

# Temperaturunter- suchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 120

**bast**

# **Temperaturunter- suchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30**

**Analyse des Temperatur-  
einflusses während  
eines Dauerversuchs**

von

Bastian Wacker  
Michael Scherkenbach  
Dirk Jansen

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Bergisch Gladbach

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 120**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt F1100.3414110:**  
Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator  
MLS30 während eines Dauerversuchs

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-389-3

Bergisch Gladbach, Juli 2018

## Kurzfassung – Abstract

### Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) führt derzeit umfangreiche Versuchsprogramme zur zeittraffenden Belastung auf verschiedenen Straßenbaukonstruktionen mit dem Großversuchsstand Mobile Load Simulator MLS30 (früher unter MLS10 bekannt) in Versuchshallen durch. Die Mobilität der Maschine erlaubt auch Belastungsversuche auf außenliegenden Versuchsflächen, wie dem duraBASt. Während der ersten Versuche, die seit 2013 mit dem MLS30 durchgeführt wurden, konnten signifikante Temperaturveränderungen insbesondere der Belastungsflächen festgestellt werden. Die entsprechenden Daten wurden mit Sensoren aufgezeichnet und Veränderungen mit einer Infrarotkamera sichtbar gemacht. Dazu wurde der MLS30 gemäß Standardvorgaben und in einer modifizierten Betriebsform eingesetzt. Außerdem wurden für die Zeit nach der Belastung zwei unterschiedliche Varianten verwendet und getestet. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts werden bei den nächsten Versuchsprogrammen berücksichtigt und mit anderen Betreibern von zeittraffenden Belastungseinrichtungen diskutiert.

Die Versuche in diesem Forschungsvorhaben konnten belegen, an welchen Stellen Temperatureinflüsse durch die Belastung mittels Mobile Load Simulator MLS30 entstehen, und wie sie sich im Straßenkörper verteilen. Durch die Verwendung einer Infrarotkamera konnte der Aufwärmprozess aus verschiedenen Positionen visualisiert werden.

Die nun vorliegenden Kenntnisse über die Temperaturverteilungen und die sich einstellenden Temperaturdifferenzen werden einerseits für die detaillierte Planung von möglichst standardisierten Versuchsprogrammen mit dem MLS30 verwendet und dienen andererseits zur vertieften Interpretation der Ergebnisse aus den Belastungsversuchen.

Der Versuch, die Temperaturerhöhung innerhalb des MLS30 mit geringer Modifikation der Luftzufuhr deutlich zu mindern, hat nicht den erwarteten Erfolg gebracht. Es zeigte sich allerdings auch, dass die durch die Radüberrollung hervorgerufene Reibungswärme den maßgeblichen Anteil an der

Wärmeentwicklung im Asphalt hat. Die Regulierung der Innenraumtemperatur im MLS30 verliert daher an Bedeutung, wird aber dennoch mit dem Hersteller diskutiert.

### Temperature tests on and in the MLS30 Mobile Load Simulator

The Federal Highway Research Institute (BASt) is currently using the large-scale MLS30 Mobile Load Simulator (previously known as the MLS10) to conduct extensive accelerated load test programmes on various pavement structures in test halls. The mobility of the machine also enables load tests on external test sites such as the duraBASt. During the initial tests, which since 2013 have been performed using the MLS30, it was possible to identify significant temperature changes, in particular on surfaces subjected to load. The corresponding data were recorded using sensors and changes made visible by an infrared camera. For this, the MLS30 was used both in the standard and in a modified operating form. In addition, two different versions were used and tested for the period after load testing. The results of this research project will be taken into consideration during upcoming test programmes and discussed with other operators of accelerated pavement testing equipment.

The tests in this research project were able to confirm the points at which temperature influences arise due to load applied by the MLS30 Mobile Load Simulator, and how these are distributed over the pavement structure. The use of an infrared camera enabled the heating process to be visualised from various positions.

The findings now available concerning the temperature distribution and the occurring temperature differences will on the one hand be used for detailed planning of ideally standardised test programmes using the MLS30, and on the other hand to provide a more in-depth interpretation of the results from load tests.

The attempt to significantly reduce the temperature increase inside the MLS30 through slight

modification of the air supply did not deliver the expected success. It showed, however, that the friction heat produced by the rolling wheels caused most of the heat development in the asphalt. Regulation of the temperature inside the MLS30 is therefore of lessor significance but is nevertheless still being discussed with the manufacturer.

## Inhalt

<b>Abkürzungen</b> .....	6	4.3.2 Infrarotkamera auf die Belastungsräder .....	32
<b>Vorwort</b> .....	7	4.3.3 Infrarotkamera auf die Asphaltoberfläche .....	34
<b>1 Einleitung</b> .....	7	<b>5 Zusammenfassung, Erkenntnisse und weiteres Vorgehen</b> .....	36
1.1 Ausgangssituation .....	7	<b>Literatur</b> .....	37
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	8	<b>Bilder</b> .....	37
<b>2 Literaturstudie zum Temperaturverhalten von Asphalt</b> .....	9	<b>Tabellen</b> .....	38
<b>3 Versuchsprogramm</b> .....	12	<b>Anhang</b> .....	39
3.1 Eingesetzte Maschinen und Hilfsmittel .....	12		
3.1.1 Mobile Load Simulator MLS30 .....	12		
3.1.2 Sensoren und Erfassungsmedium .....	13		
3.1.3 Untersuchungsfeld .....	14		
3.1.4 Infrarotkamera .....	15		
3.1.5 Luftthermometer .....	16		
3.2 Betriebsformen und Varianten der Durchführung .....	16		
3.2.1 Positionierung der Elemente und Versuchsdurchführung .....	17		
<b>4 Auswertung der verschiedenen Versuche</b> .....	19		
4.1 Erkenntnisse aus vorherigen Untersuchungen .....	19		
4.2 Auswertung der Temperaturdaten von den Sensoren .....	19		
4.2.1 Lufttemperatur .....	20		
4.2.2 Asphaltoberflächentemperatur .....	22		
4.2.3 Asphalttemperatur in verschiedenen Tiefen .....	24		
4.2.4 Zusammenfassende Erkenntnisse aller Sensoren .....	27		
4.3 Auswertung der verschiedenen Kamerapositionen .....	29		
4.3.1 Infrarotkamera auf die Linear- motoren gerichtet .....	31		

## Abkürzungen

BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
duraBAST	Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der BAST
FLIR	Forward Looking InfraRed
FSS	Frostschutzschicht
FWD	FallingWeightDeflectometer
GPR	Georadar (ground penetrating radar)
LIM	Linearmotoren (linearer Induktionsmotor)
MA	Mastixasphalt, Gussasphalt
MLS30	Mobile Load Simulator (früher: MLS10)
NCAT	National Center for Asphalt Technology
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
ToB	Tragschicht ohne Bindemittel
V_.1*	Nach Belastung weiter auf Stützen
V_.2*	Nach Belastung direktes Anheben auf Transporträder (Fahrposition)
V1._*	Standard-Betriebsform
V2._*	Modifizierte Betriebsform

## Vorwort

Der vorliegende Projektbericht ist im Referat GS3 „Dimensionierung und Straßenaufbau“ entstanden. Die Projektergebnisse sind neben den genannten Autoren dieses Berichtes insbesondere auch durch die engagierte Mitwirkung folgender, im Referat beschäftigten Personen entstanden:

Erhard Ebbinghaus

Wolfgang Kumm

Benjamin Rudolph

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangssituation

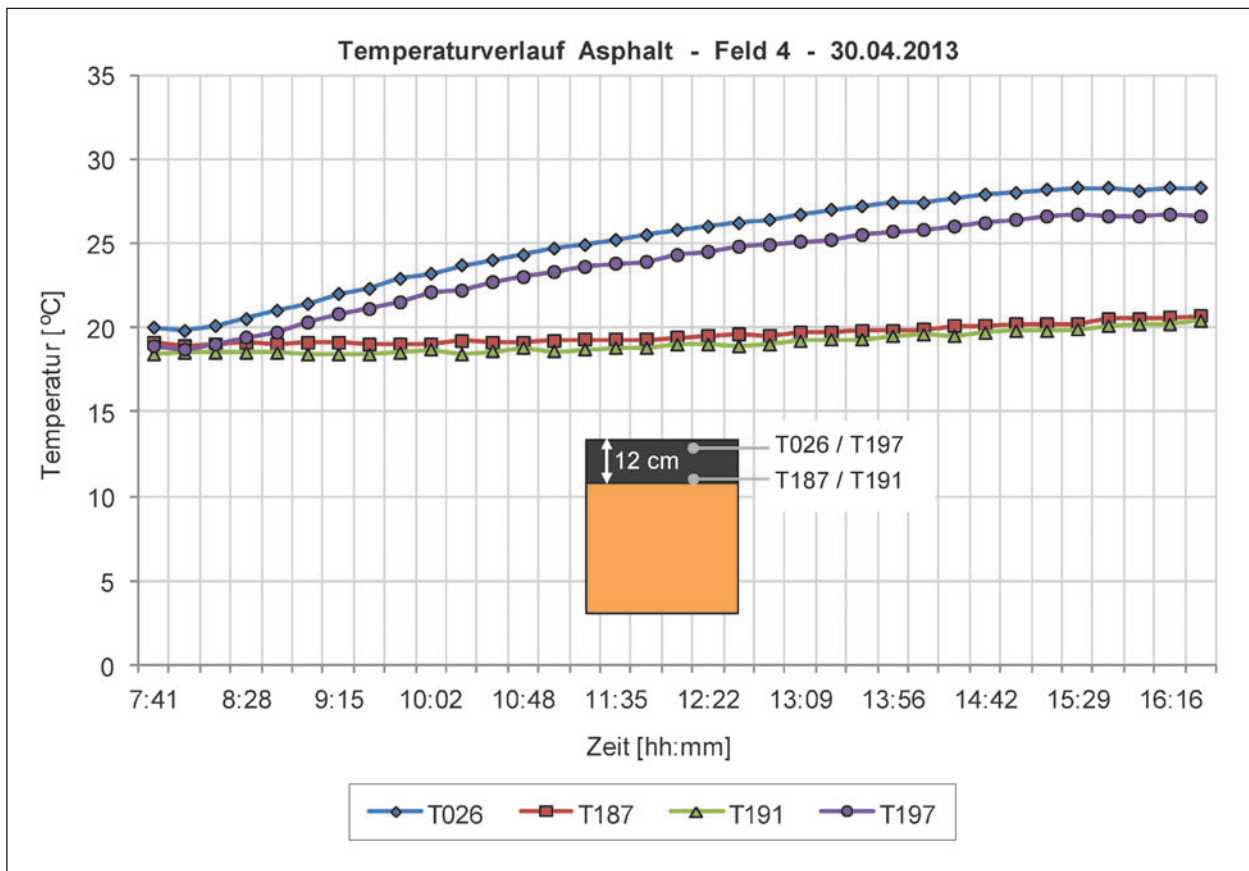
Mit der Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS30 (auch bekannt unter dem Namen MLS10) werden auf großmaßstäblichen Versuchsfeldern Belastungsversuche im Maßstab 1:1 durchgeführt. Die innerhalb der Belastungseinrichtung MLS30 laufende, geschlossene Kette mit vier Belastungsrädern wird durch Linearmotoren (LIM) angetrieben. Eine genaue Erläuterung der Funktionsweise des MLS30 kann unter anderem in den Veröffentlichungen (1) und (2) nachgelesen werden.

In diesen Quellen wird auch von der Temperaturerhöhung während des Dauerbetriebs gesprochen und es werden erste Daten diskutiert. Hierzu sind Sensordaten aus verschiedenen Positionen, innerhalb des Asphaltaufbaus, auf der Oberfläche des Straßenaufbaus und in der Luft ausgewertet worden. Innerhalb des Asphaltpaketes wurden Sensoren zwischen den beiden Gussasphaltschichten und direkt unterhalb der unteren Gussasphaltschicht eingebaut. Die Oberflächen- und Lufttemperatur wurde in dem genannten Projekt mit externen Datenloggern aufgenommen. Diese wurden temporär direkt auf dem Asphalt und in 90 cm Höhe positioniert.

Die Auswertung der Daten aus dem Asphaltoberbau hat für einen 8-h-Belastungstag ergeben, dass die beiden oberen Sensoren in der Asphaltkonstruktion einen Temperaturanstieg von ca. 5-8 K erfahren. Hingegen haben die Sensoren an der Unterseite des Asphaltpaketes gleichbleibende Temperaturen aufgezeichnet (Bild 1-1). Durch die Doppelerfassung der Daten ist eine gegenseitige Überprüfung möglich und zeigt die gleichen Erkenntnisse.

In der Auswertung haben die Autoren der oben genannten Veröffentlichungen angegeben, dass durch diverse, zusammenwirkende Wärmequellen und einem möglichen Luftstau die Erwärmung erfolgen könnte. Diese Vermutung wurde damit begründet, dass die Luft-, Asphaltoberflächen und obere Asphaltoberbautemperatur gleichermaßen anstiegen.





**Bild 1-1:** Temperaturgang im Asphalt während eines Belastungstages (2)

## 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Aufgabenstellung und Zielstellung dieses Projektes war es, die Wärmequellen zu finden und zu untersuchen. Dazu sollten alle vorhandenen Sensoren aus einem Vorgängerprojekt verwendet und zusätzliche Sensoren sowie Hilfsmittel mit in den Versuchsablauf integriert werden. Des Weiteren wurde ein Versuchsprogramm erarbeitet und durchgeführt, um die verschiedenen Zustände aus unterschiedlichen Positionen zu betrachten.

Die Temperaturmessungen über die verschiedenen Sensoren sollte alle 5 Minuten erfolgen und automatisiert werden. Aus verschiedenen Positionen war mithilfe einer Infrarotkamera die Veränderung der Temperatur an wesentlichen Bauteilen und Elementen zu erfassen und zu visualisieren. Durch eine Verschneidung der Sensordaten mit den Erkenntnissen aus der Infrarotbildbetrachtung wurde eine umfassende Auswertung durchgeführt.

Für die Untersuchungen sollten unterschiedliche Betriebsformen gewählt werden. Als erste Betriebsform war dabei der standardmäßige Betrieb zu untersuchen. Die zweite Betriebsform sollte modifiziert sein, um einen besseren Austausch der Luft während des Betriebes ermöglichen. Innerhalb dieser Betriebsformen sollten zwei Varianten zum Einsatz kommen. Zum einen soll durch eine sofortige Lüftung nach dem Versuchsende ein Abkühlen innerhalb des MLS30 untersucht und mit dem Verhalten ohne sofortige Lüftung verglichen werden.

Durch diese Untersuchungen sollen für weitere Versuchsprogramme, die durch den MLS30 verursachten Temperaturentwicklungen ermittelt werden, um die Programme dahingehend abzustimmen. Außerdem sollten Erkenntnisse gewonnen werden, die den Einfluss einer Überrollung auf das Versuchsfeld beschreiben.

## 2 Literaturstudie zum Temperaturverhalten von Asphalt

In den folgenden Absätzen werden Forschungsergebnisse einzelner Institute vorgestellt und zusammengefasst. Dabei wird der entsprechende Absatz dem entsprechenden Artikel zugeordnet.

ROBBINS und TIMM, 2008

Temperature and Velocity Effects on a Flexible Perpetual Pavement (3)

(Effekte aus Temperatur und Geschwindigkeit auf flexible, dauerhafte Beläge)

Im National Center for Asphalt Technology (NCAT) in den USA wurden auf dem Pavement Test Track durch ROBBINS und TIMM großmaßstäbliche Versuche unternommen, um die Zusammenhänge zwischen Asphalttemperatur und Lkw-Geschwindigkeit auf die Dehnungen zu untersuchen (3). Während der Untersuchungen wurden die Temperaturen innerhalb der Konstruktion aufgezeichnet. Dazu wurden Temperatursensoren an der Oberfläche, in der Mitte der Asphaltkonstruktion (18 cm) und an der Unterseite der Asphaltkonstruktion (36 cm) eingesetzt. Zur Messung der Dehnungen wurden 12 Sensoren verwendet, die in einer bestimmten Anordnung, einem sog. Array, unterhalb des Asphalts positioniert waren. Dadurch konnten Längs- und Querdehnungen messtechnisch erfasst werden. Die Überfahrten wurden mit verschiedenen Geschwindigkeiten (24-72 km/h) bei konstanten Achslasten von ca. 90 kN durchgeführt. Zum einen konnte so der Zusammenhang zwischen Dehnung und Geschwindigkeit untersucht werden. Zum anderen wurde der Zusammenhang zwischen Dehnung und Temperatur analysiert. Dabei wurden die einzelnen Geschwindigkeiten berücksichtigt. Die Oberflächen-Temperatur lag mit 21-49 °C deutlich höher als die Temperaturen in den unteren Asphalt-schichten. Bei den Untersuchungen wurde die Temperatur in der Mitte der Asphaltkonstruktion für die weiteren Betrachtungen ausgewählt. Dort zeigt sich die Reaktion bei Dehnung und Temperatur auf Variation der Achslasten und Geschwindigkeiten am deutlichsten. Zudem wurde deutlich, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten und hohen Temperaturen die größten Dehnungen auftraten.

Die kombinierende Wirkung von Geschwindigkeit und Temperatur wurde in dem hier beschriebenen Forschungsvorhaben in einer Formel eingearbeitet

um die entsprechenden Dehnungen rechnerisch zu erhalten. Diese Formel benötigt drei Regressionskoeffizienten (a, c, d) je nach Orientierung des Sensors und der entsprechenden Achse. Die Formel mit den entsprechenden Koeffizienten ist in dem Forschungsvorhaben nachzulesen.

von BECKER, 1976

Zur Annahme wirklichkeitsnäherer E-Moduli als Kennwerte für das elastische Verformungsverhalten flexibler Straßenbefestigungen bei elastizitätstheoretischen Beanspruchungen (4)

Innerhalb dieses Projektes wurde aus dem Bericht von BECKER (4) der Teil des Temperatureinflusses auf den E-Modul betrachtet. Weitere Faktoren, die Einfluss auf das elastische Verformungsverhalten haben, wurden nicht mit aufgenommen.

Bei flexiblen Befestigungen haben neben der Lufttemperatur auch weitere Umwelteinflüsse wie Sonneneinstrahlung, Wind, Regen, Schnee und Eis Einfluss auf die Temperaturentwicklung. Durch das Zusammenspiel von Wärmekapazität und Leitfähigkeit heizen sich bituminös gebundene Bauweisen unter intensiver Wärmestrahlung stark auf. So kann es zu deutlich anderen Oberflächentemperaturen kommen, als die Lufttemperatur erwarten lässt.

Weltweit wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, um einen Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und der zu erwartenden Temperatur innerhalb der Straßenkonstruktion abzuleiten. In Europa wurde nach von BECKER die Oberflächentemperatur aus der Lufttemperatur [°C] über einen Faktor n abgeleitet. Die beiden Szenarien konventioneller Aufbau (n = 0,8) und Aufbauten mit Wärmedämmschichten (n = 0,9) werden dabei unterschieden. In der ehemaligen UdSSR wurde nach von BECKER die Lufttemperatur mit einem festen Faktor von 1,3 multipliziert und im Anschluss 7 K addiert, um für Orientierungszwecke die mittlere Deckentemperatur zu erhalten. Für eine Betrachtung der Temperatur in 30 cm Tiefe wurde in amerikanischen Versuchen eine Formel entwickelt, die die Lufttemperatur mit einem festen Faktor von 1,185 multipliziert. Bei den amerikanischen Versuchen wurde der Witterungseinfluss auf die Daten ebenfalls aufgezeigt. Dabei wurden deutliche Unterschiede zwischen wolkenfreiem Himmel, bewölktem Himmel und regnerischem Wetter festgestellt. In den entsprechenden Abbildungen der amerikanischen Untersuchungen kann erkannt werden, dass der wolkenfreie Himmel durch die Formel

nicht erfasst wird und die anderen beiden Varianten näherungsweise mit den Berechnungen übereinstimmen.

Die Verformungseigenschaften bituminös gebundener Materialien sollen sich bei höheren Temperaturen denen der bindemittelfreien Mineralstoffe angleichen. Reibungsanteile und die Kohäsion vom Bitumen-Mineralgemisch sollen nach Ansätzen der ehemaligen UDSSR am kleinsten sein, wenn die Temperatur höher als 40 °C ist. Ab der genannten Temperatur könnte das Bitumen sogar als Schmiermittel fungieren und die Reibung demnach herabsetzen.

Der Steifigkeitsmodul oder Dynamische E-Modul wird in Abhängigkeit von der Temperatur sowie der Belastungsart und -größe festgelegt. Dabei sollen Änderungen der Belastungsdauer einen sehr viel kleineren Einfluss auf die Verformungseigenschaften haben als Temperaturänderungen.

Exemplarisch ist in Bild 2-1 die charakteristische Jahresganglinie der mittleren Monatstemperatur in

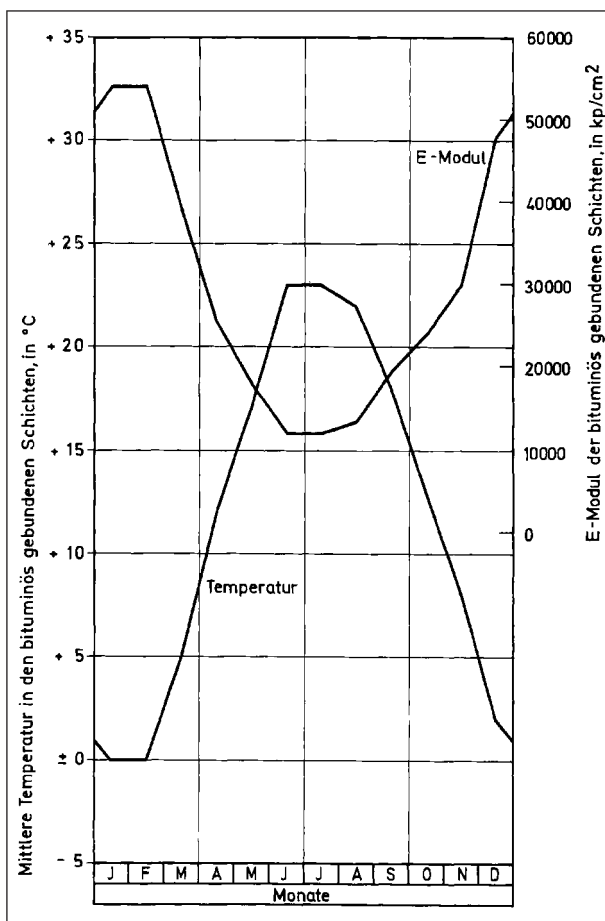


Bild 2-1: Charak. Jahresgang und E-Modul bituminös gebundener Schichten (4)

den bituminös gebundenen Schichten und der E-Modul dieser Schichten aufgetragen.

Nach von BECKER (4) „sind die Bemühungen zu verstärken, die maßgebenden Materialkennwerte an Straßenbefestigungen unter natürlichen Bedingungen oder in entsprechenden Großversuchen zu ermitteln“. Des Weiteren kann bezweifelt werden, dass aus Laboruntersuchungen jemals mehr abzuleiten ist, als Erkenntnisse über bestimmte Einzeleinflüsse. Der Mechanismus innerhalb einer vollständigen Befestigung ist so komplex, sodass selbst durch Übertragungsfunktionen die Belastungsbedingungen und Umwelteinflüsse im Labor nicht simuliert werden können.

BELLS-Verfahren und weitere Untersuchungen, 1994 – 2009

Temperaturbestimmung im Asphaltkörper bei FWD-Messungen (5) (6)

Der von BALTZER, ERTMAN-LARSEN, LUKANEN und STUBSTAD (5) (6) entwickelte und nach den Autoren benannte BELLS Algorithmus zur Berechnung von Asphaltkörpertemperaturen basiert auf dem Ansatz von SOUTHGATE et al. (7) und wurde für die Anwendung bei FWD-Messungen entwickelt. Der Algorithmus wurde mehrfach überarbeitet und liegt nun in der dritten Version als BELLS3 vor. Der Algorithmus wird in der Literatur vielfach genannt und findet sich im amerikanischen Regelwerk in Form einer ASTM-Norm wieder.

Zur Herleitung des Algorithmus wurden Temperaturdaten aus dem Long Term Pavement Performance (LTPP) Programm des U.S. Department of Transportation verwendet. Das dafür ausgesuchte Streckenkollektiv setzt sich wie folgt zusammen:

- 21 % Straßen mit einer Asphaltkörperdicke zwischen 4,5 und 10 cm,
- 53 % Straßen mit einer Asphaltkörperdicke zwischen 10 und 20 cm,
- 26 % Straßen mit einer Asphaltkörperdicke zwischen 20 und 30 cm.

Zur Anwendung des Algorithmus wird die aktuelle Oberflächentemperatur, die Uhrzeit sowie die mittlere Lufttemperatur des Vortages benötigt. Mithilfe des Algorithmus kann die Temperatur in beliebiger Tiefe berechnet werden.

$$T_x = 2,9 + 0,935 \cdot T_0 + (\log(x) - 1,25) \cdot (-0,487 \cdot T_0 + 0,626 \cdot T_{\text{vor}}) + 3,29 \cdot \sin(\text{hr}_{18} - 15,5) + 0,037 \cdot T_0 \cdot \sin(\text{hr}_{18} - 13,5)$$

Gl. 1

mit

$T_x$  = Asphalttemperatur in der Tiefe  $x$  [°C]

$x$  = Tiefe unter Fahrbahnoberfläche [mm]

$T_0$  = Oberflächentemperatur [°C]

$T_{\text{vor}}$  = mittlere Lufttemperatur des Vortages [°C]

sin = Sinus-Funktion in einem 24h-System, wobei  $2\pi$  einem 24h-Tag entsprechen

$\text{hr}_{18}$  = Tageszeit, Beispiel: 9.30h  $\rightarrow (9,5-15,5)/24 = -0,1875 \rightarrow -0,1875 \times 2\pi = -1,178$  Radiant  $\rightarrow \sin(-1,178) = 0,90$

Die ausschließliche Berücksichtigung der Luft- und Oberflächentemperatur ist durch die Ergänzung des Messzeitpunktes in den Algorithmus möglich. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Ganglinien der Temperaturen im Asphaltkörper über einen Tag hinweg mit zwei sich überlappenden Sinuskurven angeglichen werden können. Die Wahl von zwei Sinuskurven berücksichtigt die unterschiedlichen Dauern der Aufheiz- und Abkühlphase an einem Tag, vgl. Bild 2-2. Die Aufheizphase ist dabei kürzer als die Abkühlphase.

Im Rahmen des DFG-Projektes STR 877/2-1 (Dissertation JANSEN) (8) wurden in Deutschland, NRW, zwei Asphaltstraßen mit Temperaturmess-Stationen ausgestattet. Über mehr als ein Jahr hinweg wurden die Asphaltkörpertemperaturen in verschiedenen Tiefen kontinuierlich aufgezeichnet. Die Datenbasis wurde durch Daten von naheliegenden DWD-Wetterstationen ergänzt.

Die so vorliegende Datenbasis wurde zur Überprüfung des BELLS3-Ansatzes verwendet. Hierzu wurden die gemessenen Temperaturen mit den berechneten Temperaturen in verschiedenen Tiefen gegenübergestellt. Die Ergebnisse werden in Bild 2-3 und Bild 2-4 dargestellt.

Anhand der Darstellungen ist zu erkennen, dass

- die Genauigkeit des Verfahrens mit zunehmender Tiefe abnimmt,
- tendenziell zu niedrige Temperaturwerte berechnet werden.

Die Erkenntnisse aus dieser Literaturrecherche zeigen, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, die Temperatur von Straßenaufbauten zu berechnen. Außerdem wurden verschiedenen Parameter beleuchtet, die Einfluss auf die Temperaturentwicklung haben. Aufgrund der Tatsache, dass bei den zeitraffenden Belastungsversuchen mit dem Mobile Load Simulator MLS30 ein von der Umgebung abgeschotteter Bereich innerhalb der Maschine

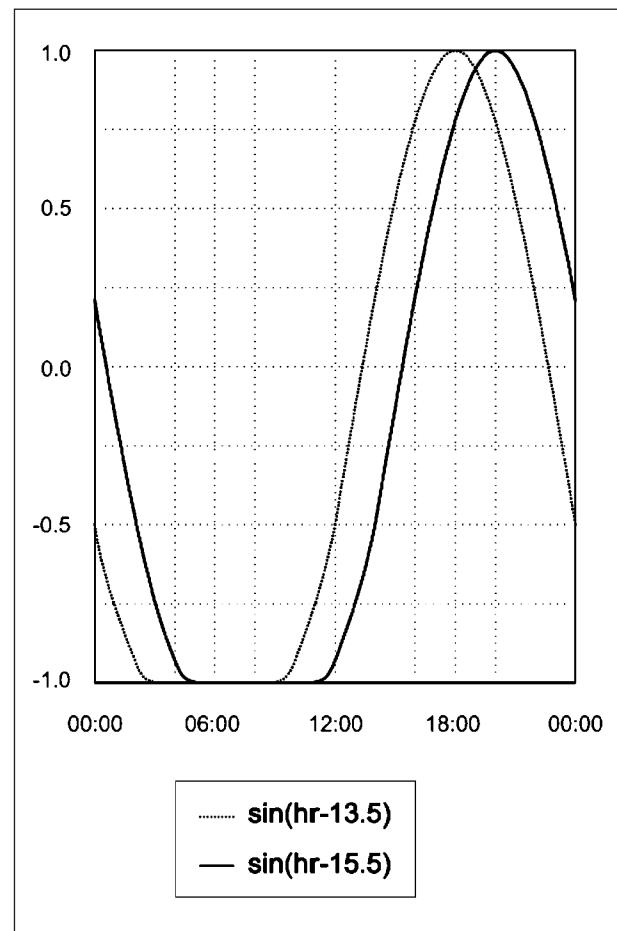
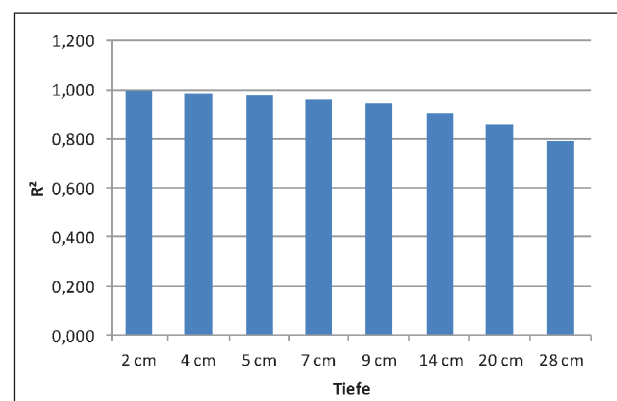


Bild 2-2: Aufteilung des Tagesgangs in zwei Sinuskurven

Bild 2-3: Korrelation  $R^2$  (8)

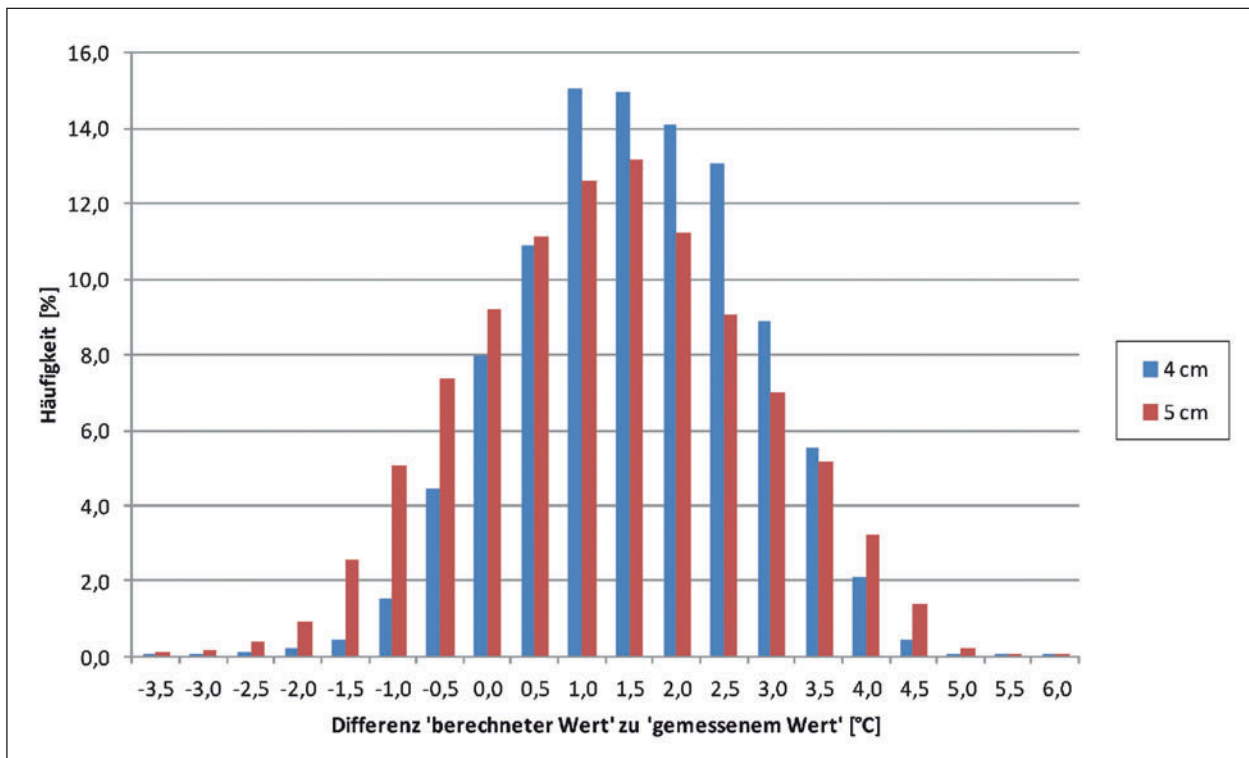


Bild 2-4: Häufigkeit der Differenzen [N = 37.303 Einzelwerte] (8)

verwendet wird, sind die vorher genannten Berechnungsverfahren nur eingeschränkt einsetzbar. Für weitergehende Untersuchungen kann mithilfe der gewonnen Erkenntnisse aus der Literaturrecherche und weiteren Verfahren wie dem Differenzverfahren und dem Wärmestrom in Körpern ein eigener Berechnungsansatz für diese Art von Belastungsversuchen entwickelt werden. Dabei werden bauphysikalische Parameter wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Dichte eine große Bedeutung haben. Hierzu sind allerdings im Vorfeld umfangreiche Untersuchungen am Belastungsgerät durchzuführen. Im weiteren Verlauf des Berichtes werden erste Beiträge zu diesen Untersuchungen vorgestellt.

### 3 Versuchsprogramm

In den folgenden Kapiteln werden die notwendigen Elemente für die Versuchsdurchführung erläutert und beschrieben. Außerdem werden die unterschiedlichen Betriebsformen und Varianten während des Versuches erklärt.

#### 3.1 Eingesetzte Maschinen und Hilfsmittel

Unter Maschinen und Hilfsmitteln wird innerhalb dieses Forschungsvorhabens all das verstanden, was für das Erreichen des Ziels notwendig ist. Dazu zählen die Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS30, die einzusetzenden Sensoren mit dem entsprechenden Erfassungsprogramm und ein Luftthermometer. Hinzu kommt die weitere Versuchsinfrastruktur mit dem Versuchsfeld und einer Infrarotkamera.

##### 3.1.1 Mobile Load Simulator MLS30

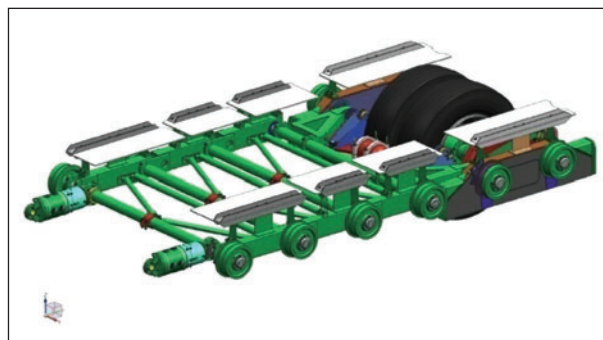
Mit dem Mobile Load Simulator MLS30 kann individuell auf Versuchsgegebenheiten reagiert werden, da dieser 40 t schwere Großversuchsstand selbstfahrend positioniert werden kann (Bild 3-1). Aufgrund der Möglichkeit, den Betrieb über einen Dieselgenerator oder über das Starkstromnetz durchzuführen, ist die Einsatzplanung sehr flexibel zu gestalten. Durch den Betrieb mittels Starkstroms können Schadstoffausstoß und Lärmbelastigung vor Ort reduziert werden. Beim Einsatz des Dieselgenerators ist eine höhere Flexibilität gegeben.



**Bild 3-1:** Mobile Load Simulator MLS30 der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

Die Einsatzmöglichkeiten bestehen auf Versuchsstrecken mit unterschiedlichsten Eigenschaften. Dazu zählen gebundene Oberbaukonstruktionen wie Asphalt- und Betonbefestigungen. Auch ein Einsatz auf ungebundenen Materialien ist möglich. Innerhalb der Abmessungen von 10,7 m in der Länge, 2,4 m in der Breite sowie 3,1 m in der Höhe sind die Transporträder und der komplette Versuchstand eingebaut. In der Mitte ist das elementarste Bauteil der Belastungseinrichtung angeordnet. Dort wird durch vier Belastungsräder die Belastung aufgebracht. Diese Räder sind in sogenannten Bogie und Radsatzzügen (siehe Bild 3-2) integriert. Als Belastungsräder werden handelsübliche Lkw-Reifen verwendet, die in Zwillingbereifung oder Super-Single-Version eingebaut werden können. Auf einer Länge von 3,50 m ist eine konstante Radlast unter den Belastungsrädern nachgewiesen worden (2). In Flächen vor sowie hinter diesem Bereich sind die Aufsetz- und Abhebebereiche (keine konstante Radlast). Insgesamt werden die Belastungsräder auf einer Länge von 4,20 m über die Konstruktion geführt.

Der Antrieb der Radsatzzüge erfolgt über Linearomotoren (LIM), die in der Maschine verteilt sind. Insgesamt 24 Motoren sind an 12 Positionen paarweise angeordnet. An jeder Position sind zwei Linearomotoren übereinander mit einem Spalt in der Mitte angeordnet. Sechs dieser Positionen liegen im unteren und sechs im oberen Bereich des MLS30. An den Radsatzzügen angebrachte Reaktionsplatten, werden durch den Spalt zwischen den Linearomotoren geführt und treiben so die Belastungseinrichtung an. Die vertikal-ovale Bewegung wird durch seitliche Führungsschienen erreicht, auf denen sich die Führungsräder der sechs Achsen pro Radsatzzug bewegen.



**Bild 3-2:** Radsatzzug (1 von 4) des MLS30 (9)

Mit diesem Antrieb wird erreicht, dass in einer Stunde bis zu 6.000 Überrollungen durch den MLS30 aufgebracht werden können. Dies entspricht einer Geschwindigkeit von ca. 22 km/h (6,1 m/s). Das bedeutet, dass unter Höchstgeschwindigkeit alle 600 ms eine Belastung über denselben Bereich geführt wird. Durch diese Dichte an Überrollungen wird mit dem MLS30 die zeitraffende Wirkung erzeugt und damit die Konstruktion belastet.

Für eine vergleichbare Belastung werden die Radlasten bei den aktuellen Versuchen auf konstant 50 kN eingestellt und somit der Bezug zum aktuellen deutschen dimensionierungsrelevantem Regelwerk (z. B. RStO 12 (10)) sichergestellt. Die Radlasten sind in der Maschine prinzipiell zwischen 40-75 kN frei wählbar. Die Einstellung der Radlast wird über einen hydraulischen Druckspeicher an jedem Bogie vorgenommen.

### 3.1.2 Sensoren und Erfassungsmedium

Die im Versuchsfeld 4 installierten Sensoren wurden in (2) ausführlich beschrieben. Für die hier vorgestellten Untersuchungen sind die meisten Sensoren nicht relevant, für spätere Untersuchungen wurden die Signale aber mit aufgezeichnet. Bei den dynamischen Sensoren wurde insbesondere das Temperaturverhalten untersucht.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass ein Teil der Dehnungssensoren bewusst in der Mitte der Asphaltenschicht verbaut worden ist. Mit diesen Sensoren soll vor allem die Rissentwicklung untersucht werden. Kommt es infolge der Belastung zu Rissen an der Unterkante, so wandert die neutrale Faser weiter nach oben. Der Sensor behält seine Position und sollte daher bei gleichbleibender Belastung immer größere Dehnungen anzeigen. Gelingt es, einen Grenzwert zu definieren, ließe sich so ein Identifizierungssystem für strukturelle Schädigungen

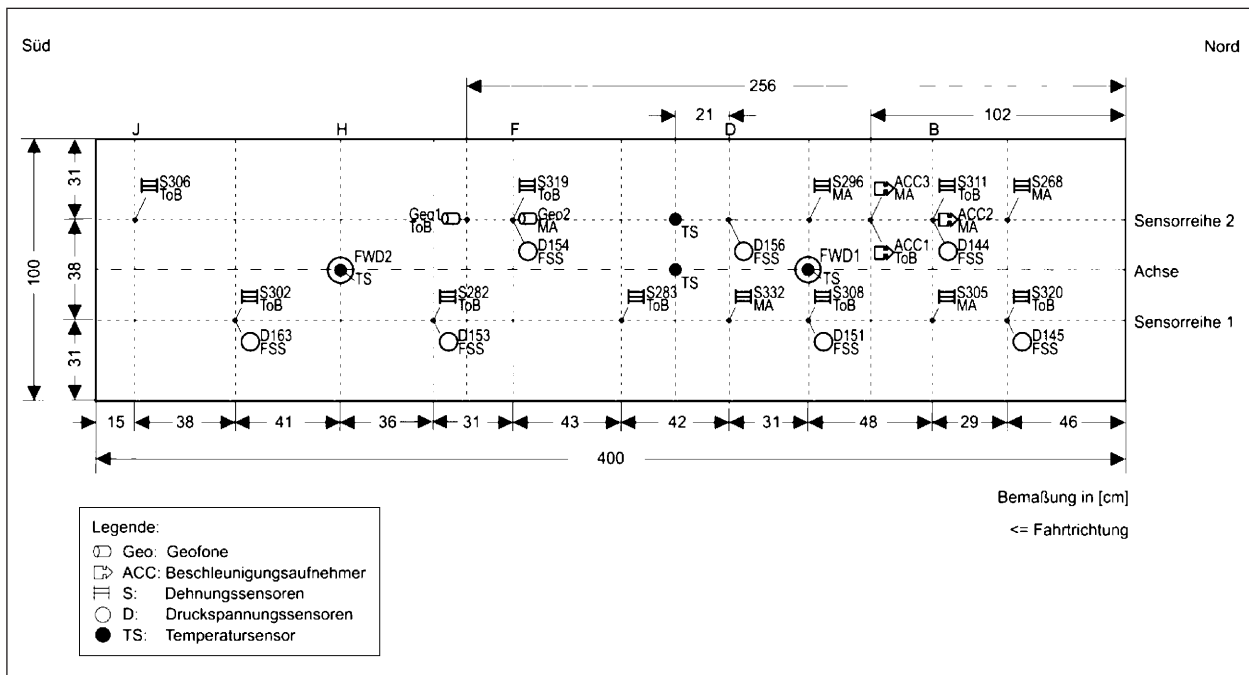


Bild 3-3: Sensoranordnung im Versuchsfeld 4 – Draufsicht

gen aufbauen. Die Auswertung dieser Idee erfolgt fortlaufend in den weiteren Belastungsversuchen.

Die relevanten Sensoren in dieser Untersuchung sind die Temperatursensoren. Da recht unterschiedliche Typen eingesetzt wurden, sollen die Sensoren noch einmal kurz beschrieben werden.

Die Temperaturentwicklung in unterschiedlichen Tiefen wurde mit den im Feld eingebauten Sensoren erfasst. Dabei handelt es sich um Eigenbauten, die sich durch ihre 4-20 mA Schnittstelle auszeichnen. Der aktive Sensor ist ein Halbleiter IC in der kleinen Bauform SOT 23 (Kunststoffkörper 3 mm x 1,75 mm x 1,3 mm). Beim Aufbau wurde sichergestellt, dass der Sensor einen guten Kontakt zum verwendeten Aluminiumgehäuse aufweist. Seine Reaktionseigenschaft muss mit gemächlich beschrieben werden. Für die eher langsam ablaufenden Temperaturveränderungen im Straßenaufbau ist dieser Sensor ausreichend.

Die nachträglich in der Asphaltoberfläche aufbrachten Sensoren sind kommerziell erhältliche PT-1.000-Sensoren. Dübel und Schraube sorgen hier für einen guten Kontakt zum Asphalt.

Die Lufttemperatur in 90 cm Höhe wurde mit einem kommerziellen Handgerät ermittelt, dessen korrektes Verhalten im Wasserbad überprüft wurde.

### 3.1.3 Untersuchungsfeld

Für die Untersuchungen wurde ein Versuchsfeld der Asphaltmodellstraße der BAST ausgewählt. Dieses Versuchsfeld wurde in einem vorherigen Versuch schon mit dimensionierungsrelevanten 300.000 Überrollungen belastet (2). Da sich aus den Sensordaten und den weiteren Betrachtungen noch keine strukturellen Schädigungen ableiten ließen (2), wurde das instrumentierte Feld vor und während dieses Versuchs weiter belastet. Insgesamt hat das Feld vor dem Versuchsstart zu den Temperaturuntersuchungen rund 600.000 Lastwechsel erfahren. Eine Auswertung dieser Strukturdaten findet gesondert statt.

Das verwendete Versuchsfeld wurde schon einmal durch Impulsgeber strukturell zerstört (11) und mit neuen Sensoren, angepasst an die MLS30-Belastung mit Zwillingsbereifung (zwei Sensorreihen, siehe Bild 3-3), bestückt und mit zwei Lagen Gussasphalt (MA) neu aufgebaut (12). Diese eingebauten Sensoren nehmen in verschiedenen Tiefen Druckspannungen und Dehnungen auf. Zusätzlich wurden in zwei Tiefen, zwischen den beiden Gussasphaltilagen und unterhalb der unteren Gussasphaltilage, Temperatursensoren eingebaut.

Der Unterbau des Versuchsfeldes baut sich aus einer Frostschutzschicht (FSS) und einer Trag-schicht ohne Bindemittel (ToB) auf. Über diesem

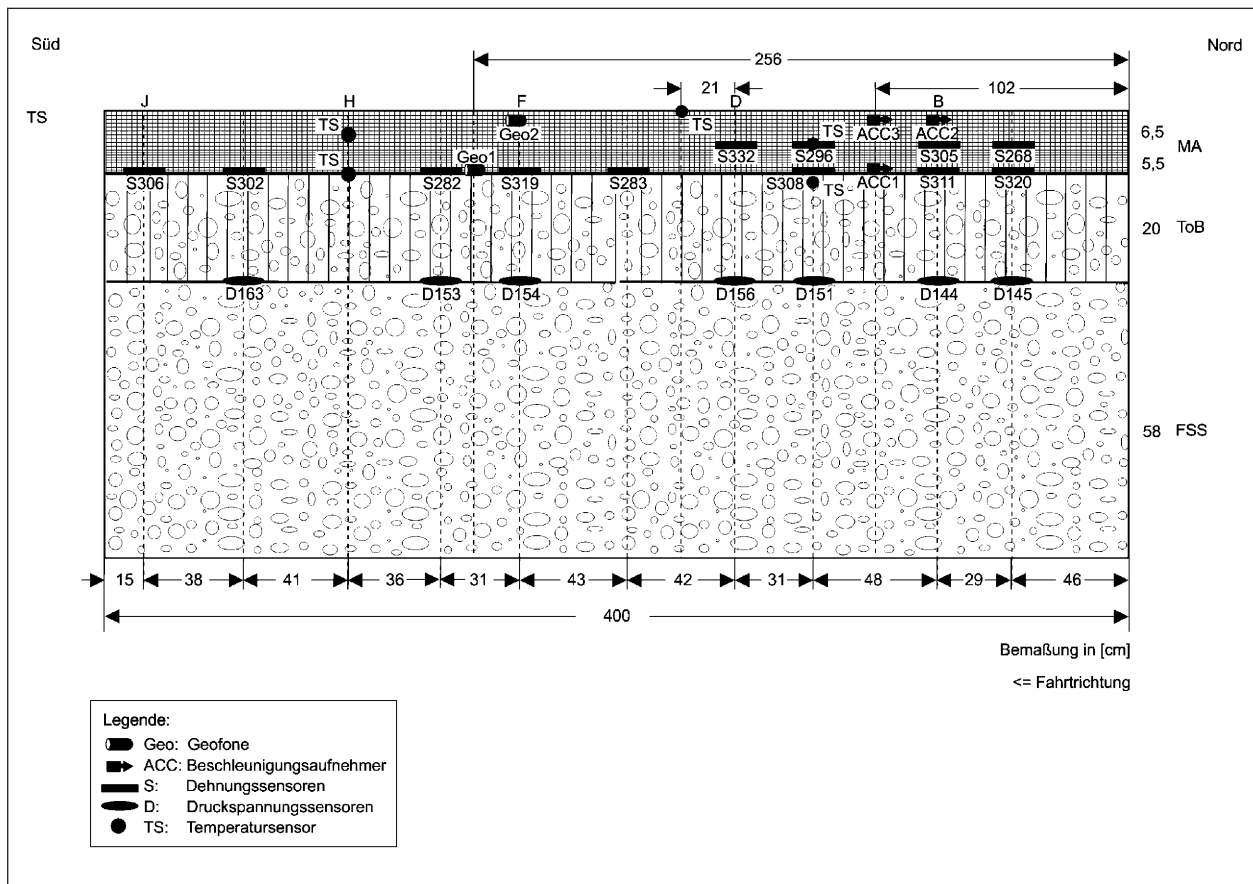


Bild 3-4: Sensoranordnung im Versuchsfeld 4 – Querschnitt

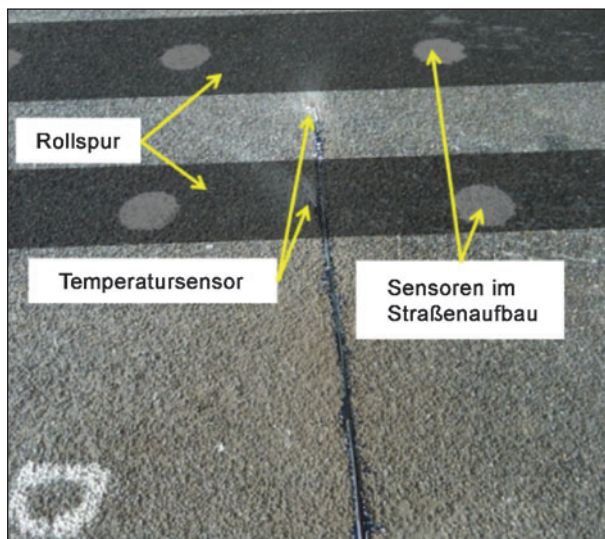


Bild 3-5: Sensormarkierungen inner- und außerhalb der MLS30-Rollspur

ungebundenen Bereich wurden die beiden Gussasphaltpfahnen eingebaut, siehe Bild 3-4. Während des Umbaus des Versuchsfeldes wurde die ToB in dem Bereich ebenfalls erneuert und an der Unterseite mit Druckspannungssensoren versehen. Diese Druckspannungssensoren liegen ca. 32 cm

unter der Oberkante des Asphalts. Dehnungssensoren wurden zwischen den beiden Gussasphaltpfahnen und an der Unterseite der unteren Gussasphaltpfahne eingebaut. Für die Auswertungen wurden bislang ausschließlich die Sensoren der Unterseite (ca. 12 cm Tiefe) verwendet.

Die Temperatursensoren innerhalb der Konstruktion wurden in zwei Höhen, 6,5 cm und 12,0 cm, zwischen den Rollspuren der Zwillingbereifung eingebaut. In Bild 3-4 können die Positionen der Sensoren 'TS' mit 0,94 m von Süden und 1,23 m von Norden angegeben werden. Ergänzend wurden zwei weitere Temperatursensoren an der Oberfläche der Asphaltkonstruktion dauerhaft eingebaut, siehe Bild 3-5, um die Oberflächentemperatur zwischen und direkt in der Rollspur zu erfassen.

### 3.1.4 Infrarotkamera

Für dieses Versuchsprogramm wurde eine FLIR T250 Infrarotkamera verwendet. Diese Kamera verfügt über einen Digitalmodus und einen Infrarotmodus der ebenfalls mit dem Digitalmodus verschritten werden kann. Für den hier durchgeführten



Versuch wurde ausschließlich der Infrarotmodus gewählt.

Alle Einstellungen wurden manuell vorgenommen. Dazu wurden folgende Werte an den entsprechenden Positionen eingetragen: Bei allen Positionen ist die rel. Luftfeuchte mit 50 % und die Atmosphären Temperatur mit 25 °C angegeben worden. Bei der Temperatur wurde dieser Wert gewählt, obwohl sich die Temperatur im Laufe des Versuchs änderte, aber eine Nachregelung nicht möglich war und dieser Wert im Mittel als sinnvoll angesehen wurde.

Für den Blickwinkel auf die Linearmotoren (LIM) wurde ein Emissionsgrad von 0,85 gewählt, dies entspricht einem rostfreien Stahl Typ 18-8 der bei 800 °C oxidiert. Der Abstand zwischen Kamera und Zielobjekt wurde mit 1,0 m gemessen und als reflektierte, scheinbare Temperatur 15 °C gewählt. Der Temperaturbereich, vor allem bei der Betrachtung der Linearmotoren, wurde relativ groß gewählt, um über die komplette Versuchsdauer die Temperaturunterschiede aufzeichnen zu können. Es wurde eine Starttemperatur von 25,0 °C und eine Endtemperaturen von 60 °C bzw. 55 °C gewählt. Eine Reduzierung auf 55 °C wurde unternommen, um die möglichen Grenzen besser detektieren zu können. Durch die große Spannweite zwischen Start und Endtemperatur lassen sich die Temperaturen nur grob von der Farbskala ablesen. Dies wurde für diesen ersten Versuch als ausreichend angesehen.

Für den Blickwinkel auf die Belastungsräder von vorne sowie von hinten wurde ein Emissionsgrad von 0,95 gewählt, dies entspricht schwarzem Gummi. Der Abstand zwischen Kamera und Zielobjekt betrug 1,5 m und als reflektierte, scheinbare Temperatur wurde 25 °C gewählt. Der Temperaturbereich wurde so gewählt, dass über die komplette Versuchsdauer eine grobe Temperaturmessung möglich war. Dies bedeutet, dass eine Starttemperatur von 25,0 °C und eine Endtemperatur von 35 °C bzw. 40 °C gewählt wurden. Die Erhöhung wurde durchgeführt, weil sich die Mantelfläche der Belastungsräder höher erwärmte, als im Vorfeld angenommen wurde.

### 3.1.5 Luftthermometer

Für Lufttemperaturmessungen wurde ein Thermometer der Firma Testo GmbH & Co eingesetzt. Das

Modell testo 925 wurde dazu verwendet, zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Belastungsbetriebes die Lufttemperatur in 90 cm Höhe und ca. 1,0 m Entfernung zum MLS zu erfassen. Diese Temperatur wurde mit der Lufttemperatur innerhalb des MLS30 verglichen und analysiert. Des Weiteren soll so gesehen werden, welche Temperaturen in näherer Umgebung herrschen und welche Entwicklung zu erkennen ist. Neben den Temperaturmessungen zu Beginn jedes Belastungsprogramms mit dem externen Thermometer stehen die Sensorwerte aus dem Feld für eine Auswertung zur Verfügung. Zur Auswertung der Sensorwerte werden vor allem Differenzen herangezogen.

## 3.2 Betriebsformen und Varianten der Durchführung

Im Vorfeld der Versuchsdurchführung wurden zwei Betriebsformen definiert. Diese wurden als Standard-Betriebsform und Modifizierte-Betriebsform unterschieden. Bei der Standard-Betriebsform handelt es sich um den regulären Betrieb des MLS30 in dem als Serienzustand zu beschreibendem Zustand. Bei der Modifizierten-Betriebsform handelt es sich um eine Betrachtung, bei der eine bessere Luftumwälzung realisiert werden sollte. Ein Luftstau innerhalb der Maschine sollte dadurch verhindert bzw. reduziert werden. Hierzu wurden spezielle Halterungen konzipiert, um die seitlichen Schürzen hochzuhalten und dadurch eine ca. 8,0 cm hohe Öffnung zwischen Asphaltoberfläche und MLS30 zu erreichen. Durch diese Öffnung sollte die Luft innerhalb des MLS30 zügiger ausgetauscht werden. Überprüft werden sollte die Hypothese, ob der Temperaturanstieg innerhalb der Maschine reduziert werden kann.

Innerhalb jeder Betriebsform wurden jeweils zwei Varianten im Versuch angewendet. Diese unterscheiden sich erst nach der fünfstündigen Belastung bei dem sich anschließenden Abkühlvorgang. So wurden pro Betriebsform für die Belastungsphase jeweils sechs Datensätze ( $n = 6$ ) für Vergleiche erfasst.

Bei der ersten Variante wurde der MLS30 nach fünf Stunden abgeschaltet und unverändert auf den vier Eckstützen belassen. Die Sensoren und die Bildaufnahme wurden in dieser Zeit weiter geführt. Nach einer Stunde wurden die Bildaufnahmen eingestellt. Die Sensoren liefen bis zum Ende der



**Bild 3-6:** Standard- (oben) und Modifizierte-Betriebsform (unten)

Betrachtung am folgenden Tag weiter und zeichnen die Abkühlung an allen relevanten Stellen auf. Am folgenden Tag wurde der MLS30 nach einer 18-stündigen Ruhephase angehoben und damit ein vollständiger Luftaustausch provoziert (Bild 3-6).

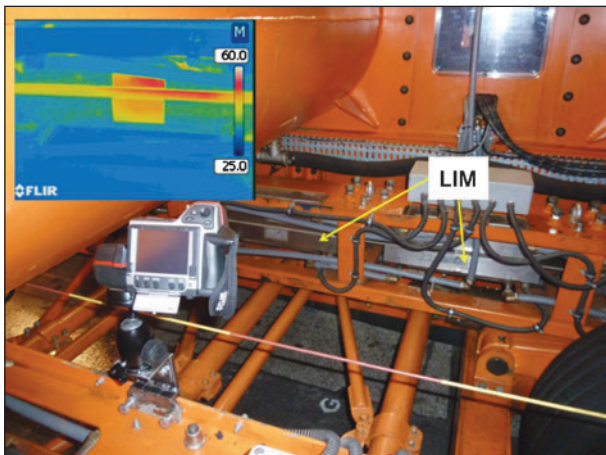
Bei der zweiten Variante wurde der MLS30 ebenfalls nach fünf Stunden Belastung ausgeschaltet, dann aber sofort in die Fahrposition angehoben, um den Luftaustausch direkt nach der Belastung zu erreichen. Es wurden die Sensoren und die Bildaufnahmen weiter fortgesetzt. Diese genaue Betrachtung erfolgte mindestens weitere zwei Stunden. Die Sensoren liefen zum Teil noch länger und wurden am folgenden Morgen ausgeschaltet.

Im weiteren Verlauf wird eine Bezeichnung für die oben beschriebenen Betriebsformen und Varianten eingeführt. Die Standard-Betriebsform wird mit V 1. und die Modifizierte-Betriebsform mit V 2. bezeich-

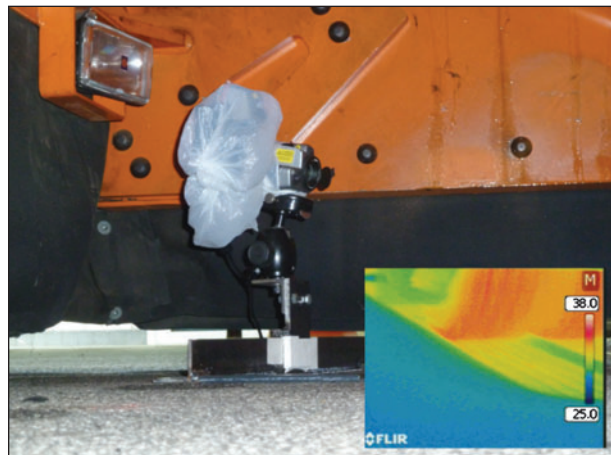
net. Für die jeweilige Variante werden ebenfalls arabische Zahlen verwendet. Die erste Variante (weiter auf Stützen stehend) wird mit .1 und die zweite Variante (direktes Anheben nach der Belastung) wird mit .2 angegeben. Somit ergeben sich zusammengesetzte Bezeichnungen wie z. B. V2.1 – ‚Modifizierte-Betriebsform und Variante weiter auf Stützen stehend nach dem Belastungsende‘.

### 3.2.1 Positionierung der Elemente und Versuchsdurchführung

Zusätzlich zu der oben beschriebenen Bezeichnung der Betriebsformen und Varianten wird ein Titel verwendet. Dieser Titel bezeichnet die Blickrichtung der Infrarotkamera. Ursprünglich waren vier Positionen angedacht. Durch diese Positionen sollten die Linearmotoren, die Belastungsräder von vorne aber auch von hinten sowie die Asphaltüber-



**Bild 3-7:** Position – Infrarotkamera (IR) auf LIM



**Bild 3-9:** Position – Infrarotkamera (IR) auf Räder hinten



**Bild 3-8:** Position – Infrarotkamera (IR) auf Räder vorne

fläche untersucht werden. Um Schäden durch ölhaltige Sprühnebel oder fliegende, aufgewirbelte Teile zu verhindern, wurde die Kamera geschützt.

Da bei der Betrachtung der Position der Belastungsräder die Asphaltoberfläche mit untersucht werden konnte, wurde diese Einzelposition aus dem Versuchsprogramm gestrichen.

Die Position mit dem Titel: IR auf LIM (Infrarotkamera auf Linearmotoren) wurde so gewählt, dass die Motoren vorne, rechts unten (LIM Nr. 23 und 24) untersucht werden konnten. Die Kamerahalterung wurde dazu in der Mitte des MLS30 auf der linken Seite positioniert (siehe Bild 3-7).

Die Position mit dem Titel: IR auf Räder vorne (Infrarotkamera auf die Belastungsräder von vorne) wurde so gewählt, dass die Belastungsräder vor dem Abheben aufgenommen und die belastete Asphaltfläche untersucht werden konnten. Dazu wurde die Kamera am linken vorderen Teil des MLS30 positioniert (siehe Bild 3-8).

Die Position mit dem Titel: IR auf Räder hinten (Infrarotkamera auf die Belastungsräder von hinten), wurde so gewählt, dass die Belastungsräder vor dem Aufsetzen aufgenommen und die später belastete Asphaltfläche untersucht werden konnte. Dazu wurde die Kamera am linken hinteren Ende des MLS30 positioniert (siehe Bild 3-9).

Wie schon im Kapitel zum Untersuchungsfeld (Kapitel 3.1.3) beschrieben, wurden an verschiedenen Stellen Sensoren im Feld verbaut. Für die Temperaturerfassung wurden weitere Temperatursensoren am und unter dem MLS30 angebracht. Zum einen wurde in 90 cm Höhe, MLS30 in Belastungsposition, zur Oberkante Asphalt ein Temperatursensor hinten rechts im MLS30 für die Luftmessung angebracht. Die Oberflächentemperatur wurde durch zwei weitere Sensoren in der Feldmitte (zwischen Querachse D und E) angeordnet (siehe Bild 3-5) und erfasst. Davon liegt einer innerhalb der Rollspur des MLS30 und wird jedes Mal überrollt. Der Zweite liegt genau zwischen den Zwillingreifen und erfasst die reine Asphaltoberflächentemperatur. Die anderen vier Temperatursensoren liegen wie schon im Kapitel 3.1.3 beschrieben innerhalb der Konstruktion und lassen sich durch die paarige Anordnung gegenseitig kontrollieren.

Der Mobile Load Simulator MLS30 wird immer in Feldmitte des Versuchsfeld 4 positioniert, um eine optimale Überrollung der Sensoren gewährleisten zu können. Dadurch wird erreicht, dass das Lastzentrum der Belastungsräder immer zentriert über den Sensoren liegt.

Informationen zum Versuchsprogramm enthält Tabelle 3-1.

Generelle Informationen				
Versuchsstandort	instrumentiertes Versuchsfeld innerhalb der Versuchshalle			
Versuchsdauer	jeweils 5 [h] = 30.000 Überrollungen			
Belastung	Überrollungen mit 50 kN			
Versuchsinfrastruktur	Infrarotkamera, integrierte Temperatursensoren und PT 1000, Hand-Thermometer			
Kamerapositionen	(a) Blick auf die Linearmotoren, (b) Blick auf die Belastungsräder von vorne und von hinten, (c) Blick auf die Asphaltoberfläche von vorne und von hinten.			
Detaillierte Informationen				
Betriebsform	Standard (V1...)		Modifiziert (V2...)	
seitliche Schürzen	unten (kein Spalt)		hoch (Spalt ca. 8 cm)	
Variante	1 (V1.1)	2 (V1.2)	1 (V2.1)	2 (V2.2)
direktes Anheben	nein	ja	nein	ja

Tab. 3-1: Versuchsprogramm

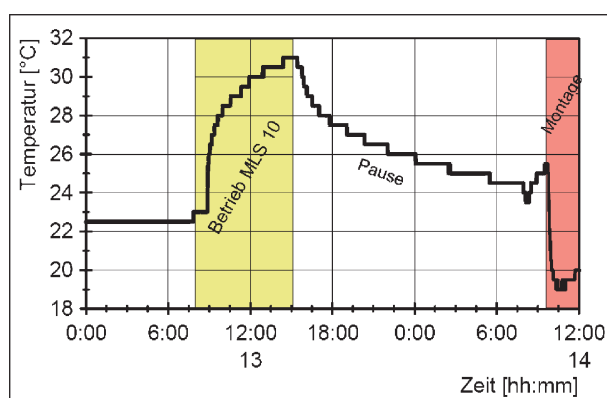


Bild 4-1: Temperaturverlauf oberhalb Asphaltoberfläche und innerhalb des MLS30

## 4 Auswertung der verschiedenen Versuche

### 4.1 Erkenntnisse aus vorherigen Untersuchungen

In ersten Versuchen mit dem Mobile Load Simulator MLS30 wurden Temperaturerhöhungen innerhalb eines Belastungstages festgestellt. Wie Bild 1-1 zeigt, stieg die Temperatur im Laufe eines Belastungstages (8 h) in der Straßenkonstruktion, ca. 6 cm unterhalb der Oberfläche, um 6-8 °C an.

Dieser Temperaturanstieg wurde im Weiteren durch externe Datenlogger (Asphaltoberfläche und Lufttemperatur 90 cm Höhe) grob untersucht. Bei diesen einzelnen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Temperatur während des Betriebes zuerst sprunghaft ansteigt und sich später moderater entwickelt (siehe Bild 4-1). Nach dem Ausschalt-

ten des MLS30 fällt die Temperatur innerhalb von 18 h erst zügig und später moderat ab. Für eine Inspektion nach dieser 18-stündigen Ruhephase wurde der MLS30 angehoben und ein schlagartiger Luftaustausch fand statt. Dies konnte eindeutig am Temperaturverlauf detektiert werden.

Diese Erfahrungen sollten in einem größeren und umfangreicheren Versuchsprogramm untersucht und abgesichert werden. Mit den folgenden Abschnitten in diesem Kapitel werden die Erfahrungen intensiv aufbereitet und ausgewertet.

### 4.2 Auswertung der Temperaturdaten von den Sensoren

In diesem Kapitel werden die Temperatursensordaten der unterschiedlichen Betriebsformen und Varianten verglichen und ausgewertet. Dazu werden die Lufttemperatur, die Oberflächentemperatur und in zwei Tiefen die Asphalttemperatur analysiert. Für die Auswertung werden ausschließlich die Temperaturdifferenzen verwendet, unterschiedliche Starttemperaturen und verschiedene Sensortypen werden so berücksichtigt.

Bei der Betrachtung der Diagramme sind kleine Sprünge zwischen der zweiten und dritten Stunden der Versuchsdauer erkennbar. Diese Störungen wurden hervorgerufen, weil der Mobile Load Simulator MLS30 im Laufe des Versuchs zum Wechseln der Batterien der Infrarotkamera teilweise angehoben werden musste.

4.2.1 Lufttemperatur

Der für die Auswertung verwendete Sensor wird in diesem Versuchsprogramm mit T Luft bezeichnet. Dieser Sensor wurde am hinteren Ende in 90 cm Höhe zur Asphaltoberfläche, innerhalb des Mobile Load Simulator MLS30 angebracht. Zusätzlich wurde die Lufttemperatur außerhalb des MLS30 durch ein externes Thermometer zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst. Das Thermometer war 1,0 m neben dem MLS30 auf einem Tisch in ca. 0,90 m Höhe positioniert.

Innerhalb des MLS30 wurden die Versuche mit Startlufttemperaturen von 21,2 °C bis 25,5 °C begonnen. Somit haben die Startlufttemperaturen an den verschiedenen Versuchstagen eine Spannweite von 4,2 K.

Im Mittel ist die Temperatur an den 12 Versuchstagen innerhalb von fünf Belastungsstunden um durchschnittlich 6,6 K angestiegen. Die minimalste Erwärmung von 5,4 K wurde bei einer Modifizierten-Betriebsform (V2.), die maximalste Erwärmung von 7,8 K wurde bei einer Standard-Betriebsform (V1.) aufgezeichnet. Dieser deutliche Unterschied lässt sich im jeweiligen Mittelwert über alle Messun-

gen, Modifizierte-Betriebsform 6,4 K und Standard-Betriebsform 6,8 K, nicht erkennen.

In Bild 4-2 sind ausgewählte Kurven von Temperaturdifferenzen über einen gesamten Tag (24 h) dargestellt. Der Versuchsabschnitt zwischen der fünften und sechsten Stunde wird im Bild durch senkrechte Striche gekennzeichnet. Dieser Bereich wird im Bild 4-3 separat ausgewertet.

Nach fünf Stunden Belastung fällt auf, dass die stärker ansteigenden Kurven zu der Standard-Betriebsform (V1.) mit einem Anstieg von 7,5-7,8 K und die etwas geringer ansteigenden Kurven zu der Modifizierten-Betriebsform (V2.) mit einem Anstieg von 6,0-6,6 K gehören. Beide Betriebsformen haben einen nahezu parallel verlaufenden Abkühlprozess über die folgenden 18 h. Die ermittelten Werte, vor allem in der Belastungsphase, spiegeln nicht die Erwartungen wieder, die an die Modifizierte-Betriebsform gestellt worden sind, weil sich keine deutliche Reduzierung der Temperaturerhöhung eingestellt hat.

Zusätzlich sind zwei Kurvenverläufe mit einzelnen Symbolen ( $\Delta$ ) in Bild 4-2 dargestellt. Diese Messwerte wurden durch ein externes Thermometer ne-

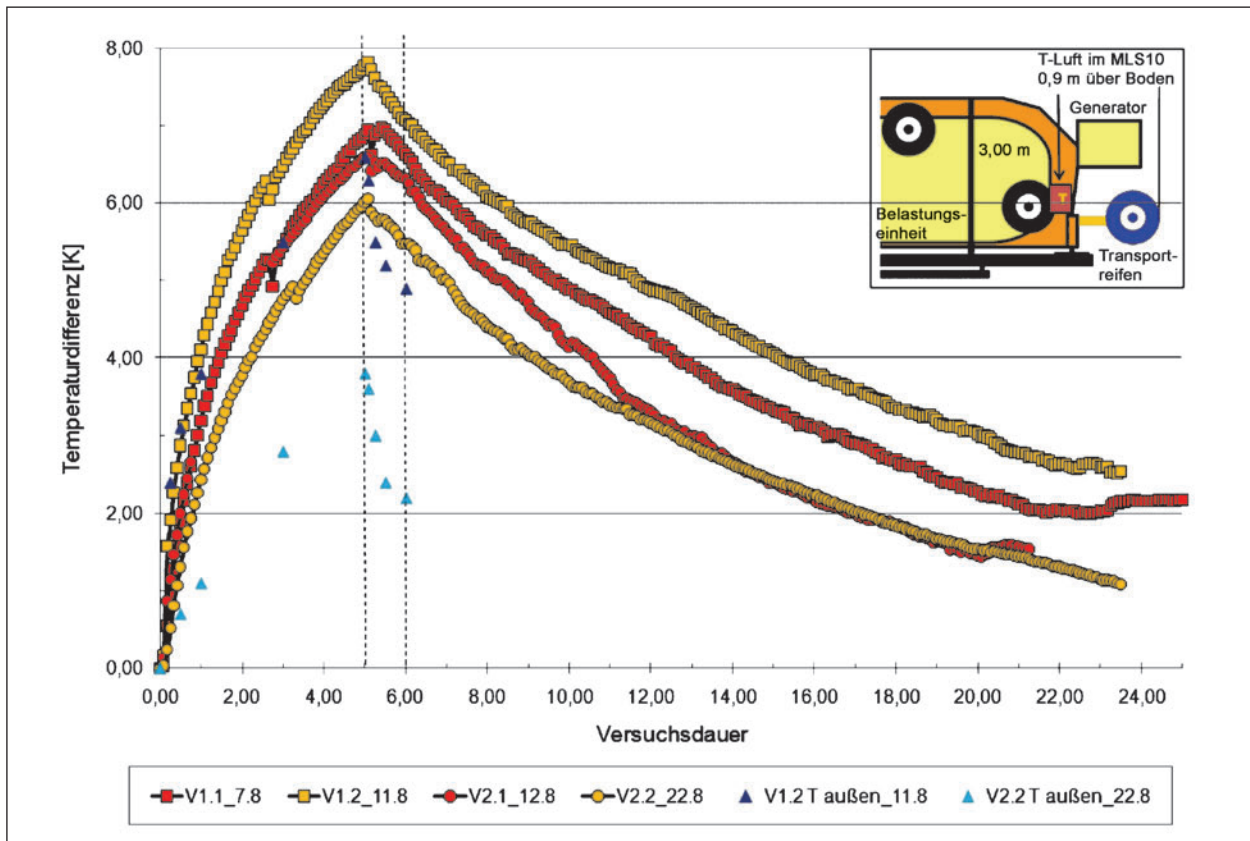


Bild 4-2: Lufttemperatur im MLS30 Belastungs- und Abkühlphase

ben dem MLS30 dokumentiert und werden in der Legende mit ‚T außen‘ bezeichnet. Bei diesen Werten fällt auf, dass während der Belastungsphase unterschiedliche Temperaturanstiege dokumentiert werden konnten. An einem Versuchstag hat sich die Temperatur innerhalb von fünf Stunden um 3,8 K (V2\_) und am anderen Versuchstag um 6,6 K (V1\_) erhöht. Die Starttemperatur war an beiden Versuchstagen identisch und trotzdem wurde an dem einen Versuchstag (Standard-Betriebsform) ein deutlicher Temperaturanstieg dokumentiert. Aus den gesammelten Daten (siehe Tabelle 4-1) lässt sich diesbezüglich keine eindeutige Systematik entwickeln. Daher wird vermutet, dass der Anstieg außerhalb vom MLS30 stärker von der Hallentemperatur als vom MLS30 herrührt.

Die anschließende Abkühlphase nach der fünfständigen Belastung wird im Folgenden deutlicher untersucht. Dazu wird die erste Stunde nach dem Ausschalten des MLS30 ausgewählt, diese wurde in Bild 4-2 schon mit senkrechten Strichen markiert. Mit den Kurvenverläufen in Bild 4-3 lassen sich die beiden Varianten, V\_1 weiter auf Stützen stehend und V\_2 direkt anheben, eindeutig zuordnen und erklären. Bei der Variante V1.1 (rot-Quadrat) (Standard-Betriebsform MLS30 blieb weiter auf Stützen stehen) zeigt sich nach dem Ausschalten zuerst eine deutliche Temperaturreduzierung bevor die Temperatur wieder ansteigt. Dieser erneute Anstieg der Temperatur lässt sich auf die Abwärme des MLS30 zurückführen. In den ersten fünf Minuten nach dem Ausschalten werden verstärkt Ventilatoren eingesetzt, um eine Abkühlung und einen Luftaustausch hervorzurufen. Die aufgeheizten Linearmotoren und Maschinenteile kühlen in dieser kurzen Zeit nicht soweit ab und heizen den abgeschotteten Innenraum wieder auf. Nach ca. 20 Minuten ist der Scheitelpunkt der Erwärmung erreicht und die Temperatur unterhalb des MLS30 verringert sich wieder. Bei der Variante V2.1 (rot-Kreis) (Modi-

fierte-Betriebsform MLS30 blieb weiter auf Stützen stehen) zeigt sich, dass der erneute Anstieg deutlich geringer ausfällt aber sich die beiden Abkühlkurven im weiteren Verlauf der Abkühlung annähern. Dies wird damit begründet, dass durch die hochgeklappten seitlichen Schürzen die Luft nach dem Betrieb und dem Ventilatoreinsatz nicht so gestaut wird und sich wieder erwärmen kann. Insgesamt wurde so eine Reduzierung innerhalb der ersten Stunde nach der Belastung von deutlich weniger als 0,5 K erreicht.

Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Kurven sind die Kurven der Variante V\_2 (orange) folgendermaßen zu erklären: Direkt nach dem Ausschalten des MLS30, nach fünfständiger Belastungszeit, wurde dieser auf seine Transporträder aufgebockt und in Fahrposition (Luftspalt unterhalb der seitlichen Schürze ca. 25 cm) belassen. Auf diese Weise konnte sich die Luft und die Abwärme deutlich schneller mit der umgebenden Luft vermischen und ein Wiederanstieg der Lufttemperatur verhindert werden. Der gesamte Abkühlprozess konnte somit früher beginnen und nach einer Stunde schon deutlich mehr als 0,5 K erreichen.

Die zwei Temperaturverläufe außerhalb des MLS30 (V\_2 T außen) mit den einzelnen Symbolen ( $\Delta$ ) sind wie schon in Bild 4-2 dargestellt. Bei diesen Werten fällt auf, dass während der Abkühlphase eine deutliche Reduzierung von mehr als 1,5 K innerhalb der ersten Stunde nach dem Ausschalten dokumentiert worden ist. Diese Reduzierung zeigt eindrucksvoll den Einfluss einer in Betrieb stehenden und einer ausgeschalteten Belastungseinrichtung MLS30. Damit wird die oben beschriebene Theorie, dass die Hallentemperatur maßgebend ist, allerdings auch wieder aufgehoben. Direkt nach dem Ausschalten des MLS30 wurde eine Abnahme der Lufttemperatur verzeichnet. Diese Abnahme hat sich nach einer halben Stunde verlangsamt.

	Start-Temp. [°C]	Temp. Diff. [K] nach 5 h	Temp. Diff. [K] nach 5 h	Start-Temp. [°C]	
V1.1 (10-15 Uhr)	-	-	-	-	V1.2 (8-13 Uhr)
	22,9	3,9	-	22,4	
	22,9	4,3	6,6	19,7	
V2.1 (10-15 Uhr)	21,8	4,5	5,2	20,0	V2.2 (8-13 Uhr)
	19,6	4,6	5,9	19,3	
	20,0	3,5	3,8	19,8	

Tab. 4-1: Temperaturentwicklung außerhalb des MLS30

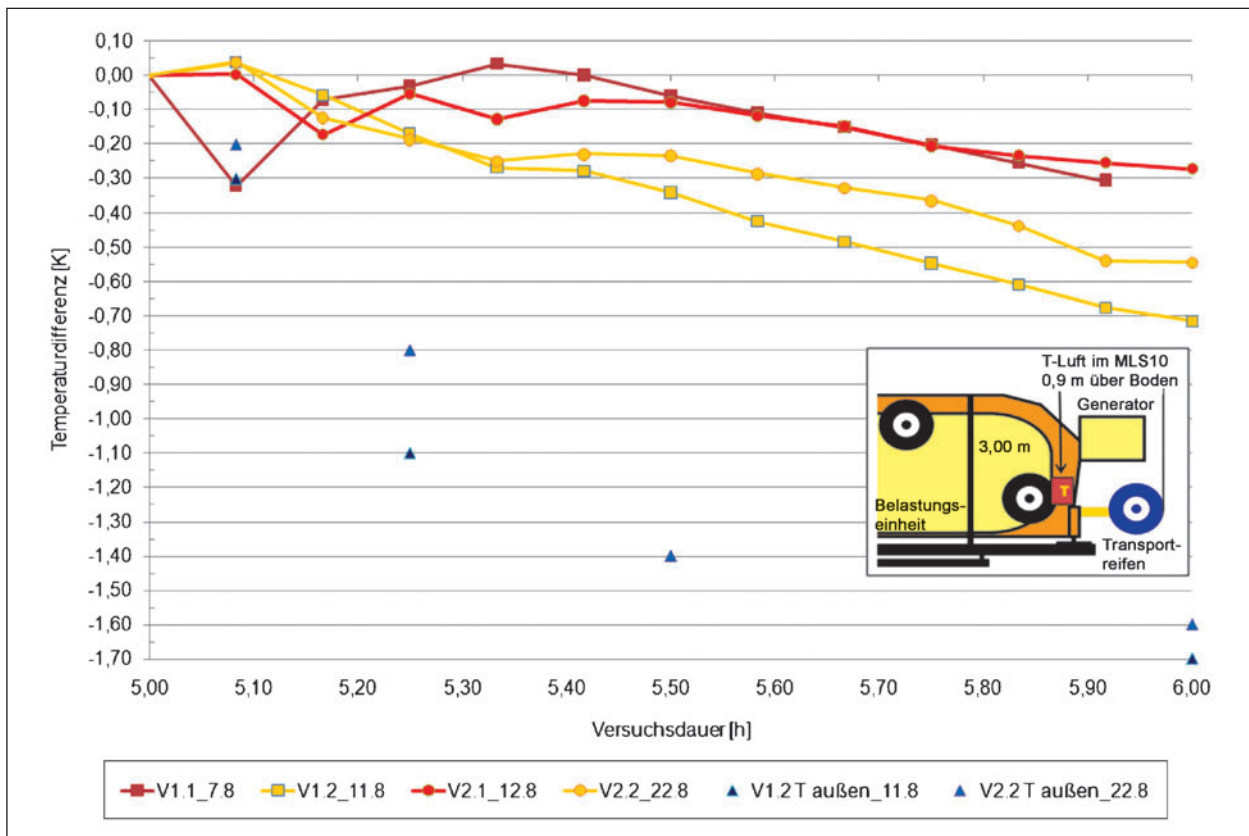


Bild 4-3: Lufttemperatur Abkühlphase nach 5-stündiger Belastungsphase

Aus der Betrachtung der einzelnen Kurven in Bild 4-2 und Bild 4-3 wird deutlich, welchen Einfluss der Betrieb des Mobile Load Simulators MLS30 auf die Lufttemperaturentwicklung innerhalb und unmittelbar an dem MLS30 hat. Für eine Bewertung der Versuchsfläche sollten diese Einflüsse nicht unberücksichtigt bleiben und unter Witterungsbedingungen dokumentiert werden. Bei der Planung von Versuchsprogrammen sollte daher geklärt werden, ob die Abwärme des MLS30 relevant ist oder nicht. Sobald die Entscheidung getroffen wird, dass die Erwärmung nur während der Belastung auftreten und danach schnellstmöglich abgebaut werden soll, sollte ein unmittelbares Anheben des MLS30 in die Planung aufgenommen werden. Wie sich der Einfluss auf die weiteren Sensoren auswirkt, wird in den nächsten Kapiteln beschrieben und im Kapitel 4.2.4 zusammengefasst.

#### 4.2.2 Asphaltoberflächentemperatur

In Bild 3-5 werden die Positionen der Temperatursensoren an der Oberfläche erläutert und gezeigt. Durch diese Untersuchung wird der Unterschied der direkten Überrollung und der unmittelbaren Umgebung untersucht. Auch bei dieser Betrachtung

werden beide Betriebsformen, Standard (V1.\_\_) oder Modifiziert (V2.\_\_), mit den jeweiligen Varianten, nach Belastung weiter auf Stützen stehend (V\_1) oder direktes Anheben nach der Belastung (V\_2), untersucht.

An den 12 Versuchstagen wurden Starttemperaturen von 19,5 °C bis 24,6 °C, mit einem Gesamtmittelwert von 22,4 °C, aufgezeichnet. Diese Temperaturen wurden bei beiden Sensoren, in und neben der Rollspur, gleichermaßen gemessen und somit gegenseitig kontrolliert. Als weiteres Ergebnis wurde die Spannweite der Temperaturen zum Beginn der jeweiligen Versuche mit 4,9 K ermittelt.

Die Maximaltemperaturen nach fünfstündiger Belastung haben sich je nach Position des Sensors unterschiedlich entwickelt. Dies bedeutet, dass der Sensor neben der Rollspur über alle Versuchstage und alle Betriebsformen sowie Varianten im Mittel eine Temperaturerhöhung von 8,2 K, mit einer Spannweite von 2,8 K, aufgezeichnet hat. Hingegen der Sensor in der Rollspur über alle Versuchstage und alle Betriebsformen sowie Varianten im Mittel eine Temperaturerhöhung von 10,1 K, mit einer Spannweite von 3,4 K aufwies. Die Betrachtung der einzelnen Sensoren zeigt, dass die Maxi-

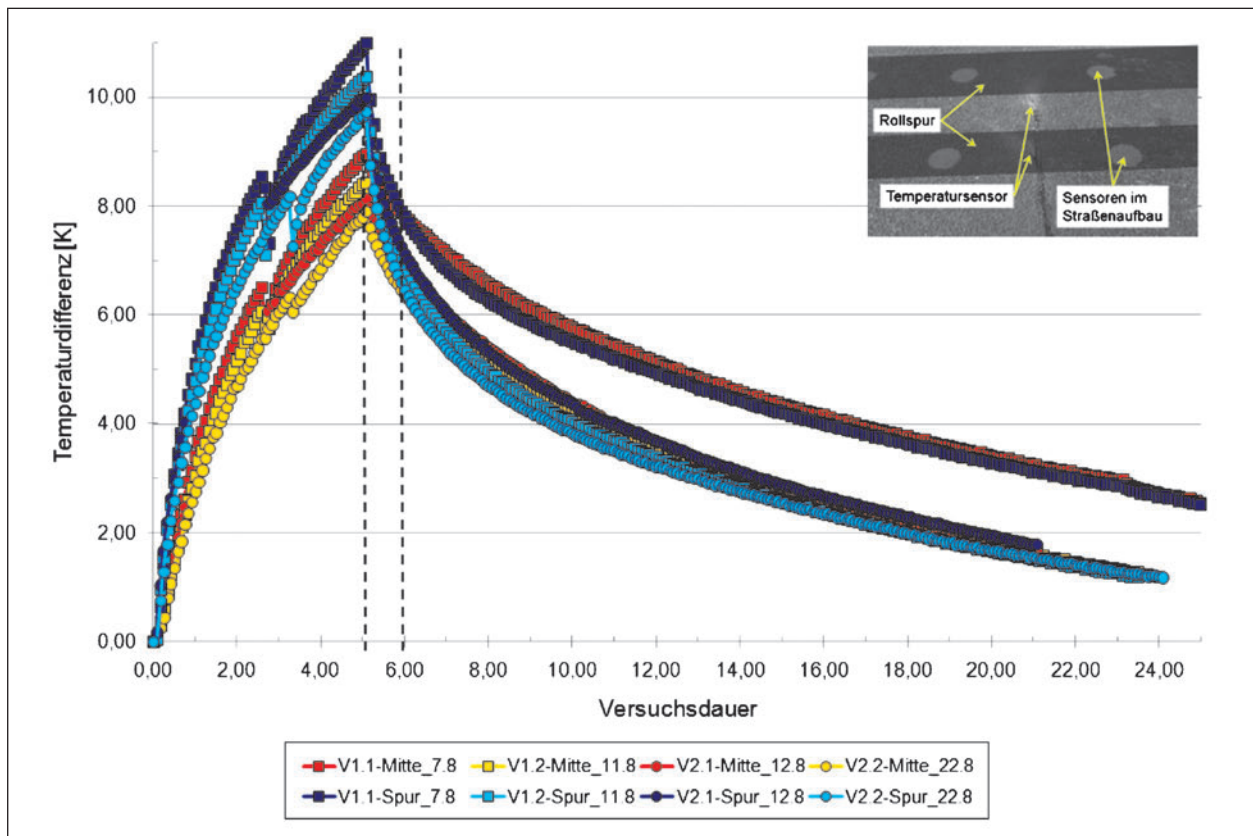


Bild 4-4: Oberflächentemperatur in und neben der Rollspur

maltemperaturerhöhung zwischen beiden Sensoren im Mittel um ca. 1,9 K abweichen. Die Asphalt-oberflächentemperatur in der Rollspur erwärmt sich demnach erwartungsgemäß mehr als die unmittelbar angrenzende Oberfläche. Bei der Betrachtung der einzelnen Spannweiten fällt auf, dass die Spannweite bei dem Sensor neben der Rollspur (2,8 K) geringer ist als in der Rollspur (3,4 K). Der Einfluss der direkten Überrollung ist größer, als der in unmittelbarer Nähe zur Überrollung

Für die Betrachtung der einzelnen Betriebsformen werden die im Kapitel 4.2.1 verwendeten Versuchstage verwendet. In Bild 4-4 sind die jeweiligen Sensorsignale für die identischen Versuchstage aufgetragen. Es fällt auf, dass, wie oben schon beschrieben, während der Belastungsphase die Temperaturdifferenz in der Rollspur ( $V_{..}$ -Spur) stärker ansteigt als neben der Rollspur ( $V_{..}$ -Mitte). Der Unterschied von ca. 2 K wird dort ebenfalls ersichtlich. Auffällig ist weiterhin, dass sich während der Abkühlphase die Temperaturen der verschiedenen Positionen in sehr kurzer Zeit, ca. 1 h, annähern und gleichmäßig abkühlen.

Grundsätzlich ist es so, dass bei der Modifizierten-Betriebsform ( $V2_{..}$ ) tendenziell geringere Tem-

peraturerhöhungen aufgezeichnet wurden als bei der Standard-Betriebsform ( $V1_{..}$ ). Der Unterschied von ca. 2 K ist allerdings geringer als erwartet.

Die anschließende Abkühlphase nach der fünf-stündigen Belastung wird im Folgenden deutlicher untersucht. Dazu wird die erste Stunde nach dem Ausschalten des MLS30 ausgewählt, diese wurde in Bild 4-4 schon mit senkrechten Strichen markiert. Mit den ausgewählten Kurvenverläufen in Bild 4-5 lassen sich die beiden Sensorpositionen eindeutig erkennen. Des Weiteren werden die verschiedenen Betriebsformen und Varianten genauer betrachtet.

Aus dem zuvor beschriebenen Bild (Bild 4-4) wurde deutlich, dass die Maximaltemperaturen bei den verschiedenen Sensorpositionen unterschiedlich waren, sich aber die Temperaturen in kurzer Zeit angenähert haben. Diese Annäherung wird in dem Bild 4-5 deutlich. Die Temperatur neben der Rollspur ( $V_{..}$  Mitte) nimmt innerhalb der ersten Stunde deutlich langsamer ab (ca. 1,1-1,5 K) als die Temperatur in der Rollspur ( $V_{..}$  Spur) (ca. 2,8-3,5 K) im gleichen Zeitraum, dadurch wird die höhere Maximaltemperatur am Ende der Belastungsphase wieder ausgeglichen. Des Weiteren lässt sich bei der Temperaturentwicklung neben der Rollspur ein



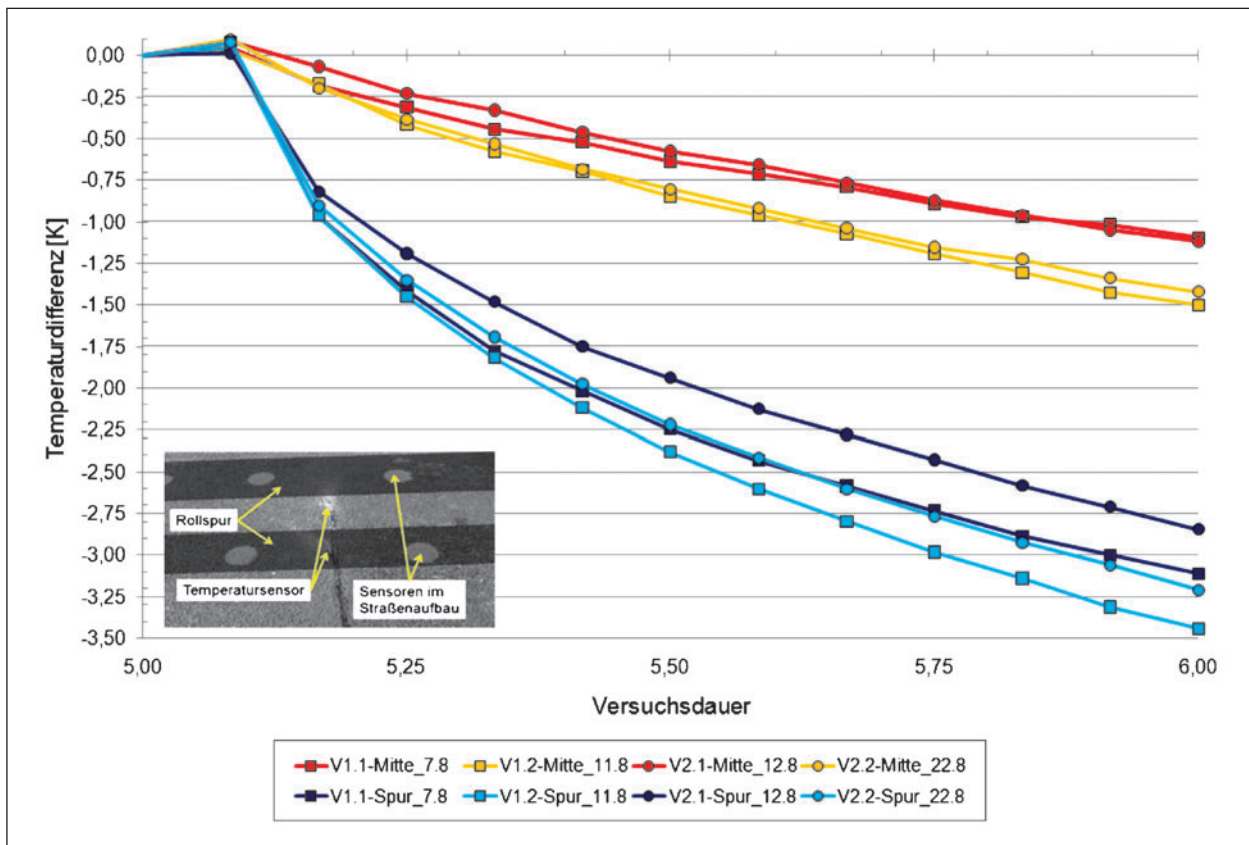


Bild 4-5: Oberflächentemperatur Abkühlphase nach 5-stündiger Belastungsphase

eindeutiger Unterschied zwischen der Variante „direktes anheben nach der Belastung“ (V\_2) und der Variante „weiter auf den Stützen stehend“ (V\_1) erkennen. Unabhängig der Betriebsform reduziert sich die Temperatur beim direkten anheben nach der Belastung schneller als bei der anderen Variante. Dieser Zusammenhang ist bei der Temperaturentwicklung innerhalb der Rollspur nicht ersichtlich.

#### 4.2.3 Asphalttemperatur in verschiedenen Tiefen

Die Positionen der Temperatursensoren innerhalb der Konstruktion wurden im Kapitel 3.1.3 beschrieben. Aufgrund der im Mittel gleichen Tendenzen wurden für die Auswertungen die Sensoren T-026 (zw. MA) und T-187 (unter MA) für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Bei dieser Betrachtung werden ebenfalls beide Betriebsformen, Standard (V1\_) oder Modifiziert (V2\_), mit den jeweiligen Varianten „nach Belastung weiter auf Stützen stehend“ (V\_1) oder „direktes Anheben nach der Belastung“ (V\_2) untersucht.

An den 12 Versuchstagen wurden zwischen den Gussasphaltilagen (zw. MA) Starttemperaturen von

21,4 °C bis 25,8 °C, mit einem Gesamtmittelwert von 23,8 °C, aufgezeichnet. Unterhalb des Gussasphaltes (unter MA) wurden Starttemperaturen von 21,0 °C bis 23,9 °C, mit einem Gesamtmittelwert von 22,6 °C, gemessen.

Für die Betrachtung der einzelnen Betriebsformen und genaueren Betrachtung der Kurvenverläufe werden die im Kapitel 4.2.1 und Kapitel 4.2.2 verwendeten Versuchstage verwendet. In Bild 4-6 sind die jeweiligen Sensorsignale aufgetragen.

Im Mittel hat sich die Temperatur am oberen Sensor (zw. MA) innerhalb der Belastungsphase um 5,7 K zur Ausgangstemperatur erhöht. Die maximale Temperaturerhöhung am unteren Sensor (unter MA) kann im Mittel mit 1,3 K angegeben werden. Diese Temperaturerhöhung wurde allerdings erst nach ca. 11-14 h erzielt. Das bedeutet, dass die durch die Belastung eingeleitete Veränderung der Temperatur im Mittel mit einer Verzögerung von 6-7 h (max. 9 h) an der Unterseite des Asphaltes, in 12 cm Tiefe, den Maximalwert erreicht. Das Maximum zwischen den Asphaltlagen, in 6,5 cm Tiefe, wurde schon ca. 20 Minuten nach der Beendigung des Belastungsbetriebes erreicht. Das bedeutet, dass sich die Temperatur im Asphaltkörper, wie

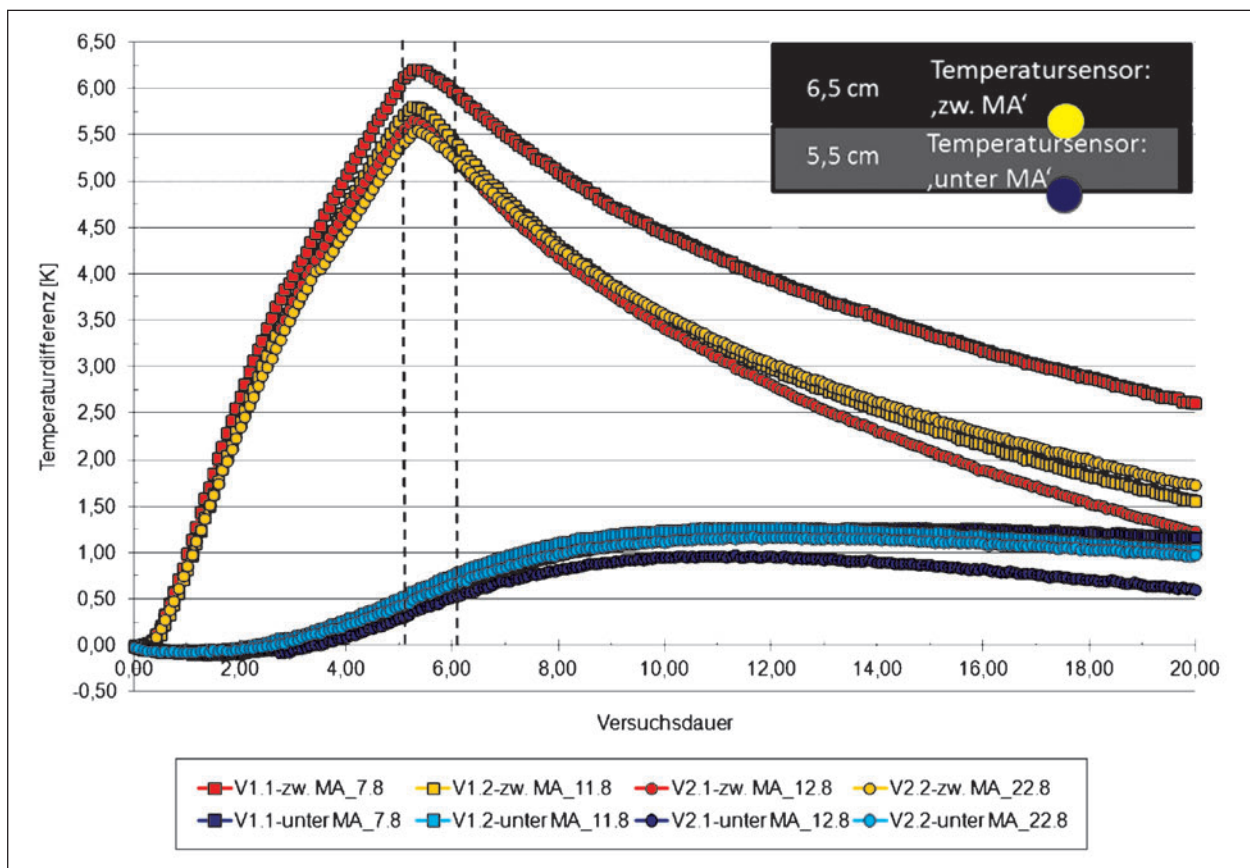


Bild 4-6: Asphalttemperatur in zwei verschiedenen Tiefen

erwartet, sehr unterschiedlich ausbreitet und mit zunehmender Stärke des Asphaltpaketes auch langsamer vollzieht. Somit hat die Belastung hauptsächlich Temperatureinflüsse auf die oberen Asphalt-schichten und -lagen. Je dicker der Aufbau wird, desto weniger Einfluss hat die Belastung auf die Temperaturentwicklung an der unteren Grenze des Asphaltaufbaus.

Es fällt auf, dass die Kurvenverläufe im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Positionen deutlich enger liegen. Dies lässt darauf schließen, dass durch die Einbettung im Asphalt die Anfälligkeit gegenüber kurzzeitigen Veränderungen geringer ausfällt und das System träge ist. Erst im Laufe der Abkühlphase spreizen sich die Kurvenverläufe. Es wird deutlich, dass an den Sensoren die identischen Verläufe festgestellt werden können. Das bedeutet, wenn die Temperatur am höheren Sensor (zw. MA) stärker abfällt, kann dies auch bei dem tiefer liegenden Sensor (unter MA) erkannt werden. Wenn sich die Abkühlphase langsamer vollzieht, wird dies ebenfalls deutlich. Ein Unterschied der einzelnen Betriebsformen, Standard (V1.) oder Modifiziert (V2.), wurde bei den Sensoren im Asphaltaufbau nicht festgestellt.

In Bild 4-6 fällt auf, dass sich die Abkühlphase der Asphalttemperatur in zwei Bereiche teilt. Einmal wird der Bereich analysiert, der auch bei den anderen Sensorpositionen ausgewertet wurde (siehe Markierungen bei fünf und sechs Stunden). Dabei handelt es sich um die erste Stunde nach dem Ausschalten des Mobile Load Simulators MLS30, siehe Bild 4-7. Der zweite Bereich müsste nach etwa 11 h Versuchsdauer beginnen und länger als eine Stunde werden, weil sich dort eine deutlich geringere Entwicklung einstellt. Da dies schon in Bild 4-6 deutlich wurde, wird die Abkühlphase des unteren Sensors an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

Interessant ist die Abkühlphase in den oberen Asphalt-schichten und -lagen, weil sich hiernach auch Zeitpunkte von Untersuchungen anpassen lassen. So sollten die zerstörungsfreien Tragfähigkeitsmessungen z. B. mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) ca. 15-20 Minuten nach dem Ausschalten stattfinden, um die Einflüsse der höchsten Temperaturen im oberen Asphaltaufbau zu berücksichtigen. Alle temperaturbeeinflussten zerstörungsfreien Messungen sollten innerhalb eines Zeitfensters von 30 Minuten abgeschlossen sein, weil dann die gleichen oder höheren Temperaturbedingungen

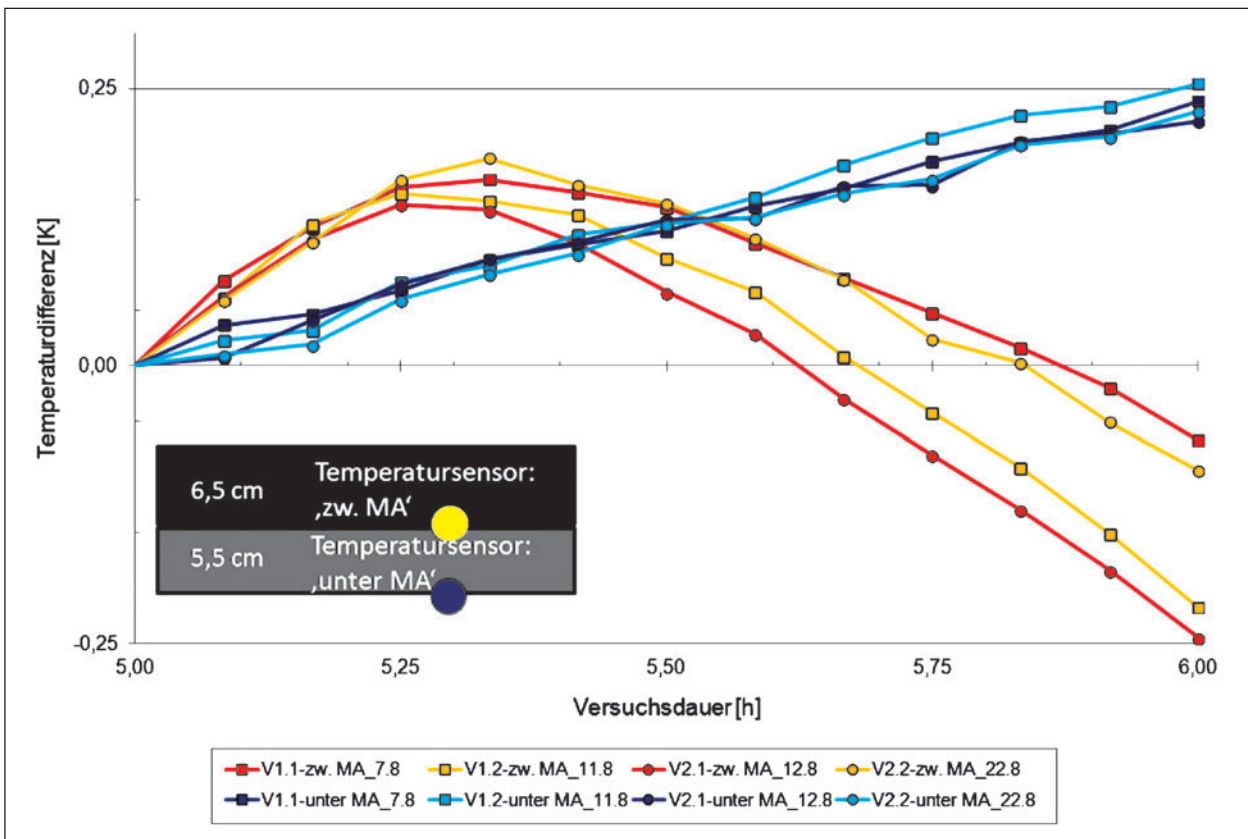


Bild 4-7: Asphalttemperatur Abkühlphase nach 5-stündiger Belastungsphase

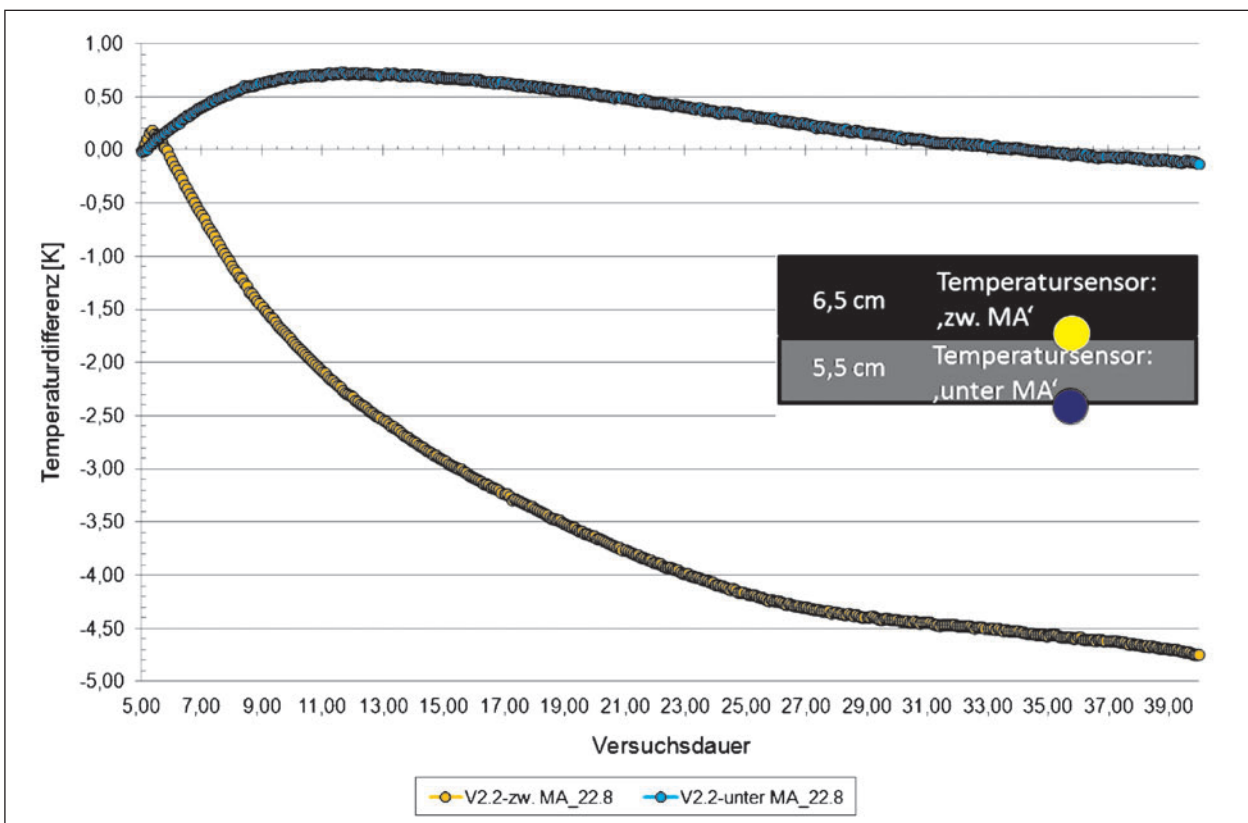


Bild 4-8: Temperaturentwicklung über 35 h nach Versuchsende

herrschen wie beim Ausschalten. Somit wird die größte Spannweite zwischen Anfangstemperatur beim Einschalten des MLS30 und Endtemperatur bei den Messungen berücksichtigt.

Innerhalb der letzten 40 Minuten dieser ersten Stunde nach dem Ausschalten fällt die Temperatur in der oberen Asphaltlage um 0,3-0,4 K deutlich ab.

Während der vorgeschlagenen Messzeitpunkte steigt die Asphalttemperatur an der Unterseite des Asphaltpaketes weiter an, aufgrund der Größenordnung von insgesamt rd. 1,3 K über die gesamten ca. 11 h ist dies gegenüber der Temperaturentwicklung zwischen den Asphaltlagen vernachlässigbar.

Bei Betrachtung der Temperaturentwicklung über 35 h nach der Belastung (siehe Bild 4-8) fällt auf, dass nach knapp 1,5 Tagen noch nicht die Ausgangstemperatur in der oberen Asphaltlage erreicht wurde. Während der Belastung hatte sich der Asphalt am Sensor ‚zw. MA‘ um 5,6 K erwärmt. In den anschließenden 35 h hat sich die Temperatur um ca. 4,8 K reduziert. Die Temperatur an der Unterseite hat sich innerhalb der betrachteten Zeit auf die Temperatur beim Ausschalten des MLS30 reduziert.

#### 4.2.4 Zusammenfassende Erkenntnisse aller Sensoren

Bei der Betrachtung der einzelnen Positionen der Sensoren sind interessante Zusammenhänge und Unterschiede aufgetreten. Dabei wurde vor allem die Temperaturerhöhung während der Belastungsphase von jeweils fünf Stunden untersucht und ausgewertet. Des Weiteren wurde die Abkühlphase, jeweils eine Stunde direkt nach der Belastungsphase, beobachtet. An den unterschiedlichen Sensorpositionen im Versuchsaufbau (im MLS30, an der Asphaltoberfläche und innerhalb der Asphaltkonstruktion) lassen sich unterschiedliche Reaktionen erkennen.

In den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3 wurden die Gesamtmittelwerte textlich beschrieben und im Anschluss an ausgewählten Daten im Detail untersucht und ausgewertet. Bei der folgenden Betrachtung werden ausschließlich die Mittelwerte über alle Daten betrachtet. Dem Gesamtmittelwert werden die Mittelwerte der Standard-Betriebsform (V1.\_) und der Modifizierten-Betriebsform (V2.\_) gegenübergestellt. Die verschiedenen Varianten (nach der Belastung weiter auf den Stützen stehend (V\_.1) und direktes Anheben (V\_.2)) werden hier nicht weiter beleuchtet. Die genauen Kurvenverläufe, während der ersten Stunde nach der Belastung, wurden in den vorherigen Kapiteln analysiert.

Während der Belastungsphase von fünf Stunden (Tabelle 4-2) wurden Temperaturerhöhungen detektiert, die sich in Bild 4-9 zeigen. Dazu wurde die Temperaturdifferenz zwischen der Starttemperatur und der Maximaltemperatur verwendet. Auffällig ist, dass die größte Temperaturerhöhung innerhalb der Rollspur an der Asphaltoberfläche (Gesamtmittelwert = 10,1 K; Mittelwert V1.\_ = 10,6 K; Mittelwert V2.\_ = 9,5 K) detektiert werden konnte. Die zweithöchste Temperaturerhöhung wurde neben der Rollspur an der Asphaltoberfläche (Gesamtmittelwert = 8,2 K; Mittelwert V1.\_ = 8,6 K; Mittelwert V2.\_ = 7,8 K) gemessen. Erst an dritter Stelle folgt die Lufttemperaturerhöhung (Gesamtmittelwert = 6,5 K; Mittelwert V1.\_ = 6,7 K; Mittelwert V2.\_ = 6,2 K). Die viert höchste Temperaturerhöhung wurde 6,5 cm unterhalb der Oberfläche zwischen den beiden Gussasphaltlagen detektiert (Gesamtmittelwert = 5,7 K; Mittelwert V1.\_ = 5,9 K; Mittelwert V2.\_ = 5,4 K). Die Erwärmung der tieferen Schichten braucht wie erwartet länger und geschieht zeitverzögert (Gesamtmittelwert = 1,3 K; Mittelwert V1.\_ = 1,4 K; Mittelwert V2.\_ = 1,2 K).

In allen Bereichen ist die Standard-Betriebsform (V1.\_) wärmer als die Modifizierte-Betriebsform. Mit der Modifizierten-Betriebsform (V2.\_) konnte der größte Einfluss auf die Erwärmung der Oberfläche

	Gesamtmittelwert	Mittelwert V1._	Mittelwert V2._	V1._ zu V2._
	[K]	[K]	[K]	[K]
Temp. Oberfläche Rollspur	10,1	10,6	9,5	1,1
Temp. Oberfläche neben Rollspur	8,2	8,6	7,8	0,8
Temp. Luft innerhalb MLS30	6,5	6,7	6,2	0,5
Temp. zwischen Gussasphaltlagen	5,7	5,9	5,4	0,5
Temp. unter Gussasphaltlagen	1,3	1,4	1,2	0,2

Tab. 4-2: Zusammenstellung Temperaturmittelwerte der Erhöhung 5h-Belastung

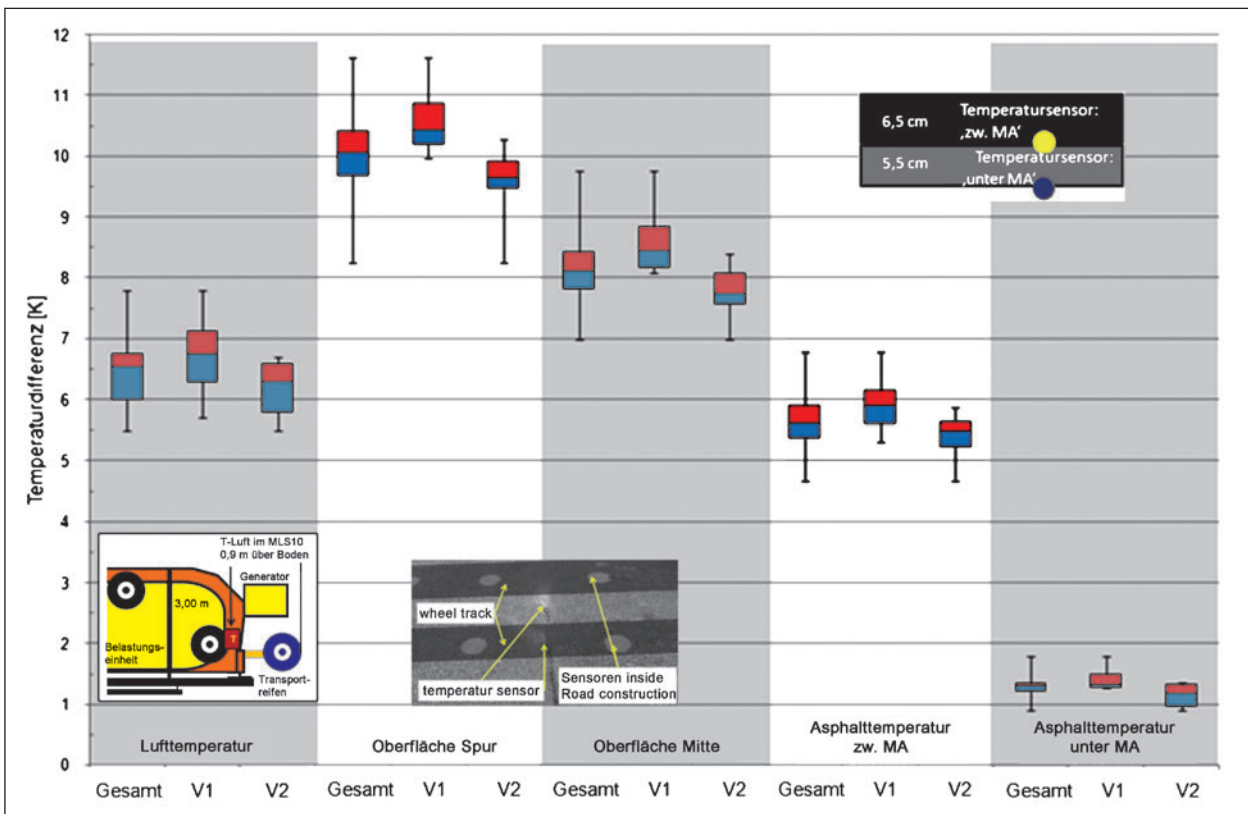


Bild 4-9: Zusammenfassung mittlere Temperaturerhöhungen

	Gesamtmittelwert	Mittelwert V1._	Mittelwert V2._	V1._ zu V2._
	[K]	[K]	[K]	[K]
Temp. Oberfläche Rollspur	6,9	7,3	6,4	<b>0,9</b>
Temp. Oberfläche neben Rollspur	6,7	7,1	6,4	<b>0,7</b>
Temp. Luft innerhalb MLS30	6,0	6,2	5,8	<b>0,4</b>
Temp. zwischen Gussasphaltilagen	5,3	5,7	5,0	<b>0,7</b>
Temp. unter Gussasphaltilagen	-	-	-	-

Tab. 4-3: Zusammenstellung Temperaturmittelwerte der Reduzierung erste Stunde

erreicht werden. Durch den deutlichen Unterschied von im Mittel 3,6 K zwischen der Erhöhung der Lufttemperatur und der Oberflächentemperatur in der Rollspur wird der maßgebende Einfluss der direkten Überrollung sichtbar.

Während der Abkühlphase von einer Stunde nach der Belastung zeigt sich in Bild 4-10 ein ähnliches Bild wie vorher. Auch hier hat die Oberfläche in der Rollspur (Gesamtmittelwert = 3,2 K; Mittelwert V1.\_ = 3,3 K; Mittelwert V2.\_ = 3,1 K) die maßgebenden Veränderungen gegenüber den weiteren Positionen erfahren. Die zum Teil deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Betriebsformen aus der Erwärmungsphase (siehe Tabelle 4-2) sind leicht abgeschwächt auch in der Abkühlphase erkennbar, (siehe Tabelle 4-3). Während der ersten Stunde

nach der Belastung hat unterhalb des Gussasphaltes noch keine Reduzierung der Temperatur stattgefunden, daher wird dies auch nicht in Bild 4-10 und Tabelle 4-3 betrachtet.

Zusammenfassend zeigt sich aus den jeweiligen Sensordaten kein eindeutiger Vorteil zwischen der Standard- und der Modifizierten-Betriebsform. Dies lässt sich aus den entsprechenden Differenzwerten ablesen.

Vor allem an dem Sensor für die Temperaturerfassung der Asphaltoberfläche in der Rollspur wird deutlich, dass die direkte Überrollung der Belastungsräder des Mobile Load Simulators MLS30 den wesentlichen Einfluss auf die Erwärmung der Asphaltbefestigung hat.

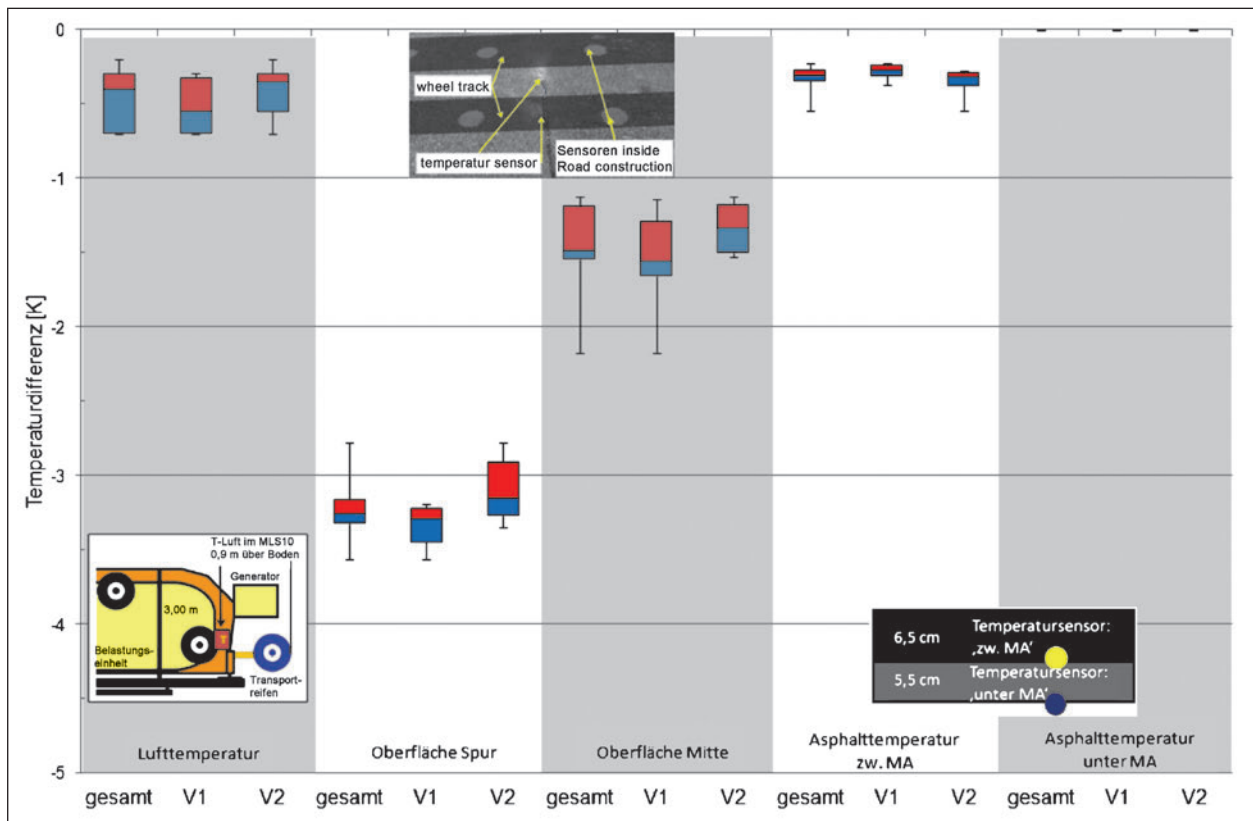


Bild 4-10: Zusammenfassung Temperaturreduzierung

### 4.3 Auswertung der verschiedenen Kamerapositionen

Die verschiedenen Betriebsformen und Varianten werden in diesem Kapitel nach den unterschiedlichen Positionen der Infrarotkamera ausgewertet. Maßstab ist dabei immer die im Bild angegebene Temperaturskala. Aus versuchstechnischen Gründen wurden zum Teil Anpassungen an den Einstellungen vorgenommen. Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass die Bestimmung der Temperaturen nach Augenmaß erfolgte und sich aufgrund der großen Spannweite zwischen der maximalen und minimalen Temperatur zum Teil Ungenauigkeiten ergeben. Die große Spannweite kam vor allem dadurch zu Stande, dass die komplette Erwärmung aufgezeichnet werden sollte.

Ursprünglich sollten vier Kamerapositionen untersucht werden. Nach Tests wurde die Anzahl auf drei Positionen reduziert, weil der Blick innerhalb des MLS30 auf die Asphaltoberfläche nicht realisierbar war bzw. keine aussagekräftigen Erkenntnisse zuließ. Daher werden im Weiteren folgende Positionen ausgewertet: Infrarotkamera auf die Linearomotoren (auf LIM), Infrarotkamera auf Räder von

vorne (auf Räder vorne) und Infrarotkamera auf Räder von hinten (auf Räder hinten)

Für die Auswertung der Infrarotbilder (IR-Bilder) wurden acht bestimmte Zeitpunkte festgelegt, die als relevant angesehen wurden. Das bedeutet, dass für die Betrachtung der Belastungsphase Bilder nach 5 min., 30 min., 1 h, 2 h und 5 h Versuchsdauer zusammengestellt wurden. Für die Analyse der Abkühlphase wurden die Bilder 5 h, 5 h 05 min., 5 h 30 min. und 6 h Versuchsdauer betrachtet. Im Anhang 2.A befinden sich zu allen Kamerapositionen die verwendeten Bilder. Ein Beispiel für die Aufbereitung der Bilder ist in Bild 4-11 zu sehen. Zur Auswertung der IR-Bilder wurden die ermittelten Temperaturen tabellarisch ausgewertet und grafisch aufbereitet. Die tabellarische Auswertung findet sich im Anhang 3.A wieder.

V2.2 IR auf Räder von vorne

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-8 25 - 35 °C  
 Bilder: - -

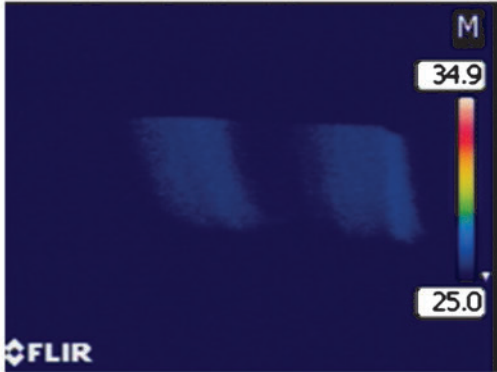


Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 10min

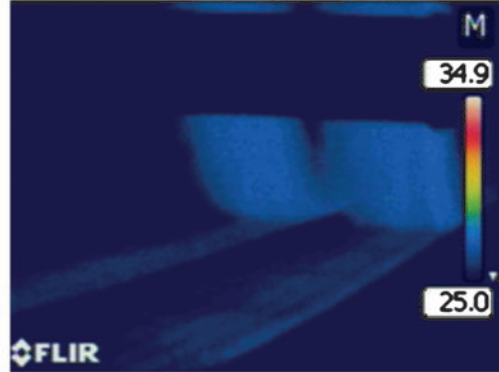


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

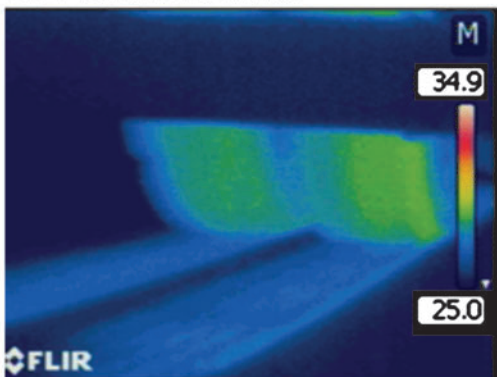


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

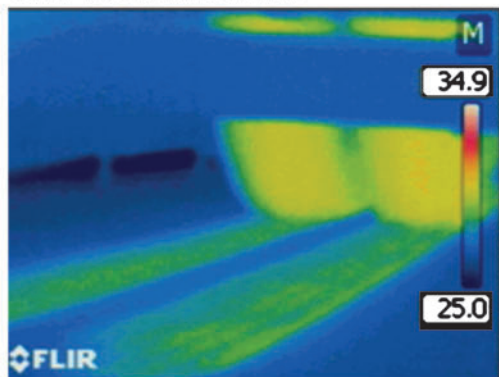


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

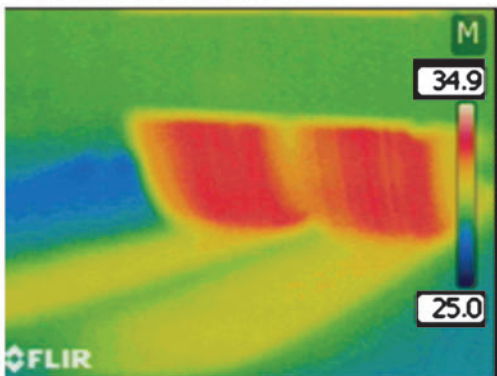


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

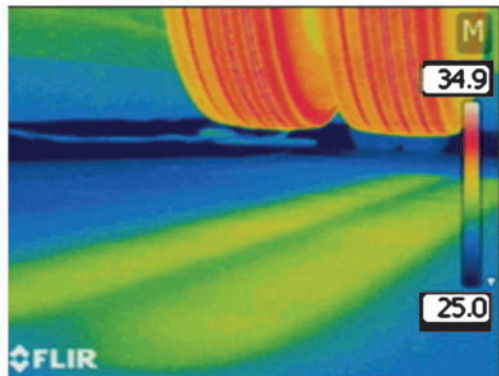


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

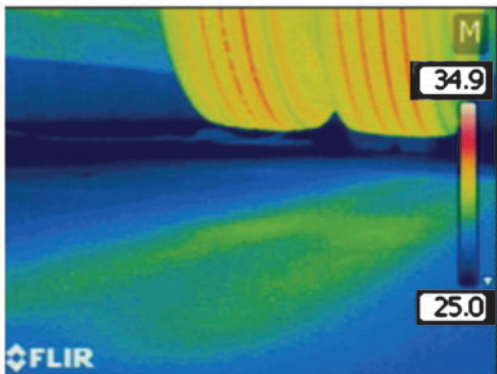


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

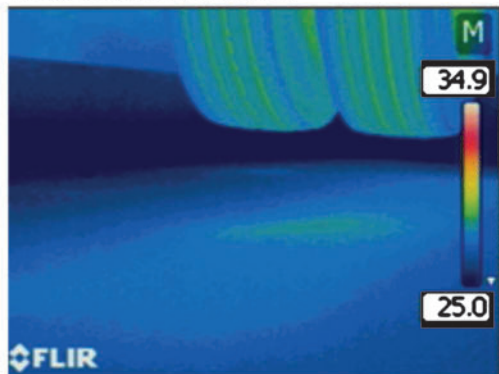


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

Bild 4-11: Infrarotbilder Zusammenstellung über 6 h Versuchsdauer

### 4.3.1 Infrarotkamera auf die Linearmotoren gerichtet

Bei der Position: ‚Infrarotkamera auf Linearmotoren‘, wurden die Linearmotoren im unteren Teil des MLS30 beobachtet. Wie in der gesamten Maschine gibt es dort ein Paket aus einem oberen und einem unteren Linearmotor (LIM oben und LIM unten; Bild 4-12).

Für die Varianten V1.1 und V2.1 wurde ein Temperaturbereich von 25-60 °C gewählt. Dieser wurde über die Belastungsdauer von 5 h nicht ausgeschöpft. Für die verschiedenen Zeiten wurden

ungefähre Temperaturen über die Farbskala ermitteln. Bei der Variante V1.2 wurde ein kleinerer Temperaturbereich, 25-55 °C, gewählt. Dieser wurde zum Ende der Belastungsphase ausgeschöpft und übertroffen. Daher lassen sich in dem Bereich keine klaren Ergebnisse ablesen. Bei der Variante V2.2 wurde ein Temperaturbereich von 25-58 °C gewählt, dieser konnte komplett ausgewertet werden.

In Bild 4-13 ist zu erkennen, dass der obere Linearmotor während der Belastungsphase im Mittel 3,0 K wärmer wird als der untere. Des Weiteren zeigt sich tendenziell, dass die Modifizierten-Betriebs-

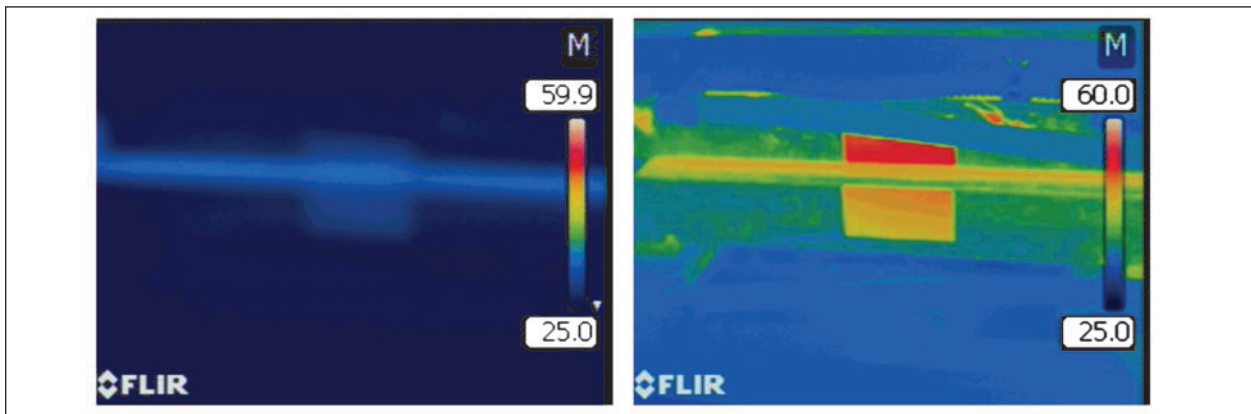


Bild 4-12: Betrachtung LIM nach 5 Minuten (links) und nach 5 h (rechts)

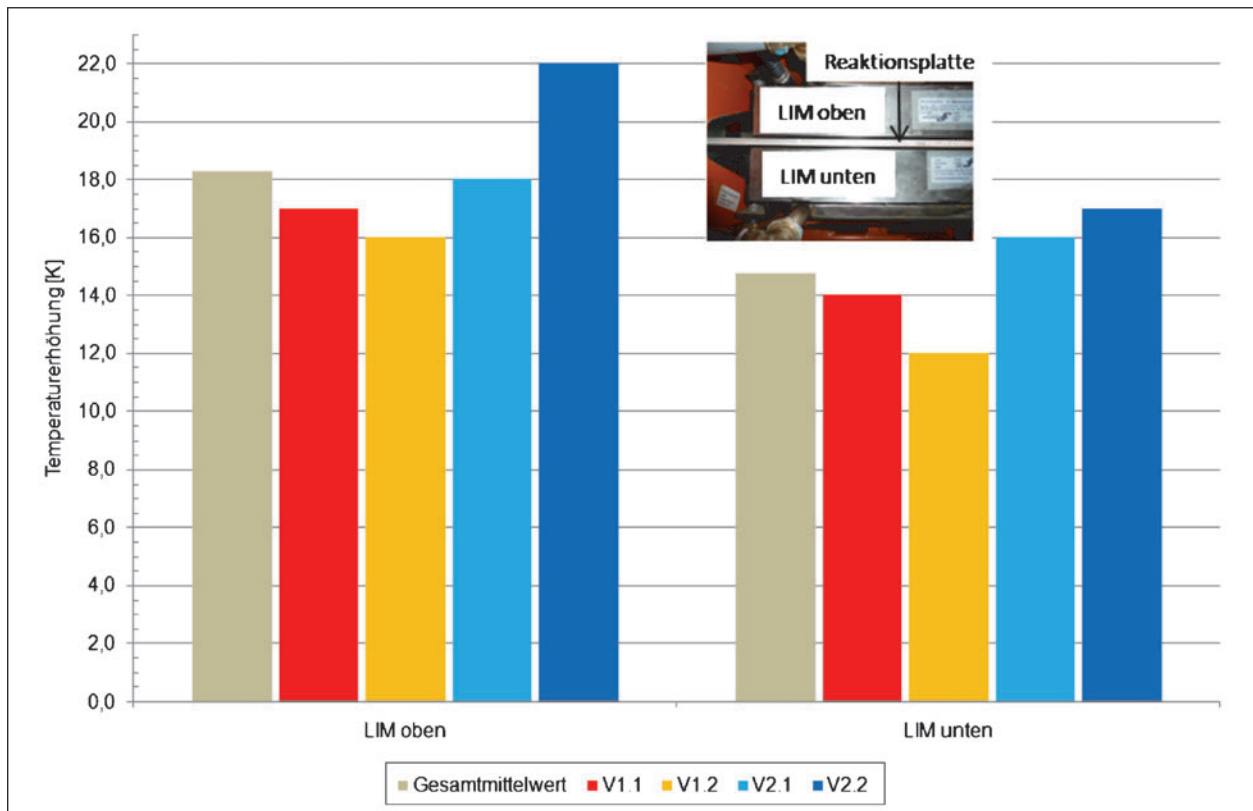


Bild 4-13: IR-Bilder Auswertung Belastungsphase – Linearmotoren



form (V2.1 und V2.2) größere Temperaturerhöhungen erzeugen als die Standard-Betriebsform (V1.1 und V1.2). Durch die verbesserte Belüftung bei der Modifizierten-Betriebsform V2.\_ wurde eigentlich ein anderes Bild erwartet. Festzuhalten bleibt, dass im Durchschnitt eine Erhöhung innerhalb von fünf Stunden Versuchsdauer um ca. 18 K am LIM oben und um ca. 15 K am LIM unten festzustellen ist und dadurch einen erheblichen Einfluss auf die Temperaturentwicklung innerhalb des MLS30 aufweisen kann.

Während der Abkühlphase von einer Stunde nach der fünfstündigen Belastungsphase wird deutlich, dass sich auch hier ein Unterschied von rund 3,0 K im Gesamtmittelwert zwischen dem oberen und unteren Linearmotor eingestellt hat, siehe Bild 4-14. Wie schon während der Belastungsphase bewirkt die Modifizierte-Betriebsform keine schnellere Temperaturreduzierung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Temperaturerhöhung am oberen Linearmotor bei der Standard-Betriebsform schneller abgebaut wurde, als bei der Modifizierten. Beim unteren Linearmotor ist keine deutliche Unterscheidung möglich.

#### 4.3.2 Infrarotkamera auf die Belastungsräder

Bei der Position „Infrarotkamera auf die Räder von vorne“ liegt der Fokus der Untersuchung auf dem Einfluss der direkten Überrollung. Bei der Position „Infrarotkamera auf die Räder von hinten“ liegt der Fokus auf der Temperaturentwicklung der Belastungsräder, die nach einer kurzen Ruhephase ohne Belastung oben durch den MLS30 zurückgeführt, wieder auf die Versuchsfläche gelangen. Dabei wird die Temperaturentwicklung der Belastungsräder während der regulären Belastungsphase und dem Abkühlen innerhalb von einer Stunde nach Belastungsende untersucht. Beispiele für die Bilder sind in Bild 4-11 zusehen.

Für die Variante V1.1 wurde ein Temperaturbereich von 25-40 °C gewählt. Dieser wurde über die Belastungsdauer von 5 h nicht ausgeschöpft. Somit lassen sich für die verschiedenen Zeiten ungefähre Temperaturen über die Farbskala ermitteln. Für die Variante V1.2 wurde ein kleinerer Temperaturbereich, 25-35 °C, gewählt. Dieser wurde zum Ende der Belastungsphase ausgeschöpft und übertroffen. Daher lassen sich in dem Bereich keine eindeutigen Ergebnisse ablesen. Bei den modifizierten

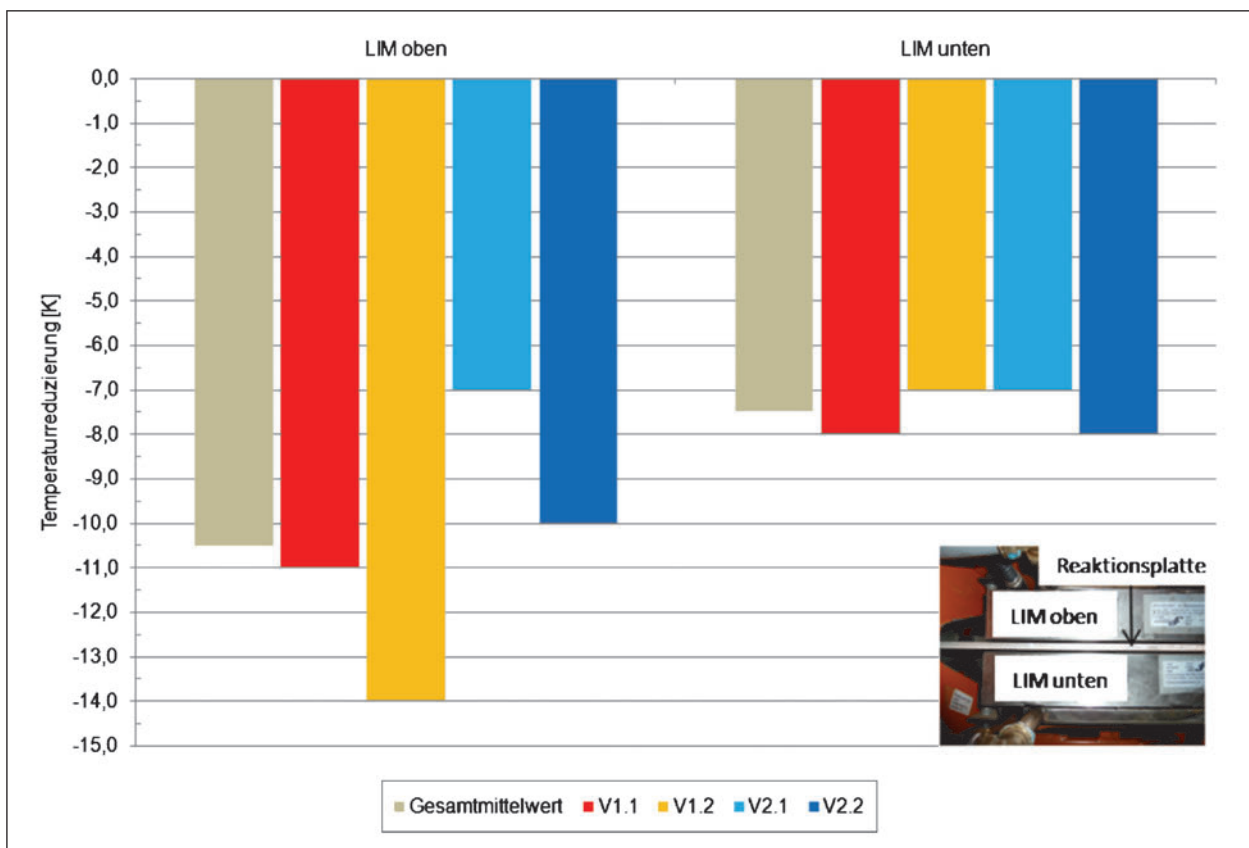


Bild 4-14: IR-Bilder Auswertung Abkühlphase – Linearmotoren

Varianten wurden aus den vorherigen Erfahrungen entsprechende Bereiche gewählt.

Die Untersuchungen der Mantelflächen wurden an acht verschiedenen Tagen durchgeführt, viermal von vorne und viermal von hinten. Dabei ist zu erkennen, dass die Gesamtmittelwerte der Temperaturerhöhungen, 8,0 K und 8,8 K, mit einer Differenz von 0,8 K dicht beieinander liegen. Aufgrund der begrenzten Datengrundlage und den augenscheinlichen Ablesungen der Temperaturen ist dieser Unterschied als vernachlässigbar zu bezeichnen.

Bei der Betrachtung der Temperaturerhöhung von vorne auf die Belastungsräder (Bild 4-15) fällt auf, dass die Standard-Betriebsformen (V1.1) eine stärkere Erhöhung erzielen als die Modifizierten-Betriebsformen. Diese Entwicklung wurde erwartet, hätte aber deutlicher ausfallen sollen. Wenn man die Erhöhungen bei der Blickrichtung von hinten betrachtet, fällt auf, dass diese deutlich homogener und gleichbleibender sind. Dadurch ist keine Unterscheidung der Standard- und Modifizierten-Betriebsform möglich. Beim Zurückführen der Belastungsräder durch den oberen Teil des MLS30 findet

keine erkennbare Abkühlung an der Mantelfläche statt. Die Temperaturentwicklung an der Mantelfläche der Belastungsreifen liegt im gleichen Bereich wie direkt nach der Überrollung.

Für die Abkühlphase wurde die erste Stunde nach der Belastungsphase genauer betrachtet. Dabei fällt auf, dass beide Blickrichtungen (3,8 K und 3,5 K) nahezu die gleiche Abkühlung zeigen. Allerdings unterscheiden sich die einzelnen Varianten untereinander sehr stark, sodass keine einheitliche Aussage möglich ist. Unter anderem wird dies bei der Standard-Betriebsform V1.1 deutlich. Wenn man von vorne auf das Belastungsrad schaut, kann eine Reduzierung um 2,0 K detektiert werden. Bei der Betrachtung von hinten sind es 5,0 K. Die beiden Messzeitpunkte lagen zwei Tage auseinander und lassen auf nahezu gleiche Versuchsbedingungen schließen. Die Temperatur außerhalb des MLS30 ist bei beiden Varianten innerhalb der ersten Stunde nach der Belastung um ca. 2,0 K gefallen und hat damit keinen Einfluss auf die deutliche Veränderung. Grundsätzlich ist die Temperaturentwicklung bei der Blickrichtung von vorne eindeutig und plausibel, weil sich durch die seitlichen Lappen das System unterhalb des MLS30 nicht so stark abkühlen

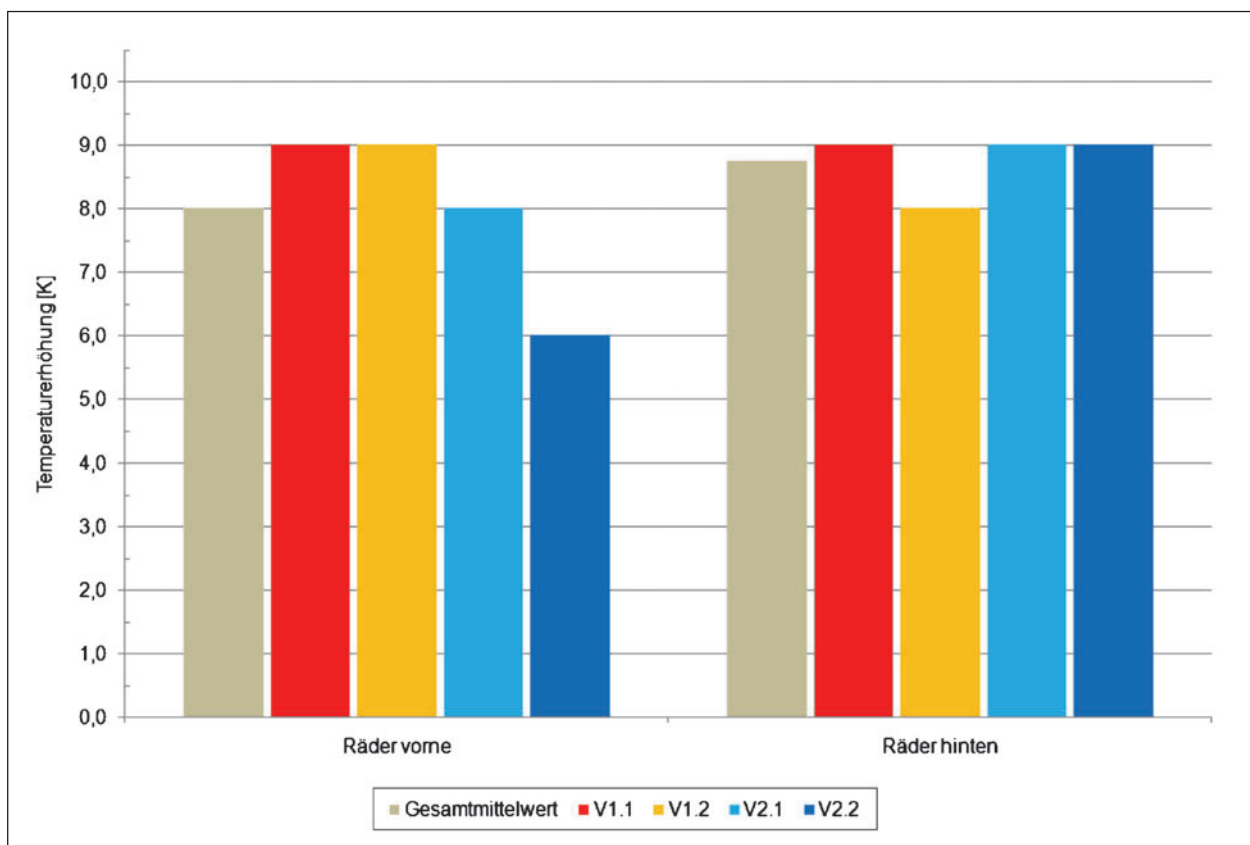
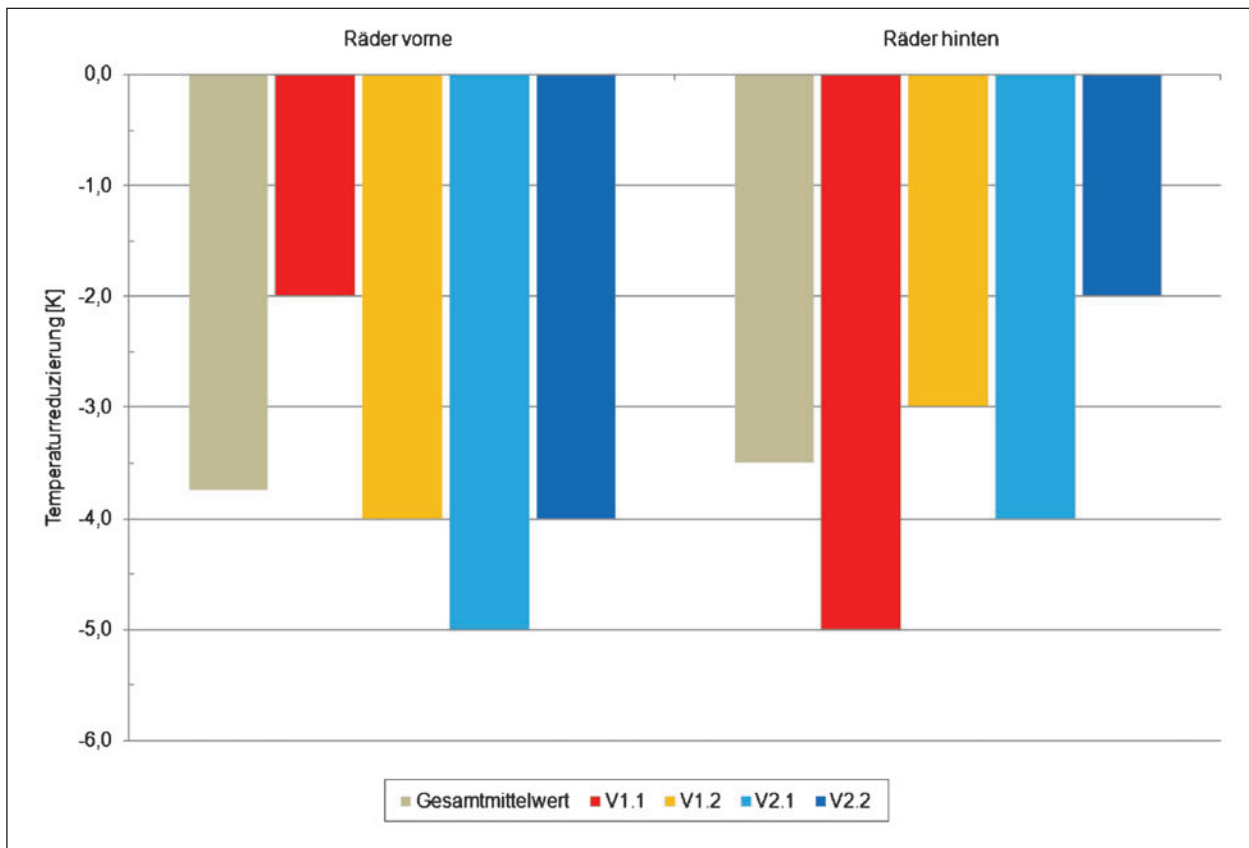


Bild 4-15: IR-Bilder Auswertung Belastungsphase – Belastungsräder



**Bild 4-16:** IR-Bilder Auswertung Abkühlphase – Belastungsräder

kann. Dies wird aber bei der Blickrichtung von hinten nicht deutlich. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass der MLS30 sehr nah an einem Zugangstor stand und dadurch ein größerer Luftaustausch im hinteren Teil des MLS30 stattfindet. Bei den anderen Varianten zeigte sich das nicht, daher wird dies als eher unwahrscheinlich eingestuft (Bild 4-16).

### 4.3.3 Infrarotkamera auf die Asphaltoberfläche

Im Laufe des Untersuchungsprogramms wurde deutlich, dass die Asphaltoberflächentemperatur ebenfalls aus der Position zur Betrachtung der Belastungsräder ermittelt werden konnte. Die Einstellungen innerhalb der Infrarotkamera, Abschnitt 3.1.4, wurden dazu nicht verändert, weil sich plausible Ergebnisse beim ersten Versuch gezeigt hatten. Dies betraf vor allem den Zusammenhang zwischen den auf dem Bild zu erkennenden Temperaturen zu den erfassten Sensorsignalen der Oberfläche.

In Bild 4-13 ist die Zunahme der Asphaltoberflächentemperatur im Bereich der Mantelfläche des Belastungsrades zu beobachten. Die ermittelten Werte wurden von beiden Kameraposi-

tionen ausgewertet und werden in Bild 4-17 analysiert.

Während der Belastungsphase waren die Gesamtmittelwerte der beiden Blickrichtungen nahezu identisch und lagen bei ca. 7,0 K Temperaturerhöhung nach der fünfstündigen Belastungsphase.

Bei der Blickrichtung von vorne ist ein deutlich inhomogeneres Bild als bei der Blickrichtung von hinten zu erkennen. Bei der Standard-Betriebsform (V1.\_) erhöht sich die Asphaltoberflächentemperatur mehr als bei der Modifizierten-Betriebsform (V2.\_). Trotzdem wird deutlich, dass innerhalb der einzelnen Betriebsformen ein Unterschied von 2,0 K auftritt, obwohl diese annähernd gleich sein sollten, weil die Varianten (V\_.1 und V\_.2) erst in der Abkühlphase einen Einfluss haben. Dies kann damit erklärt werden, dass sich der Messpunkt durch die Bewegungsrichtung unterscheidet aber auch die Strömungen innerhalb des MLS unterschiedlich sind. Zusätzlich ist durch die Farbskala im Infrarotbild eine leichte Abweichung möglich, weil keine exakten Werte ausgegeben werden.

Bei der Blickrichtung von hinten liegen die Werte sehr homogen bei einer mittleren Temperaturerhö-

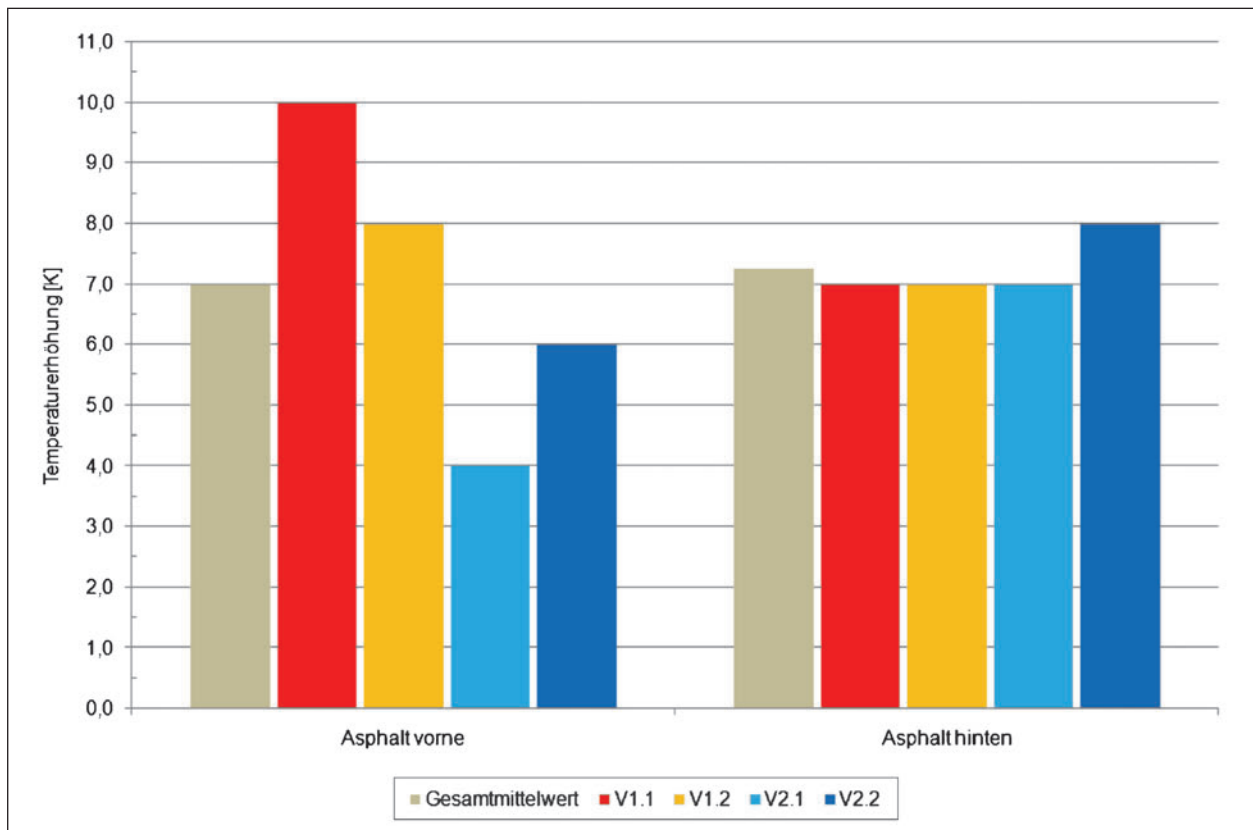


Bild 4-17: IR-Bilder Auswertung Belastungsphase – Asphaltoberfläche

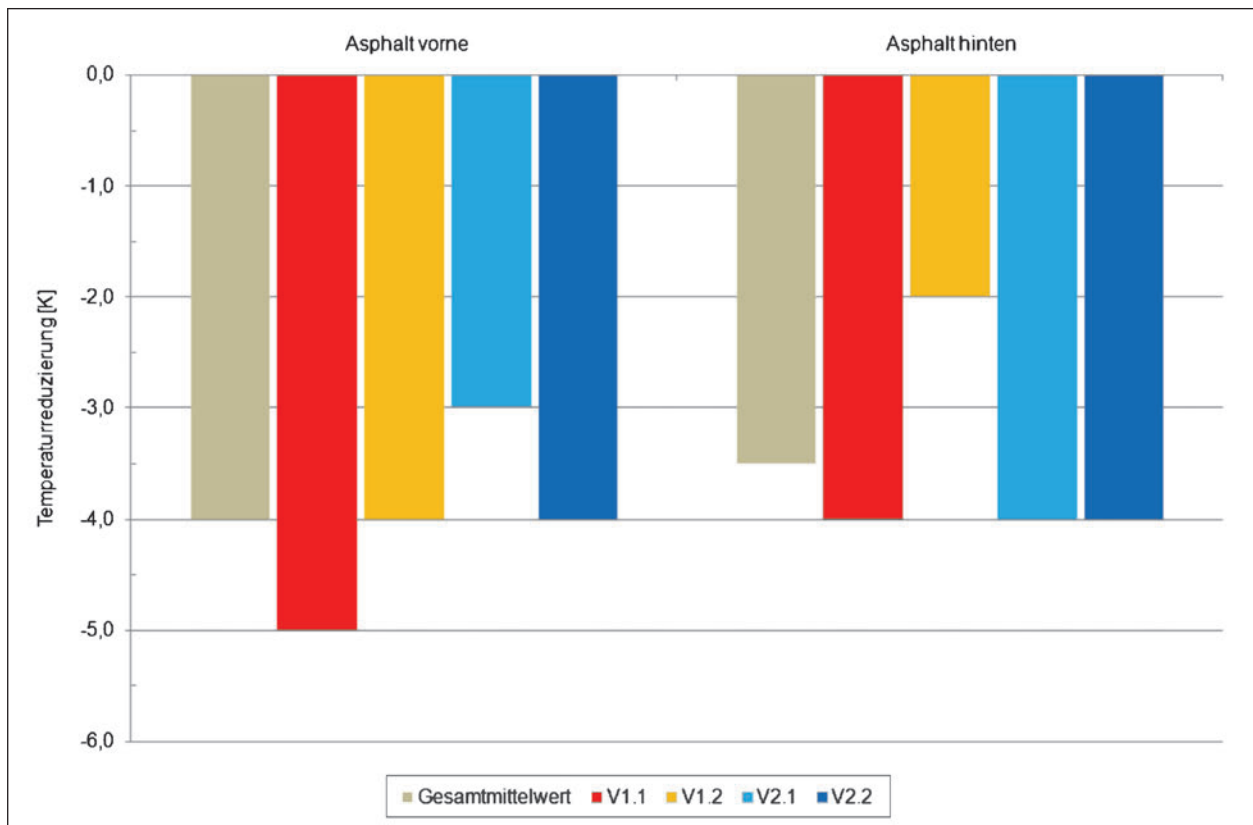


Bild 4-18: IR-Bilder Auswertung Abkühlphase – Asphaltoberfläche

hung von 7,3 K und lassen keinen Unterschied zwischen Standard- und Modifizierter-Betriebsform zu.

Innerhalb der Abkühlphase, eine Stunde nach der Belastungsphase, hat sich die Asphaltoberflächentemperatur im Mittel um 3,5-4,0 K reduziert (Bild 4-18). Auch hier ist keine eindeutige Zuordnung zu den einzelnen Betriebsformen und Varianten möglich. Das direkte Anheben hat nach den Infrarotbildern ebenso wenig Einfluss, wie die Modifizierte-Betriebsform mit hochgestellten seitlichen Lappen.

## 5 Zusammenfassung, Erkenntnisse und weiteres Vorgehen

Die Versuche in diesem Forschungsvorhaben konnten zeigen, an welchen Stellen Temperatureinflüsse durch die Belastung mittels Mobile Load Simulator MLS30 entstehen, und wie sie sich im Straßenkörper verteilen. Durch die Verwendung einer Infrarotkamera konnte der Aufwärmprozess aus verschiedenen Positionen visualisiert werden. Um einheitliche und genaue Messwerte zu erhalten, wurden Sensoren innerhalb und außerhalb eines instrumentierten Versuchsfeldes verwendet. Dabei wurden die entsprechenden Temperaturen in verschiedenen Tiefen und an der Oberfläche gemessen.

Die nun vorliegenden Kenntnisse über die Temperaturverteilungen und der sich einstellenden Temperaturdifferenzen werden zum einen für die detaillierte Planung von möglichst standardisierten Versuchsprogrammen mit dem MLS30 verwendet und dienen zum anderen zur vertieften Interpretation der Ergebnisse aus den Belastungsversuchen. So konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass das Maximum der Temperaturerhöhung innerhalb des Aufbaus sich ca. 20 Minuten nach Belastungsende in 6,5 cm Tiefe einstellt. Somit kann es sinnvoll sein, die temperaturabhängigen Messungen, wie zum Beispiel Tragfähigkeitsmessungen, so einzuplanen, dass das Maximum der Asphaltkörpertemperatur berücksichtigt wird.

Der Versuch, die Temperaturerhöhung innerhalb des MLS30 mit geringer Modifikation der Luftzufuhr deutlich zu mindern, hat nicht den erwarteten Erfolg gebracht. Es zeigte sich allerdings auch, dass die durch die Radüberrollung hervorgerufene Rei-

bungswärme den maßgeblichen Anteil zur Wärmeentwicklung im Asphalt beiträgt. Die Regulierung der Innenraumtemperatur im MLS30 verliert daher an Bedeutung, wird aber dennoch mit dem Hersteller diskutiert.

In Zukunft sind weitere Fragestellungen zu beantworten, um die Temperaturentwicklung weiter klassifizieren zu können. Dazu werden unter anderem auch kommende Belastungsversuche verwendet. Wenn sich dort eine konstante Entwicklung feststellen lässt, wäre die Temperaturverteilung unterhalb des MLS30 rechnerisch bestimmbar. Eine dadurch mögliche Reduzierung von Sensoren ist gleichbedeutend mit einer Reduzierung einbaubedingter Störungen, gleichwohl Temperatursensoren sehr klein gebaut werden können und nur geringe Störungen hervorrufen.

Zusätzlich zu den nun bekannten Erkenntnissen sollten weitere Versuche mit dem FWD durchgeführt werden. Unter anderem ist ein Versuchsprogramm geplant, dass zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach einer bestimmten Überrollungsanzahl die Veränderung allein durch die Abkühlung und Erholung der Konstruktion messtechnisch erfasst. Da nach diesem Forschungsprojekt bekannt ist, dass etwa sechs Stunden nach Belastungsende eine Temperaturreduzierung in der oberen Asphaltlage (6,5 cm unter Asphaltoberkante) von 2,0 K vorhanden ist, sollte das Verhalten der Konstruktion durch Messungen innerhalb dieser Zeit an ein und derselben Stelle analysiert werden.

Während der Literaturstudie wurden verschiedene Formeln zusammengetragen, die von unterschiedlichen Temperaturen auf verschiedene andere Parameter schließen lassen. Dazu gehört die Temperaturberechnung der Konstruktion (Oberflächentemperatur, innerhalb der Konstruktion), aber auch die Berechnung von Dehnungen an unterschiedlichen Positionen aufgrund von gemessenen Temperaturverläufen innerhalb der Konstruktion. Diese Berechnungen werden in Zukunft weitergeführt und mit entsprechenden Datengrundlagen verglichen. Nach derzeitigem Stand lassen sich diese theoretischen Überlegungen noch nicht übertragen.

Das durchgeführte Versuchsprogramm hat sich ausschließlich mit Versuchen in einer klimatisierten Halle beschäftigt. Ein Bestandteil weiterer Forschungsbemühungen wäre die Beobachtung unter realen Witterungsbedingungen. Dazu würden sich die Untersuchungsflächen auf dem duraBAST anbieten, weil dort umfassende Wetterdaten orts-

treu erhoben und auch entsprechende Sensorkonzepte innerhalb der Konstruktion umgesetzt werden sollen. Außerdem sollte untersucht werden, ob sich beim MLS30 eine maximale Temperaturerhöhung einstellt. Mit einer solchen Information könnte ein konstanter Dauerbetrieb über eine durchgängige Zeit weiter begründet werden. Neben der Erhöhung der Anzahl an Überrollungen pro Tag könnten dadurch auch temperaturinduzierte Schwankungen vermieden werden, um somit den tatsächlichen Einfluss der Überrollungen untersuchen zu können.

## Literatur

- [1] WACKER, B. et al. (2014): Zeitraffende Verkehrsbelastung mit dem Mobile Load Simulator MLS10 und Sensorik zur Beanspruchungsdetektion. Straße und Autobahn, S. 16-22
- [2] WACKER, B. et al. (2016): Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS30. Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Straßenbau, S. 101. Bergisch Gladbach
- [3] ROBBINS, M. M.; TIMM, D. H. (2008): Temperature and Velocity Effects on a Flexible Perpetual Pavement. 3<sup>rd</sup> International Conference on Accelerated Pavement Testing
- [4] von BECKER, P. (1976): Zur Annahme wirklichkeitsnäherer E-Moduli als Kennwerte für das elastische Verformungsverhalten flexibler Straßenbefestigungen bei elastizitätstheoretischen Beanspruchungsrechnungen. Bundesministerium für Verkehr, Bonn
- [5] BALTZER, S. et al. (1994): Fourth International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Prediction of AC mat temperatures for routine load/deflection measurements. Trondheim : s. n.
- [6] LUKANEN, E. O.; STUBSTAD, R.; BRIGGS, R. (2000): Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement. McLean: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration
- [7] SOUTHGATE, H. F.; DEEN, R. C. (1969): Temperature distribution within asphalt pavements and its relationship to pavement deflection. Highway Research Record 291, Washington
- [8] JANSEN, D. (2009): Temperaturkorrektur von mit dem Falling-Weight-Deflectometer gemessenen Deflexionen auf Asphaltbefestigungen. Institut für Straßenbau und Verkehrswesen, Schriftenreihe Heft 2, Duisburg
- [9] MLS Test Systems (Pty) Ltd. 2013
- [10] Forschungsgesellschaft Straßenwesen (FGSV) (2012): Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. FGSV Verlag GmbH, Köln
- [11] RITTER, J. (2010): Dauerbelastungsversuche an einer Modellstraße zur vergleichenden Bewertung des Tragverhaltens unterschiedlicher Asphaltbauweisen. BASt AP-Projekt 06 000/S4. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- [12] SCHERKENBACH, M. (2013): Sensortestfeld – Analyse neuer und alter Sensoren. Referat GS3, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach
- [13] RABE, R. (2004): Bau einer instrumentierten Modellstraße in Asphaltbauweise zur messtechnischen Erfassung der Beanspruchungssituation im Straßenbau. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach
- [14] Forschungsgesellschaft Straßenwesen (FGSV) (2001): Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. FGSV Verlag GmbH, Köln

## Bilder

Bild 1-1: Temperaturgang im Asphalt während eines Belastungstages (2)

Bild 2-1: Charak. Jahrgang und E-Modul bituminös gebundener Schichten (4)

Bild 2-2: Aufteilung des Tagesgangs in zwei Sinuskurven

- Bild 2-3: Korrelation  $R^2$  (8)
- Bild 2-4: Häufigkeit der Differenzen [N = 37.303 Einzelwerte] (8)
- Bild 3-1: Mobile Load Simulator MLS30 der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- Bild 3-2: Radsatzzug (1 von 4) des MLS30 (9)
- Bild 3-3: Sensoranordnung im Versuchsfeld 4 – Draufsicht
- Bild 3-4: Sensoranordnung im Versuchsfeld 4 – Querschnitt
- Bild 3-5: Sensormarkierungen inner- und außerhalb der MLS30-Rollspur
- Bild 3-6: Standard- (oben) und Modifizierte-Betriebsform (unten)
- Bild 3-7: Position – Infrarotkamera (IR) auf LIM
- Bild 3-8: Position – Infrarotkamera (IR) auf Räder vorne
- Bild 3-9: Position – Infrarotkamera (IR) auf Räder hinten
- Bild 4-1: Temperaturverlauf oberhalb Asphalt-oberfläche und innerhalb des MLS30
- Bild 4-2: Lufttemperatur im MLS30 Belastungs- und Abkühlphase
- Bild 4-3: Lufttemperatur Abkühlphase nach 5-stündiger Belastungsphase
- Bild 4-4: Oberflächentemperatur in und neben der Rollspur
- Bild 4-5: Oberflächentemperatur Abkühlphase nach 5-stündiger Belastungsphase
- Bild 4-6: Asphalttemperatur in zwei verschiedenen Tiefen
- Bild 4-7: Asphalttemperatur Abkühlphase nach 5-stündiger Belastungsphase
- Bild 4-8: Temperaturentwicklung über 35 h nach Versuchsende
- Bild 4-9: Zusammenfassung mittlere Temperaturerhöhungen
- Bild 4-10: Zusammenfassung Temperaturreduzierung
- Bild 4-11: Infrarotbilder Zusammenstellung über 6 h Versuchsdauer
- Bild 4-12: Betrachtung LIM nach 5 Minuten (links) und nach 5 h (rechts)
- Bild 4-13: IR-Bilder Auswertung Belastungsphase – Linearmotoren
- Bild 4-14: IR-Bilder Auswertung Abkühlphase – Linearmotoren
- Bild 4-15: IR-Bilder Auswertung Belastungsphase – Belastungsräder
- Bild 4-16: IR-Bilder Auswertung Abkühlphase – Belastungsräder
- Bild 4-17: IR-Bilder Auswertung Belastungsphase – Asphaltoberfläche
- Bild 4-18: IR-Bilder Auswertung Abkühlphase – Asphaltoberfläche

## Tabellen

- Tab. 3-1: Versuchsprogramm
- Tab. 4-1: Temperaturentwicklung außerhalb des MLS30
- Tab. 4-2: Zusammenstellung Temperaturmittelwerte der Erhöhung 5h-Belastung
- Tab. 4-3: Zusammenstellung Temperaturmittelwerte der Reduzierung erste Stunde

## Anhang

### 1.A Ablaufplan des Versuchsprogramms

	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
<b>KW 30</b>	21. Jul Test Benny	22. Jul Test Michael	23. Jul Test Benny, Michael	24. Jul Vorbereitung Benny, Michael	25. Jul Vorbereitung
<b>KW 31</b>	28. Jul V1.1 auf LIM Benny	29. Jul V1.1 auf LIM Benny	30. Jul Insp. & Vorbereitung Benny/Erhard	31. Jul V1.2 auf LIM Benny	01. Aug V1.2 auf Räder vorne Benny
<b>KW 32</b>	04. Aug Vorbereitung Benny	05. Aug V1.1 auf Räder vorne Benny	06. Aug V1.1 auf Räder vorne Benny	07. Aug V1.1 auf Räder hinten Benny	08. Aug V1.1 auf Räder hinten & Insp. Benny
<b>KW 33</b>	11. Aug V1.2 auf Räder hinten Benny	12. Aug V2.1 auf LIM Benny	13. Aug V2.1 auf LIM & Insp. Benny	14. Aug V2.2 auf LIM Benny	15. Aug V2.2 auf Räder vorne Benny
<b>KW 34</b>	18. Aug Vorbereitung/Umbau Erhard	19. Aug Vorbereitung/Umbau Erhard	20. Aug V2.1 auf Räder vorne Erhard	21. Aug V2.1 auf Räder vorn Erhard	22. Aug V2.2 auf Räder hinten Erhard
<b>KW 35</b>	25. Aug Vorbereitung Erhard	26. Aug V2.1 auf Räder hinten Erhard	27. Aug V2.1 auf Räder hinten Erhard	28. Aug PUFFER Erhard	29. Aug PUFFER Erhard



## 2.A IR-Bilder Zusammenstellung

V1.1 IR auf LIM

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-8 25 - 60 °C

Bilder: - -

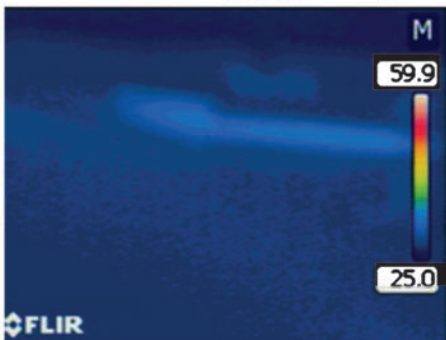


Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 10min

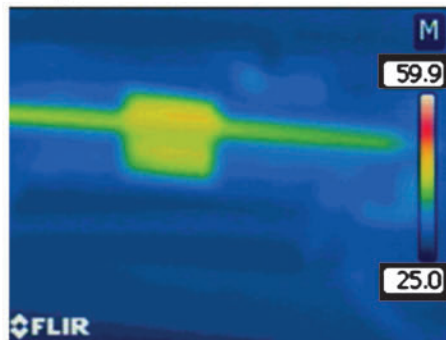


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

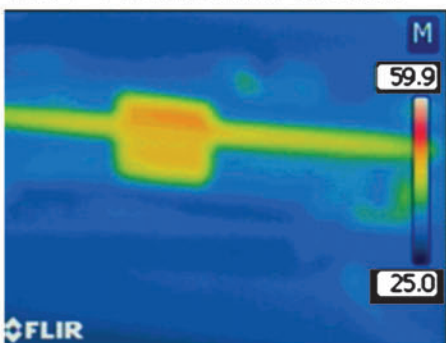


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

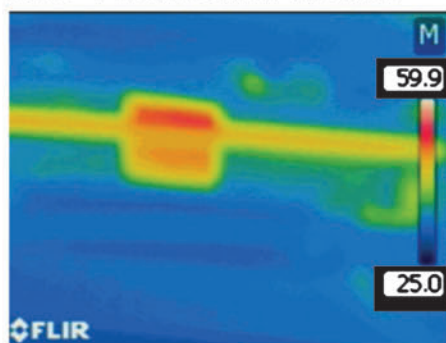


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

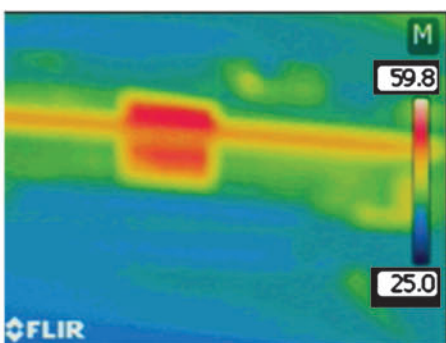


Bild 5 - Versuchsdauer: 5h 00min

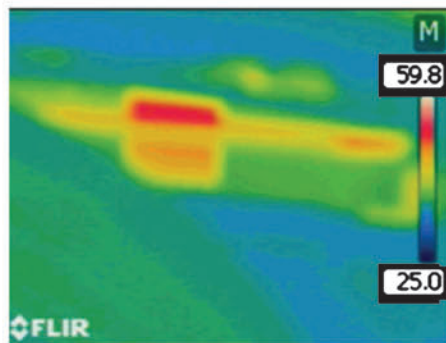


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 05min

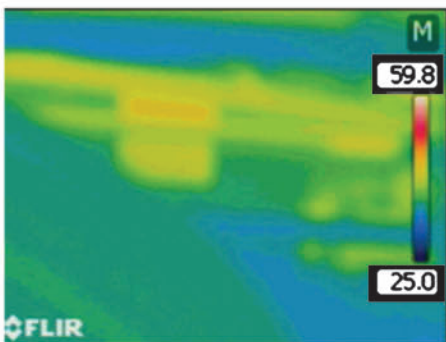


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

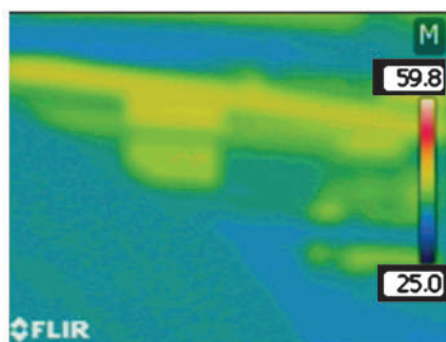


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

## V1.2 IR auf LIM

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-8 25 - 55 °C

Bilder: -

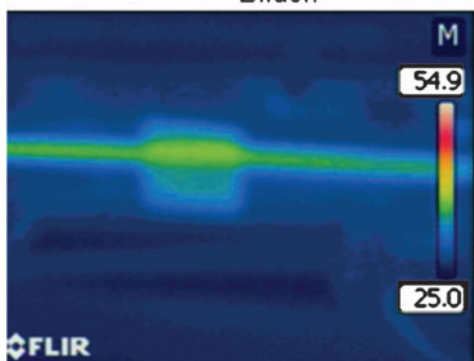


Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 10min

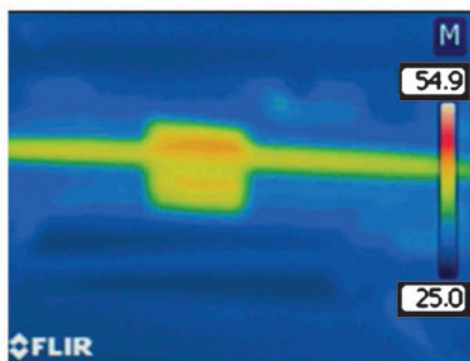


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

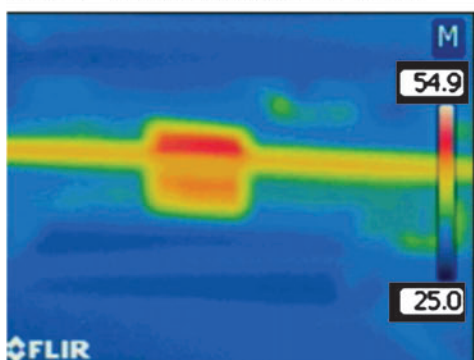


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

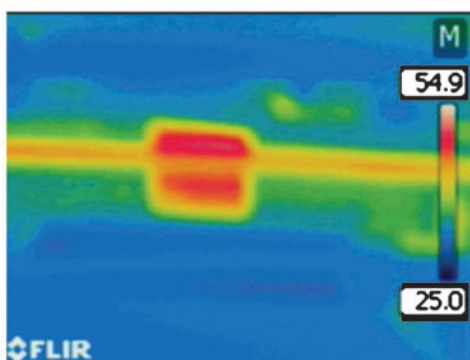


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

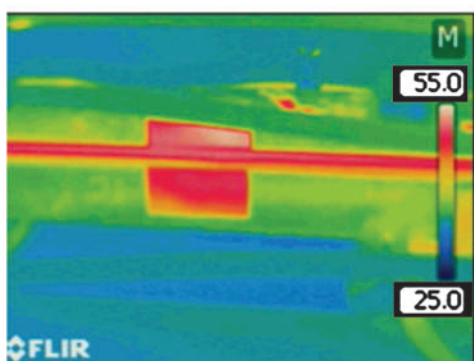


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

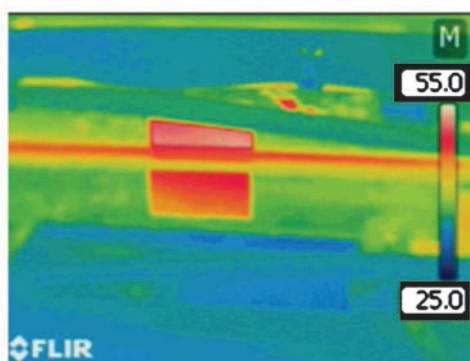


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

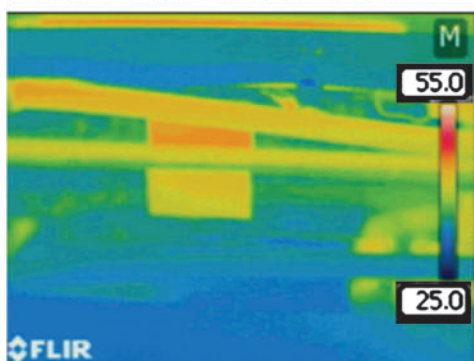


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

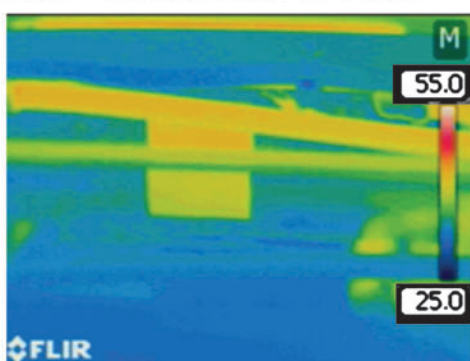


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

## V2.1 IR auf LIM

gewählter Temperaturbereich:

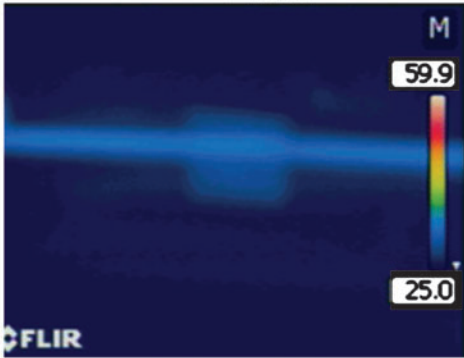
Bilder: 1-8    25 - 60 °C  
Bilder: -       -

Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 5min

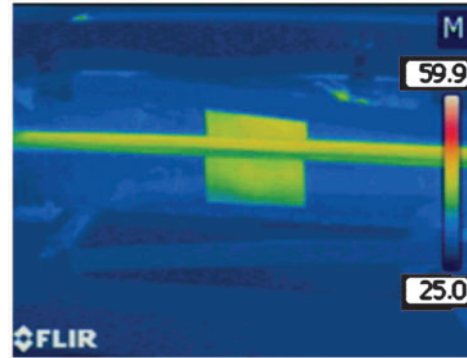


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

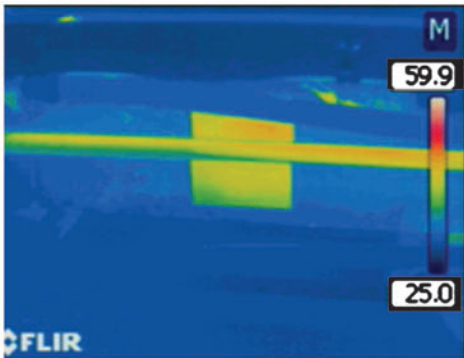


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

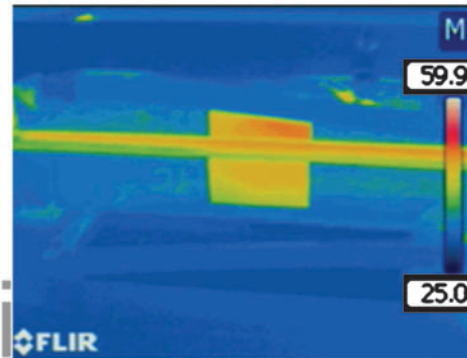


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

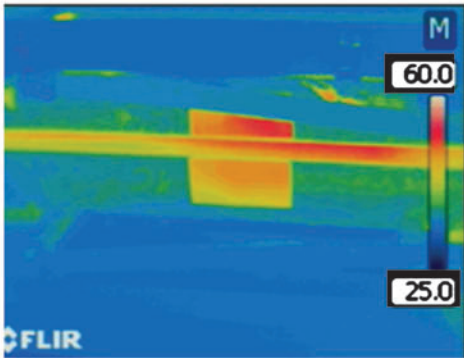


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

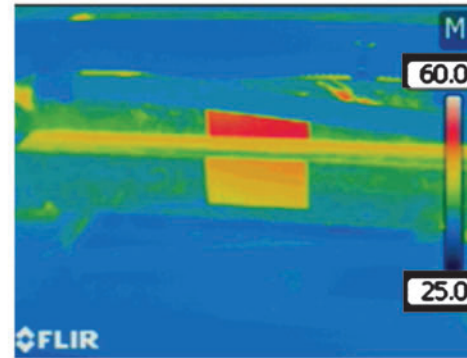


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

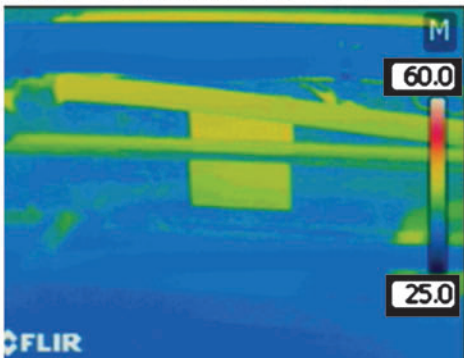


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

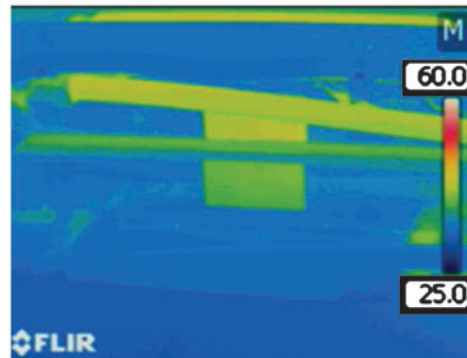


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

## V2.2 IR auf LIM

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-8 25 - 58 °C

Bilder: -

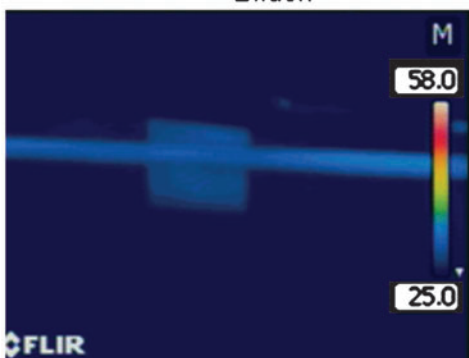


Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 5min

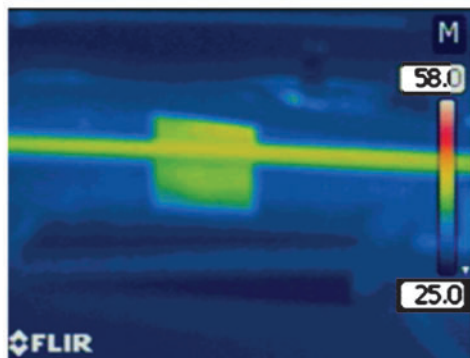


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

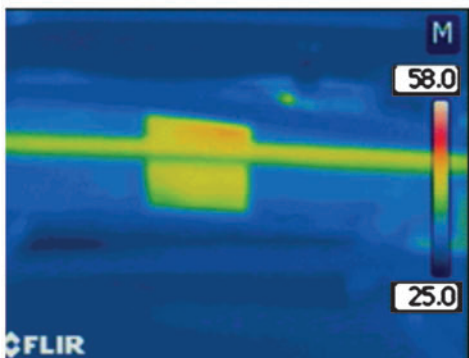


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

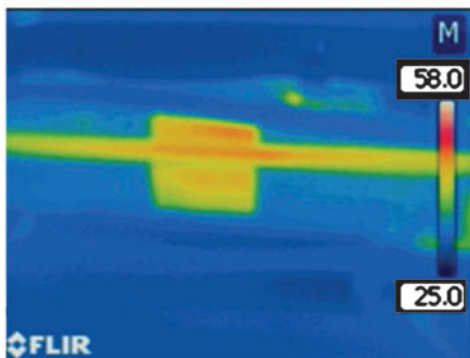


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

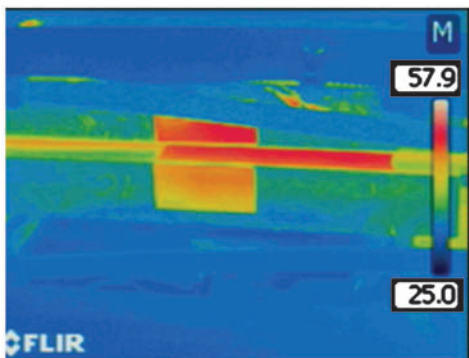


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

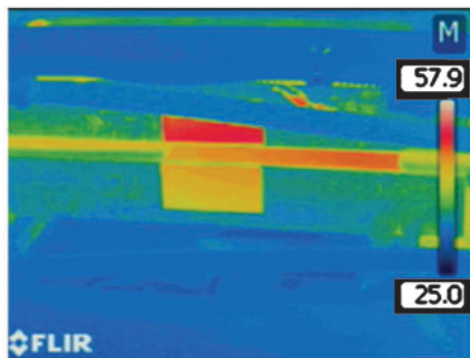


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

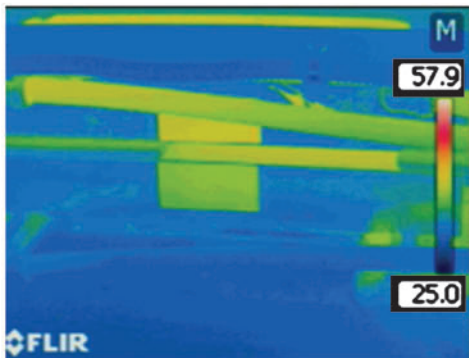


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

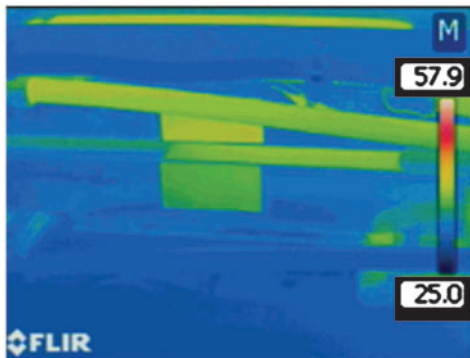


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

## V1.1 IR auf Räder von vorne

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-8 25 - 40 °C

Bilder: - -



Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 5min

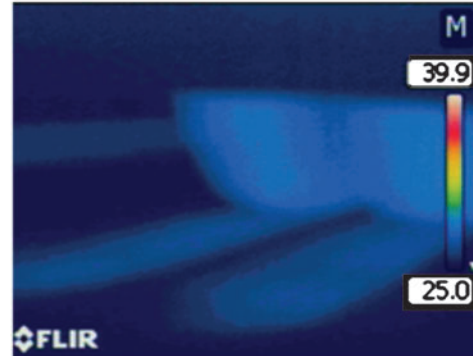


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

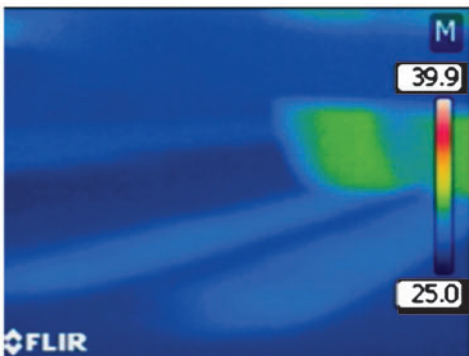


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

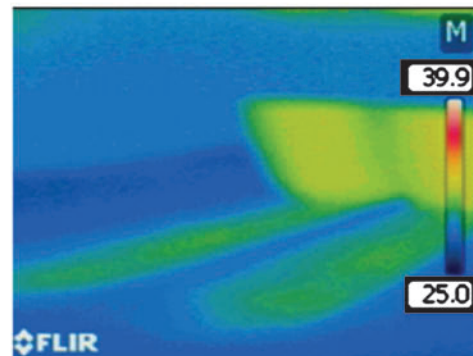


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

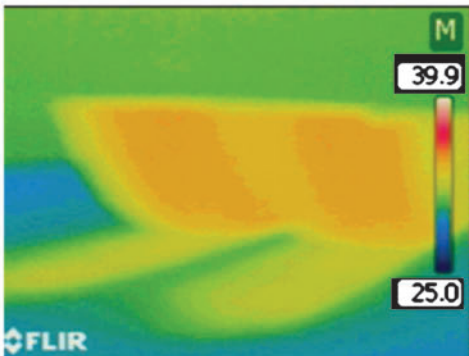


Bild 5 - Versuchsdauer: 5h 00min

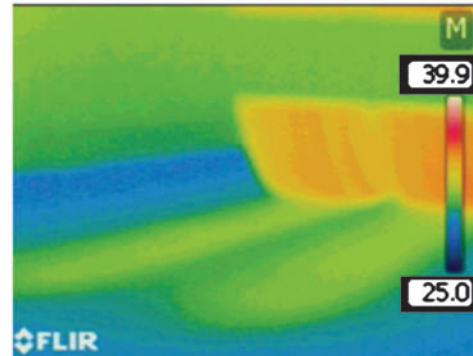


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 05min

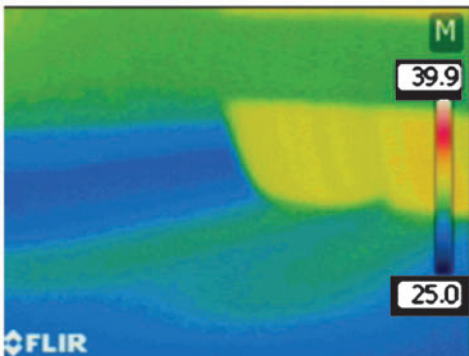


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

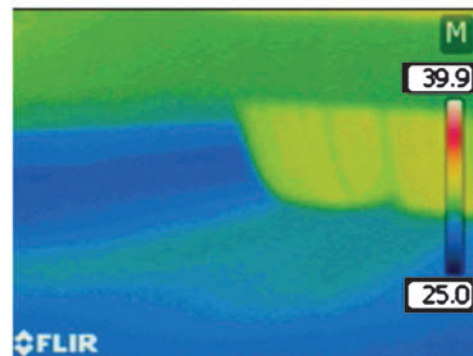


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

## V1.2 IR auf Räder von vorne

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-8 25 - 35 °C

Bilder: -

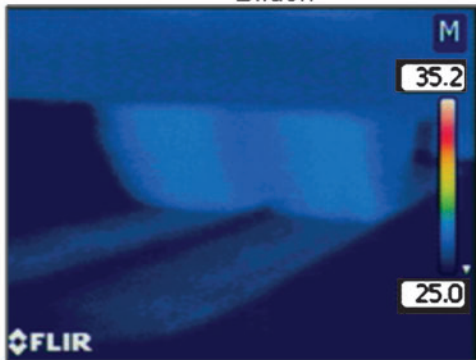


Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 5min

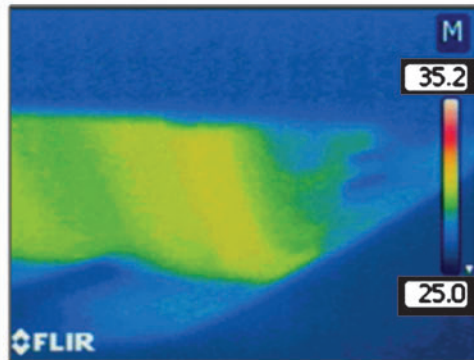


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

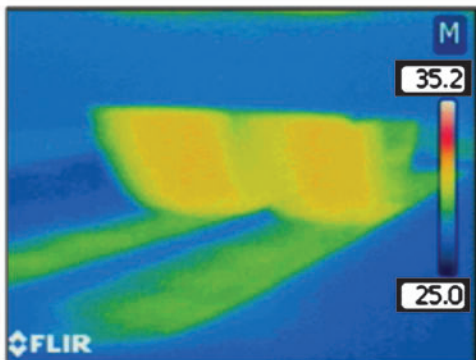


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

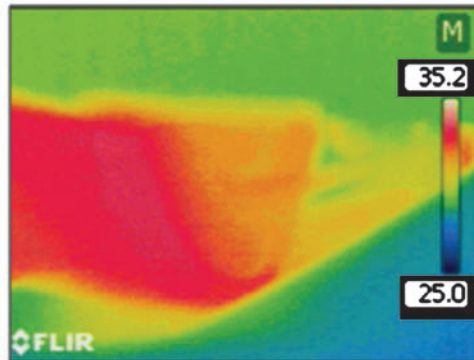


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

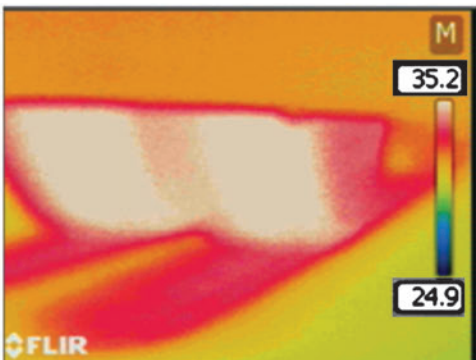


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

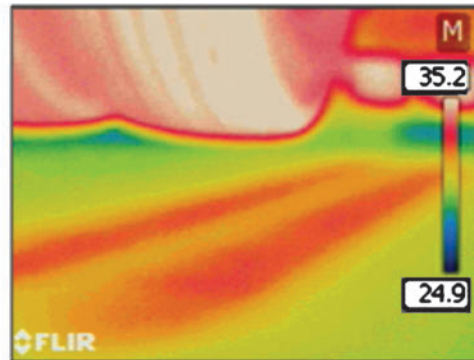


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

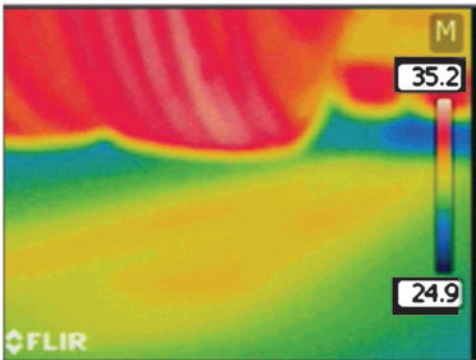


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

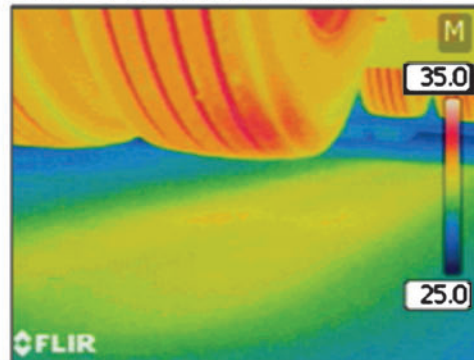


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

## V2.1 IR auf Räder von vorne

gewählter Temperaturbereich:

Bilder:	1-4	22 - 37 °C
Bilder:	5-8	25 - 40 °C

kein Bild vorhanden



Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 5min

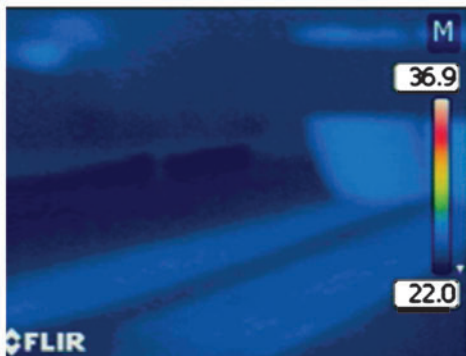


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

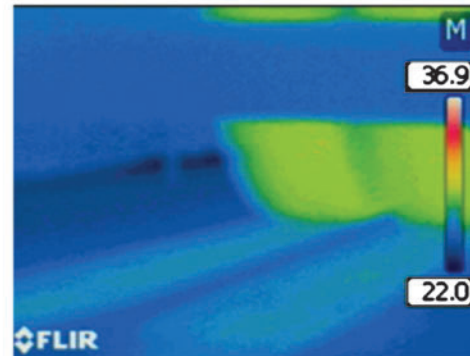


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

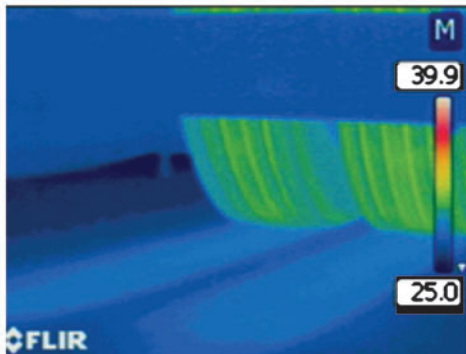


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

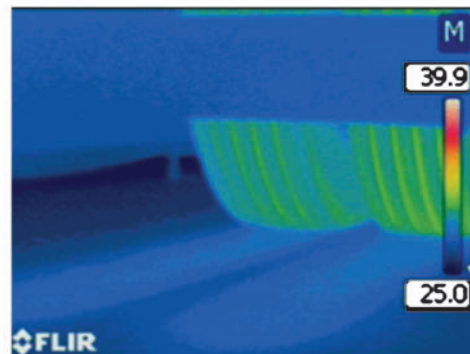


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

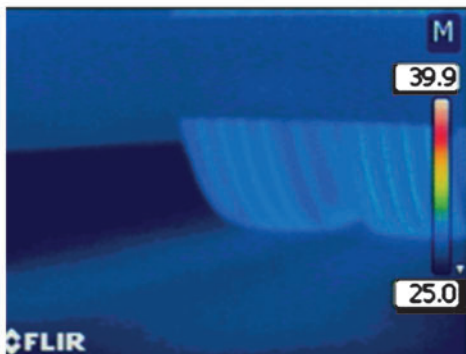


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

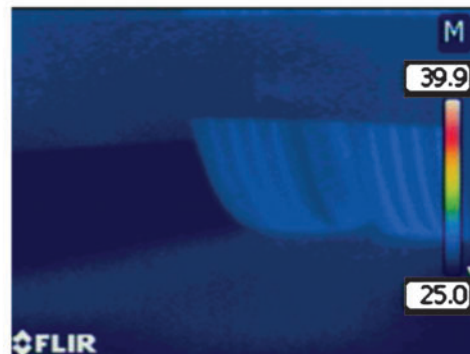


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

## V2.2 IR auf Räder von vorne

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-8 25 - 35 °C

Bilder: -

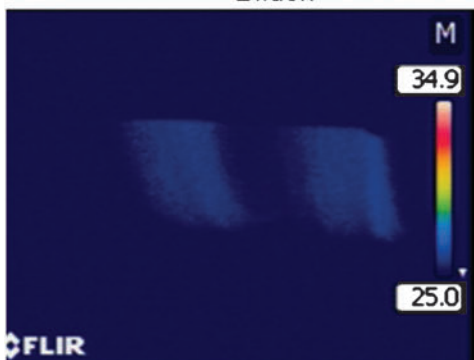


Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 10min

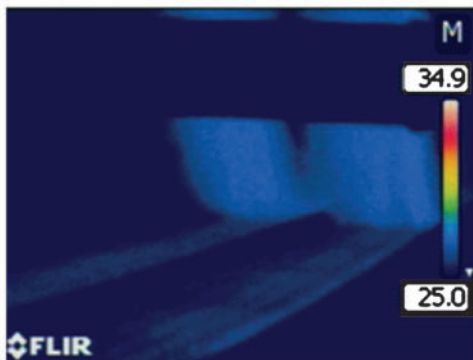


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

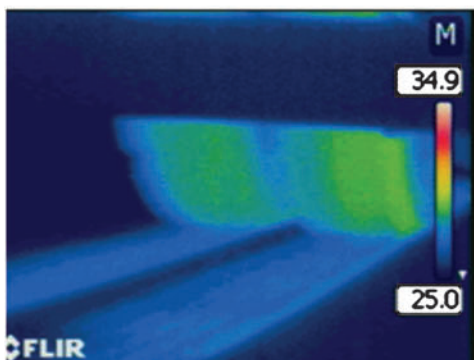


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

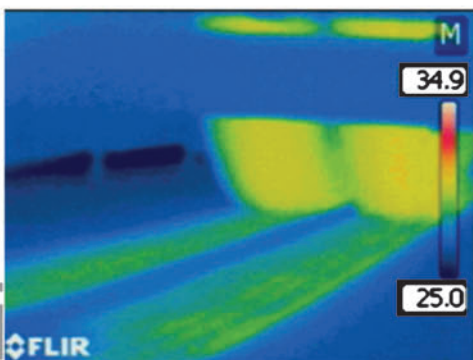


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

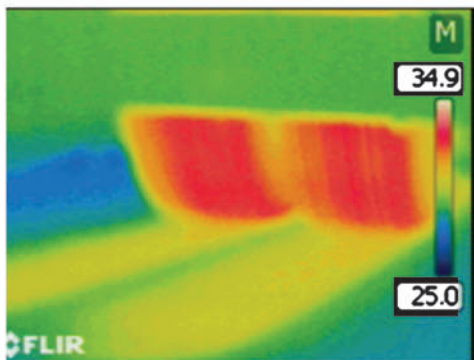


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

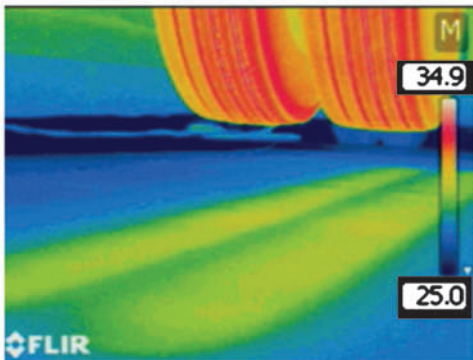


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

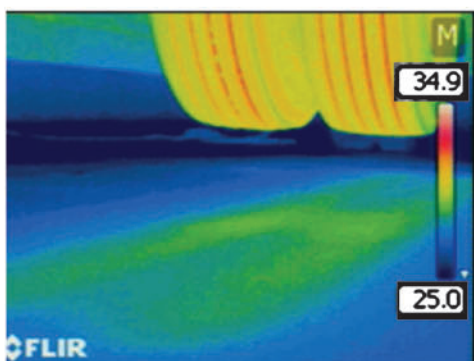


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

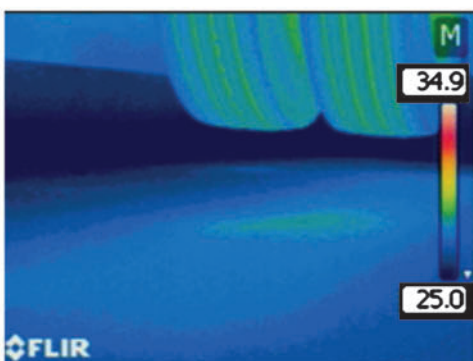


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min



## V1.1 IR auf Räder von hinten

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-8 25 - 40 °C

Bilder: -

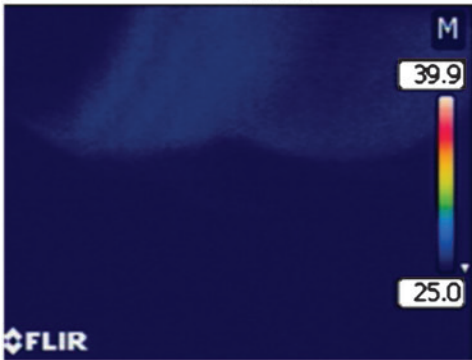


Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 5min



Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min



Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

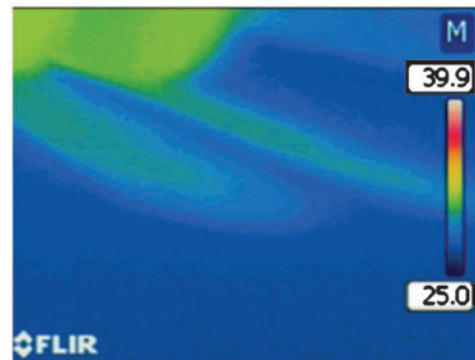


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

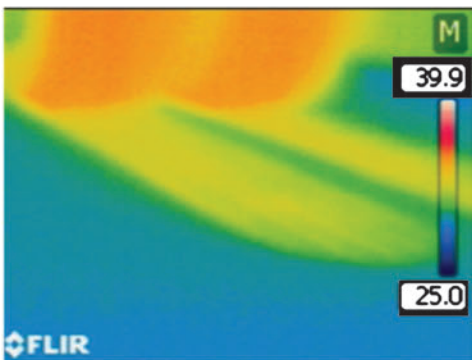


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

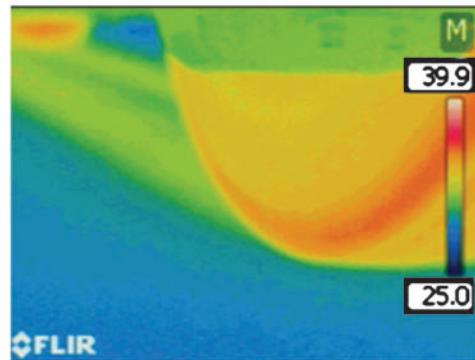


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

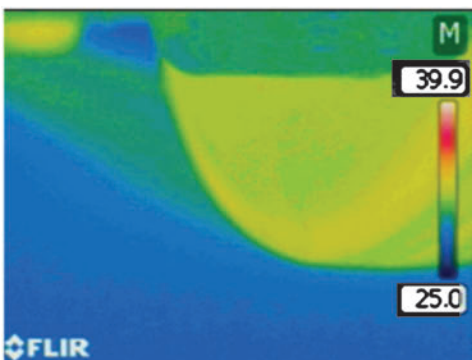


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

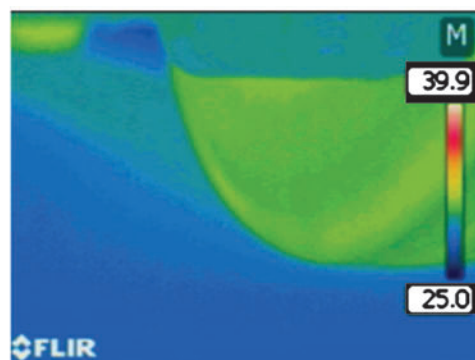


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

## V1.2 IR auf Räder von hinten

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-4 25 - 35 °C

Bilder: 5-8 25 - 38 °C



Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 5min

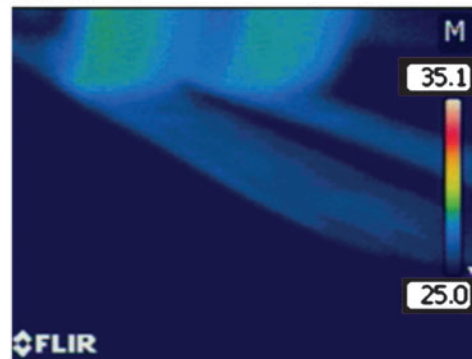


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

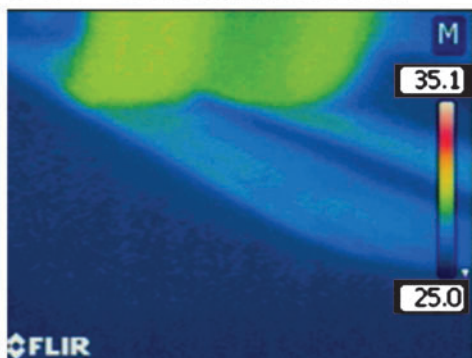


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

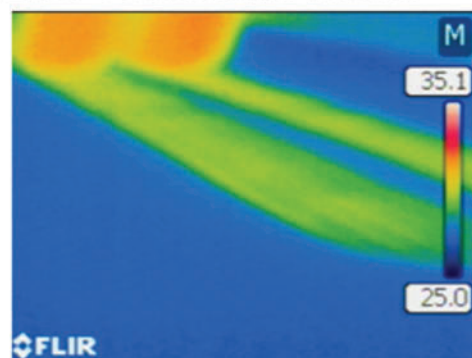


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

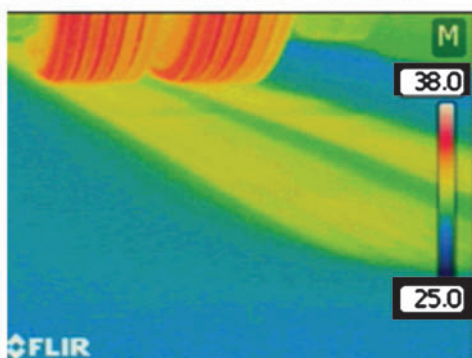


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

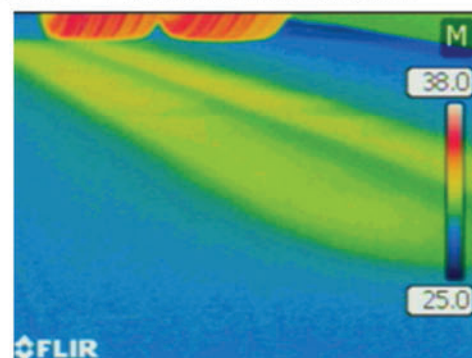


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

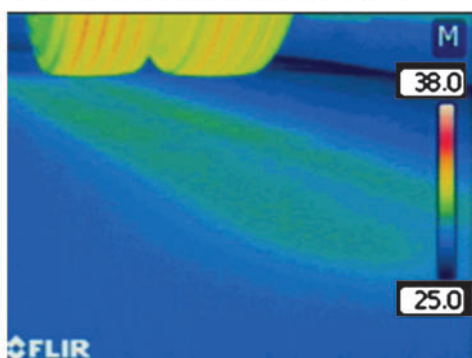


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

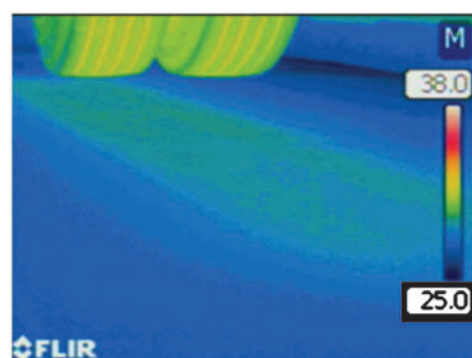


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

## V2.1 IR auf Räder von hinten

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-8 22 - 35 °C

Bilder: - -

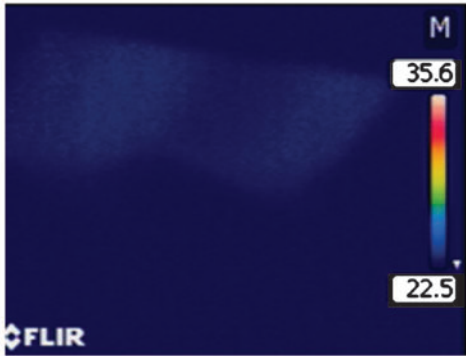


Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 5min

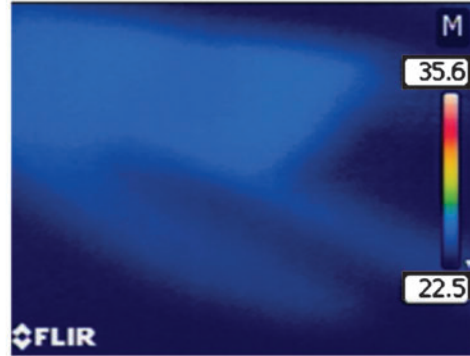


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

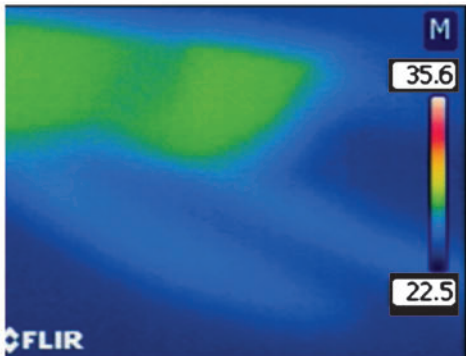


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

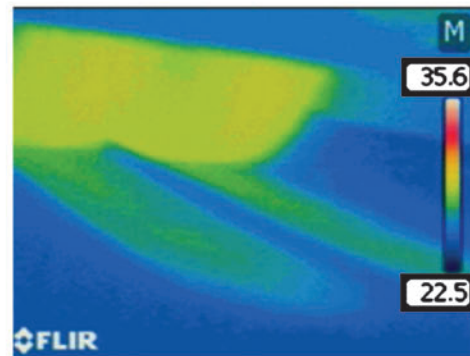


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

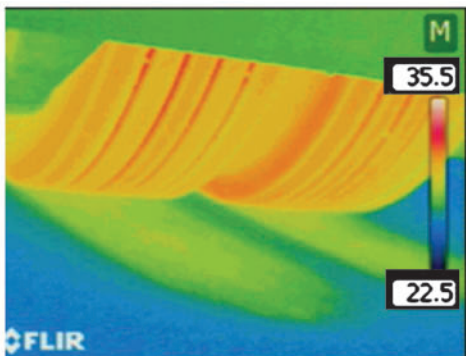


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

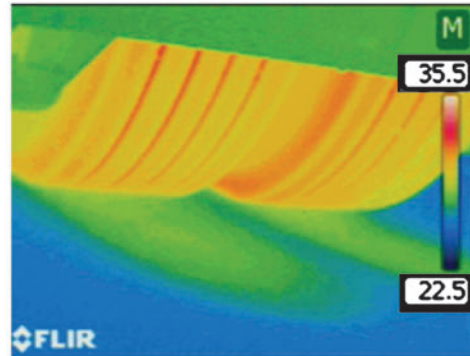


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

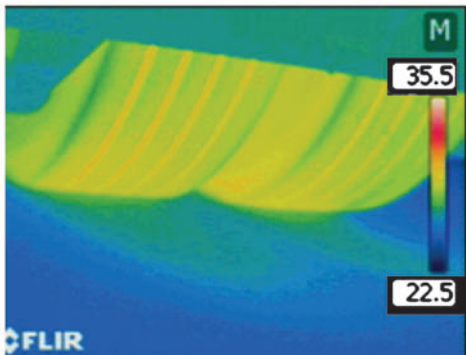


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min



Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

## V2.2 IR auf Räder von hinten

gewählter Temperaturbereich:

Bilder: 1-8 22 - 35 °C

Bilder: -

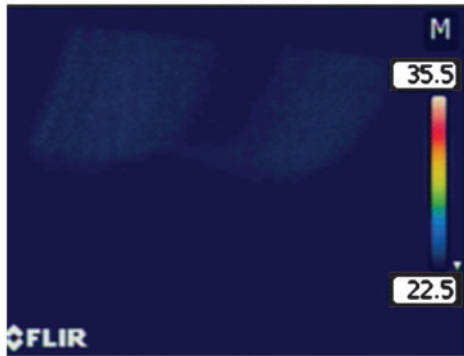


Bild 1 - Versuchsdauer: 0h 5min

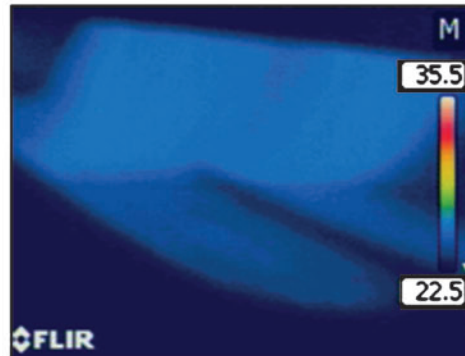


Bild 2 - Versuchsdauer: 0h 30min

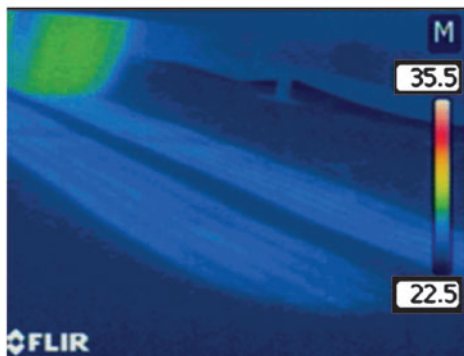


Bild 3 - Versuchsdauer: 1h 00min

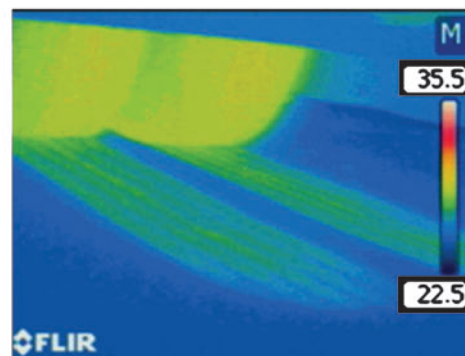


Bild 4 - Versuchsdauer: 2h 00min

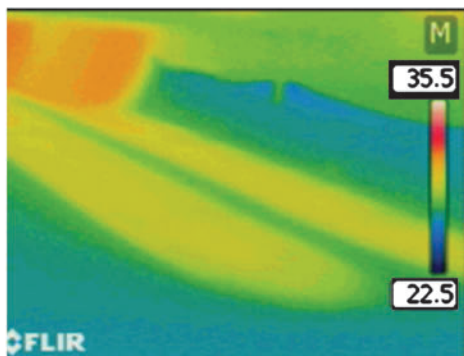


Bild 5 - Versuchsdauer: 4h 59min

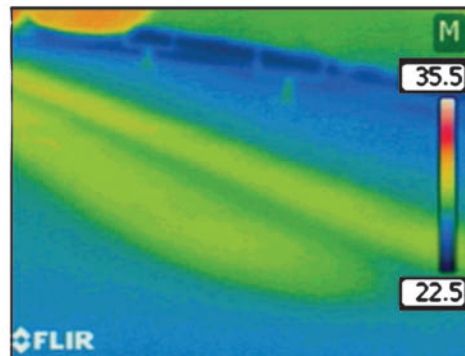


Bild 6 - Versuchsdauer: 5h 04min

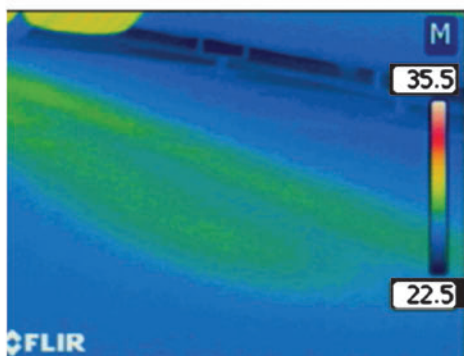


Bild 7 - Versuchsdauer: 5h 30min

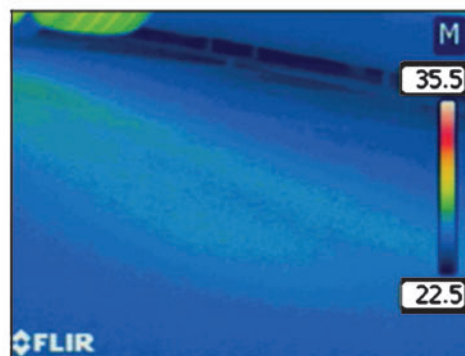


Bild 8 - Versuchsdauer: 6h 00min

### 3.A IR Bilder Auswertung

#### Belastungsphase

Bezeichnung	Versuchsdauer	auf LIM		auf Räder vorne		auf Räder hinten					
		LIM oben	LIM unten	Räder vorne	Asphalt vorne	Räder hinten	Asphalt hinten				
V1.1	0 h 5 min	34	0	26	0	24	0	25	0	25	0
	0 h 30 min	42	8	28	2	26	2	27	2	26	1
	1 h 00 min	45	11	31	5	29	5	29	4	27	2
	2 h 00 min	48	14	33	7	30	6	30	5	29	4
	5 h 00 min	51	17	35	9	34	10	34	9	32	7
V1.2	0 h 5 min	38	0	27	0	26	0	26	0	25	0
	0 h 30 min	42	4	30	3	27	1	28	2	26	1
	1 h 00 min	45	7	32	5	29	3	29	3	27	2
	2 h 00 min	47	9	34	7	31	5	31	5	29	4
	5 h 00 min	54	16	36	9	34	8	34	8	32	7
V2.1	0 h 5 min	29	0	24	0	24	0	22	0	22	0
	0 h 30 min	42	13	25	1	23	-1	25	3	23	1
	1 h 00 min	44	15	27	3	26	2	28	6	25	3
	2 h 00 min	45	16	30	6	28	4	29	7	27	5
	5 h 00 min	47	18	32	8	28	4	31	9	29	7
V2.2	0 h 5 min	28	0	26	0	25	0	22	0	22	0
	0 h 30 min	40	12	27	1	26	1	25	3	24	2
	1 h 00 min	43	15	29	3	27	2	28	6	26	4
	2 h 00 min	44	16	31	5	29	4	29	7	27	5
	5 h 00 min	50	22	32	6	31	6	31	9	30	8
Mittelwerte der Max	50,5	18,3	46,3	33,8	8,0	31,8	7,0	32,5	8,8	30,8	7,3
Max von Max	54	22	48	36	9	34	10	34	9	32	8
Min von Max	47	16	45	32	6	28	4	31	8	29	7
Diff	7	6	3	4	3	6	6	3	1	3	1
V1._ Mittelwert der Max	52,5	16,5	47,5	35,5	9	34	9	34	8,5	32	7
Max von Max	54	17	48	36	9	34	10	34	9	32	7
Min von Max	51	16	47	35	9	34	8	34	8	32	7
Diff	3	1	1	1	0	0	2	0	1	0	0
V2._ Mittelwert der Max	48,5	20	45	32	7	29,5	5	31	9	29,5	7,5
Max von Max	50	22	45	32	8	31	6	31	9	30	8
Min von Max	47	18	45	32	6	28	4	31	9	29	7
Diff	3	4	0	0	2	3	2	0	0	1	1

Bezeichnung	Versuchsdauer	auf LIM			auf Räder vorne			auf Räder hinten					
		oben	Diff.	unten	Räder	Diff.	Asphalt	Räder	Diff.	Asphalt	Diff.		
V1.1	5 h 00 min	51	0	48	0	35	0	34	0	34	0	32	0
	5 h 05 min	51	0	45	-3	35	0	33	-1	33	-1	30	-2
	5 h 30 min	43	-8	43	-5	34	-1	30	-4	31	-3	29	-3
	6 h 00 min	40	-11	40	-8	33	-2	29	-5	29	-5	28	-4
V1.2	5 h 00 min	54	0	47	0	36	0	34	0	34	0	32	0
	5 h 05 min	54	0	45	-2	36	0	33	-1	34	0	31	-1
	5 h 30 min	43	-11	40	-7	34	-2	31	-3	32	-2	30	-2
	6 h 00 min	40	-14	40	-7	32	-4	30	-4	31	-3	30	-2
V2.1	5 h 00 min	47	0	45	0	32	0	28	0	31	0	29	0
	5 h 05 min	49	2	45	0	30	-2	27	-1	30	-1	28	-1
	5 h 30 min	42	-5	40	-5	28	-4	26	-2	29	-2	27	-2
	6 h 00 min	40	-7	38	-7	27	-5	25	-3	27	-4	25	-4
V2.2	5 h 00 min	50	0	45	0	32	0	31	0	31	0	30	0
	5 h 05 min	51	1	44	-1	32	0	30	-1	31	0	29	-1
	5 h 30 min	41	-9	38	-7	31	-1	29	-2	30	-1	27	-3
	6 h 00 min	40	-10	37	-8	28	-4	27	-4	29	-2	26	-4

Mittelwerte der Min	40,0	-10,5	38,8	-7,5	30,0	-3,8	27,8	-4,0	29,0	-3,5	27,3	-3,5
Mittelwert	40	-7	40	-7	33	-2	30	-3	31	-2	30	-2
Max von Min	40	-14	37	-8	27	-5	25	-5	27	-5	25	-4
Min von Min	0	7	3	1	6	3	5	2	4	3	5	2
Diff												

V1_ Mittelwert der Min	40	-12,5	40	-7,5	32,5	-3	29,5	-4,5	30	-4	29	-3
Max von Min	40	-11	40	-7	33	-2	30	-4	31	-3	30	-2
Min von Min	40	-14	40	-8	32	-4	29	-5	29	-5	28	-4
Diff	0	3	0	1	1	2	1	1	2	2	2	2

V2_ Mittelwert der Min	40	-8,5	37,5	-7,5	27,5	-4,5	26	-3,5	28	-3	25,5	-4
Max von Min	40	-7	38	-7	28	-4	27	-3	29	-2	26	-4
Min von Min	40	-10	37	-8	27	-5	25	-4	27	-4	25	-4
Diff	0	3	1	1	1	1	2	1	2	2	1	0

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2012

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen  
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung  
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren  
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

## 2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung  
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden  
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts  
Durner € 15,00

## 2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control  
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung  
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier  
Jansen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn  
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen  
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®  
Kunz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangs-gemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht  
Radenberg, Miljković, Schäfer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung  
Müller, Seidel, Böhm  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten  
Hüniger, Börner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten  
Villaret, Frohböse, Jähnig, Karcher, Niessen, Buch, Zander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche  
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)  
Neubeck, Wiesebrock  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen  
Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung  
Kemper, Schacht, Klaproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel  
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren  
Dudenhöfer, Rückert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel  
Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt  
Böhm, Beara  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt  
Wistuba, Alisov, Isailović  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen  
R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb  
Wacker, Scherckenbach, Rabe, Golkowski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial  
Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 - 2013  
Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern  
Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

## 2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden  
Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften  
Radenberg, Nytus, Gehrke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette  
Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels  
Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)  
Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)  
Alisov, Wistuba  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt  
Zander, Buch, Birbaum  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen  
Schellenberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt  
Mollenhauer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisingerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes  
Wistuba, Isailović  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein  
Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau  
Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte  
Renken, Wistuba  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme  
Wacker, Scherckenbach, Jansen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. + (0)421/3 69 03-53 · Fax + (0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)