontalen. Die Objektivlinse der Thermografiekamera ist senkrecht auf die Straßenoberfläche gerichtet. Die Mitte der Objektivlinse befindet sich über dem Mittelpunkt des vor Beginn des Messdurchgangs auf der Straße platzierten Rahmens. Zur Kontrolle der Positionierung der Objektivlinse der Kamera innerhalb des Rahmens wird ein Lot angehalten. Der Abstand von der Mitte der Objektivlinse zur Straßenoberfläche in der Mitte des Rahmens beträgt  $191\text{ cm}$ , dies entspricht der maximalen Ausziehhöhe des Stativs ( $176\text{ cm}$ ) plus Dreifuß und Kippaufsatz. Diese Messhöhe wird bei allen folgenden Winkeleinstellungen konstant gehalten. Der Abstand von der Mitte des Stativs zur Mitte des Rahmenfeldes (und somit zur Mitte der Objektivlinse) beträgt  $72\text{ cm}$ .

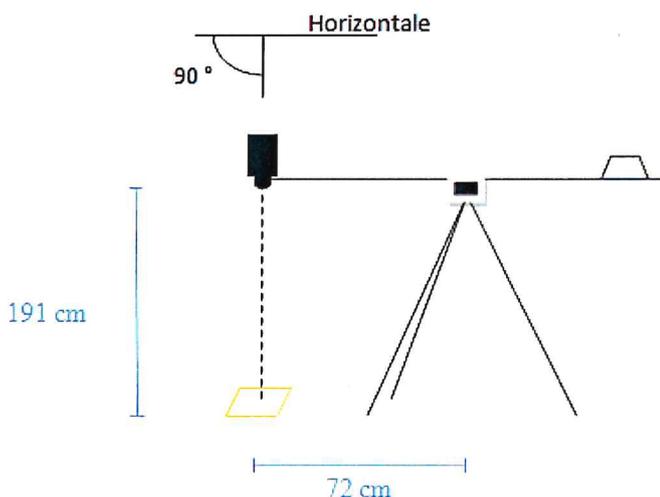


Abbildung 14. Schematische Darstellung des Messaufbaus für einen Winkel von  $90^\circ$ .

Um immer denselben Bereich der Asphaltbefestigung zu erfassen, ist es erforderlich, das Stativ bei jeder Winkeländerung um eine mit dem Tangenssatz berechnete Verschiebung  $x$  nach hinten zu versetzen. Die genauen Verschiebungen in Abhängigkeit zum Messwinkel, welche immer für eine konstante Messhöhe von 191 cm gelten, sind Tabelle 10 zu entnehmen.

**Tabelle 10: Horizontale Verschiebungen  $x$  für das Stativ mit einer Messhöhe von 191 cm**

Winkel [°]	Messhöhe $h$ [cm]	Verschiebung $x$ [cm]	Summe $x$ [cm]	Abstand zwischen der Mitte des Rahmens und der Stativmitte [cm]
90	191	0,0	0,0	72,0
85	191	16,7	16,7	88,7
80	191	17,0	33,7	105,7
75	191	17,5	51,2	123,2
70	191	18,3	69,5	141,5
65	191	19,6	89,1	161,1
60	191	21,2	110,3	182,3
55	191	23,5	133,7	205,7
50	191	26,5	160,3	232,3
45	191	30,7	191,0	263,0
40	191	36,6	227,6	299,6
35	191	45,2	272,8	344,8
30	191	58,0	330,8	402,8
25	191	78,8	409,6	481,6
20	191	115,2	524,8	596,8

Zur Einhaltung gleicher Bedingungen wurde die Position der Mitte der Objektivlinse bei jeder Messung stets auf der Anfangsmesshöhe von 191 cm belassen. In Abbildung 15 ist der Messaufbau für einen Winkel von 80° zur Horizontalen dargestellt. Zur Messung unter einem Winkel von 80° ist das Stativ laut Tabelle 10 um 33,7 cm nach hinten verschoben, der Abstand zwischen der Mitte des Rahmens und der Mitte des Stativs beträgt 105,7 cm. Danach kann die Holzlatte mit Hilfe der Verkürzung des Sicherheitsgurts auf den Winkel von 80° gekippt werden. Der Abstand zwischen der Objektivlinse und der Straßenoberfläche vergrößert sich durch das Anstellen der Holzlatte im vorderen Bereich. Um die einheitliche Messhöhe von 191 cm zu gewährleisten, werden die Stativbeine entsprechend verkürzt (Markierungen für jede Winkeleinstellung sind vorteilhaft). Die Verschiebung ist korrekt, wenn in der Mitte des Displays der Thermografiekamera der Mittelpunkt des Rahmens zu erkennen ist.

Das Verschieben des Stativs, das Anstellen der Holzlatte, das Einstellen des zu messenden aktuellen Winkels und das Verkürzen der Stativbeine ist für jede neue Winkeleinstellung durchzuführen. In Abbildung 16 ist exemplarisch die Versuchsanordnung für das Messen unter einem Winkel von 30° zur Horizontalen dargestellt. Das Stativ muss hierfür aus der Anfangsstellung um 330,8 cm nach hinten ver-

schoben werden. Die anderen Abläufe erfolgen analog zur der beschriebenen Einstellung des 80°-Winkels.

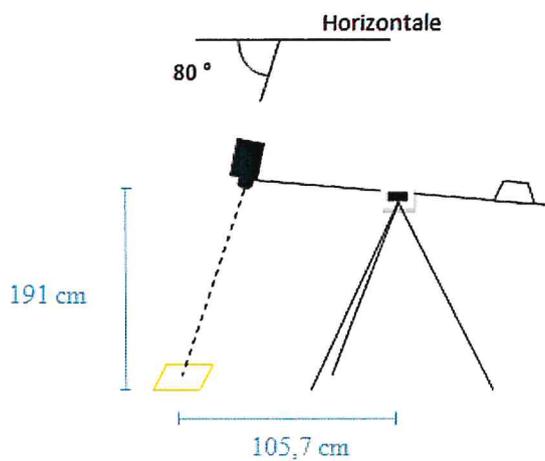


Abbildung 15. Schematische Darstellung des Messaufbaus für einen Winkel von 80°.

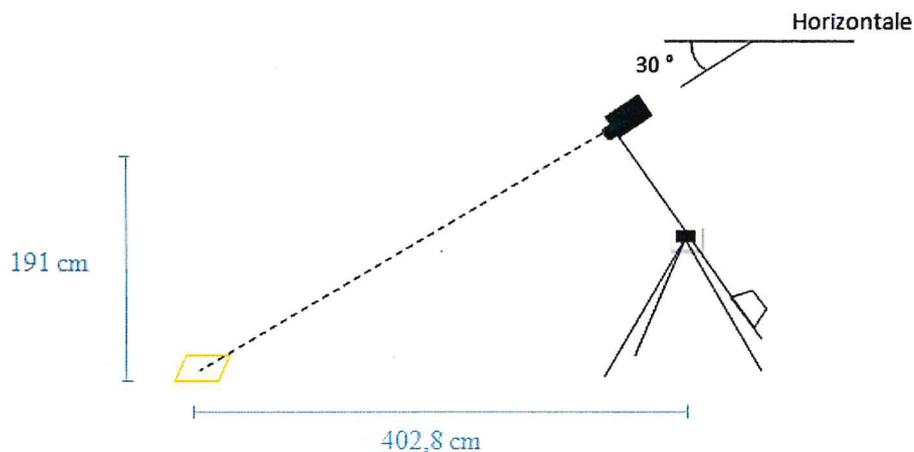


Abbildung 16. Schematische Darstellung des Messaufbaus für einen Winkel von 30°.

Vor jeder Messung werden die Lufttemperatur ( $T_{\text{Luft}}$ ) mit Hilfe eines digitalen Funkthermometers und die Temperatur der Straßenoberfläche ( $T_{\text{Straße}}$ ) mittels eines Infrarotthermometers bestimmt. Das Infrarotthermometer zeigt Temperaturen auf  $\pm 1^\circ\text{C}$  genau an und erkennt damit geringe Temperaturschwankungen nicht.

Die aufgenommenen Thermogramme werden anschließend mit dem Programm IR-BIS V2.2 ausgewertet. Die minimale Temperatur ( $T_{\text{min}}$ ) und die maximale Temperatur ( $T_{\text{max}}$ ) werden innerhalb des Rahmens, also des betrachteten Bereichs der Asphaltbefestigung, ermittelt. Beispielhaft ist die Auswertung an dem Thermogramm für den 90°-Winkel des Messdurchgangs 1 am Ort Leiferder Weg in Braunschweig-Rüningen erläutert, siehe Abbildung 17.

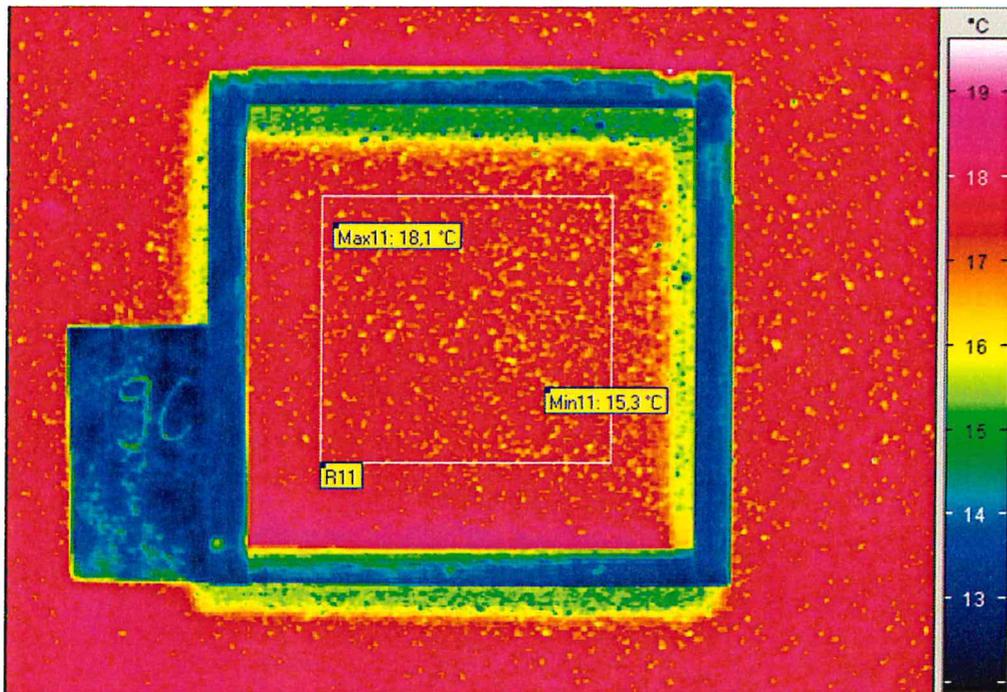


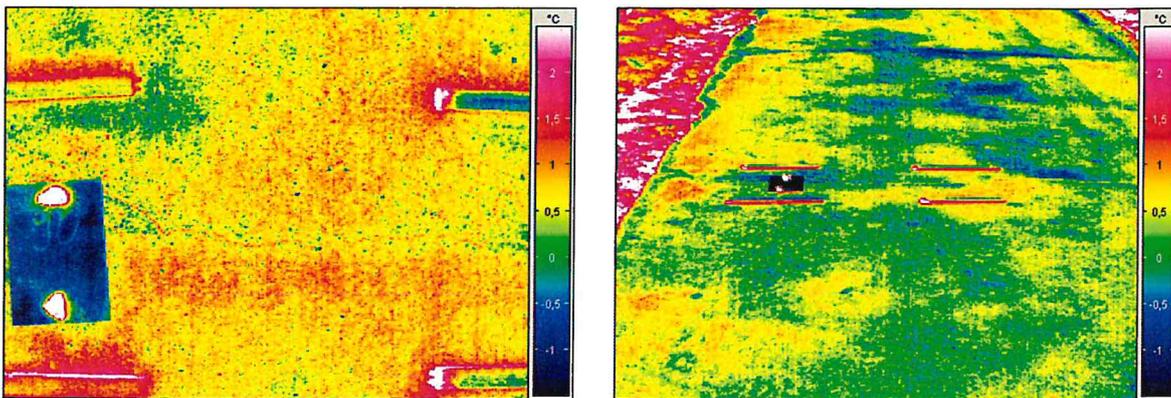
Abbildung 17. Beispiel zur Ermittlung der minimalen ( $T_{\min}$ ) und maximalen ( $T_{\max}$ ) Temperaturen innerhalb des Rahmens für das noch nicht normierte Thermogramm des  $90^\circ$ -Winkels nach Messdurchgang 1 (Leiferder Weg, Braunschweig-Rüningen).

Es ist zu erkennen, dass der Rahmen die Temperaturen der Asphaltbefestigung zum Teil durch Schattenbildung bzw. Wärmestau beeinflusst. Aufgrund dessen wurde nur der vom Schatten unbeeinflusste Bereich innerhalb des Rahmens zur Auswertung der Temperaturen herangezogen, siehe Abbildung 17. Analog wurde für alle im Rahmen eines Messdurchgangs erstellten Thermogramme verfahren. Die ermittelten Temperaturen wurden graphisch als Verlauf für alle gemessenen Winkeleinstellungen dargestellt.

Der Abstand der Thermografiekamera zum untersuchten Objekt vergrößert sich mit kleineren Winkeleinstellungen um fast das Dreifache. Bei der Messung muss somit eine längere Strecke durch die Luft zurückgelegt werden, dabei können infrarot-optische Eigenschaften - vor allem die Bestandteile Wasserdampf und Kohlendioxid - das Messergebnis beeinflussen (vgl. InfraTec, 2003).

Die Größe der Messentfernung, also der Abstand der Objektivlinse zum Messbereich beeinflusst die aufgenommene Temperaturverteilung. Bei einem  $20^\circ$ -Winkel und der dadurch größeren Messentfernung ist der aufgenommene und im Thermogramm dargestellte Ausschnitt erheblich größer als bei einer geringen Messentfernung unter einem Winkel von  $90^\circ$ . Dies ist in Abbildung 18 zu erkennen. Die Zahl der Messpunkte (Pixel) der Thermografiekamera ist bei jedem Thermogramm gleich. Das verwendete Thermografiesystem VarioCAM® hr inspect hat eine Auflösung von  $384 \times 288$  Pixel (InfraTec, 2007). Aufgrund der größeren Entfernung zum Messobjekt wird der betrachtete Messbereich in dem Thermogramm, welches unter dem Winkel von  $20^\circ$

erstellt wurde, kleiner dargestellt. Folglich verringert sich die Zahl der Messpunkte, welche die Temperaturen im betrachteten Bereich erfassen. Die Temperaturermittlung ist somit ungenauer, weil kleinflächiger. Lokale Minima und Maxima können nicht exakt bestimmt werden, wenn der Bereich durch weniger Messpunkte erfasst wird. Insgesamt werden die Temperaturen gemittelt - dies erklärt die im Beispiel erkennbare Reduktion der Temperaturspanne. Maximale Temperaturwerte werden messtechnisch bedingt verringert. Die Aussagekraft eines unter einem 90°-Winkel erstellten Thermogramms ist demnach höher, siehe Abbildung 18. Der unter einem 90°-Winkel aufgenommene Riss (Abbildung 18 links) ist bei der Aufnahme unter einem 20°-Winkel nicht zu erkennen (Abbildung 18 rechts).



**Abbildung 18.** Beispiel für den Einfluss von Kamerawinkel und -abstand: Thermogramme eines Bereiches unter einem Messwinkel von 90° (links) und 20° (rechts).

Der Ausschnitt des Thermogramms bedingt durch eine weitere Aufnahmeentfernung darf somit nicht zu groß gewählt werden. Dies gilt auch für die Messhöhe, welche aufgrund der Bildqualität auf maximal 3 m beschränkt bleiben sollte.

Hingegen sollte der Messbereich möglichst groß sein und möglichst wenige Messdurchgänge erfordern. Zur Erfassung einer kompletten Fahrstreifenbreite mit dem Normalobjektiv mit einem Öffnungswinkel von  $(30 \cdot 23)^\circ$  würde eine Kamerahöhe von 4,50 m benötigt, damit ein thermographisches Untersuchungsgebiet von 2,60 m · 2,10 m erreicht wird. Eine solche Höhe ist jedoch aus Gründen der Thermogrammqualität und Aufnahmetechnik sowie aus Gründen der Verkehrstauglichkeit unvorteilhaft.

Als Lösung wurde eine 12,5 mm Weitwinkelobjektiv mit einem Bildfeld von  $57^\circ \cdot 44^\circ$  beschafft, sodass eine Höhe von etwa 210 cm bei einer Aufnahmefläche von 260 cm · 190 cm resultiert, siehe Abbildung 19.

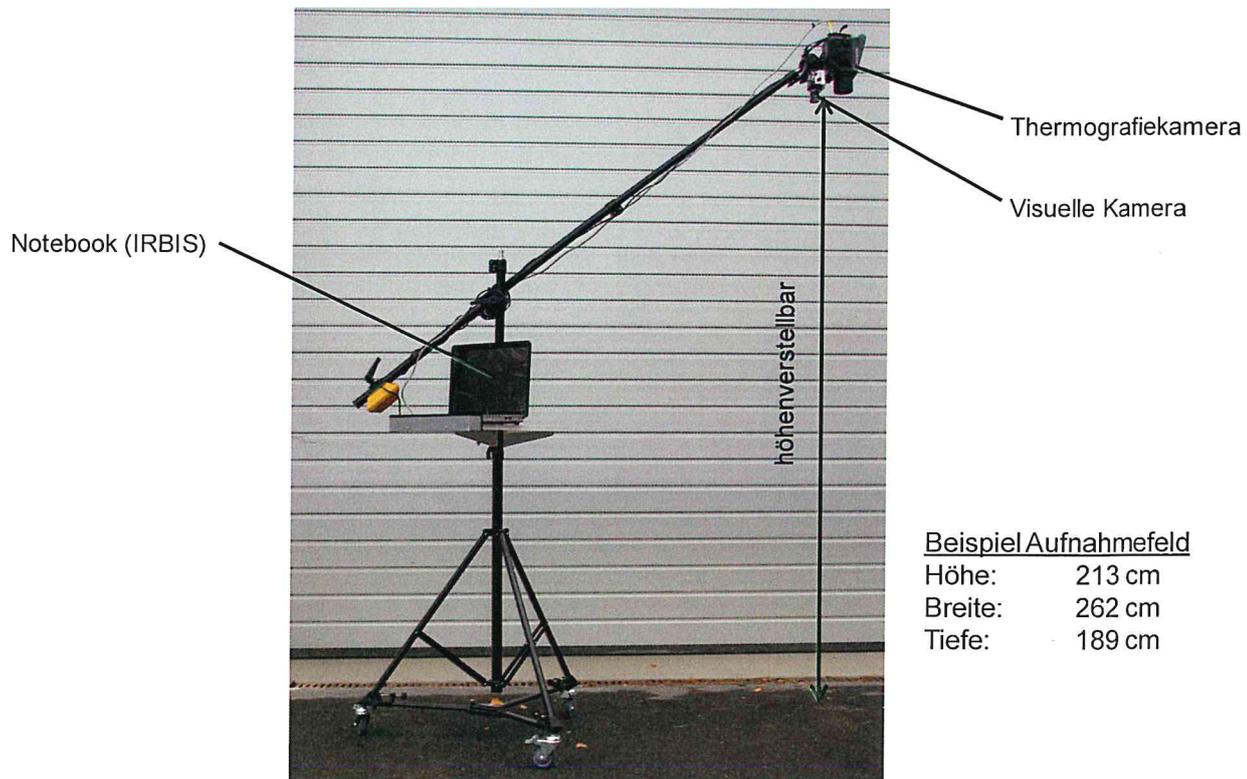


Abbildung 19. Messvorrichtung.

#### 4.2 Zeitgleiche Aufnahme von Wärme- und Digitalbild

Für die Beurteilung von Thermografieaufnahmen ist es vorteilhaft, zeitgleich zum Wärmebild ein digitales Foto mit dem gleichen Bildausschnitt aufzunehmen. Abbildung 20 zeigt beispielhaft die benachbarte Anordnung von Thermografiekamera und digitaler Kamera.

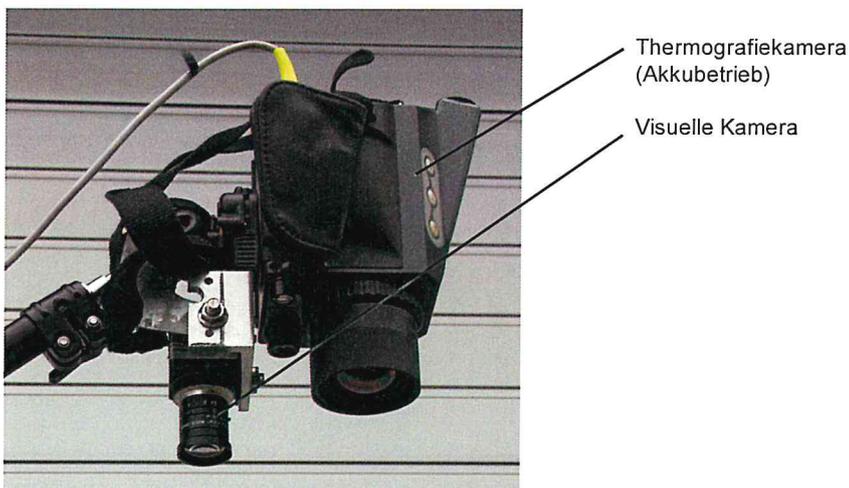


Abbildung 20. Kamerapositionen zur zeitgleichen Aufnahme von Wärmebild und Digitalfoto.

Durch vergleichende Gegenüberstellung beider Bilder werden Inhomogenitäten schneller identifiziert und viele typische Fehlinterpretationen a priori ausgeschlossen.

Dies wird bei der späteren Praxiserprobung an Baumaßnahmen deutlich, siehe Kapitel 5.

Beispielsweise erscheinen in dem in Abbildung 21 (links) dargestellten Wärmebild einer Asphaltplatte bestimmte Bereiche deutlich wärmer und lassen Inhomogenitäten im Platteninneren vermuten. Bei Berücksichtigung der Versuchsanordnung (Foto rechts daneben) wird klar, dass die Oberfläche der Asphaltplatte mittels Infrarotstrahlern erwärmt wurde und sich wegen der uneinheitlichen Wärmequelle sichelartige Bereiche stärkerer Wärmestrahlung gebildet haben.

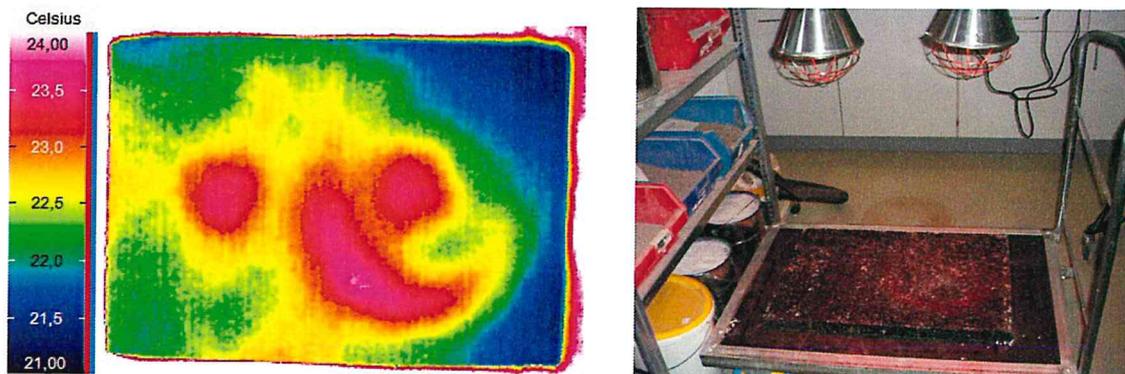


Abbildung 21. Oberflächentemperaturen an einer uneinheitlich erwärmten Asphaltplatte.

### 4.3 Thermografische Identifikation von Inhomogenitäten in Asphaltplatten

Die thermografische Analyse einer bitumengebundenen Straßenschicht und die eindeutige Detektion von Inhomogenitäten setzt eine homogene Erwärmung der Schicht voraus. Zur Untersuchung von Erwärmungseffekten zufolge aktiver und passiver Thermografie und ihrer Einflüsse beim Auffinden von Inhomogenitäten in Asphalt-schichten wurde die nachfolgend vorgestellte Parameterstudie an im Labor hergestellten Asphaltplatten durchgeführt.

#### 4.3.1 Probplattenherstellung

Im Labor wurden 8 Probplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät gemäß Technischem Regelwerk (FGSV, 2007: TP Asphalt-StB, Teil 33) hergestellt. Dabei wurden

- die Plattendicke (4, 6, 8 und 10 cm),
- die Asphaltmischgutart (Walzasphalt (Asphaltbeton AC und offenerporiger Asphalt PA) und Gussasphalt MA),
- die Asphaltmischgutsorte (AC 22 T N, AC 32 T N, PA 11 und MA 8 S)
- und die lichttechnischen Oberflächeneigenschaften (ohne und mit Aufhellungsgestein in unterschiedlichen Anteilen)

variiert, siehe Tabelle 11. Platte 9 wurde durch Ausbau aus einer Straße gewonnen.

Tabelle 11: Variation der Asphaltplatten-Eigenschaften

Platte-Nr.	Asphaltmischgutart	Dicke [cm]	Aufhellung
1	Asphalttragschichtmischgut AC 22 T N	4	nein
2	Asphalttragschichtmischgut AC 22 T N	6	nein
3	Asphalttragschichtmischgut AC 22 T N	10	nein
4	Asphalttragschichtmischgut AC 22 T N	4	geringe Menge
5	Asphalttragschichtmischgut AC 22 T N	6	vollflächig
6	Asphalttragschichtmischgut AC 32 T N	8	nein
7	Offenporiger Asphalt PA 11	6	nein
8	Gussasphalt MA 8 S; entspricht nicht dem Technischem Regelwerk	4	nein
9	Gussasphalt MA 8 S; großtechnisch hergestellt und aus der Straße ausgebaut	5	nein

Die Asphaltplatten wurden anfangs mit einer Länge von 40 cm und einer Breite von 30 cm hergestellt, später mit einer Länge von 70 cm und einer Breite von 50 cm, weil sich im Rahmen der Untersuchungen herausstellte, dass nur bei den größeren Plattenabmessungen ungewünschte Randeinflüsse vermieden werden können. Zur Produktion der großen Platten wurde ein entsprechend leistungsfähiges (in Deutschland einzigartiges) Verdichtungsgerät eingesetzt.

In jede Platte wurde mindestens eine Fehlstelle eingebaut, siehe Abbildung 22. Die Fehlstellen wurden während der Herstellung eingebracht durch Einlegen von Stahlzylindern oder -prismen und nachträglicher Entfernung dieser Stahlkörper. Der folglich in der Platte verbleibende Hohlraum sollte durch die thermografische Messung als Inhomogenität identifiziert werden.

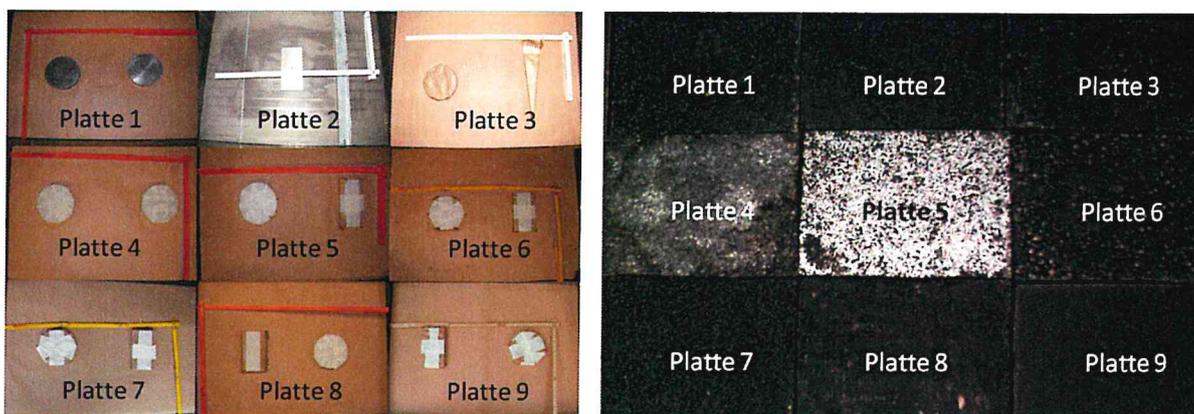


Abbildung 22. Draufsicht: eingebaute Fehlstellen (links) und fertige Asphaltplatten (rechts).

Bei den Platten 1 bis 8 wurde der Abkühlprozess nach Plattenverdichtung mittels Wärmebildkamera über eine Dauer von mindestens 3 Stunden aufgezeichnet, um

eventuelle Einflüsse von Dicke und Material auf die Abkühlgeschwindigkeit zu registrieren. Es wurden keine nennenswerten Differenzen festgestellt.

#### 4.3.2 Platten-Erwärmung mittels aktiver und passiver Thermografie

##### 4.3.2.1 Aktive Thermografie

Die Asphaltplatten wurden im Laborofen auf eine Temperatur von 55°C erwärmt und anschließend auf Raumtemperatur abgekühlt. Während der Abkühlphase bildete sich ein Temperaturgradient von Plattenmitte zu Plattenrand aus.

Eine alternative Erwärmung mittels Matten (wie sie im Hochbau verwendet werden) ist nicht zielführend, weil keine ausreichenden Oberflächentemperaturen erreicht werden.

Eine alternative Erwärmung mittels Infrarotstrahlern (wie sie bei der Tierzucht verwendet werden) bei seitlicher Dämmung mittels aluminumkaschierter Styroporplatten, siehe Abbildung 23, ist nicht zielführend, weil wegen der inhomogenen Wärmequelle der Infrarotstrahler keine vollflächig homogene Erwärmung erreicht wird.

Eine verbesserte Homogenität in der Erwärmung kann erreicht werden, wenn über der Asphaltplatte eine Wasserschicht aufgebracht wird, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, welche die Wärmedifferenzen etwas ausgleicht.



Abbildung 23. Erwärmung der Asphaltprobenplatte mittels Infrarotlampen; Asphaltplatte unter Wasserfläche (links).

Eine vollflächige und einheitliche Erwärmung der Asphaltplatte kann schließlich mittels eines erwärmten Wasserbades erreicht werden, siehe Abbildung 24. Dabei wird die Asphaltplatte in ein Wasserbad mit Temperier- und Zirkulationseinrichtung gesetzt, womit sichergestellt ist, dass die Wassertemperatur sich über die gesamte Fläche verteilt. Thermografische Aufnahmen können unmittelbar nach dem Herausnehmen der Asphaltplatte aus dem Wasserbad erfolgen.

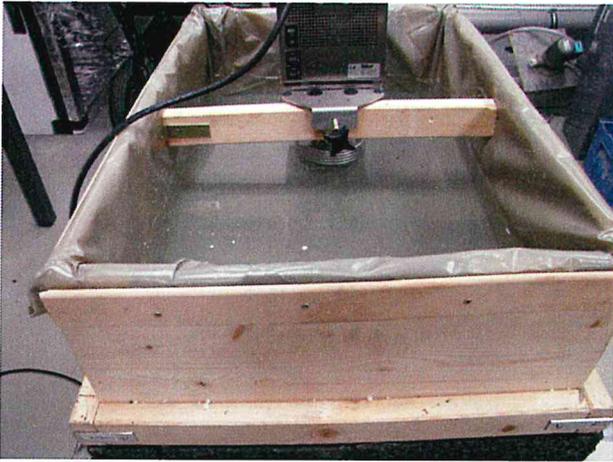


Abbildung 24. Homogenes Erwärmen einer Asphaltplatte im Wasserbad mittels aktiver Thermografie.

#### 4.3.2.2 Passive Thermografie

Für die passive Thermografie wurden die Asphaltplatten für einen Zeitraum von zwei Wochen direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt, siehe Abbildung 25. Abends wurden sie mit einer Folie abgedeckt, um Eindringen von Feuchtigkeit weitgehend zu vermeiden. Randeinflüsse wurden durch Abhängen eines Vlieses minimiert.

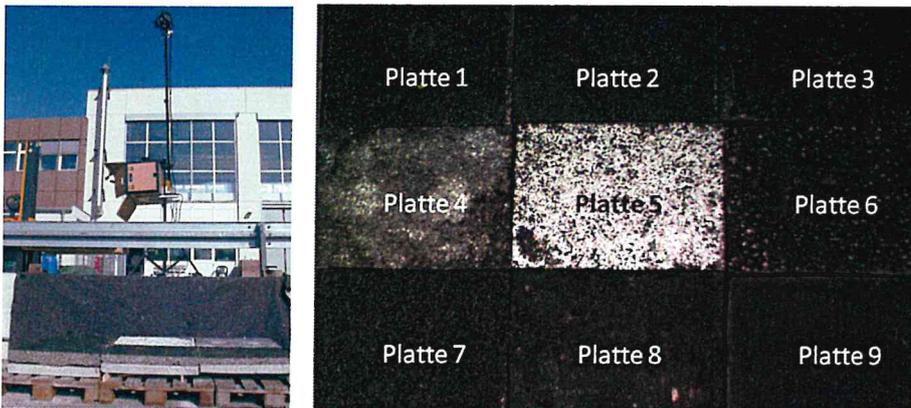


Abbildung 25. Messanordnung bei der passiven Thermografie, Lage der Platten (rechts).

### 4.3.3 Messergebnisse

#### 4.3.3.1 Messabstand

Im Labor kann der Abstand zwischen der aufzunehmenden Fläche und der Thermografiekamera grundsätzlich frei gewählt werden. Im Rahmen des Projekts wurde bei Nutzung des Normalobjektiv mit einem Bildfeld von  $30^\circ \cdot 23^\circ$  ein Abstand von etwa 130 cm gewählt, siehe Abbildung 26.



Abbildung 26. Messanordnung im Labor.

#### 4.3.3.2 Messergebnisse bei aktiver Thermografie

In den folgenden Abbildungen sind die Oberflächentemperaturen nach der Erwärmungsphase dargestellt. Hierbei ist auf die optimale Skalierung zur Darstellung der Oberflächentemperaturen zu achten. Die Wärmebilder wurden mit einer Frequenz von 0,01 Hertz, d. h. mit einem Zeitabstand von 100 Sekunden aufgenommen.

Die Platten 1 bis 3 unterscheiden sich nur in ihren Dicken von 4, 6 und 10 cm. Abbildung 27 (links) zeigt die Fehlstellen in der Platte 1 anhand der höheren Oberflächentemperaturen (erkennbar an den roten Kreisen). Bei Platte 2 (Abbildung 27, rechts) ist die in der Mitte der Platte befindliche Fehlstelle nur ansatzweise erkennbar, während Platte 3 (Abbildung 28, links) einen nahezu einheitlichen Rotton im mittleren Plattenbereich aufweist. Bei Platte 5 (Abbildung 28, rechts) ist die Oberfläche vollflächig mit Aufhellungsgesteinen hergestellt. Auch hier sind nur ansatzweise Fehlstellen zu erkennen.

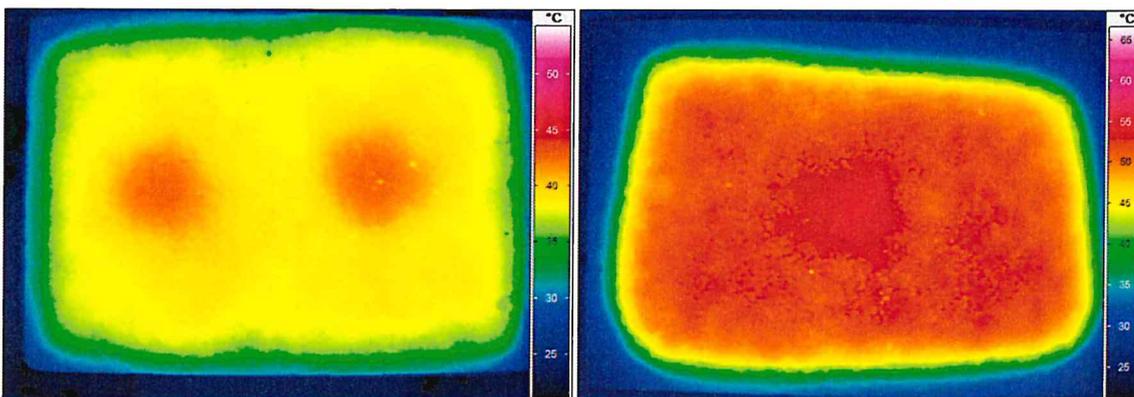


Abbildung 27. Temperaturen nach Erwärmung von Platte 1 (links) und Platte 2 (rechts).

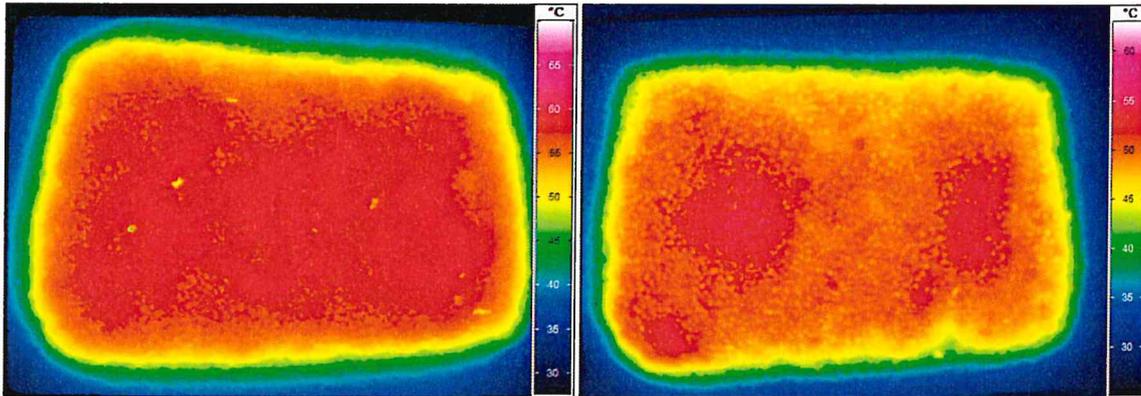


Abbildung 28. Temperaturen nach Erwärmung von Platte 3 (links) und Platte 5 (rechts).

Analoges gilt für Platte 7 aus Ofenporigem Asphalt mit einer Dicke von 6 cm, siehe Abbildung 29 links. Platte 8 wurde aus Gussasphalt mit einer Dicke von 4 cm hergestellt, siehe Abbildung 29. Eindeutig sind hier die runde Fehlstelle in der linken Hälfte und die rechteckige Fehlstelle in der rechten Hälfte auszumachen.

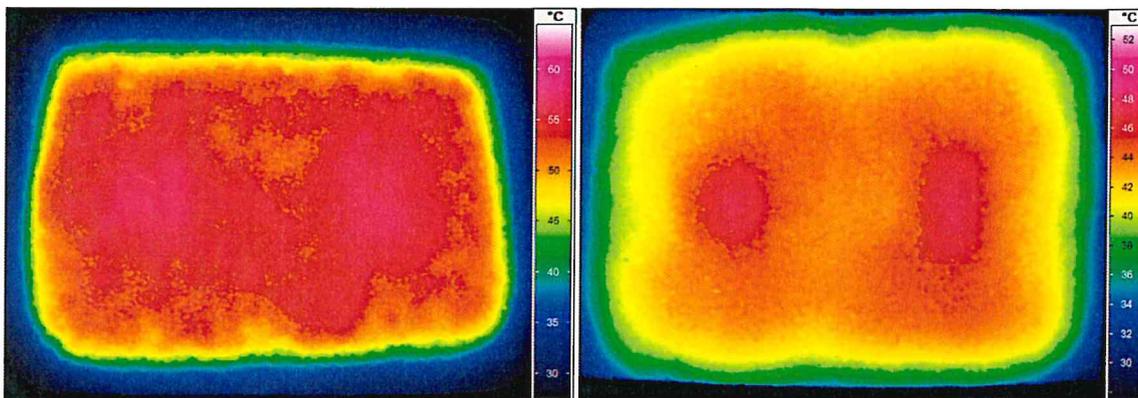


Abbildung 29. Temperaturen nach Erwärmung von Platte 7 (links) und Platte 8 (rechts).

Abbildung 30 zeigt die Oberflächentemperaturen der 5 cm dicken Platte 9 aus Gussasphalt. Eine eindeutige Detektion von Inhomogenitäten ist nicht möglich.

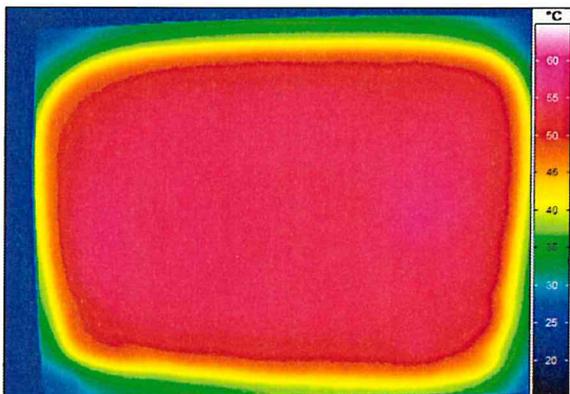


Abbildung 30. Temperaturen nach Erwärmung von Platte 9.

Auf der Grundlage der hier gemachten Beobachtungen im Labor wird festgestellt, dass die aktive Thermografie nicht für eine eindeutige Detektion von Inhomogenitäten an Asphalt-schichten geeignet ist. Im Vergleich zu realen Verhältnissen ist zu beachten, dass die im Labor untersuchten Asphaltplatten keinen Verbund mit der darunterliegenden Auflage (Betonplatte) aufwiesen und sich ein Wärmeaustausch auch den Seiten einstellen konnte.

#### 4.3.3.3 Messergebnisse bei passiver Thermografie

An mehreren Sonnentagen wurden mit einer Frequenz von 0,001 Hertz, d. h. mit einem Abstand von 1.000 Sekunden, also alle 17 Minuten, Wärmebilder aufgenommen. Beispielhaft sind in Abbildung 31 bis Abbildung 33 die Messergebnisse dargestellt, die am 18. Juni 2012 um 11:30 Uhr, um 12:00 Uhr und um 12:30 Uhr aufgenommen wurden. Die Skalierung ist für alle Abbildungen gleich, sodass die Erwärmung der Platten gut zu erkennen ist. Die Bilder wurden mit dem Weitwinkelobjektiv aufgenommen, womit die Krümmung der Bilder zu begründen ist.

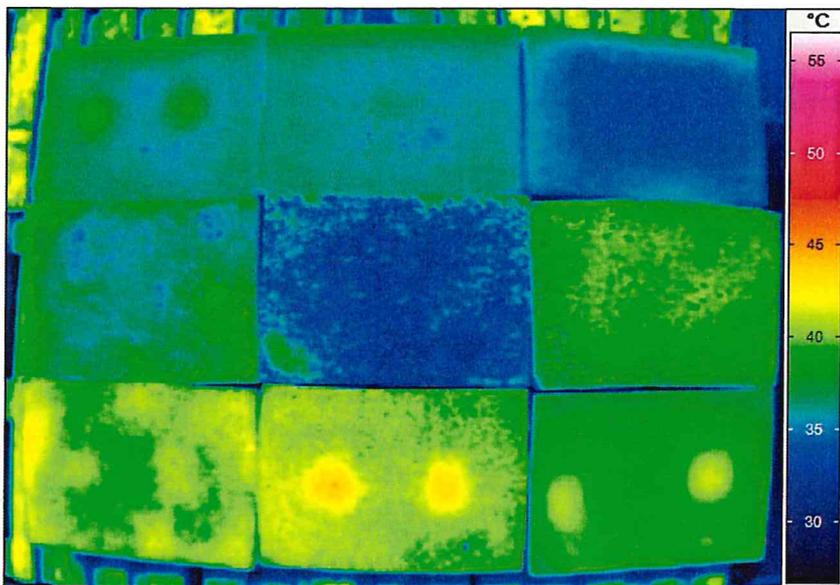


Abbildung 31. Oberflächentemperaturen der 9 Platten am 18. Juni 2012 um 11:30 Uhr.

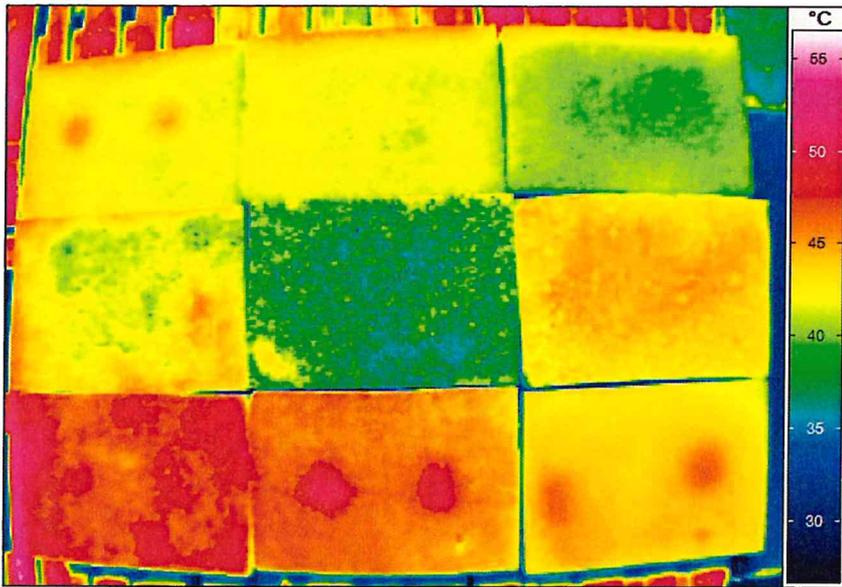


Abbildung 32. Oberflächentemperaturen der 9 Platten am 18. Juni 2012 um 12:00 Uhr.

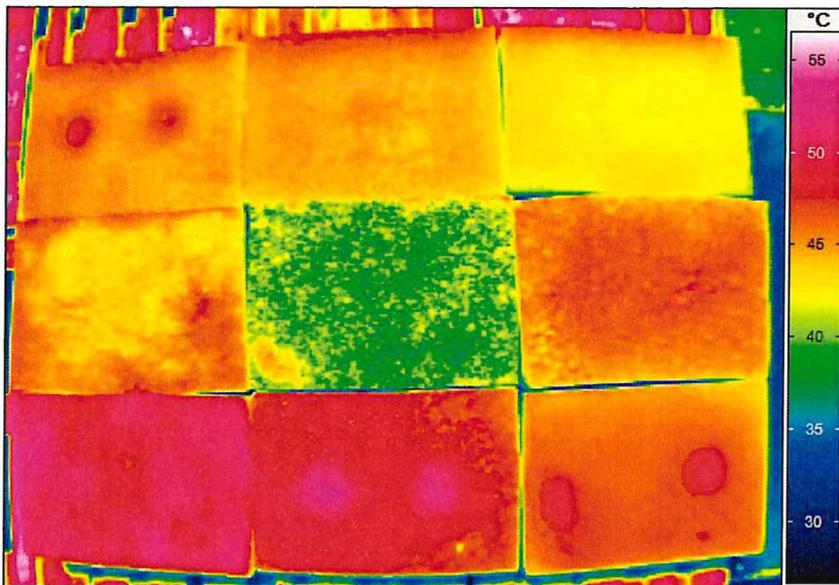


Abbildung 33. Oberflächentemperaturen der 9 Platten am 18. Juni 2012 um 12:30 Uhr.

Bereits um 11:30 Uhr sind Inhomogenitäten in den dünnen Platten 1, 8 und 9 zu erkennen. Bei der mit der gleichen Dicke von 4 cm eingebauten Platte 4 wirken die Aufhellungsgesteine, womit die überwiegend blaue Farbe, also geringe Temperaturen, zu begründen sind. Dieser Effekt ist bei Platte 5 ebenfalls zu erkennen. Die mit 10 cm dickste Platte 3 ist noch von der Nacht her so kühl, dass geringe Temperaturen an der Oberfläche herrschen. Die offenporige Platte 7 erwärmt sich aufgrund der großen Hohlraumgehaltes homogen.

Generell können aufgrund der längeren Sonneneinstrahlung höhere Oberflächentemperaturen nachgewiesen werden. Eindeutig sind dennoch nur die Inhomogenitäten bei den Platten 1, 8 und 9 zu detektieren, siehe Abbildung 32. Deutlich ist der Einfluss von Aufhellungsgesteinen zu erkennen. Die Oberflächentemperaturen bei

Platte 5 liegen um etwa 10 bis 15 Kelvin unter den umliegenden Platten. Platte 4 mit einem geringen Anteil an Aufhellungsgesteinen weist weitaus höhere Temperaturen an der Oberfläche aus. 30 Minuten später steigen die Oberflächentemperaturen weiter an, siehe Abbildung 33. Die Aussagen gelten analog. Ansatzweise werden Inhomogenitäten in Platte 2 und in Platte 7 aus offenporigem Asphalt detektiert.

#### 4.4 Sonstige Einflüsse

Bei Messungen an Straßenabschnitten wurde festgestellt, dass folgende weitere Faktoren zu erheblichen Temperaturdifferenzen an der Fahrbahnoberfläche führen und das thermografische Messergebnis entscheidend beeinflussen können.

- **Fugenvergussmasse:** Fugenvergussmassen können im Regelfall aufgrund ihrer vergleichsweise dunklen Farbe die Oberflächenstrahlung stärker absorbieren als die Asphaltoberfläche und weisen daher höhere Temperaturen auf.
- **Kondenswasser:** Kondenswasser kann von den Fahrzeugen auf die Oberfläche gelangen, wenn sich bei Fahrzeugen mit eingeschalteter Klimaanlage aufgrund von Kondensationsvorgängen an kalten Leitungen Kondenswasser sammelt und von dort auf die Fahrbahnoberfläche abtropft. Dieses führt lokal zu geringeren Oberflächentemperaturen. In Abbildung 34 (rechts) ist der Einfluss von Kondenswasser auf die Fahrbahnoberflächentemperatur zu erkennen.

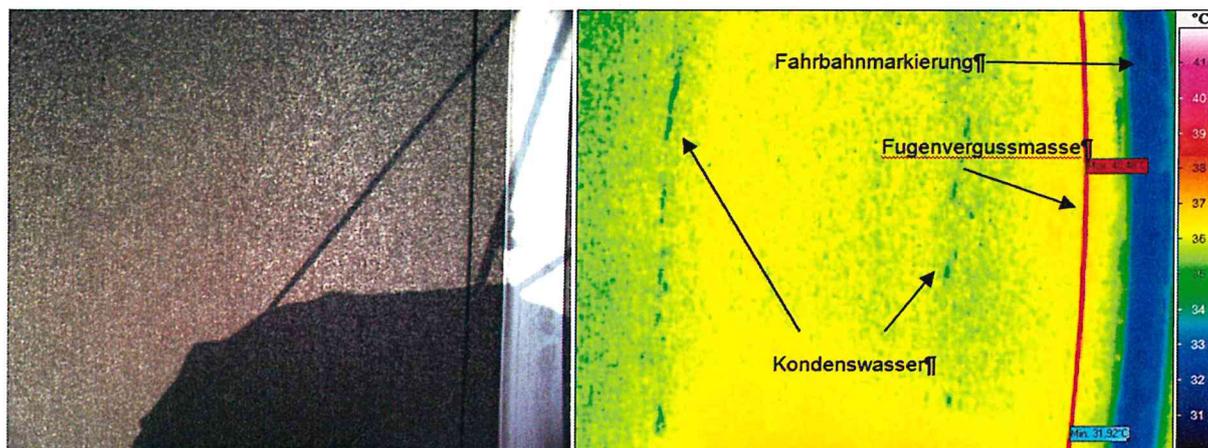


Abbildung 34. Einfluss von Kondenswasser und Fugenvergussmasse auf die Oberflächentemperatur.

- **Fahrbahnmarkierung:** Fahrbahnmarkierungen sind meist in greller Farbe ausgeführt, teils mit Glasperlen abgestreut. Die thermografische Aufnahme zeigt für solche Stellen ein deutlich geringeres Temperaturniveau, vgl. Abbildung 34.
- **Einlaufgitter:** Einlaufgitter, die der Entwässerung dienen, sind aus Stahl und zeigen daher eine von Asphalt deutliche abweichende Oberflächentemperaturbilanz, siehe Abbildung 35.

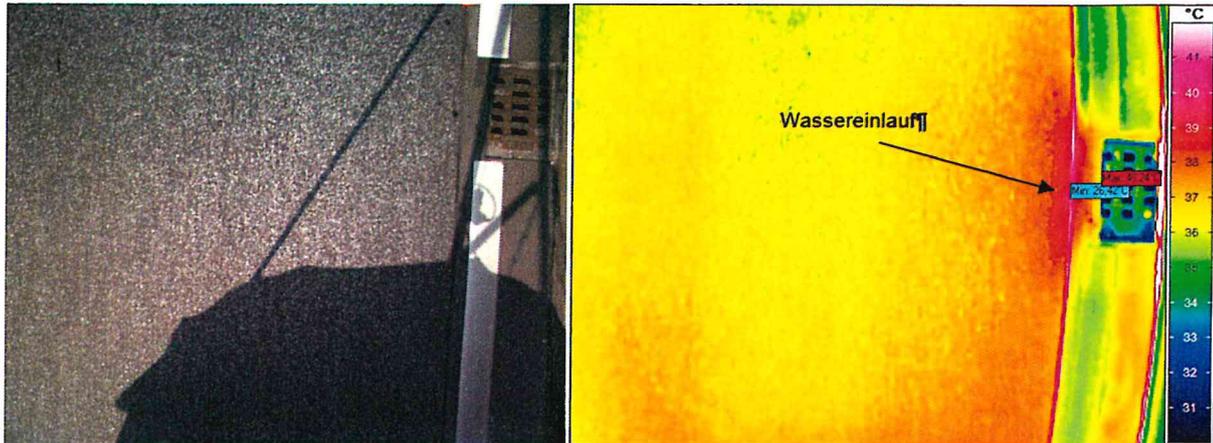


Abbildung 35. Oberflächentemperaturen vor Einlauf der Entwässerungseinrichtung.

- **Schattenwirkung und Reflexionen:** Schatten wirkt bei ausreichend langer Einwirkungszeit temperaturreduzierend auf den Asphaltbelag, vgl. Abbildung 36. In der visuellen Aufnahme in Abbildung 34 ist der Schatten des Messfahrzeuges zu erkennen, aufgrund der kurzen Verweilzeit hat dieser aber keinen erkennbaren Einfluss auf die Oberflächentemperatur zum Aufnahmezeitpunkt. Die kritische Zeitdauer der Einwirkung von Schatten zur Temperaturreduktion ist von Energiebilanz der Straßenoberfläche und den jeweils vorherrschenden Umgebungsbedingungen abhängig und konnte im Rahmen des Projekts nicht eindeutig identifiziert werden.

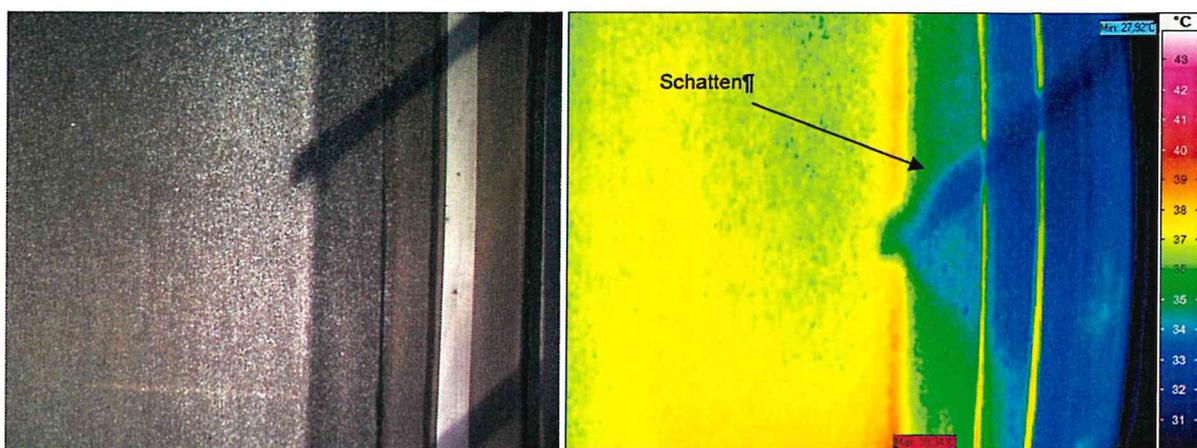


Abbildung 36. Einfluss von Schattenwirkung auf die Oberflächentemperatur der Fahrbahn.

Selbst kurzzeitige Abschattungseffekte können Thermografieaufnahmen verfälschen, wie etwa an einem Fahrzeug festgestellt, das für weniger als 10 Minuten im Messbereich geparkt war, siehe Abbildung 37. Der Schatten führte kurzfristig zur Abkühlung der Oberfläche, während der Motor inkl. Auspuff zur Erwärmung führte.

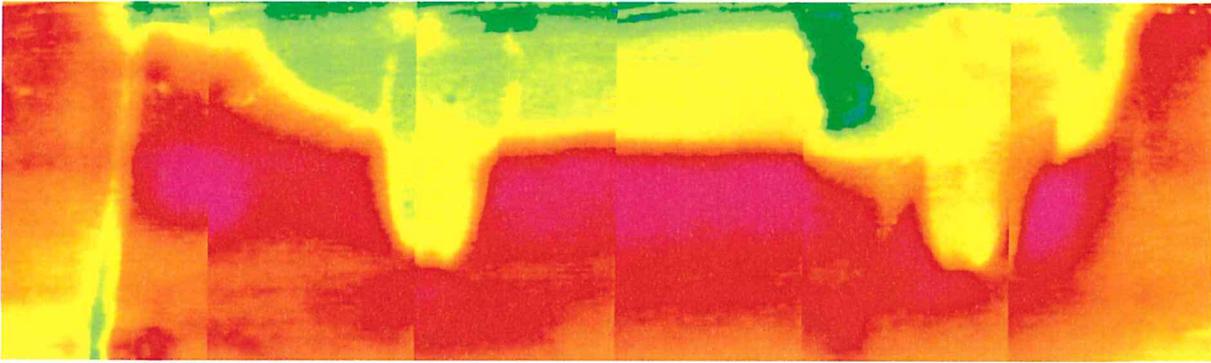


Abbildung 37. Thermogramm der Standfläche eines Fahrzeugs.

Auch Reflektionen von Bauteilen wie Leit- oder Lärmschutzwände können das Messergebnis beeinflussen, siehe Abbildung 38.

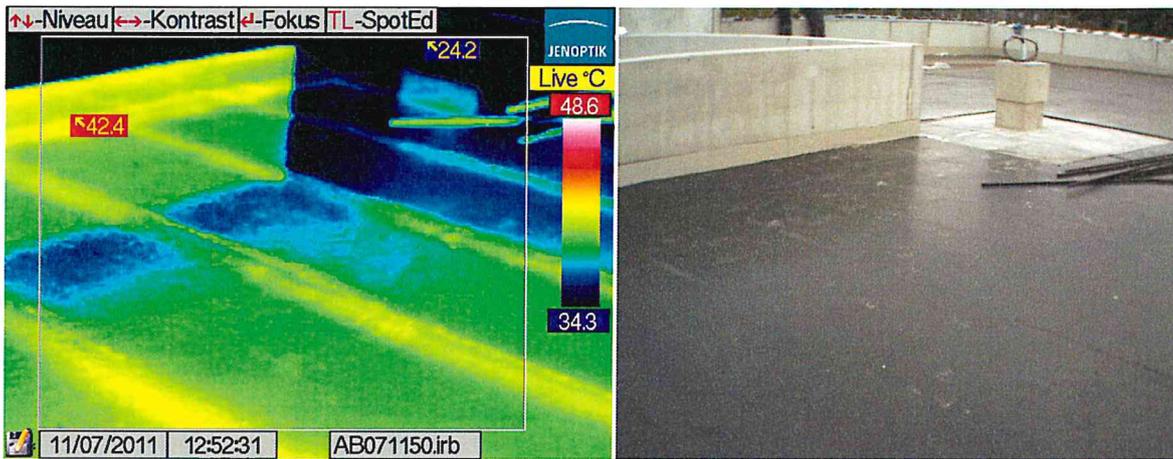


Abbildung 38. Einfluss der Reflektion von einer Betonwand.

- **Bitumenschweißbahn:** Auf thermografischen Aufnahmen von Asphaltbelägen auf Brücken sind mitunter die Überlappungsbereiche der Bitumenschweißbahnen in Form von regelmäßig angeordneten Streifen erkennbar, siehe Abbildung 39.

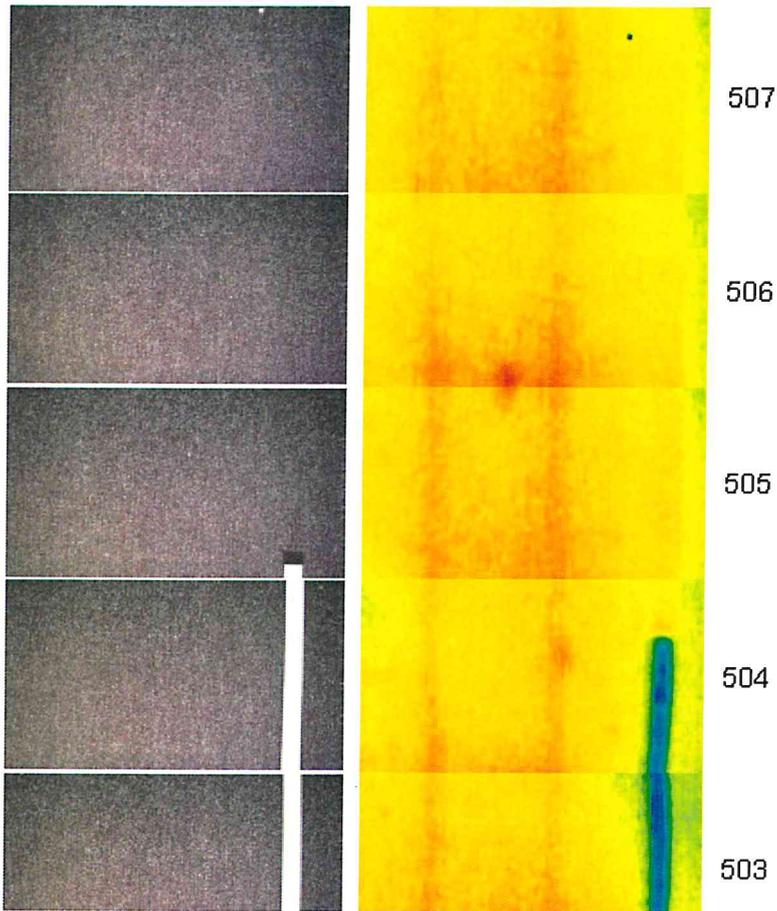


Abbildung 39. Erkennbare Überlappungsbereiche der Bitumenschweißbahnen.

## 5 Erprobung an ausgewählten Baumaßnahmen

Anhand von ausgewählten Baumaßnahmen wurde die Anwendung der Thermografie im Brückenbau in der Praxis erprobt, insbesondere zur

- Prüfung der Abdichtungsschicht vor dem Asphalteinbau,
- baubegleitenden Qualitätskontrolle und
- Nachkontrolle des Asphaltbelags.

Dabei sollte jeweils die Unterlage bzw. die Schicht auf Inhomogenitäten geprüft werden. Als Inhomogenität wird eine Hohlstelle bezeichnet, entweder infolge von mangelndem Schichtenverbund, oder infolge von Hohlräumen (Blasen, Rissen) in der Schicht.

Die thermografische Messung des heißen Asphaltmischguts während des Einbaus ist zur Qualitätskontrolle nicht zielführend.

Bei allen Messungen wurde zeitgleich zur thermografischen Aufnahme eine optische Aufnahme gemacht.

### 5.1 Entwicklung einer mobilen Messanlage

Mobile Thermografie-Messanlagen werden zunehmend zur Zustandserfassung und Zustandsbewertung von Straßen- und Brückenbelägen eingesetzt. Abbildung 40 zeigt z. B. die mobile Messanlage IRMU (= InfraRed Mobile Unit) der Abteilung Straßenbau/Abdichtungen der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA, Dübendorf). Dabei ist die Thermografiekamera in einer Höhe von 225 cm senkrecht zur Straßenoberfläche an der frontalen Stoßstange montiert. Die Speicherung der Daten erfolgt mit einem an die Kamera angeschlossenen Notebook.



Abbildung 40. Mobile Infrarotmessanlage (IRMU) der EMPA (Stimolo, 2001).

In Anlehnung an diese Messvorrichtung wurde im Rahmen des Projekts eine Vorrichtung entwickelt, die an das Messfahrzeug des Auftragnehmers befestigt werden

kann, siehe Abbildung 41. Mit einem Kameraabstand von etwa 240 cm kann eine Oberfläche von ca. 280 cm Breite und ca. 200 cm Länge (Tiefe) aufgenommen werden, siehe Abbildung 42.

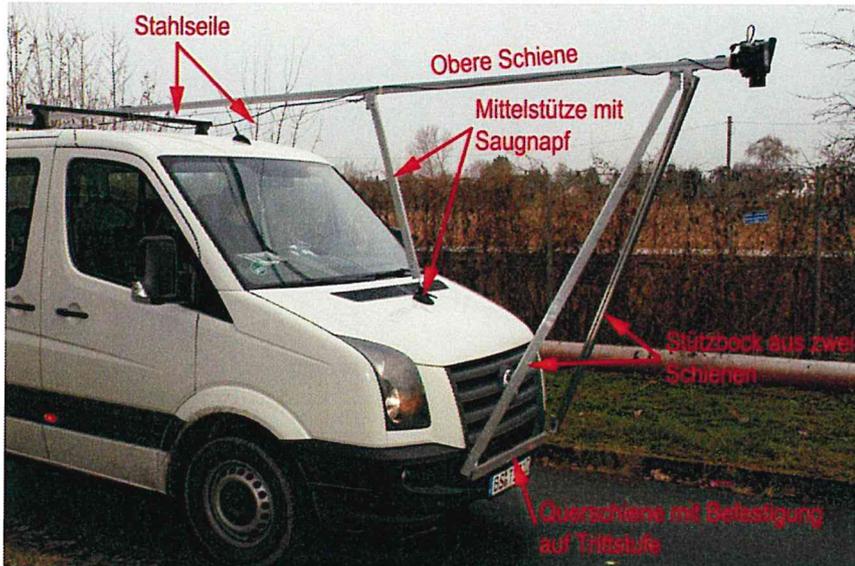


Abbildung 41. Messvorrichtung für die Befahrung von Untersuchungsflächen.

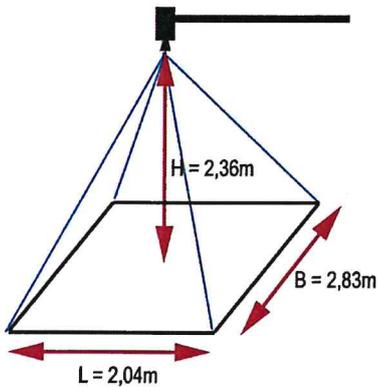


Abbildung 42. Während einer Befahrung aufzunehmende Oberfläche in Abhängigkeit des Kameraabstandes.

## 5.2 Erprobung für unterschiedliche Einsatzzwecke

### 5.2.1 Beispiele 1 und 2: Prüfung der Abdichtungsschicht vor dem Asphalteinbau

#### 5.2.1.1 Kontrolle der Bitumenschweißbahn auf einem Parkdeck

Am 11. Juli 2011 wurde die Bitumenschweißbahn auf einem Parkdeck in Braunschweig (Einkaufszentrum) mittels Thermografie manuell, d. h. ohne Stativ oder fahrbare Messvorrichtung, aufgenommen, siehe Abbildung 43. Vor diesem Tag hat es eine 3-tägige Sonnenperiode gegeben.

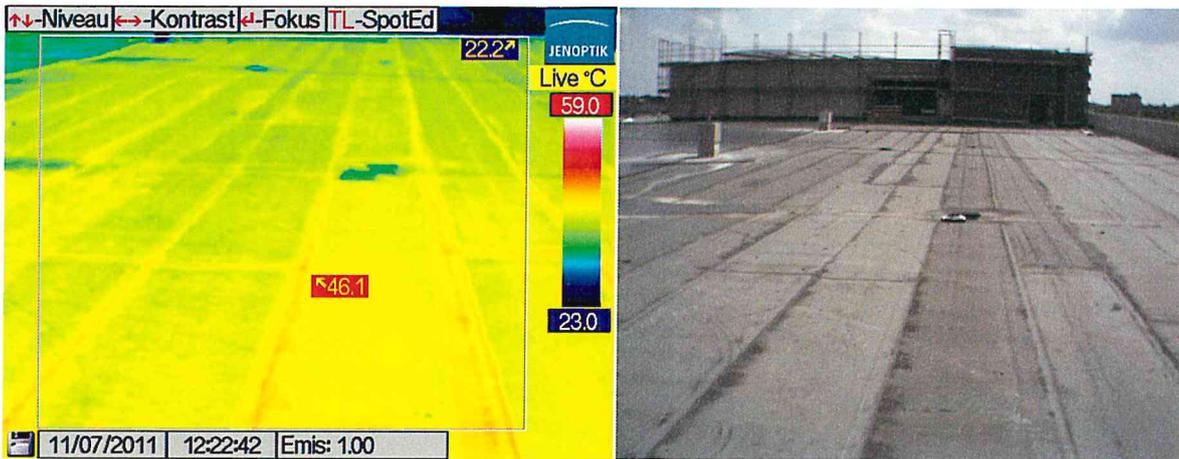


Abbildung 43. Bitumenschweißbahn auf einem Parkdeck: Wärmebild links, Echtbild rechts.

Es wurden Temperaturunterschiede gemessen, die nicht mit einer Veränderung der Oberfläche begründet werden konnten, siehe Abbildung 44.

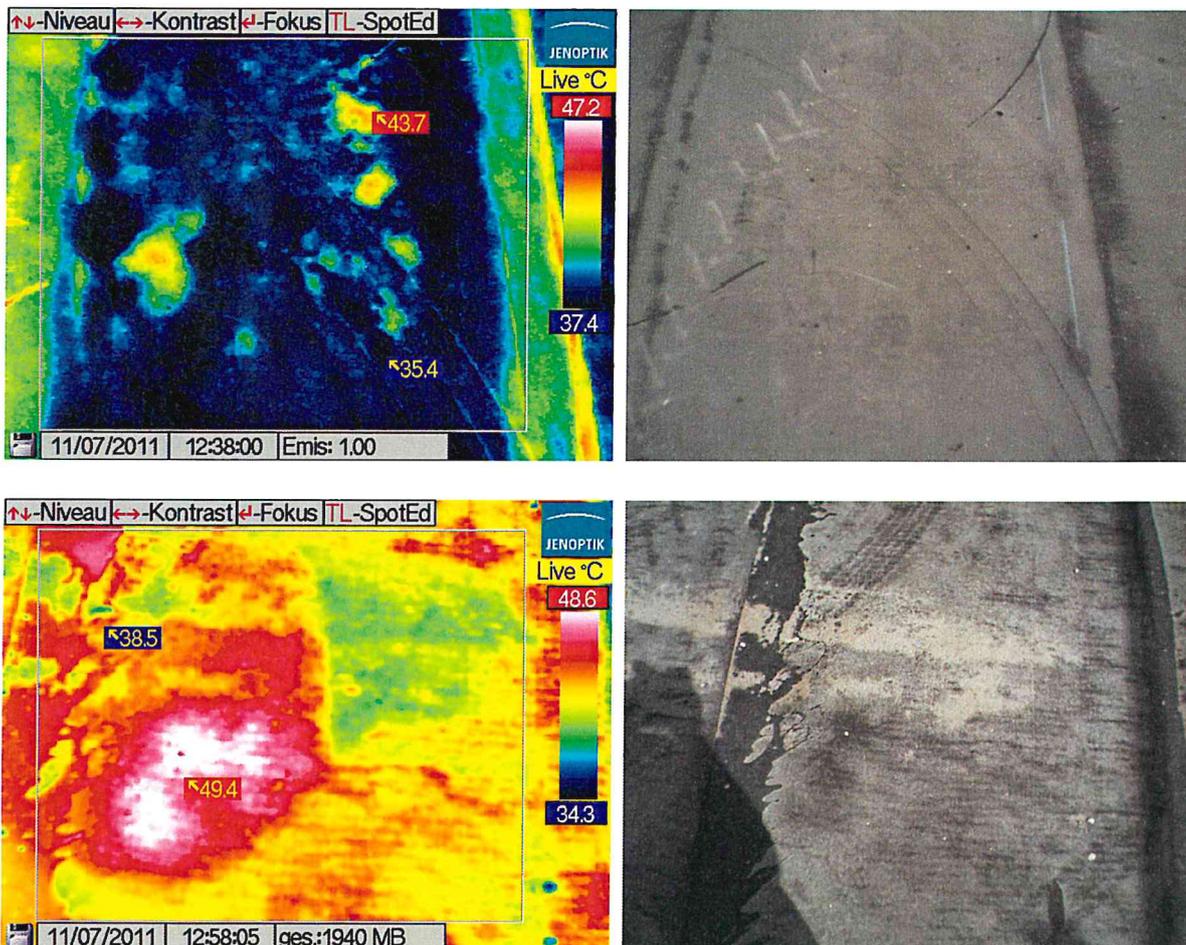


Abbildung 44. Festgestellte Inhomogenitäten: Wärmebild links, Echtbild rechts.

Jene Stellen, an denen Temperaturunterschiede festgestellt wurden, wurden auf der Bitumenschweißbahn markiert und im Nachgang näher untersucht. Abbildung 45

zeigt eine detektierte Inhomogenität in Form einer Blase, nachdem sie aufgeschnitten wurde.

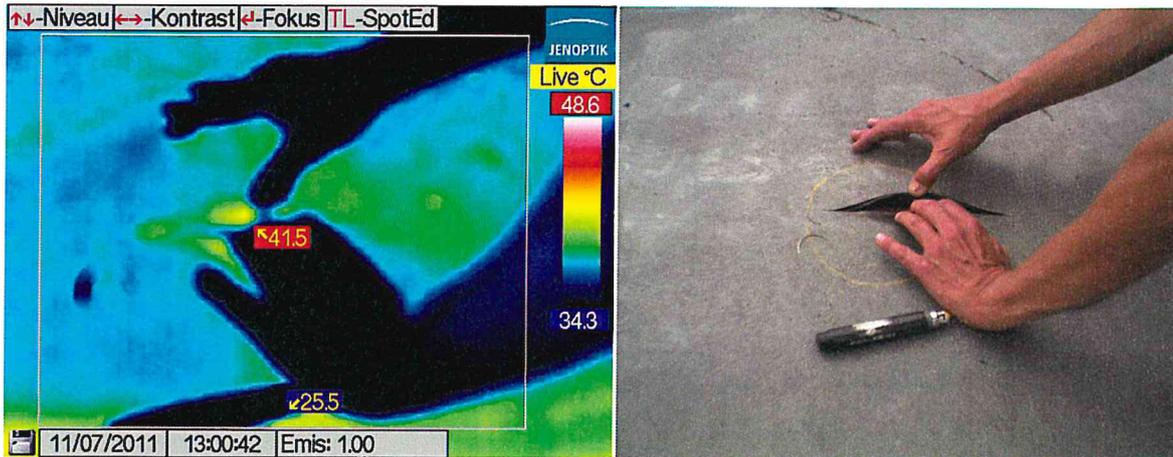


Abbildung 45. Aufgeschnittene Blase: Wärmebild links, Echtbild rechts.

#### 5.2.1.2 Kontrolle der Bitumenschweißbahn auf einer Brücke

Am 25. Juli 2012 durfte der Auftragnehmer die Bitumenschweißbahn einer Betonbrücke im Stadtgebiet Braunschweig auf Inhomogenitäten überprüfen.

Abbildung 46 gibt einen Überblick der Brücke in Längs- und Querrichtung. In Längsrichtung wurde in zwei Profilen die Brücke mit dem rollbaren Stativ abgegangen.

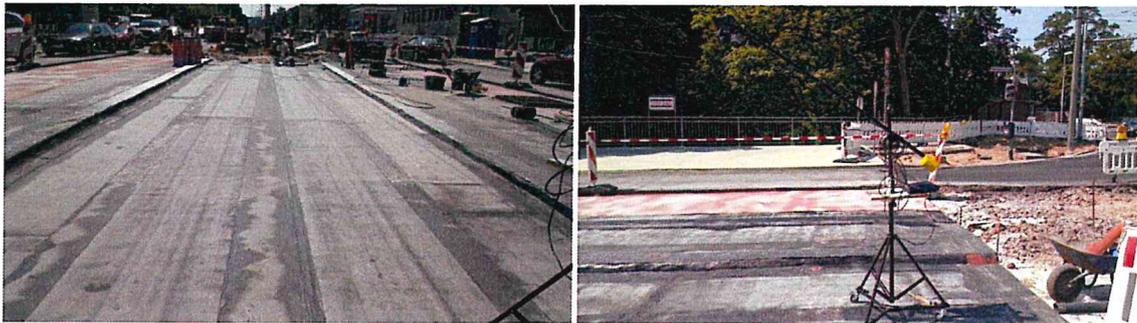


Abbildung 46. Bitumenschweißbahn auf einer Betonbrücke, rechts – Längsrichtung, links – Querrichtung.

Abbildung 47 zeigt Inhomogenitäten in Längsrichtung. An der Position des Zollstockes konnte auf einer Länge von mindestens 200 cm einen Bereich lokalisiert werden, der keinen Verbund zur Unterlage aufweist.

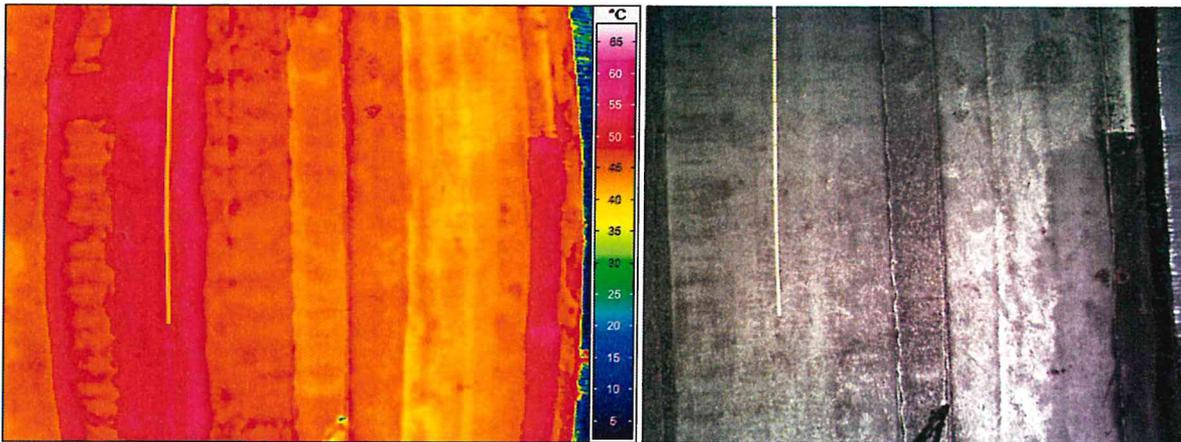


Abbildung 47. Detektierte Inhomogenitäten in Längsrichtung: Wärmebild links, Echtfoto rechts.

Das Wärmebild der Abbildung 48 lässt mindestens 3 detektierte Inhomogenitäten auf der linken Seite erkennen. Der als Quadrat zusammengesteckte Zollstock wurde auf alle Inhomogenitäten gelegt und der Temperaturschatten ist auf dem Wärmebild noch auszumachen. Auf dem Echtfoto sind an der Oberfläche keine Veränderungen auszumachen und die Begehung wies eindeutig auf Blasen aufgrund einer fehlenden Verklebung mit der Unterlage hin.

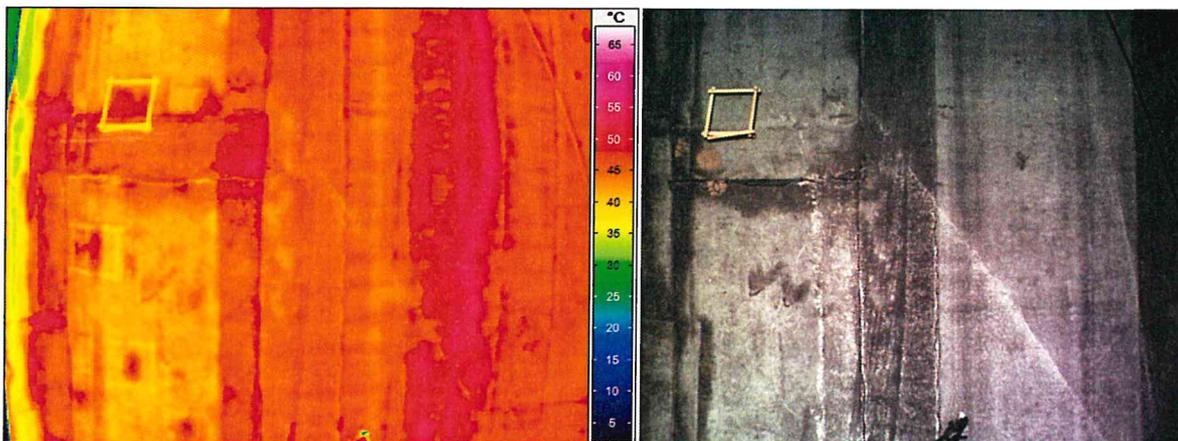


Abbildung 48. Detektion von kreisförmigen Inhomogenitäten: Wärmebild links, Echtfoto rechts.

### 5.2.2 Beispiel 3: Baubegleitende Qualitätskontrolle

Baubegleitende Untersuchungen eines Brückenbelages erfolgten vom 4. bis 7. Juni 2012 an einer Brücke nahe Letter/Hannover. Dabei wurde der Einbau der Bitumenschweißbahn, der Gussasphaltschutzschicht und der Gussasphaltdeckschicht mittels thermografischer Aufnahmen begleitet. Beide Bilder der Abbildung 49 und das linke Bild der Abbildung 52 zeigen die aufzunehmenden Oberflächen.

Das rechte Bild der Abbildung 52 weist auf ein grundsätzliches Problem bei der Wärmebildaufnahme hin. Um plausible Aufnahmen zu erhalten, sollte der aufzunehmende Bereich jedenfalls kurz vorher nicht begangen oder befahren werden. Dies konnte aufgrund des engen Zeitplanes nicht eingehalten werden. Während die Gussasphalt-

schutzschicht aufgenommen wurde, wurde schon die Gussasphaltdeckschicht in einem Fahrstreifen eingebaut.

Auch blieb wenig Zeit für die Erwärmung der Schichten, da zum einen die Deckschicht am Morgen nach der am Nachmittag des Vortages eingebauten Schutzschicht hergestellt wurde und zu anderen der Himmel sehr bedeckt war.

Die Brücke ist Richtung Süden ausgerichtet, was für eine gute Sonneneinstrahlung spricht. Dennoch lagen große Bereiche durch die Tragkonstruktion im Schatten.



Abbildung 49. Bitumenschweißbahn (links) und Gussasphaltschutzschicht (rechts).

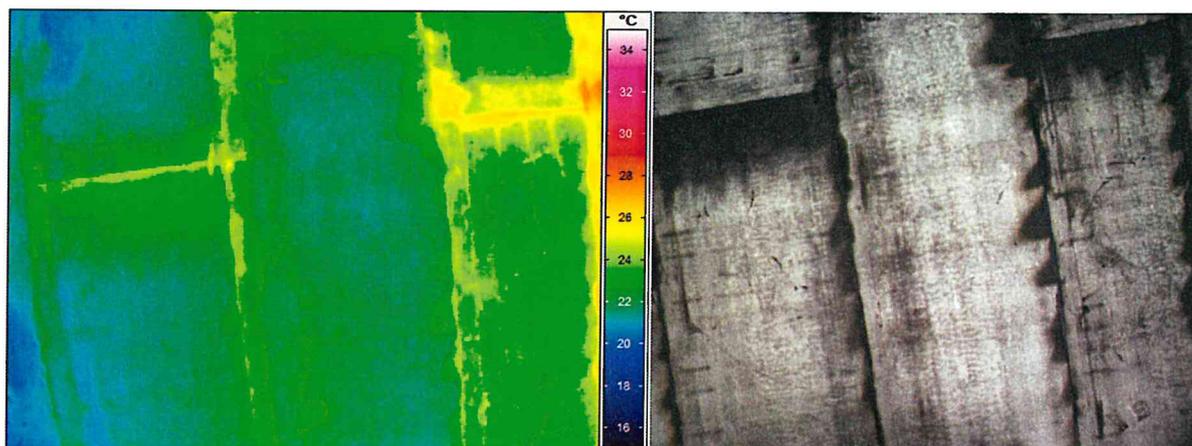


Abbildung 50. Bitumenschweißbahn: Wärmebild links, Echtbild rechts.

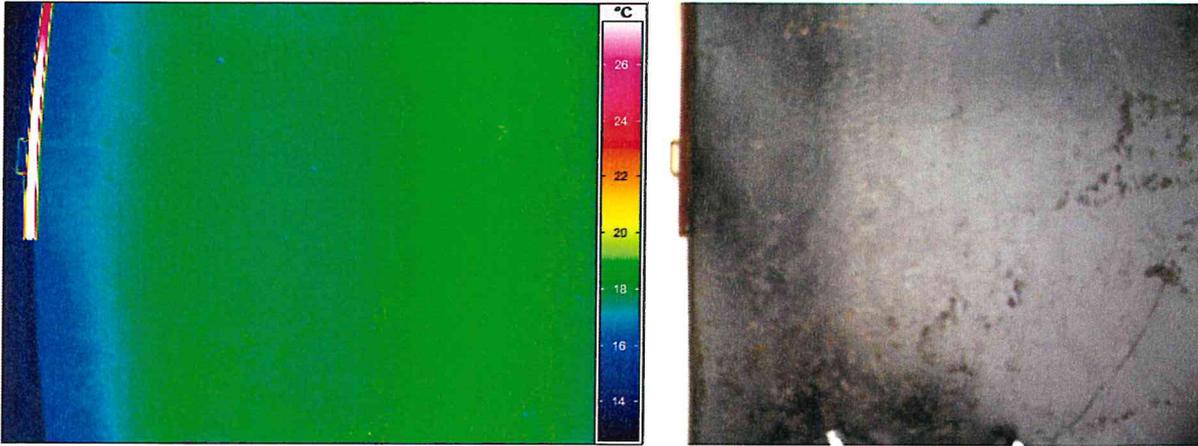


Abbildung 51. Gussasphaltschutzschicht: Wärmebild links, Echtbild rechts.



Abbildung 52. Gussasphaltdeckenschicht (links) und Gussasphaltdeckenschicht (rechts).

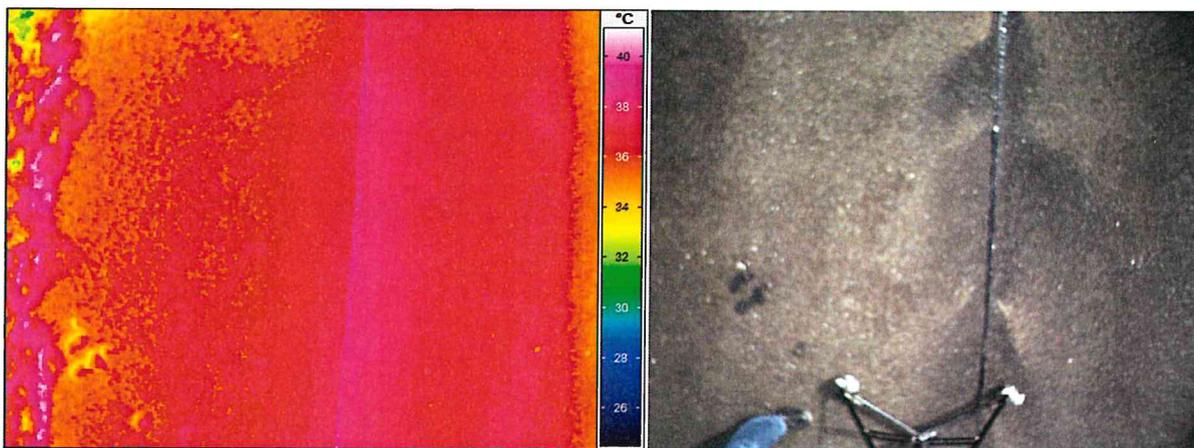


Abbildung 53. Gussasphaltdeckenschicht: Wärmebild links, Echtbild rechts.

Die Wärmebildaufnahmen signalisierten keine Inhomogenitäten und deuten auf eine gute Einbauleistung hin.

### 5.2.3 Beispiel 4: Nachkontrolle des Asphaltbelags

Im Zuge des Neubaus einer Bundesautobahn nahe Bremen wurde auf einem Brückenbauwerk mit einer Länge von etwa 1.000 m in einigen Abschnitten Blasenbildung festgestellt. Die Deckschicht wurde aus Splittmastixasphalt SMA 8 und die darunter liegende Schutzschicht aus Gussasphalt MA 11 S hergestellt. Mit Hilfe der Thermografie wurden die Stellen mit Inhomogenitäten detektiert.

Dazu wurde die Fahrbahn während einer Überfahung zeitgleich mit einer visuellen und einer thermografischen Kamera erfasst. Beide Kameras wurden an einem Messgestell am Messfahrzeug montiert (siehe Abbildung 41) und so ausgerichtet, dass die Aufnahmen orthogonal zur Fahrbahnoberfläche aus einer Höhe von 2,27 m aufgenommen wurden. Es wurden fortlaufend Aufnahmen der Fahrbahnoberfläche mit einer Länge von 1,93 m in Fahrtrichtung und einer Breite von 2,73 m erstellt. Beide Kameras wurden mit einem Computer im Führerhaus verbunden und waren von dort aus zu bedienen.

Es wurde sichergestellt, dass die Kamera für visuelle Aufnahmen sowie die Kamera für thermografische Aufnahmen zeitgleich mit einer konstanten Frequenz von 1 Hz über den gesamten Zeitraum des Messvorgangs auslösten. Dabei betrug die Fahrgeschwindigkeit 4,86 km/h ( $1,35 \text{ m/s} \triangleq$  mittlere Geschwindigkeit des Messfahrzeugs bei Standgas im ersten Gang).

Alle Aufnahmen wurden am 3. September 2011 bei wolkenlosem Himmel erstellt. Es wurde im Zeitraum von 10:34 Uhr bis 15:50 Uhr gemessen. Die Temperaturen lagen ganztägig oberhalb von  $15^\circ\text{C}$ .

Bei den Aufnahmen wurde darauf geachtet, möglichst viele Bezugslinien (Fahrbahnmarkierungen) zu erfassen. In Abbildung 54 sind die Bereiche der Aufnahmestreifen (1\_1 bis 1\_4) des Abschnittes 1 dargestellt. Aneinandergrenzende Aufnahmestreifen wurden versetzt aufgenommen, so dass in Fahrbahnquerrichtung Überlappungsbereiche entstanden. Dadurch wurde sichergestellt, dass die gesamte Fahrbahnoberfläche erfasst wird. Die Mittellinie konnte zudem doppelt (1\_2 und 1\_3) als Bezugslinie erfasst werden.

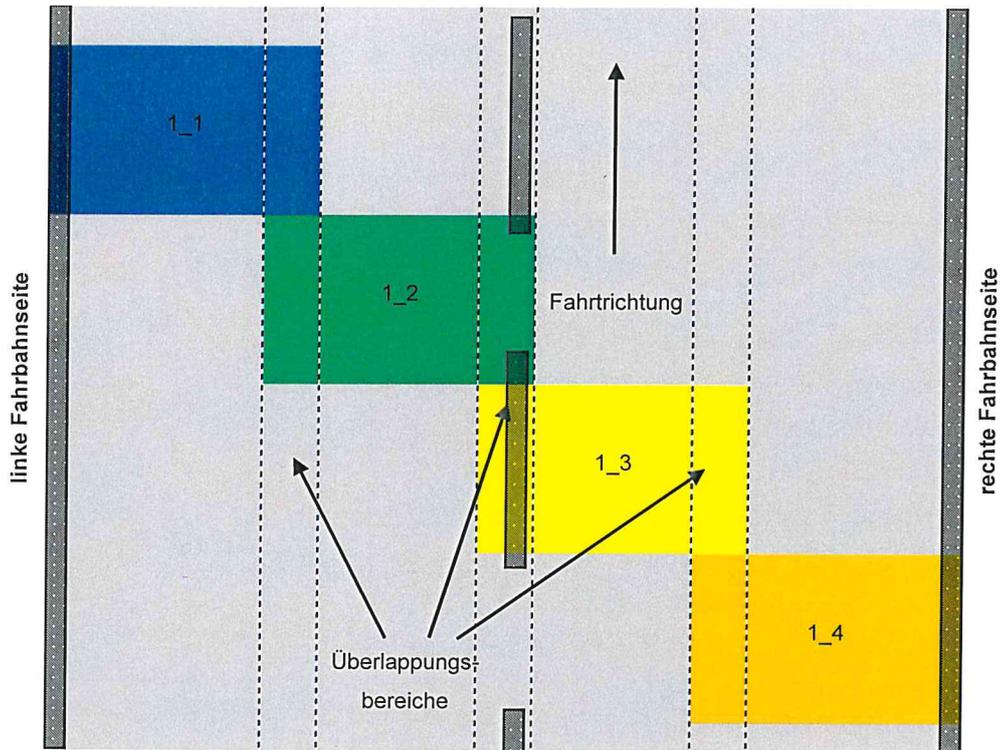


Abbildung 54. Überlappungsbereiche in Fahrtrichtung (schematische Darstellung).

Die Aufnahmen wurden in digitalen Dokumenten (Format PDF) derart aufbereitet, dass für jeden Untersuchungsabschnitt die Bildpaare (visuell und thermografisch) der nebeneinanderliegenden Aufnahmestreifen nebeneinander abgebildet sind. Fortlaufend erzeugte Aufnahmen wurden übereinander angeordnet, wobei der Überlappungsbereich der Aufnahmen in Fahrtrichtung entfernt wurde. Jede Aufnahme stellt somit ca. 1,35 m der Fahrbahnoberfläche in Aufnahmerrichtung dar (siehe Abbildung 55). Die Aufnahmebreiten (2,73 m) wurden für die Darstellung nicht reduziert.

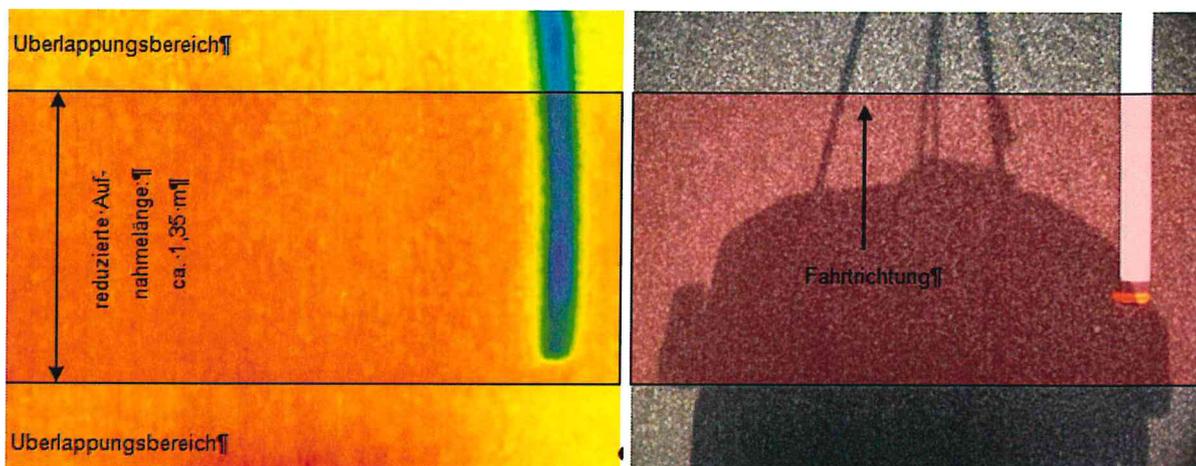


Abbildung 55. Aufnahmeausschnitt nach Entfernung der Überlappungsbereiche in Aufnahmerrichtung (schematische Darstellung).

Die dargestellten Aufnahmen wurden einer Sichtprüfung auf lokal begrenzte Flächen mit erhöhten Temperaturen unterzogen (vgl. Abbildung 56). Diese markanten Temperaturunterschiede wurden auf Inhomogenitäten zurückgeführt.

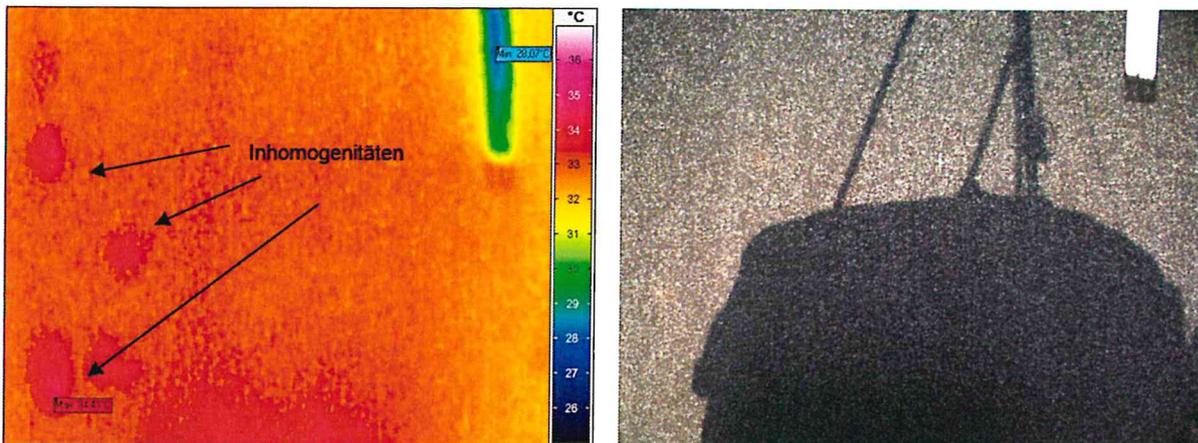


Abbildung 56. Lokal begrenzte Inhomogenitäten der Oberflächentemperatur (links) mit zugehöriger visueller Aufnahme (rechts)

## 6 Zusammenfassende Hinweise und Arbeitsanleitung

### 6.1 Hinweise

Die zukünftige Anwendung von Thermografie im Brückenbau wird empfohlen zur zerstörungsfreien Qualitätskontrolle der Unterlage und zur Überprüfung der Verbundwirkung zwischen Tragkonstruktionen aus Beton und Fahrbahnbelägen aus Asphalt.

Fehlstellen der Schicht werden als thermische Inhomogenitäten detektiert. Solche Inhomogenitäten entstehen aufgrund von Hohlstellen, entweder infolge von mangelndem Schichtenverbund oder infolge von Hohlräumen (Blasen, Rissen) in der Schicht.

Es wurde festgestellt, dass die Zuverlässigkeit von thermografischen Verfahren mit zunehmender Schichtdicke abnimmt. Dünne Schichten wie Bitumenschweißbahnen konnten besonders zuverlässig beurteilt werden.

Mit Ausnahme von hohlraumreichen Asphalten beeinflussten Asphaltart und -sorte die Wärmeausbreitung und damit die Zuverlässigkeit der Thermografie kaum.

Die Verwendung von Abstreusplitt als Oberflächenaufheller reduzierte die Oberflächentemperatur erheblich. Es konnten Unterschiede von bis zu 15 Kelvin ermittelt werden. Durch die geringeren Oberflächentemperaturen stellen sich geringere Temperaturgradienten in der Schicht ein – die Detektion von Inhomogenitäten wird dadurch erschwert.

Die Erstellung von Thermografieaufnahmen an langgestreckten Brücken ist zielführend bei langsamer Befahrung mittels mobiler Messanlage. So konnte eine Autobahnbrücke mit etwa 1.000 m Länge geprüft und Schadensbereiche gut eingrenzt werden.

### 6.2 Arbeitsanleitung

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich folgende Hinweise bei der Aufnahme von Wärmebildern zur Detektion von Inhomogenitäten in Brückenbelägen (analoges gilt allgemein für Schichten des Straßenaufbaus):

1. Thermografische Aufnahmen an Fahrbahnoberflächen sind orthogonal, also unter einem Winkel von etwa  $90^\circ$  zur Aufnahmefläche zu erstellen. Die Messhöhe sollte maximal 3 Meter betragen.
2. Der Messabstand, also die Entfernung des Kamera-Objektives von der zu untersuchenden Fläche, ist so zu wählen, dass Aufnahmen mit ausreichender Auflösung und mit möglichst wenigen Begehungen bzw. Befahrungen der Flä-

che aufgenommen werden können. Dazu ist die aufzunehmende Fläche zu vermessen und gegebenenfalls zu rastern.

3. Vorteilhaft wird ein 12,5 mm Weitwinkelobjektiv mit einem Bildfeld von  $57^\circ \cdot 44^\circ$  eingesetzt. Es resultiert eine optimale Messhöhe von 210 cm bei einer Aufnahme­fläche von 260 cm · 190 cm.
4. Thermografische Aufnahmen an Fahrbahnoberflächen sind stets mit zeitgleich erstellten digitalen Fotos zu kombinieren. Dies erleichtert die nachträgliche Detektion von Inhomogenitäten. Es wird darauf hingewiesen, dass Wärm­bild­kameras nicht die gleiche Auflösung wie digitale Kameras haben. Auf das digitale Foto kann verzichtet werden, wenn die Position einer Inhomogenität direkt vor Ort markiert und begutachtet wird.
5. Für thermografische Aufnahmen an Fahrbahnoberflächen kann der jeweilige Emissionsgrad der zu untersuchenden Oberfläche unbeachtet bleiben, da nur Temperaturunterschiede aufgenommen werden und keine Erkenntnisse aus den absoluten Temperaturen gewonnen werden, wie es etwa für die Begutachtung von Häuserfassaden üblich ist.
6. Es sind kalibrierte Objektive zu verwenden.
7. Nach Starten der Thermografiekamera ist die Zeit zur Selbstkalibrierung abzuwarten (Warm­lauf­phase).
8. Die Farbskalierung ist so zu wählen, dass die höchsten und tiefsten Temperaturen um jeweils 5 Kelvin über- bzw. unterschritten sind.
9. Thermografische Aufnahmen am frühen Morgen, nach Regenereignissen, bei bedecktem Himmel und bei negativer Lufttemperatur sind zu vermeiden.
10. Die zu untersuchende Fahrbahnoberfläche sollte vor der thermografischen Aufnahme mindestens zwei Stunden ohne Unterbrechung sonnenbeschienen sein.
11. Die zu untersuchende Fahrbahnoberfläche sollte vor der thermografischen Aufnahme mindestens eine halbe Stunde nicht begangen oder befahren werden.
12. Es ist vorteilhaft, wenn während der Durchführung von thermografischen Aufnahmen die Sonne ohne Unterbrechung scheint. Bei starker Wolkenbildung ist die Messkampagne abzubrechen.
13. Bei der allfälligen Feststellung einer Temperaturdifferenz auf thermografischen Aufnahmen ist für die betroffene Stelle bzw. für den betroffenen Bereich zu-

nächst zu prüfen, ob die Ursache auf zur Asphaltoberfläche abweichende Temperatureigenschaften an der Fahrbahnoberfläche oder unter der Asphalt-schicht zurückgeführt werden kann und dann keinen Hinweis auf eine Fehl-stelle darstellt. Dazu zählen typischerweise Stellen von Fugenvergussmassen, Kondenswasser, Fahrbahnmarkierungen, Einlaufgittern, Schattenwirkung und Reflexionen sowie darunterliegende Bitumenschweißbahnen.

## 7 Nutzen und Ergebnistransfer

### 7.1 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Die Projektergebnisse liefern einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU. Der wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Nutzen ergibt sich im Zusammenhang mit einer

- zerstörungsfreien Beurteilung der homogenen Verklebung von Schweißbahnen auf Brücken und Parkdecks während der Bauphase,
- zerstörungsfreien Detektion von Inhomogenitäten in Fahrbahnbelägen,
- flächendeckenden Kontrolle der Einbauleistung durch Begehung oder Befahrung.

Die bisher existierenden Verfahren zur Beurteilung der Einbauqualität von Bitumenschweißbahnen und Asphaltbelägen auf Brücken und Parkdecks beschränken sich auf visuelle, akustische und/oder zerstörende Prüfungen, die zufallsbehaftet und nicht ausreichend präzise sind, um rechtzeitig einzugreifen und an Schadstellen Reparaturen auszuführen. Der entscheidende Vorteil für KMU liegt daher in der Möglichkeit, einen mängelfreien Einbau durch eine baubegleitende und flächendeckende Überprüfung des Verbundes von Bitumenschweißbahnen und Gussasphalten zur Unterlage mittels Infrarotaufnahmen sicherzustellen. Die zwischen den einzelnen Bauphasen angesetzte Qualitätskontrolle ermöglicht es, rechtzeitig evtl. Gegenmaßnahmen zur Behebung vorhandener bzw. potentieller Schadstellen einzuleiten. Insbesondere kann die Funktionsweise der Bitumenschweißbahn und der Gussasphalt-Dichtungsschicht noch vor dem Einbau der darüber liegenden Schicht(en) einwandfrei festgestellt werden. Insgesamt sind im Fall von Einbaumängeln entscheidende Kosteneinsparungen im Vergleich zu einer kompletten Sanierung des Abdichtungs- und Belagsystems zu erwarten. Weiterhin ist die Dokumentation einer einwandfreien Einbauleistung des KMU mit der neuen Messmethode ein geeignetes Mittel, späteren Schadensersatzansprüchen von Seiten des Bauherrn zu begegnen. Daneben gestatten marktgängige Thermografie-Systeme eine einfache Handhabung und bei relativ geringen Beschaffungskosten sind auch kleineren Bauunternehmen in der Lage, diese neue Messmethode wirtschaftlich und technologisch vorteilhaft einzusetzen.

Eine Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse kann in folgenden Fachgebieten erfolgen: Werkstoffe/Materialien, Messtechnik, Betriebswirtschaft / Organisation, Qualitätssicherung, Kosten-Nutzen-Vergleich, Wirtschaftszweig 45 (Baugewerbe), Wirtschaftszweig 60 (Landverkehr, Transport), Wirtschaftszweig 72/74 (Erbringung von Dienstleistungen überwiegend für Unternehmen).

## 7.2 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Zur Sicherstellung des Transfers der in diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse, wurden bereits im Verlaufe der Projektbearbeitung intensive Kontakte zur Wirtschaft und zu Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) gepflegt.

Auf der Homepage des Deutschen Asphaltverbandes (DAV) wurde auf das Forschungsprojekt aufmerksam gemacht, woraus sich Anfragen und Diskussionen im Dialog ergaben. Anlässlich der Deutschen Asphalttage 2012 wurde ein Poster erstellt und mit Tagungsteilnehmern die hierauf dargestellten Ergebnisse diskutiert. Ein Poster wurde auch im Zuge der ISBS-Veranstaltung „Tag des offenen Labors“ einem breitem Publikum präsentiert.

Bisher sind veröffentlicht ein Beitrag zur 11th Quantitative InfraRed Thermography (QUIRT 2012), June 11-14, 2012, University of Naples Federico II, Naples, Italy mit dem Titel „Thermal mapping for detection of inhomogeneities in asphalt bridge decks“.

Der Beitrag „Zerstörungsfreie Detektion von Inhomogenitäten auf Brücken- und Parkdeckbelägen aus Asphalt mit Hilfe der Thermografie“ wurde in ihrer Frühjahrszeitschrift 2012 der VSVI-Niedersachsen veröffentlicht.

Zurzeit wird ein Vortrag für die VSVI-Veranstaltungen der Landesverbände vorbereitet.

Ein Beitrag für die 5th eata conference 2013 der European Asphalt Technology Association ist in Vorbereitung.

Weiters ist vorgesehen, die Ergebnisse des Forschungsprojektes in den einschlägigen Fachzeitschriften „Straße und Autobahn“, „asphalt“ und in den österreichischen Schriften „fsv-aktuell STRASSE“ und „GESTRATA Journal“ zu publizieren.

## 8 Literatur

Busse, G. 2000. Thermografie. Vorlesungsskript Sommersemester 2000, Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde.

FGSV, 1999. Technische Prüfvorschriften für Brückenbeläge auf Beton mit Dichtungsschicht aus einer Bitumen-Schweißbahn nach den ZTV-BEL-B Teil 1 (TP-BEL-B Teil 1). Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln.

FGSV, 2003. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-Ing), Teil 7: Brückenbeläge, Abschnitt 1 Brückenbeläge auf Beton mit einer Dichtungsschicht aus einer Bitumen-Schweißbahn. Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln.

FGSV, 2007. Technische Prüfvorschrift für Asphalt – Teil 33: Herstellung von Asphalt-Probeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV). TP Asphalt-StB Teil 33. Technisches Regelwerk, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln.

Fouad, N. A. und Richter, T. 2009. Leitfaden Thermografie im Bauwesen. 3. Unveränderte Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Huschek, S., Arndt, R., Röllig, M. & Maierhofer, C. 2008. Anwendung der Thermografie beim Einbau von Asphaltsschichten. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Straßenwesen und Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin.

InfraTec GmbH, 2003. Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie. InfraTec GmbH, Dresden.

InfraTec GmbH, 2007. VarioCAM® high resolution. Benutzerhandbuch, InfraTec GmbH, Dresden.

Krebs, H. G. und Böllinger, G. 1981. Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper und Erstellung von Jahreszyklen der Fahrbahntemperaturen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 347, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

Michalski, Chr. 1992. Modellvorstellungen zur Deutung des Blasenwachstums im Gussasphalt und anderen thermoviskosen Stoffen für den Straßenbau. Mitteilungen aus dem Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Heft 14, Universität Hannover.

Pohlmann, P. 1989. Simulation von Temperaturverteilungen und thermisch induzierten Zugspannungen in Asphaltstraßen. Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 9, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Rogosch, N. 1994. Zur Blasenbildung in thermoviskosen Stoffen unter Berücksichtigung rheologischer Materialkennwerte und geometrischer Randbedingungen. Mitteilungen aus dem Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Heft 16, Universität Hannover.

Schuster, N. und Kolobrodov, V. G. 1999. Infrarotthermographie. 1. Auflage, Wiley-Vch-Verlag Berlin GmbH, Berlin.

Stimolo, M. 2001. Praktische Anwendung der Thermografie im Strassenbau und für Abdichtungssysteme. Vortrag Thermografie-Kolloquium Stuttgart 2001, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf/Schweiz.

Wagner, H. 2011. Thermografie, sicher einsetzen bei der Energieberatung, Bauüberwachung und Schadensanalyse. Rudolf Müller Verlag, Köln.

Weise, F., Pirskawetz, S. & Mueller, R. 2007. Einfluss der Wärmeabstrahlung, -leitfähigkeit und -kapazität von Mineralstoffen auf die Energiebilanz von Fahrbahnbefestigungen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 968, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

Wistuba, M. 2003. Klimaeinflüsse auf Asphaltstraßen - Maßgebende Temperatur für die analytische Oberbaubemessung in Österreich. Dissertation, erschienen in Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, Heft 15, ISBN 3-901912-14-2, Wien.

Wistuba, M., Litzka, J., Blab, R., Nefzger, H., Kromp-Kolb, H. & Potzmann, R. 2001. Klimakenngrößen für den Straßenoberbau in Österreich. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Reihe Straßenforschung, Heft 507, ISSN 0379-1491, Wien.