

**Nutzung der Kerntemperaturvorhersage
zur Verdichtung von Asphaltmischgut im Straßenbau**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Jochen Wendebaum

aus Neunkirchen (Saar)

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Juli 2004

Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Fritz Gehbauer, M.S.

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel

Kurzfassung

Schäden an Asphaltsschichten beispielsweise im Straßen- oder Flughafenbau sind häufig auf eine mangelhafte Verdichtungsarbeit während der Herstellung zurückzuführen. Durch die Verdichtung des Asphaltes ausserhalb eines vom Material und den beteiligten Verdichtungsgeräten abhängigen Temperaturbereiches wird ein Verdichtungsergebnis erzielt, das keine ausreichende Dauerhaftigkeit aufweist. Wird bei zu hohen Temperaturen verdichtet, drückt sich die Walze in den Asphalt ein, was zu einer Wellenbildung führt. Ist das Material zu kalt, ist es aufgrund einer zu hohen Steifigkeit nicht mehr verformbar und somit auch nicht mehr weiter verdichtbar.

Damit nicht ausserhalb des optimalen Temperaturbereiches verdichtet wird, benötigt der Maschinenführer die Angabe der Asphalttemperatur. Die meisten neueren Verdichtungswalzen sind deshalb mit Infrarotsensoren ausgerüstet, die die Oberflächentemperatur messen, die dem Maschinenführer angezeigt wird. Jedoch ist die Angabe der Oberflächentemperatur wegen ihrer großen, von vielen Faktoren abhängigen Streuung sehr ungenau und daher nur bedingt für die Einschätzung der Materialtemperatur nutzbar. Die Temperatur in der Mitte der Schicht erlaubt eine deutlich bessere Beurteilung der Verdichtbarkeit, ist jedoch nicht direkt messbar.

Die vorliegende Arbeit hat die Entwicklung eines Systems zum Inhalt, das die Kerntemperatur der Asphaltsschicht unter der Walze während des Einbaus vorhersagt und dem Walzenführer damit eine Hilfestellung für eine bessere Verdichtungsarbeit bietet. Die einzelnen Komponenten des Systems (Sensoren, Berechnungsmodul, Anzeige) werden nacheinander betrachtet.

Nach der Beschreibung der Grundlagen der Asphaltstraßenbaus mit einer Betrachtung der beteiligten Maschinen und Materialien in Kapitel 2 werden die benötigten Prozessdaten und deren Erfassung beleuchtet (Kapitel 3). Die wichtigsten Messungen sind dabei Schichtdicke, Materialtemperatur, Windgeschwindigkeit und -temperatur sowie die Temperatur des Untergrundes, die teilweise nur am Ferti-ger gemessen werden können um dann per Funk zur Walze übertragen zu werden. Kapitel 3 beinhaltet die Diskussion der Messmethodik und die daraus resultierenden Sensoren sowie die Wahl der Sensorpositionen.

Der Bestimmung der Kerntemperatur und deren Abhängigkeit von der Zeit wird ein mathematisches Modell zugrunde gelegt, das in Kapitel 4, aufbauend auf schon existierenden eindimensionalen Abkühlungsmodellen, dargestellt wird. Dabei wird ausgehend von thermodynamischen Grundlagen und einer Literatursichtung ein Finite-Differenzen-Modell aufgezeigt und der entsprechende Berechnungs-algorithmus in der Programmiersprache C entwickelt. Das Ergebnis ist eine numerische Abkühlkurve, die mit Hilfe einer Approximation in eine polynomische Funktion umgewandelt wird. Somit ist eine Beschreibung der Abkühlung mit wenigen Parametern möglich. Zur Überprüfung der Genauigkeit des Modells werden in Abschnitt 4.7 Temperaturmessungen von verschiedenen Baustellen mit dem eigenen und zwei weiteren Modellen aufgezeigt und wertend verglichen.

In Kapitel 5 wird, aufbauend auf den Erkenntnissen der vorherigen Kapitel, ein Gesamtsystem entworfen und dessen Einzelkomponenten diskutiert. Für die Datenübertragung zwischen den einzelnen Maschinen per Funk wird die zu erwartende Datenmenge und die daraus resultierenden möglichen Übertragungssysteme aufgezeigt. Dann wird auf den Prozessorkern eingegangen, der die Berechnungen

und das Datenmanagement sowie die Positionierung verarbeitet. Zuletzt wird in diesem Kapitel die Benutzerschnittstelle entwickelt und ein Entwurf gezeigt.

Das bis hier entwickelte System, das auf Messungen auf dem Fertiger und der Übertragung der Messwerte zu den Verdichtungsgeräten basiert, hat einen hohen Einrichtungsaufwand, der zu hohen Kosten und damit zu einer geringen Marktakzeptanz führt. Deshalb wird in Kapitel 6 die Möglichkeit einer Umsetzung eines solchen Systems auf einer einzelnen Walze ohne Beteiligung des Fertigers diskutiert. Dabei wird in erster Linie auf die Ermittlung der Messwerte eingegangen, die für die Berechnung wichtig sind.

Die praktische Umsetzung des bis hierher entwickelten Systems in einen Prototypen wird in Kapitel 7 beschrieben. Die Erstellung dieses Prototypes wird in Zusammenarbeit mit der Firma MOBA Mobile Automation AG durchgeführt. Dazu werden in diesem Kapitel die Systemkomponenten aufgelistet und die Schnittstellen zwischen den einzelnen Teilen beschrieben. Als Prozessorkern wird ein Infineon XC164CS Mikrocontroller gewählt. Die Fertigstellung des Prototypen ist für den Sommer 2004 geplant.

Abstract

Damages of asphalt layer in the construction of roads or airports are often resulting from a deficient compaction work during the construction process. The compaction of asphalt outside a temperature range that is depending on the material and the used machines leads to a compaction result which has no sufficient durability. If the compaction is performed at too high temperatures, the compactor pushes into the material and creates waves. A too low temperature leads to a high stiffness of the asphalt which becomes uncompactable.

To be able to do the compaction in the right temperature range, the compactor driver needs the information of the asphalt temperature. Therefore, most of the modern compactors are equipped with infra-red sensors to monitor the surface temperature and to present it to the driver. The usability of the surface temperature has to be doubted as it depends on many factors and is therefore imprecise and not a good representation of the material temperature. The core temperature of the layer would allow a much better evaluation of the ability for compaction, but a direct measurement of the core temperature is not possible.

In this work a system is developed that predicts the core temperature of an asphalt layer below a compactor based on several sensor measurements. This system can be a supporting help for the compactor driver to perform a higher quality compaction. All components of the system like sensors, calculation modules, display, are treated in this thesis.

After the description of the machinery and the materials of the road construction process in chapter 2, the needed process data and their acquisition are regarded in chapter 3. The most important measurements are the layer thickness, the material temperature, wind speed and temperature and the temperature of the base layer. Some of these measurements can only be taken on the paver, which are then transferred to the compactor via a radio link. The chapter contains the discussion of the measurement method and the corresponding sensors and the choice of appropriate sensor positions.

To determine the core temperature and its dependency on time, a mathematical model is underlaid which is discussed in chapter 4. This model is based on existing one-dimensional cooling models. Starting at the thermodynamic basics and a literature study, a finite-differences-model is shown and the corresponding calculation algorithm is coded in the programming language C. The result of the calculation is a numerical cooling curve which is converted into a polynomial function with an approximation algorithm. With this method, the cooling of the asphalt layer can be described with a few parameters. To verify the precision of the model, temperature measurements from different construction sites are compared with the own model and two other models in chapter 4.7.

Based on the previous chapters, a complete system is designed and discussed in chapter 5. As the data between the machines is transferred via a radio link, the expected amount of data is researched and the available transmission systems examined. Next, the processor is treated, which is responsible for data handling, the cooling calculation and the positioning. The chapter ends with the design and presentation of the user interface.

The system developed so far is based on measurements on the paver which are transmitted to the com-

pactors. It is difficult to install which leads to high costs which is a disadvantage. To meet this objection, an alternative system is examined in chapter 6, where a system without the availability of measurements on a paver is developed and the possibility of the acquisition of sensor values on the compactor is discussed.

The development of a prototype system is presented in chapter 7. In collaboration with the firm MOBA Mobile Automation AG a prototype is designed and created. In this chapter, the system components are listed and the interfaces between the components are discussed. As a processor, an Infineon XC164CS microcontroller is used. The prototype is planned to be presented in summer 2004.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2. Maschinen und Materialien im Asphaltstraßenbau	4
2.1 Aufbau von Asphaltbefestigungen	5
2.1.1 Einbaumethodik	6
2.2 Maschinen im Asphaltstraßenbau	7
2.2.1 Straßenfertiger	7
2.2.2 Walzen	9
2.2.3 Automatisierung von Asphaltbaumaschinen	11
2.2.4 Qualitätsmanagementsysteme	11
2.3 Asphalt als Straßenbaustoff	12
2.3.1 Bestandteile und Zusammensetzung	12
2.3.2 Materialeigenschaften von Walzasphalt	14
3. Prozessdatenerfassung	18
3.1 Messung der benötigten Prozessdaten auf dem Fertiger	19
3.1.1 Schichtdickenmessung	19
3.1.2 Materialtemperatur beim Einbau	19
3.1.3 Windgeschwindigkeit	20
3.1.4 Temperatur des Untergrundes	20
3.1.5 Umgebungstemperatur	21
3.2 Ermittlung der Maschinenposition	21
3.2.1 Positionsbestimmung	21
3.2.2 Positionsauswertung	22
3.3 Sensorplatzierung	24
3.3.1 Materialtemperatur	24
3.3.2 Windgeschwindigkeit und Umgebungstemperatur	26
3.3.3 Temperatur des Untergrundes	26
3.3.4 Überblick	28
4. Berechnung der Asphaltabkühlung	29
4.1 Qualität der Abkühlungsvorhersage	29
4.2 Berechnungsgrundlagen	30
4.2.1 Allgemeines	30
4.2.2 Randbedingungen	32
4.3 Literatursichtung	34
4.4 Abkühlungsmodell	36
4.4.1 Vereinfachungen	37
4.4.2 Berechnungsgeschwindigkeit	38

4.4.3 Berücksichtigung der Verdichtung	39
4.5 Approximation	39
4.5.1 Exponentielle Näherung	39
4.5.2 Polynomische Näherung	40
4.5.3 Vergleich und Wertung	40
4.6 Messungen und Vergleich	40
4.6.1 Vorüberlegung	40
4.6.2 Messeinrichtung, Messprinzip	41
4.6.3 Messungen in Oskarshamn, Schweden	42
4.6.4 Messungen in Karlsruhe	47
4.6.5 Auswertung	54
5. Systementwurf und Wahl der Hardwarekomponenten	55
5.1 Systementwurf	55
5.2 Datenübertragung	56
5.2.1 Datenmenge	56
5.2.2 Mögliche Technologien	57
5.3 Hardwarewahl und Systementwurf	58
5.3.1 Anforderungen	58
5.3.2 Mikroprozessoren und Mikrocontroller	59
5.4 Benutzerschnittstelle	61
5.4.1 Anforderungen	61
5.4.2 Entwurf der Bedienerchnittstelle	62
6. Alternativsystem ohne Fertiger	65
6.1 Überblick	65
6.2 Ermittlung der Messwerte	66
6.2.1 Schichtdicke	66
6.2.2 Materialtemperatur beim Einbau	67
6.2.3 Windgeschwindigkeit	67
6.2.4 Temperatur des Untergrundes	68
7. Entwurf und Entwicklung eines Prototypsystems	69
7.1 Konzeption	70
7.2 Aufbau des Gerätes	71
7.2.1 Mikrocontroller	71
7.2.2 Platinen	71
7.3 Datenfluss zwischen den Komponenten	73
8. Zusammenfassung und Ausblick	74
9. Literatur	76

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Abkühlung von verschiedenen dicken Asphaltlagen [HUTSCHENREUTHER98]	2
Abb. 2.1:	Straßenbau und Anforderungen [KAUFMANN03].	5
Abb. 2.2:	Ansicht eines Straßenfertigers.	7
Abb. 2.3:	Querschnitt durch einen Straßenfertiger (nach [ASKAL01]).	8
Abb. 2.4:	Prinzipskizze „schwimmende Bohle“ [DYNAPAC01]	8
Abb. 2.5:	Hochverdichtungsbohle von Vögele mit Stampfer, Vibratoren und zwei Pressleisten [VÖGELE]	9
Abb. 2.6:	Eignung von Walzen für verschiedene Schichten [BOMAG03].	10
Abb. 2.7:	Aufbau von Bitumen.	13
Abb. 2.8:	Das Verhältnis zwischen Schichtdicke und Größtkorn [GEHBAUER00].	14
Abb. 2.9:	Rheologisches 5-Parameter-Modell von [KRASS71].	16
Abb. 2.10:	Qualitativer Verlauf der Verformung von Asphalt unter konstanter Belastung nach [KREBS81A]	17
Abb. 3.1:	Windgeschwindigkeit und gefilterte Geschwindigkeit über einen Zeitraum von 80 Minuten, Messwerte aus Baustellenmessung [JURASZ03 ET AL].	21
Abb. 3.2:	Sensoren für Temperatur (links, infrarot) [WEBMIKRON] und Windgeschwindigkeit (rechts, Anemometer) [WEBEKOPOWER]	21
Abb. 3.3:	Vergleich der rasterbasierten (siehe A.8 und [WEBGEODYN]) und vektorbasierten Darstellung [JURASZ03B].	22
Abb. 3.4:	Absolute Position und relative Position	23
Abb. 3.5:	Linearisierte kurvilineare Koordinaten (nach [JURASZ03B])	24
Abb. 3.6:	mögliche Positionen für den Materialtemperatursensor	24
Abb. 3.7:	Beispiel für die Verwendung eines PT100-Sensors als Materialtemperatursensor [JURASZ03 ET AL]	25
Abb. 3.8:	Straßenfertiger mit Sensoren: links: Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur, rechts: Infrarot-Temperatur [JURASZ03 ET AL].	26
Abb. 3.9:	Veränderung der gemessenen Schichtdicke an einer Fertigerbohle über einen Zeitraum von 60 min [JURASZ03 ET AL].	27
Abb. 3.10:	Messprinzip zur Ermittlung der Schichtdicke [HORN03]	28
Abb. 3.11:	gewählte Sensorpositionen: 1: Materialtemperatur, 2: Windgeschwindigkeit, 3: Untergrundtemperatur, 4: Neigungssensoren, 5: Seilzugsensor	28
Abb. 4.1:	Abdrücken der Asphaltkante mit einer Kantenrolle	31
Abb. 4.2:	Bedeutung der Krümmung für die zeitliche Änderung der Temperatur nach Gleichung (3) . . .	31
Abb. 4.3:	PaveCool-Software des Minnesota Department of Transportation.	36
Abb. 4.4:	exemplarische Messung mit Darstellung der Abkühlungsvorhersage sowie polynomischer und exponentieller Approximation.	40
Abb. 4.5:	Durchführung der Messungen.	42
Abb. 4.6:	Messung der Temperatur während des Straßenbauvorganges	42

Abb. 4.7:	Straßenbaustelle in Oskarshamn, Schweden	43
Abb. 4.8:	Messpunkt 1: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	44
Abb. 4.9:	Messpunkt 2: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	45
Abb. 4.10:	Messpunkt 3: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	45
Abb. 4.11:	Messpunkt 4: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	46
Abb. 4.12:	Baumaßnahme in der Georg-Friedrich-Straße am 11. Oktober 2003 in Karlsruhe	47
Abb. 4.13:	Messpunkt 1: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	48
Abb. 4.14:	Messpunkt 2: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	48
Abb. 4.15:	Messpunkt 3: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	50
Abb. 4.16:	Messpunkt 4: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	50
Abb. 4.17:	Messpunkt 5: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	51
Abb. 4.18:	Messpunkt 6: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	52
Abb. 4.19:	Messpunkt 7: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	53
Abb. 4.20:	Messpunkt 8: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten	53
Abb. 5.1:	Entwurf des Gesamtsystems	56
Abb. 5.2:	Abgrenzung der Begriffe Mikroprozessor, Mikrorechner und Mikrorechnersystem [BRINKSCHULTE02].	60
Abb. 5.3:	Rasterentwurf für Benutzerschnittstelle	63
Abb. 5.4:	Entwurf der Benutzerschnittstelle mit beispielhafter Darstellung des LED-Rasters	64
Abb. 6.1:	Berührungslose Messung der Dicke der Asphaltsschicht (nach [HORNG]).	66
Abb. 6.2:	Messung der Materialtemperatur auf der Walze.	67
Abb. 6.3:	Windgeschwindigkeit, scheinbarer Wind und Fahrtwind.	67
Abb. 7.1:	Aufbau des Prototypen aus zwei Platinen (Seitenansicht)	72
Abb. 7.2:	Ansicht der Frontplatine mit LEDs, Tasten und Aussparung für die Graphikanzeige	72
Abb. 7.3:	Datenfluss zwischen den Hardwarekomponenten	73
Abb. 7.4:	LED-Ansteuerung mit Data-Clock-Enable.	73

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1:	Grenzwerte für die Unebenheit bei maschinellm Einbau auf Straßen der Bauklassen SV, I bis VI [ZTV-A]	6
Tab. 1.2:	physikalische Eigenschaften von Bitumen	13
Tab. 1.3:	Bitumensorten und deren Temperatur beim Einbau	13
Tab. 1.4:	Wärmeleitfähigkeit und -kapazität häufig verwendeter Gesteinsarten aus [ASKAL01][KAVIANIPOUR67], in Klammern der Durchschnittswert	14
Tab. 1.5:	Asphaltnischgutarten und -sorten mit vorgeschriebenen und empfohlenen Schichtdickenbereichen [ZTV-A][GEHBAUER00]	15
Tab. 1.6:	Thermische Eigenschaften von Walzasphalt nach [CHADBOURN98]	16
Tab. 2.1:	Übersicht über gängige Messungen auf Straßenfertigern und Walzen	19
Tab. 3.1:	Konstante Materialparameter für die Berechnung	38
Tab. 3.2:	Eingabemöglichkeiten der Berechnungssoftware von MnDOT und VTI (+: Parameter einstellbar, -: Parameter nicht einstellbar	41
Tab. 3.3:	Umweltbedingungen der Temperaturmessungen bei Oskarshamn, Schweden	43
Tab. 3.4:	Einbaudicken an den Messstellen	43
Tab. 3.5:	Messpunkt 1: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	44
Tab. 3.6:	Messpunkt 2: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	44
Tab. 3.7:	Messpunkt 3: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	46
Tab. 3.8:	Messpunkt 4: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	46
Tab. 3.9:	Umweltbedingungen der Temperaturmessungen in Karlsruhe	47
Tab. 3.10:	Einbaudicken an den Messstellen	47
Tab. 3.11:	Messpunkt 1: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	49
Tab. 3.12:	Messpunkt 2: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	49
Tab. 3.13:	Messpunkt 3: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	49
Tab. 3.14:	Messpunkt 4: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	49
Tab. 3.15:	Messpunkt 5: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	51
Tab. 3.16:	Messpunkt 6: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	51
Tab. 3.17:	Messpunkt 7: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	52
Tab. 3.18:	Messpunkt 8: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT	52
Tab. 3.19:	Zusammenfassung der Fehler aus allen Messungen	54
Tab. 4.1:	Datenübertragung zwischen Fertiger und Walze: Datenbeschreibung, Größe und Frequenz	57
Tab. 4.2:	Vergleich der verfügbaren Technologien für Datenübertragung per Funk	57
Tab. 4.3:	Mikrocontroller verschiedener Hersteller (nach [BRINKSCHULTE02])	60
Tab. 4.4:	Beispiel für Inhalte einer LED-Anzeige auf der Walze	615
Tab. 4.5:	angenommene Temperatur des Untergrundes in Abhängigkeit von der Jahreszeit	68

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) der Universität Karlsruhe (TH) und bei der Firma MOBA Mobile Automation AG in Elz. Die Idee zu dieser Arbeit erwuchs aus meiner Mitarbeit im OSYRIS-Projekt („Open System for Road Information Support“), einem von der Europäischen Union finanzierten Forschungs- und Entwicklungsprojekt, das vom TMB koordiniert wurde und für das maßgebliche Entwicklungen sowohl am TMB als auch von der Firma MOBA durchgeführt wurden.

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Fritz Gehbauer für die Möglichkeit, diese Arbeit im Rahmen des OSYRIS-Projektes durchführen zu können und die Betreuung und Unterstützung dieser Arbeit, sowie für viele hilfreiche Vorschläge und Anregungen.

Desweiteren danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Wolfram Ressel vom Institut für Straßenplanung und Straßenbau der Universität Stuttgart für die informativen Gespräche und seine Bereitschaft, diese Arbeit ebenfalls zu betreuen.

Weiterer Dank gebührt der Firma MOBA und in erster Linie Herrn Dipl.-Ing. Alfons Horn, der es möglich machte, das in dieser Arbeit entworfene System in die Praxis umzusetzen und ein marktfähiges Produkt zu entwickeln sowie für seine Ideen und Anregungen zur Optimierung des Systems.

Ich danke meiner Frau, die mir trotz aller Umstände stets hinreichend Zeit und Raum gelassen hat, um diese Arbeit zu vollenden.

Zu guter Letzt danke ich meinen ehemaligen Kollegen am TMB, die am OSYRIS-Projekt mitgewirkt haben, für ihre Ideen, Diskussionen und Beiträge zu dieser Arbeit. Ich hoffe, dass der Stand der Straßenbautechnik mit der erfolgreichen Durchführung des OSYRIS-Projektes ein Stück weitergetragen werden konnte.

1. Einführung

1.1 Zielsetzung

Der Asphaltbau ist aufgrund der wiederkehrenden und sich ähnelnden Arbeitsvorgänge hoch mechanisiert. Die ständige Weiterentwicklung der am Bauvorgang beteiligten Baumaschinen hat in den letzten Jahren zu immer umfangreicheren und genaueren Meß- und Steuerungssystemen geführt. Moderne, von verschiedenen Maschinenherstellern angebotene Qualitätsmanagementsysteme, die eine ortsgenaue Dokumentation des Bauprozesses ermöglichen, werden jedoch aufgrund ihrer hohen Anschaffungskosten nur in seltenen Fällen eingesetzt. Dabei sind in erster Linie die Verwendung von Positionierungslösungen basierend auf dem Global Positioning System GPS sowie die eingesetzten Industrie-Computer für die hohen Kosten verantwortlich. Insbesondere bei Bauprojekten, die auf Betreibermodellen basieren, lohnt sich der Einsatz teurer Qualitätsmanagementsysteme, denn hier ist das ausführende Unternehmen in der Regel verpflichtet, die Funktion des hergestellten Bauwerks „Straße“ über einen langen Zeitraum zu gewährleisten. Die Verlängerung der Instandhaltungsintervalle durch eine bessere Qualität kann zu einer geringeren Anzahl von zu leistenden Reparaturarbeiten innerhalb des Gewährleistungszeitraums führen und somit zu Kosteneinsparungen, die die Anschaffung eines Qualitätsmanagementsystems rechtfertigen.

Desweiteren muss für ein erfolgreiches Qualitätsmanagement die gesamte Maschinenflotte miteinander

kommunizieren und Prozessdaten austauschen können. Da es jedoch bisher keinen Standard für die intermaschinelle Kommunikation gibt und kaum ein Hersteller alle beteiligten Maschinentypen produziert, kann eine solche Kommunikation nicht stattfinden. Das nachträgliche Ausrüsten der Maschinen wird wiederum zu kostspielig.

Neuere Entwicklungen in öffentlich finanzierten Forschungsprojekten im Bereich des Straßenbaus schaffen die Grundlage für eine umfangreiche maschinen- und informationstechnische Weiterentwicklung im Bereich des Straßen- und damit des gesamten Asphaltbaus. Die Entwicklung von dokumentierten, offenen Kommunikationsstandards erlauben es den Maschinenentwicklern, Daten von anderen Maschinen zu empfangen und zu verarbeiten. Die Möglichkeit dieses Datenaustausches unter den am Bauprozess beteiligten Maschinen gestattet eine messtechnische Verknüpfung der Daten und Prozesse. Es können beispielsweise Messdaten auf dem Fertiger erfasst werden und an die Walzen übertragen werden.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an:

Schäden von Asphaltstraßen und anderen Anwendungsgebieten im Asphaltbau, die auf die Herstellung zurückgeführt werden können, treten oft durch eine mangelhafte Verdichtungsarbeit während der Herstellung auf, die wiederum häufig auf den Einsatz von Walzen bei zu niedrigen Temperaturen des Asphaltes zurückzuführen ist. Die Asphalttemperatur ist von zentraler Bedeutung im Asphaltbau, da sich die physikalischen Eigenschaften des Materials sehr stark mit der Temperatur verändern (viskoelastisches Verhalten). Daher darf Asphalt nur in einem bestimmten Temperaturbereich verdichtet werden (vgl. Abb. 1.1).

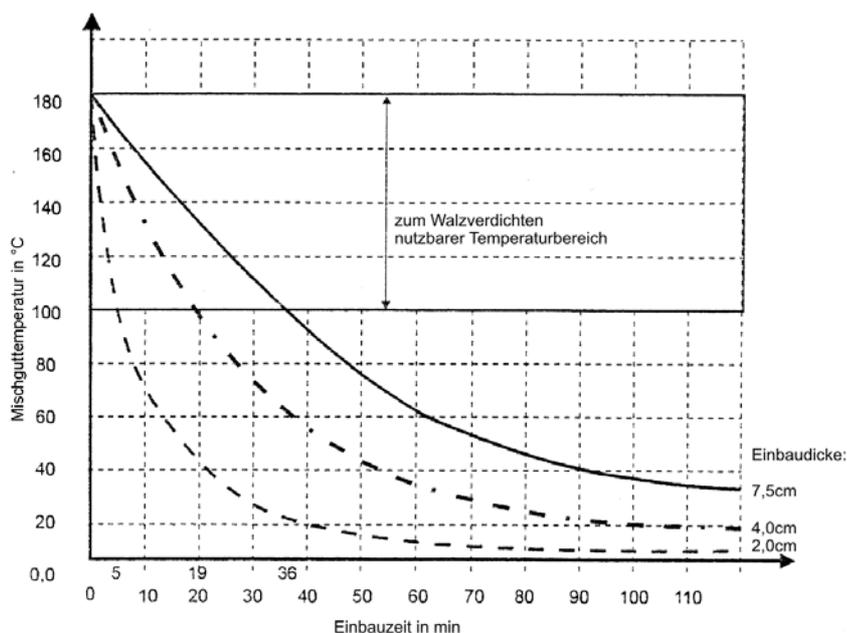


Bild 1.1: Abkühlung von verschiedenen dicken Asphaltlagen [HUTSCHENREUTHER98]¹

Die Walzenhersteller bieten die (Infrarot-) Messung der Oberflächentemperatur und deren Darstellung auf der Walze an, jedoch muss die Verwendung der Oberflächentemperatur als sinnvolle Information

1. Einbaubedingungen: Luft: +2 - +4 °C, Unterlage: -2 - +2 °C, trocken, kein Wind

aufgrund angezweifelt werden, da sie sehr stark variieren kann ohne eine bedeutende Auswirkung auf das direkt darunterliegende Material. Nur eine Darstellung der Kerntemperatur ist sinnvoll für eine Beurteilung der Verdichtungsfähigkeit des Asphaltmaterials. Die Ermittlung der Kerntemperatur kann aber wiederum nur auf Messungen auf dem Fertiger aufbauen. Die vorliegende Arbeit hat den Entwurf eines Systems zum Ziel, das es erlaubt, basierend auf Messungen am Fertiger, die Kerntemperatur von Asphaltsschichten während des Bauvorgangs vorherzusagen, diese Daten an die Walze zu übertragen und dem Walzenfahrer komprimiert und in einer einfachen Art darzustellen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit orientiert sich an der Richtung des Datenflusses des entwickelten Gesamtsystems, beginnend bei der Messwerterfassung auf dem Fertiger über die Datenverarbeitung bis zum Entwurf der Benutzerschnittstelle auf der Walze.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen des Asphaltbaus betrachtet. Ein Überblick über den Aufbau einer Straße mit ihren einzelnen Schichten und deren Anforderungen und über die Methoden des Straßenbaus führt zu den im Straßenbau tätigen Maschinen und deren Technologie. Danach wird auf das Material „Asphalt“ und seine einzelnen Bestandteile vor allem in Hinblick auf die Abkühlungseigenschaften eingegangen.

Kapitel 3 diskutiert die Auswahl der benötigten Prozessdaten sowie die technischen Einzelheiten der Messwerterfassung wie Sensorik und Positionierung. Dabei wird werden für alle für das System benötigte Sensoren die optimale Messposition festgelegt.

Im Kapitel 4 wird das Abkühlverhalten von Asphalt untersucht. Es wird ein eindimensionales Berechnungsmodell gewählt und mit Hilfe eines Berechnungsalgorithmus in der Programmiersprache C implementiert. Eine Approximation mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate führt zu einer Annäherung einer einfachen Funktion an die Abkühlkurve. Diese wird anschließend mit Messungen auf verschiedenen Baustellen sowie anderen Berechnungsmodellen verglichen und bewertet.

Die Umsetzung des Berechnungsmodelles in ein Gesamtsystem erfordert einen detaillierten Systementwurf und die Auswahl der Systemkomponenten, worauf in Kapitel 5 eingegangen wird. Überlegungen zur Datenübertragung per Funk zwischen den Maschinen sowie die Erklärung und Auswahl geeigneter Mikrocontroller werden angestellt. Danach werden die Anforderungen an die Benutzerschnittstelle entwickelt und eine mögliche Schnittstelle entworfen.

Aufgrund praktischer Überlegungen wird in Kapitel 6 ein Alternativsystem ohne die Verwendung eines Fertigers diskutiert, das neben einer höheren Robustheit des Gesamtsystems auch geringere Kosten zur Folge hat. Dadurch werden auch Überlegungen zur Neupositionierung der Sensoren durchgeführt.

Kapitel 7 beschreibt den Entwurf und die praktische Entwicklung des im vorigen Kapitel vorgestellten Systems ohne Fertiger bei der Firma MOBA Mobile Automation AG.

Das Kapitel 8 schließt die Arbeit mit Zusammenfassung und Ausblick ab.

2. Maschinen und Materialien im Asphaltstraßenbau

Der Straßenbau umfasst die Bemessung, Herstellung und Erhaltung des Verkehrsnetzes, um dessen Nutzern Sicherheit und Nutzungskomfort zu schaffen und diesen über lange Zeit zu erhalten. Dabei hat das Bauwerk Straße mit seinen Bestandteilen Untergrund, Unterbau und Oberbau die Aufgabe, die aus den auftretenden Verkehrslasten resultierenden Schub- und Biegespannungen abzubauen. Die einzelnen Schichten sollen daher einen kontinuierlichen Steifigkeitsaufbau von unten nach oben zur Oberfläche aufweisen.

Doch nicht nur die Steifigkeitsverteilung des Straßenkörpers ist von Bedeutung sondern auch der Oberflächenzustand, der sich infolge der Verkehrs- und Klimaeinwirkungen ständig verschlechtert und deshalb erhalten werden muss. Um eine hohe Qualität der Asphaltdecken zu gewährleisten, muss während der Herstellung auf die Einhaltung verschiedener Regeln geachtet werden. Dabei spielt neben der Wahl der richtigen Maschinen (siehe Kapitel 2.2) und Materialien (siehe Kapitel 2.3) vor allem die Verarbeitung eine sehr große Rolle. Da das Verhalten des Asphaltmaterials viskoelastisch und damit sehr stark von der Temperatur abhängig ist, muss das Abkühlungsverhalten während des Einbaus berücksichtigt werden.

2.1 Aufbau von Asphaltbefestigungen

Eine Asphaltfahrbahn besteht wie aus Abbildung 2.1 ersichtlich ist, in der Regel aus einer Deckschicht, einer Binderschicht, der Tragschicht, der Frostschuttschicht auf Planum.

Die Hauptaufgabe der *Frostschuttschicht* als 1. Tragschicht ist der Schutz der darüber liegenden Schichten vor Frostschäden. Die darüberliegende 2. *Tragschicht* wird als erste auf den vorbereiteten Untergrund in einem oder mehreren Durchgängen aufgebracht. Sie verteilt die von oben kommenden Lasten auf dem Untergrund. Die *Binderschicht* ist die Verbindungsschicht zwischen der Deckschicht und der Tragschicht. Sie sorgt für eine Verzahnung der Deckschicht mit der Tragschicht und ist sehr hohen Belastungen ausgesetzt. Anforderungen an diese Schicht sind [HUTSCHENREUTHER98]:

- ▶ verteilung der auftretenden Schubspannungen
- ▶ hohe Standfestigkeit
- ▶ Wasserundurchlässigkeit
- ▶ Ermüdungsbeständigkeit

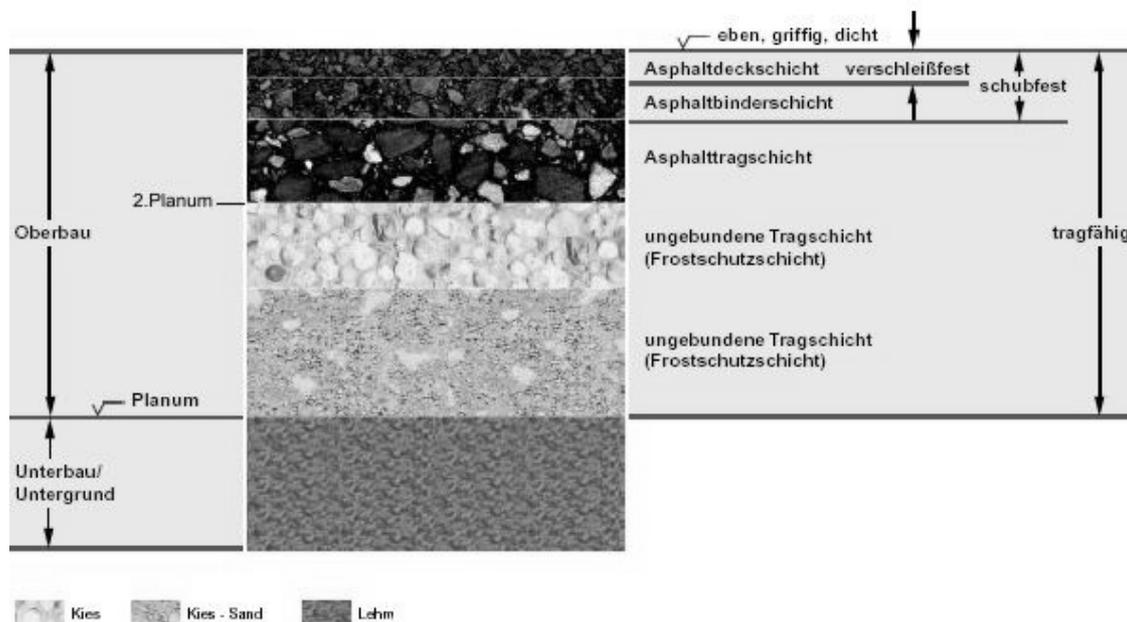


Bild 2.1: Straßenaufbau und Anforderungen [KAUFMANN03]

Die *Deckschicht* steht in unmittelbarem Kontakt mit dem Verkehr. Sie nimmt die Verkehrslast auf und gibt sie an die darunter gelegenen Schichten weiter. Anforderungen an diese oberste Schicht sind [ZTV-A]:

- ▶ Ebenheit in Längs- und Querrichtung
- ▶ Griffigkeit
- ▶ Verformungs- und Verschleißfestigkeit
- ▶ Lärminderung

- ▶ Ableitung von Wasser
- ▶ Geringer Rollwiderstand

An jede dieser drei Asphalt-schichten müssen aufgrund ihrer Lage und Aufgabe unterschiedliche For-derungen gestellt werden: Die Tragschicht ist vor allem auf Tragfähigkeit und Lastverteilung ausge-legt. Die Binderschicht muss die auftretenden Schubspannungen in die Tragschicht übertragen und er-fordert eine große Schubfestigkeit. Die Deckschicht schließlich hat in erster Linie eine große Ver-schleißfestigkeit und deshalb eine hohe Dichte aufzuweisen [GEHBAUER00].

2.1.1 Einbaumethodik

Beim Neubau von Fahrbahnen wird in mehreren Arbeitsschritten vorgegangen. Zu Beginn wird das Planum erstellt, das entsprechend der endgültigen Straßenoberfläche profilgerecht hergestellt werden muss. Ohne ein ebenes Planum ist die Erstellung einer ebenen Straßenoberfläche nicht möglich [HUTSCHENREUTHER98]. Die Anforderungen an die Ebenheit laut ZTV [ZTV-A] sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Grenzwerte für die Unebenheit bei maschinellem Einbau auf Straßen der Bauklassen SV, I bis VI [ZTV-A]

	Unebenheiten in mm innerhalb einer 4 m langen Messstrecke		
	Tragdeckschichten	Binderschichten	Deckschichten
auf nicht mit Bindemittel gebundener Unterlage	≤ 10	≤ 10	-
auf mit Bindemittel gebundener Unterlage mit zulässiger Unebenheit über 6 mm	≤ 10	≤ 6	≤ 6
auf Asphaltunterlage mit zulässiger Unebenheit von höchstens 6 mm	-	-	≤ 4

Auf dem Planum wird die Frostschutzschicht aufgebaut, die in der Regel aus ungebundenem Gesteins-körnungsmaterial besteht. Diese Schicht wird aufgrund ihrer geringeren Materialkosten an das endgül-tige Straßenprofil angeglichen. Abhängig von der Bemessungsstrategie wird auf der Frostschutz-schicht eine Schottertragschicht erstellt.

Die ungebundenen Tragschichten werden mit Erdbewegungsmaschinen wie Bulldozer und Straßenho-beln (Grader) oder Fertigern erstellt und profiliert sowie mit Walzen verdichtet.

Die auf den ungebundenen Tragschichten aufliegende Asphalttragschicht, Asphaltbinderschicht sowie die Deckschicht werden mit Straßenfertigern eingebaut. Das heiße Asphaltmischgut wird mit LKWs zur Einbaustelle transportiert und mit dem Straßenfertiger verteilt. Dabei ist die Bohle des Fertigers als Werkzeug für die Ebenheit sowohl in Quer- als auch in Längsrichtung verantwortlich. Eine Vorver-dichtung wird ebenfalls von der Bohle des Fertigers erreicht. Diese ist, je nach Ausführung der Ma-schine, mit Unwuchten und Stampfern ausgerüstet, deren Betriebsparameter an Material und Schicht-dicke angepasst werden können.

Die endgültige Verdichtung wird durch die Verwendung von Walzen erreicht, deren Typ und Anzahl

an die jeweilige Einsatzsituation angepasst werden muss

2.2 Maschinen im Asphaltstraßenbau

Zur Herstellung von Asphaltdecken werden im allgemeinen zwei verschiedene Typen von Maschinen eingesetzt: Straßenfertiger und Walzen

2.2.1 Straßenfertiger

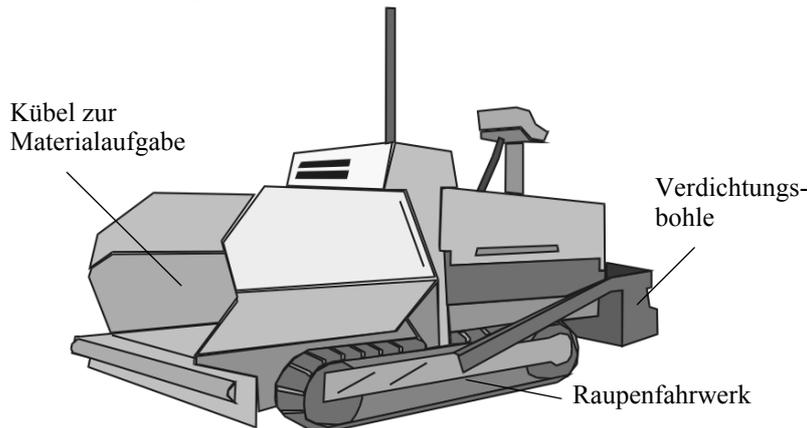


Bild 2.2: Ansicht eines Straßenfertigers

2.2.1.1 Straßenfertiger für Walzasphalt

Straßenfertiger für Walzasphalt (siehe Kapitel 2.3) bestehen aus vier wichtigen Elementen, dem Grundgerät mit Raupen- oder Radfahrwerk, einer Mulde zur Asphaltaufnahme, einem Kratzband, das den Asphalt zur Verteilerschnecke und der Verdichtungsbohle (siehe Abb. 2.2 und 2.3).

Der Vorteil des Raupenfahrwerkes liegt in der Tauglichkeit für wenig tragfähigen Untergrund und ungebundenen Schichten, desweiteren ist es mit einem Raupenfahrwerk aufgrund der erhöhten Stabilität möglich, größere Einbaubreiten zu erzielen. Das Radfahrwerk bietet dagegen den Vorteil größerer Mobilität, der Fertiger kann schneller zwischen verschiedenen Einbaustellen auch im öffentlichen Verkehr versetzt werden.

Zum Einbauen des Asphalts wird der zu verteilende Asphalt mittels LKW in die Mulde gekippt. Von dort transportiert das Kratzband ihn zur Verteilerschnecke, die das Material gleichmäßig auf die gesamte Einbaubreite verteilt. Mit der Verdichtungsbohle wird der Asphalt vorverdichtet, die endgültige Verdichtung wird durch die nachfolgenden Walzen vorgenommen (siehe Kapitel 2.2.2). Einbaubreiten bis 12 m können mit modernen Fertigern genutzt werden bei einer Einbaugeschwindigkeit von ca. 1 km/h. Solche Maschinen erreichen nach [DREES93] bis zu 30 t.

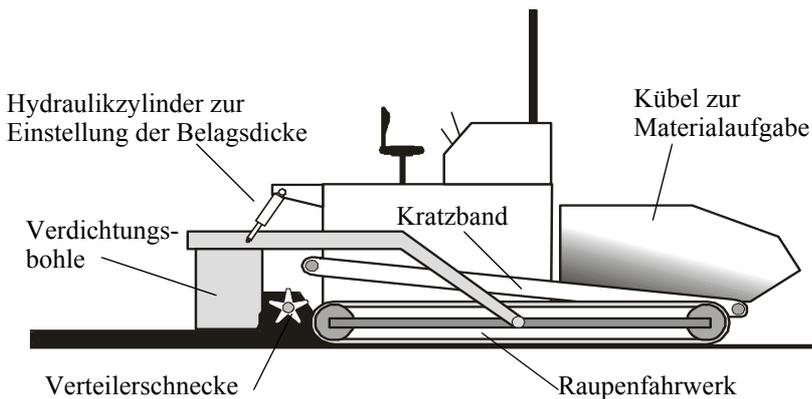


Bild 2.3: Querschnitt durch einen Straßenfertiger (nach [ASKAL01])

Im Regelfall werden Verdichtungsbohlen als „schwimmende Bohlen“ ausgebildet. Darunter versteht man Bohlen, die beim Einbau frei auf dem Mischgut aufliegen und von diesem getragen werden. Die Steuerung der herzustellenden Schichtdicke erfolgt über die Steuerung der Einbaugeswindigkeit und die Höhe des Materials vor der Bohle (siehe Abbildung 2.4) sowie durch die Steuerung von Hydraulikzylindern, an denen die Bohle aufgehängt ist.

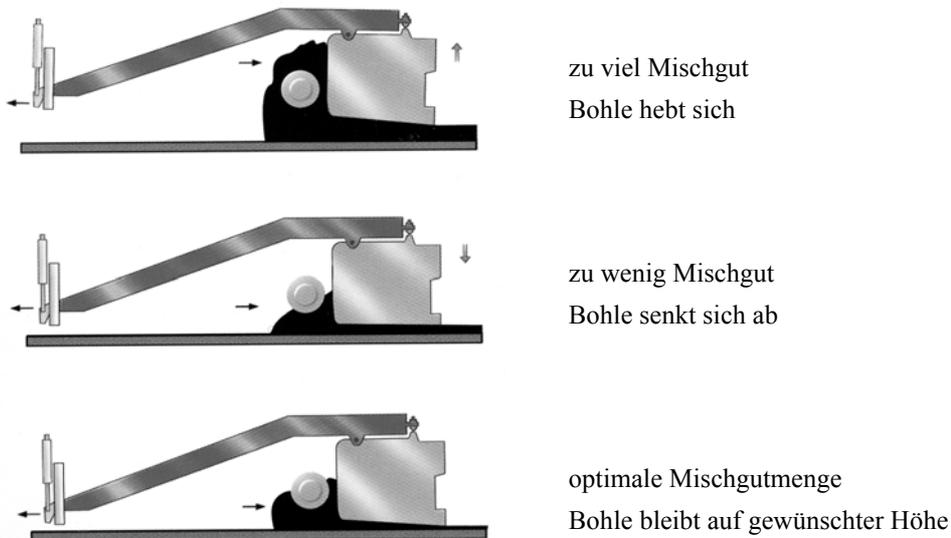


Bild 2.4: Prinzipskizze „schwimmende Bohle“ [DYNAPAC01]

Bei der Weiterentwicklung von Fertigern wird sehr großer Wert auf die weitere Optimierung der Vorverdichtungstechnik gelegt. Ziel dabei ist das Erreichen einer Verdichtung, die eine Minimierung des Walzeneinsatzes erlaubt.

Die erste Vorverdichtung des Asphaltmischgutes erfolgt durch einen Stampfer („Tamber“) (siehe Abbildung 2.5). Unter dem Stampfer wird das Mischgut bis ca. 85% verdichtet¹. Hinter dem Stampfer können senkrecht wirkende Vibratoren angeordnet sein, und dahinter wiederum Pressleisten [VIZI81]. Pressleisten bleiben im Gegensatz zur Stampferleiste in ständigem Kontakt mit dem Belag. Sie werden durch hochfrequente hydraulische Druckimpulse nach unten gedrückt. Die Endverdichtung, die mit

1. Verdichtungsgrad des Marshall-Probekörpers nach DIN 1996 Teil 7

modernen Hochverdichtungsbohlen erreicht werden kann, liegt bei über 90% [DREES93]. Sämtliche Verdichtungselemente sind beheizt, um das Mischgut einbaufähig zu halten.

Die Steuerung der Längsebenheit der Oberfläche und der Einbaudicke erfolgt durch

- ▶ Abtasten eines gespannten Drahtes
- ▶ Abtasten des Planums mit einem Schleppski
- ▶ Positionsmessung mit einem Messrad mit Impulszähler
- ▶ lasergesteuerte Nivellierautomatik

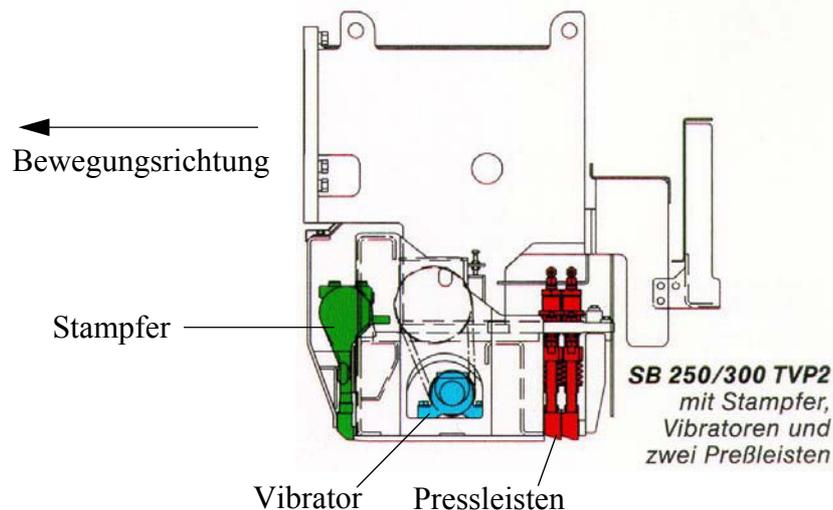


Bild 2.5: Hochverdichtungsbohle von Vögele mit Stampfer, Vibratoren und zwei Pressleisten [VÖGELE]

2.2.1.2 Straßenfertiger für Gußasphalt

Straßenfertiger für Gußasphalt unterscheiden sich von den im vorherigen Kapitel gezeigten Fertigern für Walzasphalt durch das Fehlen von Verdichtungsbohlen. Gußasphaltfertiger sind reine Verteilgeräte, der verteilte und ausgebreitete Gußasphalt wird durch beheizte Abstreifbohlen mit Querbewegung verteilt.

2.2.2 Walzen

Im Asphaltstraßenbau werden nach [DREES93] folgende Arten von Walzen eingesetzt:

- ▶ Statische Dreiradwalze (Glattmantelwalze)
Diese Walzen mit drei Antriebsrädern werden bevorzugt für die Hauptverdichtung sowie das Walzen von Nähten eingesetzt. Ihr Dienstgewicht beträgt im allgemeinen 8 - 15 t.
- ▶ Statische Tandemwalze (Glattmantelwalze)
Hier wird eine Bandage angetrieben, die andere gesteuert. Bei dieser Walze gilt wie bei der Dreiradwalze, daß die Belastung und somit die Verdichtungswirkung durch Wasserballasttanks gesteuert werden kann. Auch hier liegt der Haupteinsatzpunkt bei der Hauptverdichtung und dem Walzen von Arbeitsnähten. Das Dienstgewicht beträgt 6 - 12 t.

2. Maschinen und Materialien im Asphaltstraßenbau

► Tandemwalze mit Vibration

Diese Walze ist ähnlich der statischen Tandemwalze, jedoch werden hier beide Bandagen angetrieben und können vibrieren. Haupteinsatzgebiete sind die Hauptverdichtung, vor allem bei dickeren Asphalttragschichten. Dienstgewicht 2 - 15 t.

► Gummiradwalze

Diese Walze verfügt über 7 bis 11 Gummiräder, deren Verdichtungswirkung mit Wasser, Sand oder den Luftdruck der Bereifung gesteuert werden kann. Bei einem Dienstgewicht von 10 - 35 t eignen sich diese Walzen für die Vorprofilierung, die Hauptverdichtung bei nicht schwer verdichtbarem Mischgut und den Oberflächenschluß bei Deckschichten.

► Kombiwalze

Die Kombiwalze besitzt sowohl Gummiräder als auch eine Glattmantelbandage mit Vibration.

In Bild 2.6 ist für verschiedene Asphaltsschichten die Eignung einzelner Verdichtungsgeräte dargestellt [BOMAG03]. Es ist zu erkennen, dass Tandem- und Kombiwalzen die am besten geeigneten Verdichtungsgeräte im Asphaltbau sind.

	Art des Materials und Schichtdicke				Tragschicht			Binder		Decke		Tragdeck-schicht	Split-Asphalt-Mastix
	 [t]	 [m]	 [kg/cm]	 [Hz]	6 - 8 cm	10 - 14 cm	> 14 cm	≤ 4 cm	4 - 8 cm	≤ 2,5 cm	2,5 - 4 cm	8 - 10 cm	2,5 - 5 cm
	< 0,01	< 0,2	---	---	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Ca. 0,03 - 0,11	0,15 - 0,50	---	> 10	++	++	++	++	++	-	-	-	-
	0,04 - 0,2	0,4 - 0,6	---	≥ 70	++	++	+	+++	+++	+++	+++	++	+
	0,1 - 0,7	0,4 - 1,0	---	≤ 70 / ≥ 80	++	+++	+++	+++	+++	o	o	+	o
	0,15 - 0,45	0,5 - 1,0	2,9 - 6,6	≥ 70	+	o	-	+++	+++	+++	+++	+	o
	0,6 - 1,0	0,6 - 1,0	4,8 - 6,3	≥ 50	++	+	o	+++	+++	+++	+++	++	+
	1,5 - 7,0	0,8 - 1,5	13 - 24	≥ 45	+++	++	+	+++	+++	+++	+++	++	++
	1,5 - 7,0	0,8 - 1,5	13 - 24	≥ 50	+++	++	+	+++	+++	+++	+++	++	++
	7,0 - 15,0	1,5 - 1,8	24 - 32	≤ 40 / ≤ 60	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
	7,0 - 18,0	1,2 - 1,7	13 - 29	≤ 40 / ≤ 60	+++	+++	+++	++	+++	++	++	+++	++
	7,0 - 24,0	Ca. 2,0	≤ 3 to/Rad	---	++	+++	+++	++	++	++	++	++	-

Bild 2.6: Eignung von Walzen für verschiedene Schichten [BOMAG03]

2.2.3 Automatisierung von Asphaltbaumaschinen

Die Automation im Asphaltbau beschränkt sich nach [HOFFMANN01] im Wesentlichen auf die Bereitstellung von Maschinen, die dem Menschen die Arbeit erleichtern und Arbeitsprozesse vereinfachen, beschleunigen oder verbessern können. Jedoch ist eine Steuerwirkung durch Menschen stets erforderlich, eine computergesteuerte Lenkung erfolgt bei auf dem Markt befindlichen Systemen heute nur in sehr geringem Maße. Eine Verknüpfung aller am Bauprozess beteiligten Vorgänge fehlt, und somit ist auch keine den Gesamtprozess begleitende Automation und Dokumentation möglich.

Für Straßenfertiger gibt es von vielen Herstellern eigene Automatisierungssysteme, die sich jedoch in vielen Fällen auf ein Nivelliersystem beschränken, das die Bohle in vertikaler Richtung steuert. Bestrebungen, diese Maschinen weitergehend zu automatisieren sind gegenwärtig sehr gering. Viele Hersteller bieten zwar fortgeschrittene Systeme an, die jedoch auf dem Markt noch keine Akzeptanz finden, nicht zuletzt aufgrund der hohen Anschaffungskosten [HOFFMANN01].

Bei den Verdichtungsgeräten für den Erdbau gibt es verschiedene Automatisierungssysteme, die in erster Linie über die Messung des Verdichtungsgrades die Anzahl der erforderlichen Überfahrten messen. Dabei wird durch einen an der vibrierenden Bandage der Walze angebrachten Sensor die vertikale Bewegung der Bandage erfasst und daraus auf den Verdichtungsgrad des Bodens geschlossen. Dem Fahrer kann diese Information graphisch aufbereitet zur Verfügung gestellt werden. Desweiteren bieten alle Hersteller die Messung und Darstellung der Oberflächentemperatur der Asphaltsschicht an. Die Messung selbst erfolgt dabei stets mit einem Infrarotsensor, der an der Unterseite der Maschine angebracht ist. Die Qualität dieser Messmethode wird in Kapitel 3 ausführlicher diskutiert.

2.2.4 Qualitätsmanagementsysteme

Ein Qualitätsmanagementsystem für den Asphaltbau hat die Aufgabe, maschinenübergreifend alle Prozessdaten während des Bauprozesses zu sammeln, während des Bauprozesses eine Optimierung zu ermöglichen und nach Fertigstellung des Bauwerkes die Daten für die Unterhaltung zu bewahren. Eine höhere Qualität kann dabei nur erreicht werden, wenn ein solches System auch während des Bauprozesses ein Eingreifen in den aktuellen Bauvorgang ermöglicht. Die höhere Qualität ist dabei nur für den Straßenbesitzer von Interesse, in der Regel ist dies die Baubehörde. Die Privatisierung von Straßen und die Übertragung der Unterhaltung und Wartung an die Bauunternehmen über einen Zeitraum von vielen Jahren macht diese Systeme umso interessanter.

Baumaschinenhersteller, die ein Qualitätsmanagementsystem entwickeln, integrieren dieses nur auf ihren eigenen Maschinen und bieten keine Möglichkeit an, Maschinen anderer Hersteller mit Komponenten des Systems auszustatten. Die Anforderung, dass ein solches System maschinenübergreifend arbeiten soll, führt dazu, dass Bauunternehmen gezwungen sind, alle Baumaschinen bei dem gleichen Hersteller zu beschaffen. Problematisch ist hier, dass nur wenige Baumaschinenhersteller alle am Straßenbauvorgang beteiligten Maschinen vertreiben.

Qualitätsmanagementsysteme, die herstellerunabhängig sind und somit auf allen Baumaschinen eines Bauunternehmens integriert werden können, sind in den letzten Jahren entwickelt worden, beispiels-

weise das von der Europäischen Union finanzierte CIRC-System¹, sowie die Fortführung der Entwicklungen im ebenfalls von der EU geförderten OSYRIS-Projekt². Dieses Projekt hatte eine Gesamtlösung für den Straßenbauprozess als Ziel, mit dem herstellerunabhängig sämtliche Prozessparameter, die im Asphaltbau anfallen, erfasst und verarbeitet werden können, wobei alle Informationen auf allen Maschinen gleichzeitig zur Verfügung stehen.

Die Anforderungen an OSYRIS während der Entwicklung waren

- ▶ modularer Aufbau

Die im System verwendeten Sensoren sind austauschbar und werden automatisch beim Systemstart erkannt und konfiguriert. Neu hinzugekommene Sensoren werden in das System integriert und die verfügbaren Daten mit aufgezeichnet.

Softwarekomponenten können durch die Verwendung der OPC-Schnittstelle ohne großen Aufwand in das System integriert werden. Die Software zur Visualisierung, Datenauswertung und Datenanalyse kann somit komponentenweise ausgetauscht werden.

- ▶ offene, dokumentierte Schnittstellen

Die Schnittstelle zur Kommunikation mit den angeschlossenen Sensoren erfolgt über CANopen, ein Device Profile für die Schnittstelle ist veröffentlicht worden.

Die logische Schnittstelle zwischen den Softwarekomponenten erfolgt über OPC, was einen einfachen „Anschluss“ neuer Softwarekomponenten ermöglicht.

- ▶ frei verfügbares Datenformat

Alle Prozessdaten liegen im XML-Format vor, das offen und frei verfügbar ist.

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte System baut auf die im OSYRIS-Projekt erstellten Grundlagen und Strukturen auf.

2.3 Asphalt als Straßenbaustoff

2.3.1 Bestandteile und Zusammensetzung

Asphalt für den Straßenbau besteht aus den Komponenten Bitumen, Zuschlagstoffe und Zusatzstoffe.

2.3.1.1 Bitumen

Bitumen wird durch fraktionierte Destillation von Erdöl gewonnen [HUTSCHENREUTHER98], wobei die Härte des Bitumens durch die Destillationstemperatur bestimmt wird [DÜBNER74]. Das Bitumen besteht aus einer öligen Phase (Maltenphase) und einer festen Phase (Asphalten-Micellen, evtl. mit Asphalttharzschicht), siehe Abbildung 2.7. In dem für den Straßenbau wichtigen Temperaturbereich von 50 bis 200 °C überstreicht das Bitumen die Aggregatzustände fest bis flüssig. Verschiedene Physikalische Eigenschaften von Bitumen sind in Tabelle 2.2 aufgelistet.

1. Computer Integrated Road Construction, Bearbeitung von Teilprojekten am TMB

2. Open System for Road Information Support, Projektmanagement und Bearbeitung von Teilprojekten am TMB

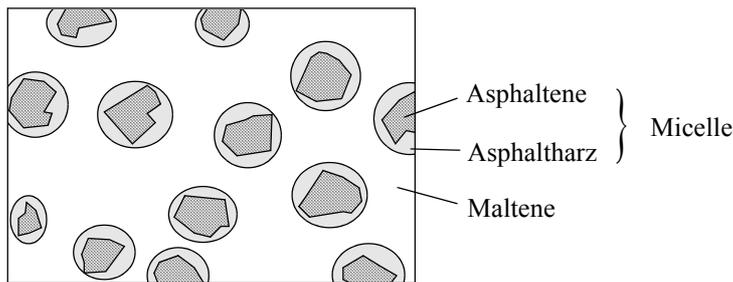


Bild 2.7: Aufbau von Bitumen

Tabelle 2.2: physikalische Eigenschaften von Bitumen [HUTSCHENREUTHER98]

Dichte	1,0 g / cm ³ bei 25 °C
kub. Wärmeausdehnungskoeffizient	0,60 - 0,62 · 10 ⁻³ (15 - 200 °C)
Wärmeleitzahl	0,16 W/mK
spezifische Wärmekapazität	1,7 J/gK bei 0 °C 1,9 J/gK bei 100 °C 2,1 J/gK bei 200 °C

Die in der Praxis verwendeten Bitumensorten werden nach ihrer Penetration bei 25 °C unterschieden:

Tabelle 2.3: Bitumensorten und deren Temperatur beim Einbau [FUHRMANN76][HUTSCHENREUTHER98]

Bezeichnung DIN 1995	Bezeichnung DIN EN 12591	Penetration bei 25 °C in 1/10 mm	Mindesttemperatur beim Einbau in °C	Erfahrungswerte aus der Praxis in °C
B 200	160/220	160 - 210	120	130 - 150
B 80	70/100	70 - 100	130	140 - 160
B 65	50/70	50 - 70	130	140 - 160
B 45	30/45	35 - 50	140	160 - 180
B 25	20/30	20 - 30	k.A.	k.A.

2.3.1.2 Zuschlagstoffe

Zuschlagstoffe sind Gesteinskörnungen natürlichen oder künstlichen Ursprungs sowie Hochofenschlacke, Flugasche und Schmelzkammergranulat [ZTV-A]. Zu den Gesteinskörnungen zählen

- ▶ Schotter, Splitt, Edelsplitt und Edelbrechsand,
- ▶ Kies und Natursand,
- ▶ Füller.

Gesteinskörnungen werden nach ihrer Körnungslinie unterteilt, die Aufschluss über die Gewichtsanteile der verschiedenen Korngrößenbereiche gibt. Kennwerte für das thermische Verhalten sind für häufig verwendete [ASKAL01] Gesteinsarten der Tabelle 2.4 zu entnehmen.

Tabelle 2.4: Wärmeleitfähigkeit und -kapazität häufig verwendeter Gesteinsarten aus [ASKAL01][KAVIANIPOUR67], in Klammern der Durchschnittswert

Gestein	Wärmeleitfähigkeit W/mK	spez. Wärmekapazität kJ/kgK
Granit, Granodiorit, Syenit	1,12 - 5,20 (Ø 2,61)	0,25 - 1,55 (Ø 1,01)
Diorit, Gabbro	1,38 - 4,14 (Ø 2,52)	0,88 - 1,13 (Ø 1,07)
Basalt	0,44 - 5,33 (Ø 1,70)	0,54 - 2,14 (Ø 1,23)
Quarzit	2,33 - 7,6 (Ø 5,18)	0,71 - 1,34 (Ø 1,00)
Gneis	0,94 - 4,86 (Ø 2,33)	0,46 - 1,18 (Ø 0,86)
Kalkstein, Dolomit	0,62 - 6,50 (Ø 3,28)	0,65 - 1,72 (Ø 0,977)

Die Zusammensetzung des Mineralstoffgemisches für Walzasphalt ist abhängig von der Bauklasse der Straße, der Mischgutart, der Einbaudicke sowie von örtlichen, klimatischen und topografischen Verhältnissen. Sie ist geregelt in den “Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen” [ZTV-A] sowie der [DIN 18317]. Grundsätzlich gilt, dass die Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit mit steigender Schichtdicke und sinkendem Größtkorn ansteigt. Erfahrungswerte für ein gutes Verhältnis von Schichtdicke zu Größtkorn liegen im Bereich zwischen 2,0 und 5,0 [GEHBAUER00].

In den ZTV sind daher Asphaltmischgutarten und -sorten mit vorgeschriebenen und empfohlenen Schichtdickenbereichen angegeben (vergl. Tabelle 2.5).

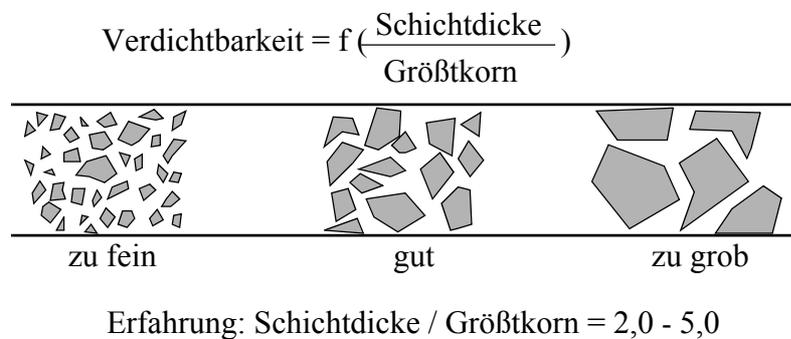


Bild 2.8: Das Verhältnis zwischen Schichtdicke und Größtkorn [GEHBAUER00]

2.3.2 Materialeigenschaften von Walzasphalt

2.3.2.1 Allgemeines

Typische Asphaltbefestigungen im Straßenbau bestehen im Mittel zu etwa 90 - 95 Gew.-% aus Gesteinskörnungen und 5 - 10 Gew.-% aus Bitumen [DÜBNER74]. Die physikalischen Eigenschaften von Asphalt sind deshalb zu einem großen Teil abhängig von den Eigenschaften der Gesteinskörnung, jedoch verändern sich die Materialeigenschaften abhängig von der Temperatur. Heißer Asphalt zeigt ein ausgeprägt viskoses Verhalten, während der Abkühlung zeigt er mehr und mehr elastische Eigenschaften [HUTSCHENREUTHER98].

Tabelle 2.5: Asphaltmischgutarten und -sorten mit vorgeschriebenen und empfohlenen Schichtdickenbereichen [ZTV-A][GEHBAUER00]

Schicht	Mischgut	Schichtdicke nach ZTV [cm]	Empfohlene Schichtdicke für Ausschreibungen [cm]
Deckschichten	Asphaltbeton 0/5	2,0 - 3,0	2,0 - 2,5
	Asphaltbeton 0/8	3,0 - 4,0	3,0 - 3,5
	Asphaltbeton 0/11	3,5 - 4,5	4,0
	Asphaltbeton 0/11S	4,0 - 5,0	4,0 - 5,0
	Asphaltbeton 0/16S	5,0 - 6,0	5,0 - 6,0
	Splittmastixasphalt 0/5	2,0 - 4,0	2,0 - 2,5
	Splittmastixasphalt 0/8	2,0 - 4,0	2,5 - 3,0
	Splittmastixasphalt 0/8S	3,0 - 4,0	3,0 - 4,0
	Splittmastixasphalt 0/11S	3,5 - 4,0	3,5 - 4,0
	Gußasphalt 0/5	2,0 - 3,0	2,0 - 3,0
	Gußasphalt 0/8	2,5 - 3,5	2,5 - 3,5
	Gußasphalt 0/11	3,5 - 4,0	3,5 - 4,0
	Gußasphalt 0/11S	3,5 - 4,0	4,0
Binderschichten	Asphaltbinder 0/11	nur für Profilausgleich	-
	Asphaltbinder 0/16	4,0 - 8,5	6,0 - 7,0
	Asphaltbinder 0/16S	5,0 - 8,5	6,0 - 7,0
	Asphaltbinder 0/22S	7,0 - 10,0	7,0 - 10,0
Asphalttragschichten	Mischgutsorte 0/22	≥ 8,0	8,0 in Sonderfällen
	Mischgutsorte 0/32	≥ 8,0	≥ 8,0

Die Dichte von Walzasphalt lässt sich aus der Dichte der einzelnen Bestandteile Bitumen und Gesteinskörnung kaum herleiten, da die Dichte der Gesteinskörnung sehr stark variieren kann. Dies liegt zum einen an der großen Schwankung der Dichte von Gestein (2200 bis 3900 kg/m³) und dem Hohlraumgehalt der Gesteinskörnung. Für Bitumen beträgt die Dichte nach ca. 1100 kg/m³, die Dichte von Walzasphalt wird in der Literatur mit ca. 2100 bis 2700 kg/m³ angegeben [ZTV-A][HUTSCHENREUTHER98].

2.3.2.2 Thermische Eigenschaften

Typische Werte von Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität sind für verschiedene Literaturquellen in Tabelle 2.6 aufgeführt.

Tabelle 2.6: Thermische Eigenschaften von Walzasphalt nach [CHADBOURN98]

Wärmeleitfähigkeit in W/mK	spez. Wärmekapazität in J/kgK	Quelle
1,01 - 1,26	840 - 1005	[BOSSEMEYER68]
0,76	keine Angabe	[TURNER81]
0,8 - 1,06	850 - 870	[JORDAN76]
1,21	920	[KAVIANIPOUR67]
1,21 - 1,38	840 - 1090	[TEGELER73]
0,85 - 2,32	keine Angabe	[KAVIANIPOUR67]
2,28 - 2,88	keine Angabe	[KAVIANIPOUR67]

Die großen Wertbereiche, die die Wärmeleitfähigkeit überstreicht, sind in erster Linie auf die großen Bereiche bei den Gesteinskörnungen für diese Eigenschaft zurückzuführen. Für eine genaue Berechnung des thermischen Verhaltens ist deshalb die exakte Zusammensetzung der Gesteinskörnung zu berücksichtigen.

2.3.2.3 Spannungs-Dehnungs-Verhalten, Rheologie

Das zeitliche Formänderungsverhalten von Asphalt unter Belastung kann mit zufriedenstellender Genauigkeit mit dem rheologischen 5-Parameter-Modell von Krass [KRASS71] dargestellt werden (siehe Abb. 2.9) [KREBS81A]. Dem Modell besteht aus einem ein viskoelastisches Modul (Kelvin-Modell als Parallelschaltung von Feder und Dämpfer) mit einem davor in Reihe geschalteten reinelastischen Modul (Hookesches-Modell) zugrunde. Beide Modelle werden mit jeweils einem Reibungselement ergänzt, das die reinplastische Verformung des Asphalts beschreibt.

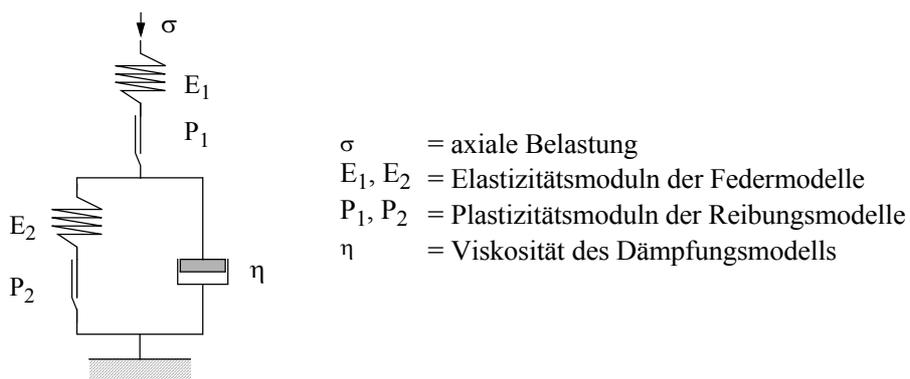


Bild 2.9: Rheologisches 5-Parameter-Modell von [KRASS71]

Der Verformungsverlauf unter konstanter Spannung ist qualitativ in Abb. 2.10 dargestellt.

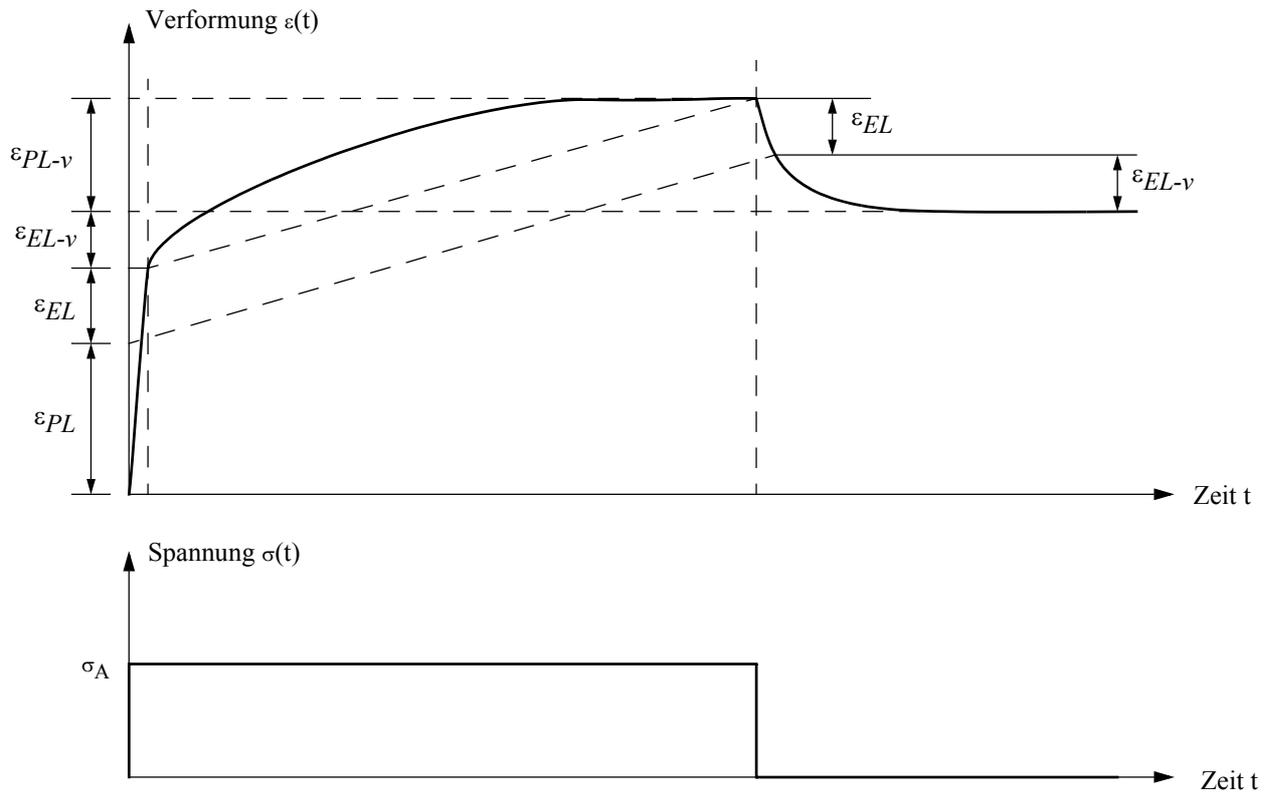


Bild 2.10: Qualitativer Verlauf der Verformung von Asphalt unter konstanter Belastung nach [KREBS81A]

Dabei sind

ε = Verformung

σ_A = Axiale Belastung

ε_{EL} = Elastischer Verformungsanteil

ε_{EL-v} = Elasto-viskoser Verformungsanteil

ε_{PL} = Plastischer Verformungsanteil

ε_{PL-v} = Plasto-viskoser Verformungsanteil

3. Prozessdatenerfassung

Die Erfassung von Maschinen- und Prozessdaten auf Fertigern und Walzen ist bei den meisten Herstellern gegeben. In der Regel kommen Systeme zum Einsatz, die auf dem digitalen Sensorbussystem CAN¹ basieren. Auf Straßenfertigern werden in erster Linie Nivelliersysteme eingesetzt, die mit Hilfe einer Referenz (beispielsweise Drahtabtastung) die Bohlenhöhe regeln. Weiterhin müssen die Schichtdicke sowie die Bohlenneigung erfasst werden.

Auf Walzen ist die indirekte Messung der Verdichtung über Hilfswerte Stand der Technik. Das Messprinzip beruht in der Regel auf der Messung der Beschleunigung der Walzenbandagen als Reaktion auf die eingebrachte Vibration. Diese Messmethode liefert im Erdbau den Verdichtungswert des Untergrundes. Im Asphaltbau lässt sich die Verdichtung selbst mit dieser Methode nicht bestimmen, da der Asphalt sein Reaktionsverhalten mit der Temperatur verändert und auch die Schichten unterhalb der obersten, zu messenden Schicht, eine Reaktion auf die Vibration zeigen, die aber nicht bekannt ist. Auf Walzen wird desweiteren die Messung und Darstellung der Oberflächentemperatur mit Infrarotsensoren angeboten.

Die Ausstattung der Maschinen mit Sensoren liefert die Basis für das in dieser Arbeit entwickelte System, das sich das Vorhandensein von Sensoren und Datenleitungen zunutze machen kann.

1. CAN: Controller Area Network

Tabelle 3.1: Übersicht über gängige Messungen auf Straßenfertigern und Walzen

Maschinen- überwachung	Öldruck	Drucksensor
	Öltemperatur	Temperatursensor
	Hydraulikdruck	Drucksensor
	Betriebszeit	Zeituhr
	Drehzahlmessung	Umdrehungscoder
Nivellier- automation (Fertiger)	Schichtdicke	Dickensensor, Drahtzugsensor
	Bohlenneigung in Querrichtung	Neigungssensor
	Sollwert-Abtastung (Draht, Ski)	Umdrehungscoder
Verdichtungs- messung (Walze)	Beschleunigungsmessung vertikal	Beschleunigungssensor
	Beschleunigungsmessung horizontal	Beschleunigungssensor
	Geschwindigkeitsmessung	Umdrehungscoder

3.1 Messung der benötigten Prozessdaten auf dem Fertiger

Die für die Vorhersage der Kerntemperatur benötigten Prozessdaten sind nach Kapitel 4.4:

- ▶ Schichtdicke
- ▶ Materialtemperatur beim Einbau
- ▶ Windgeschwindigkeit
- ▶ Umgebungstemperatur
- ▶ Temperatur des Untergrundes

3.1.1 Schichtdickenmessung

Die Messung der Schichtdicke erfolgt in der Regel mit einem Drahtzugsensor zwischen dem Chassis des Fertigers und der schwimmenden Bohle. Dieser Messwert wird auf Fertigern mit Nivellierautomatik immer mit hoher Präzision gemessen und kann für das hier entwickelte System genutzt werden (siehe Abbildung 3.10).

3.1.2 Materialtemperatur beim Einbau

Die Materialtemperatur beim Einbau ist neben der Schichtdicke ein sehr wichtiger Parameter zur Abkühlungsvorhersage. Die Temperatur kann prinzipiell auf zwei verschiedene Weisen gemessen werden:

► Infrarotmessung

Mit Hilfe eines Infrarotsensors kann berührungslos die Oberflächentemperatur eines Materials mit hoher Genauigkeit erfasst werden. Der Infrarot-Sensor misst die emittierte Strahlung und schließt daraus auf die Temperatur.

► Kontaktmessung

Die Messung der Temperatur mit direktem Kontakt wird in der Regel mit Sensoren durchgeführt, die auf dem Prinzip der Messung des elektrischen Widerstands eines Materials beruhen, das den Widerstand abhängig von der Temperatur verändert.

Zur Messung der Materialtemperatur können beide Messmethoden genutzt werden. Die Infrarotmessung bietet jedoch den Vorteil, dass durch die berührungslose Messung kein Verschleiß und keine Beschädigungen des Sensors auftreten, es können jedoch Messfehler durch eine Verklebung der Linse und durch Schlieren und Flimmern an der Asphaltoberfläche auftreten. Die Messung mit direktem Kontakt (vgl. beispielsweise Abbildung 3.7) kann zur Bildung eines Materialstaus und damit zu großen Materialverklebungen führen. Desweiteren sind die großen an den Sensor angreifenden Kräfte bei der Konstruktion zu beachten.

Die Position der Messung ist jedoch sehr wichtig zur korrekten Bestimmung der Materialtemperatur, weil nur Oberflächentemperaturen erfasst werden können. Die Wahl der Position wird in Kapitel 3.3 getroffen.

3.1.3 Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit beeinflusst die Asphaltabkühlung in großem Maße durch den großen Einfluss der Konvektion (siehe Kapitel 4.4). Zur Ermittlung der Windgeschwindigkeit wird ein Anemometer verwendet. Da die Windgeschwindigkeit über die Zeit stark variiert (vgl. Abbildung 3.1), werden die Messwerte über den Zeitraum von einer Minute gemittelt.

Die Windgeschwindigkeit wird für die Abkühlungsberechnung als konstant über den gesamten Abkühlungsverlauf angenommen. Dies beruht auf der Annahme, dass sich die Windverhältnisse an einem lokal begrenzten Ort nicht grundlegend innerhalb weniger Minuten verändern. Kurzzeitige Geschwindigkeitsveränderung werden aufgrund der Filterung als berücksichtigt angenommen. Weiterhin wird angenommen, dass lokale Windschatten durch die Filterung einer zeitlich begrenzten Datenmenge ebenfalls berücksichtigt werden.

3.1.4 Temperatur des Untergrundes

Die Temperatur des Untergrundes kann lediglich durch eine Messung der Oberflächentemperatur erfolgen. Hierzu wird ein Infrarotsensor verwendet (siehe Abb. 3.2).

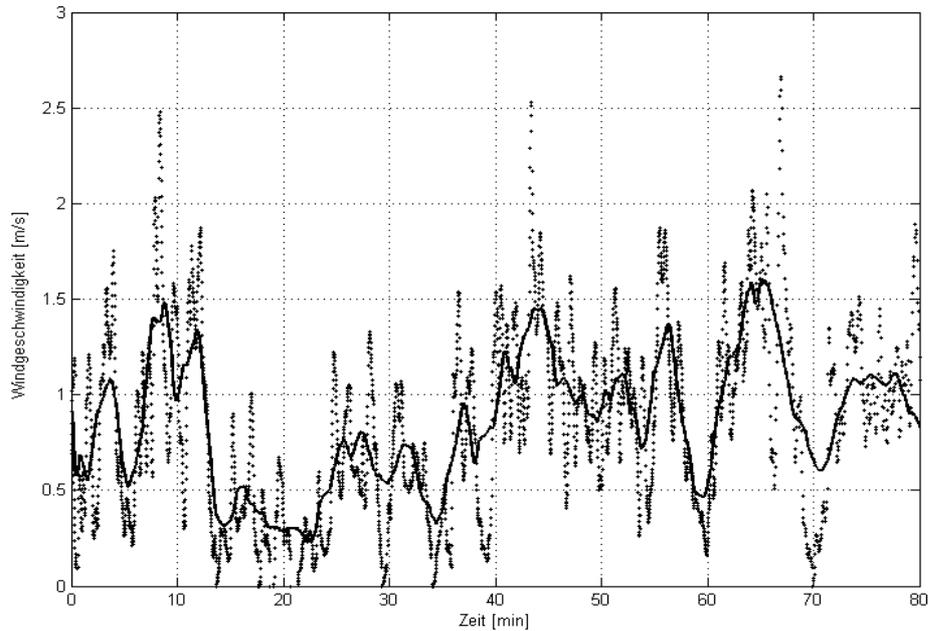


Bild 3.1: Windgeschwindigkeit und gefilterte Geschwindigkeit über einen Zeitraum von 80 Minuten, Messwerte aus Baustellenmessung [JURASZ03 ET AL]

3.1.5 Umgebungstemperatur

Die Messung der Lufttemperatur kann mit der Windgeschwindigkeitsmessung räumlich kombiniert werden. Zur Messung dient in der Regel ein Thermoelement, das seine Ausgangsspannung mit der Temperatur ändert.



Bild 3.2: Sensoren für Temperatur (links, infrarot) [WEBMIKRON] und Windgeschwindigkeit (rechts, Anemometer) [WEBKOPOWER]

3.2 Ermittlung der Maschinenposition

3.2.1 Positionsbestimmung

Die Position der Maschine ist eine elementare Information zur ortsgenauen Bestimmung, Darstellung und Auswertung der Abkühlungsparameter und Verdichtungsarbeit. Zur Ermittlung der Position können verschiedene Methode und Systeme genutzt werden, die sich neben der Methode der Positionsermittlung durch die zur Verfügung stehende Präzision und ihre Kosten unterscheiden. Im Straßenbau sinnvoll nutzbare Systeme sind zum einen die Verwendung einer selbststeuernden Totalstation, wobei die Positonsbestimmung mehrerer Maschinen gleichzeitig und die großen Entfernungen im Straßenbau

diese Messmethode schnell an ihre Grenzen bringt. Die zweite Art der Positionsbestimmung ist die Verwendung eines GPS-Systems, das die Ermittlung der absoluten Position jeder Baumaschine zulässt. Die für den Einsatz von Verdichtungswalzen benötigte Messgenauigkeit von GPS-Systemen liegt bei 40 cm [KLEY03]. Systeme mit dieser Präzision sind in der Regel extrem teuer (> 20.000 €), jedoch wurde von Kley in [KLEY03] eine Filtermethode entwickelt, die die geforderte Messgenauigkeit mit sehr niedrigen Kosten zur Verfügung stellt. Dabei wird die Kinematik der Maschine berücksichtigt und Bewegungen, die der Maschine nicht möglich sind, herausgefiltert.

Im Rahmen dieser Arbeit soll nicht weiter auf Positionierungsmethoden und die für die Verwendung im Straßenbau benötigte Präzision eingegangen werden. Es wird stattdessen auf die Arbeit von Kley [KLEY03] verwiesen.

Zur Bestimmung der Position wird davon ausgegangen, dass, analog zu den anderen Messungen, ein Positionssensor vorhanden ist, der die aktuelle, globale Maschinenposition im Sensornetzwerk zur Verfügung stellt.

3.2.2 Positionsauswertung

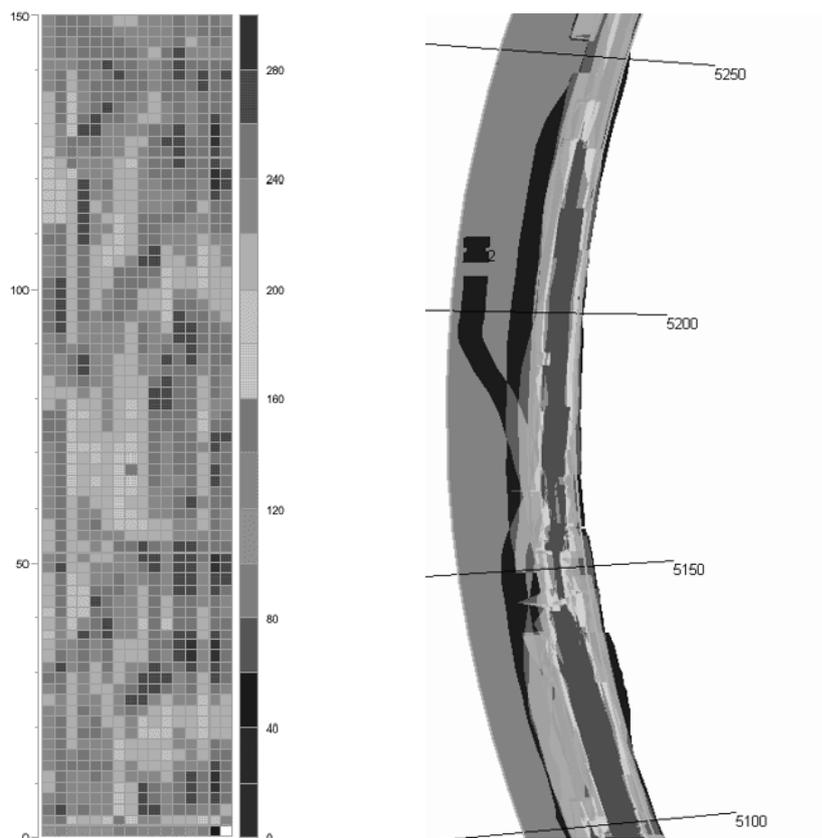


Bild 3.3: Vergleich der rasterbasierten (siehe A8 und [WEBGEODYN]) und vektorbasierten Darstellung [JURASZ03B]

Es gibt grundsätzlich zwei Methoden zur Darstellung der Maschinenposition, eine rasterbasierte und vektorbasierte Darstellung (vgl. Abb. 3.3). Bei der rasterbasierten Darstellung werden alle Prozessda-

ten einzelnen Rasterzellen zugewiesen und innerhalb der jeweiligen Zelle als konstant angenommen. Dies führt unweigerlich zu einem Datenverlust, der durch eine Verfeinerung des Rasters verringert werden kann, was andererseits zu einer Vergrößerung des Datenaufkommens führt. Sind die Koordinaten der Rasterzellen bekannt, können Prozessdaten schnell zugewiesen und verwaltet werden.

Die vektorbasierte Darstellung legt die Daten derart ab, dass sie als Attribute einzelnen Abschnitten des Arbeitsgebietes zugewiesen sind. Die Größe der Abschnitte richtet sich dabei nach dem Datenaufkommen, werden Prozessdaten in schneller Folge empfangen, werden die einzelnen Streckenabschnitte (Vektoren) kürzer, bei selten auftretenden Daten werden die jeweiligen Abschnitte größer. Durch die variablen Positionen der Daten ist die Speicherung und Verwaltung der Prozessdaten ein aufwändiger Prozess.

Die Maschinenposition wird durch das GPS-System als globale Koordinate erfasst und weitergegeben. Diese muss bei der Verarbeitung in ein lokales Koordinatensystem transformiert werden. Der Ursprungspunkt ist hierbei der hintere linke Punkt der Fertigerbohle, dessen Position ebenfalls bekannt sein muss. Die globale Position in Nord- und Ost-Richtung wird dazu derart transformiert, dass die y-Achse parallel zur Maschinenlängsaxe und die x-Achse quer dazu ausgerichtet ist. Die Position der Walze wird relativ dazu in diesem lokalen Koordinatensystem berechnet (siehe Abb. 3.4).

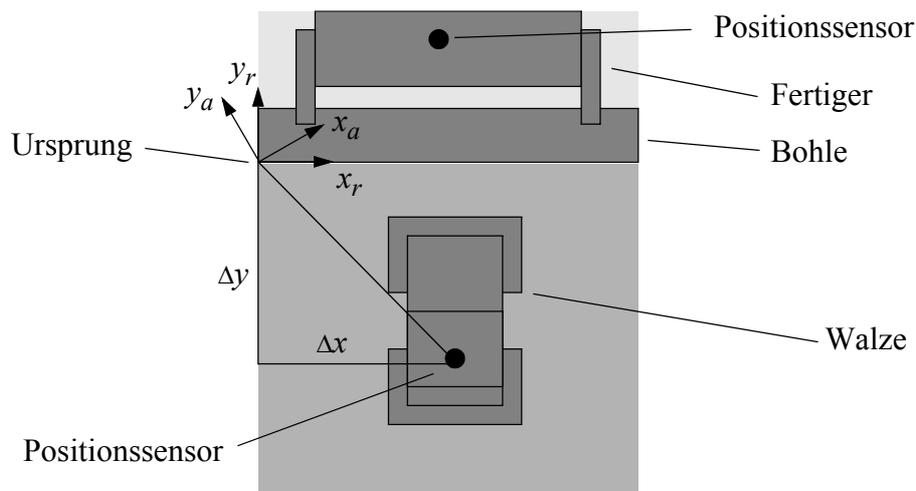


Bild 3.4: Absolute Position und relative Position

Eine gekrümmte Strassenachse muss bei der Transformation berücksichtigt werden. Hierbei werden die Mittelpunkte der einzelnen Zellen mit Hilfe des jeweiligen Krümmungswinkels α und der bekannten, konstanten Länge und Breite jeder Zelle berechnet.

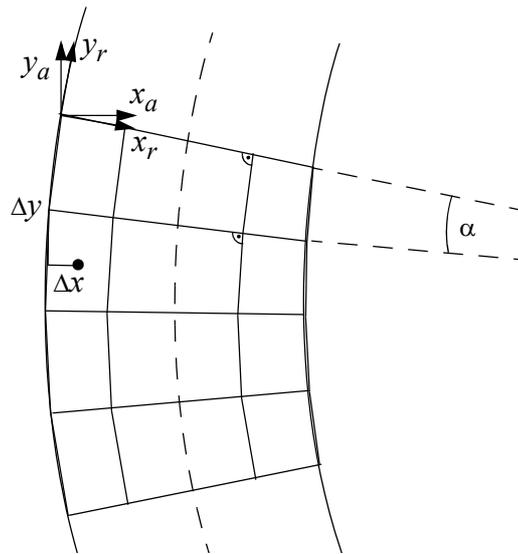


Bild 3.5: Linearisierte kurvilineare Koordinaten (nach [JURASZ03B])

3.3 Sensorplazierung

Die wichtigsten Faktoren für die Wahl der Sensorpositionen sind

- ▶ die Messbarkeit des Parameters,
- ▶ die geforderte Messgenauigkeit sowie
- ▶ Schutz vor Beschädigung.

3.3.1 Materialtemperatur

Bild 3.6 zeigt mögliche Messpunkte für die Materialtemperatur. Die Messung mit einem Infrarotsensor ist nur in den Punkten a und c möglich, in Position b ist eine Messung mit direktem Materialkontakt und damit mit einer Temperatursonde (z.B. PT100) notwendig.

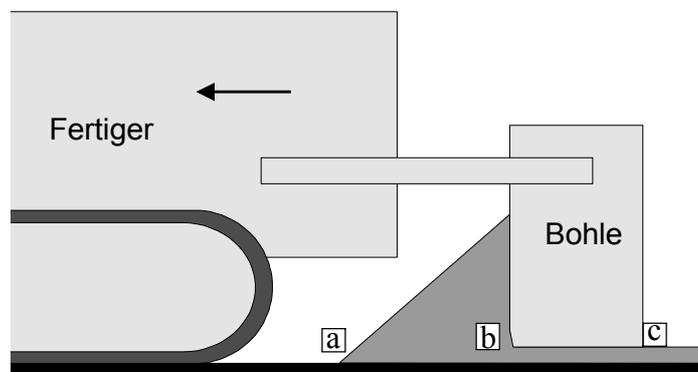


Bild 3.6: mögliche Positionen für den Materialtemperatursensor

Position a:

Die Messposition a befindet sich an dem vordersten Punkt des Materialkeils vor der Bohle. Unterschiedliche Materialstände, die während des Bauvorganges unweigerlich auftreten, führen zu einer Verschiebung dieses Punktes. Bei einem niedrigen Materialstand befindet sich dieser Punkt näher an der Bohle, bei einer großen Materialmenge kann er sich bis zum Raupenfahrwerk hin verschieben.

Um eine sicher Messung zu gewährleisten, muss hier der Materialstand bei einer Messung berücksichtigt werden, da ansonsten entweder die Untergrundtemperatur vor dem Material oder die Temperatur des Asphalts weit oberhalb des Bodens gemessen wird.

Position b:

Eine Temperaturmessung an Punkt b muss mit direktem Kontakt mit dem Material vorgenommen werden. Dafür eignen sich Widerstandsthermometer (siehe Kapitel 3.1.2). Problematisch bei dieser Messmethode sind die sehr großen angreifenden Kräfte, die extreme Anforderungen an die Robustheit der Messeinrichtung stellen. Abbildung 3.7 zeigt beispielhaft die Verwendung einer PT100-Sonde, die mittels einer Metallstange direkt mit der Bohle verschraubt ist. Die abgebildete Konstruktion ist bei Baustelleneinsätzen nach nur einer Woche zerstört worden [JURASZ03 ET AL]. Desweiteren führt das Einbringen eines solchen Fremdkörpers in den Materialstrom zu Verklebungen des Sensors und somit zu einer großen Trägheit der Messung bis hin zu fehlerhaften Messwerten.

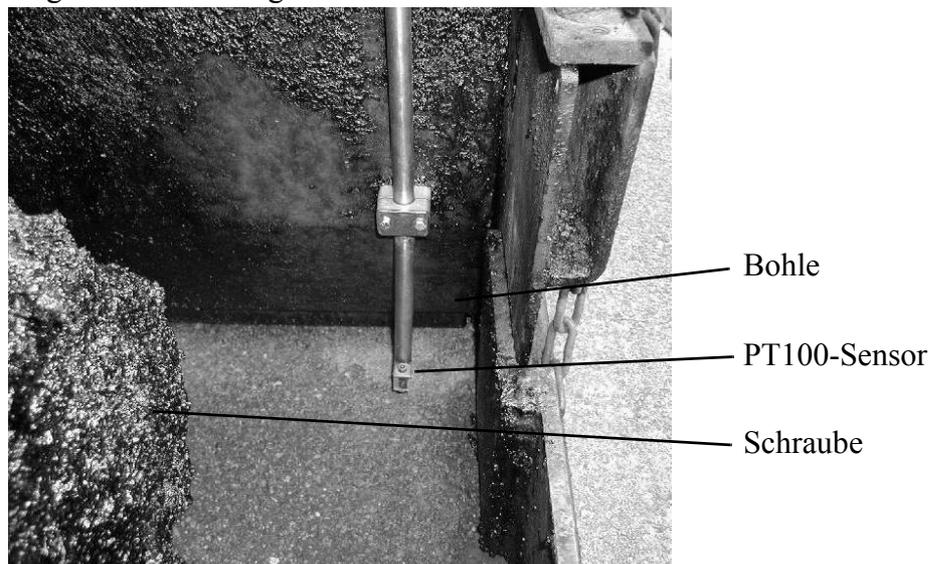


Bild 3.7: Beispiel für die Verwendung eines PT100-Sensors als Materialtemperatursensor [JURASZ03 ET AL]

Position c:

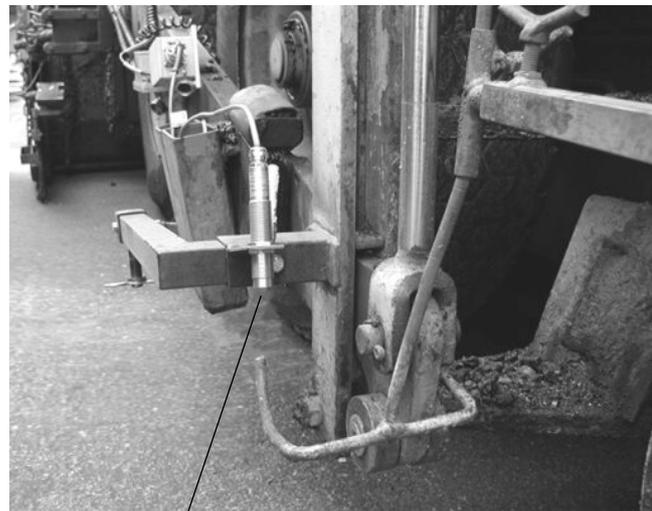
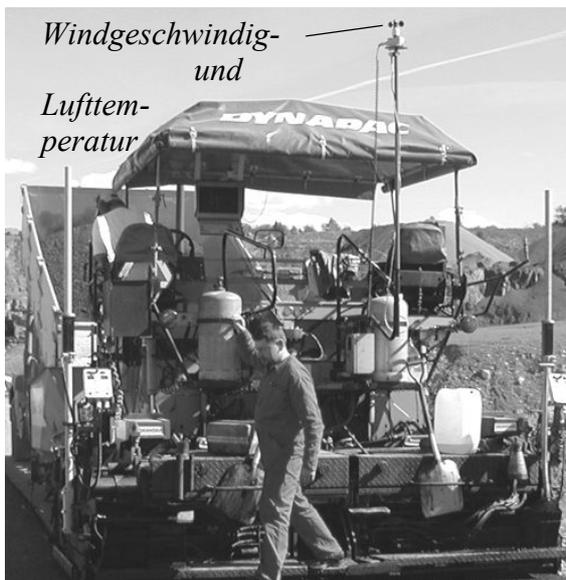
Von der Messung der Oberflächentemperatur unmittelbar hinter der Bohlenhinterkante mit einem Infrarotsensor kann auf die Kerntemperatur geschlossen werden, da das Material noch keine Möglichkeit hatte, sich an der Oberfläche abzukühlen. Die Bohle ist in der Regel beheizt und weist somit die gleiche Temperatur auf wie der Asphalt. Die Abkühlung an der Unterseite der Asphaltschicht hat zu diesem Zeitpunkt noch keinen Einfluß auf die Oberflächentemperatur.

Somit wird zur Messung der Materialtemperatur die Position c unmittelbar hinter der Bohlenhinterkante gewählt.

3.3.2 Windgeschwindigkeit und Umgebungstemperatur

Die Position des Sensors zur Messung der Windgeschwindigkeit wird so gewählt, dass möglichst keine störenden Einflüsse wie Verwirbelungen oder Windschatten die Messung verfälschen können. Die Wahl einer Position (vgl. Bild 3.8) deutlich oberhalb der Oberkante der Baumaschine ist zu bevorzugen (Nr. 2 in Bild 3.11). Windschattenbildung durch feststehende Hindernisse muss dabei nicht berücksichtigt werden, weil diese Einflüsse auch für die Asphalttschicht gelten. Die bei der Asphaltlieferung per LKW entstehende Windschattenbildung ist nicht zu verhindern, andererseits auch nur kurzfristig vorhanden.

Der auftretende Fahrtwind bei einer Geschwindigkeit von 3 bis 5 m/min beträgt 0,05 bis 0,08 m/s und kann vernachlässigt werden. Aufgrund der über die Zeit schwankenden Windgeschwindigkeiten muss eine Filterung der Messung vorgenommen werden. Diese Filterung kann als Mittelwertbildung über einen Zeitraum von einer Minute ausgeführt und direkt im Sensor implementiert werden. Der Windsensor liefert somit sowohl den aktuellen Messwert als auch die gefilterte Windgeschwindigkeit. Gleichzeitig überträgt er die gemessene Umgebungstemperatur.



Infrarot-Temperatursensor

Bild 3.8: Straßenfertiger mit Sensoren: links: Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur, rechts: Infrarot-Temperatur [JURASZ03 ET AL]

3.3.3 Temperatur des Untergrundes

Die Messung der Untergrundtemperatur erfolgt mit Hilfe eines Infrarot-Temperatursensors analog zur Messung der Materialtemperatur. Mögliche Messfehler können durch Einstrahlung des heißen Asphalts dadurch minimiert werden, daß der Infrarotsensor unterhalb der Maschine in Höhe des Raupenfahrwerks positioniert wird (siehe Abbildungen 3.8 und 3.11). Einflüsse durch Motor und Abgase kön-

nen dabei nicht auftreten, da bei Straßenfertigern Motor und Auspuff an der Maschinenoberseite liegen.

4. Schichtdicke

Die Schichtdicke soll nach [ZTV-A] so gewählt werden, dass eine möglichst Ebene Oberfläche entsteht. Somit ist die Schichtdicke direkt abhängig von der darunter liegenden Schicht. Desweiteren legt die RStO-01 [RSTO] die Soll-Schichtdicken für den Asphaltüberbau fest. In der Regel sollen die Schichtdicken von Oberbau-Asphaltschichten also möglichst konstant sein. Abbildung 3.9 zeigt die Messung der Schichtdicke an einer Fertigerbohle während des Einbaus über den Zeitraum von 60 Minuten. Es zeigt sich, dass die Schichtdicke abschnittsweise sehr konstant ist, aber in einzelnen Abschnitten stark variieren kann. Die Erfassung der Schichtdicke ist somit in Hinblick auf ihren großen Einfluss auf das Temperaturverhalten sehr wichtig.

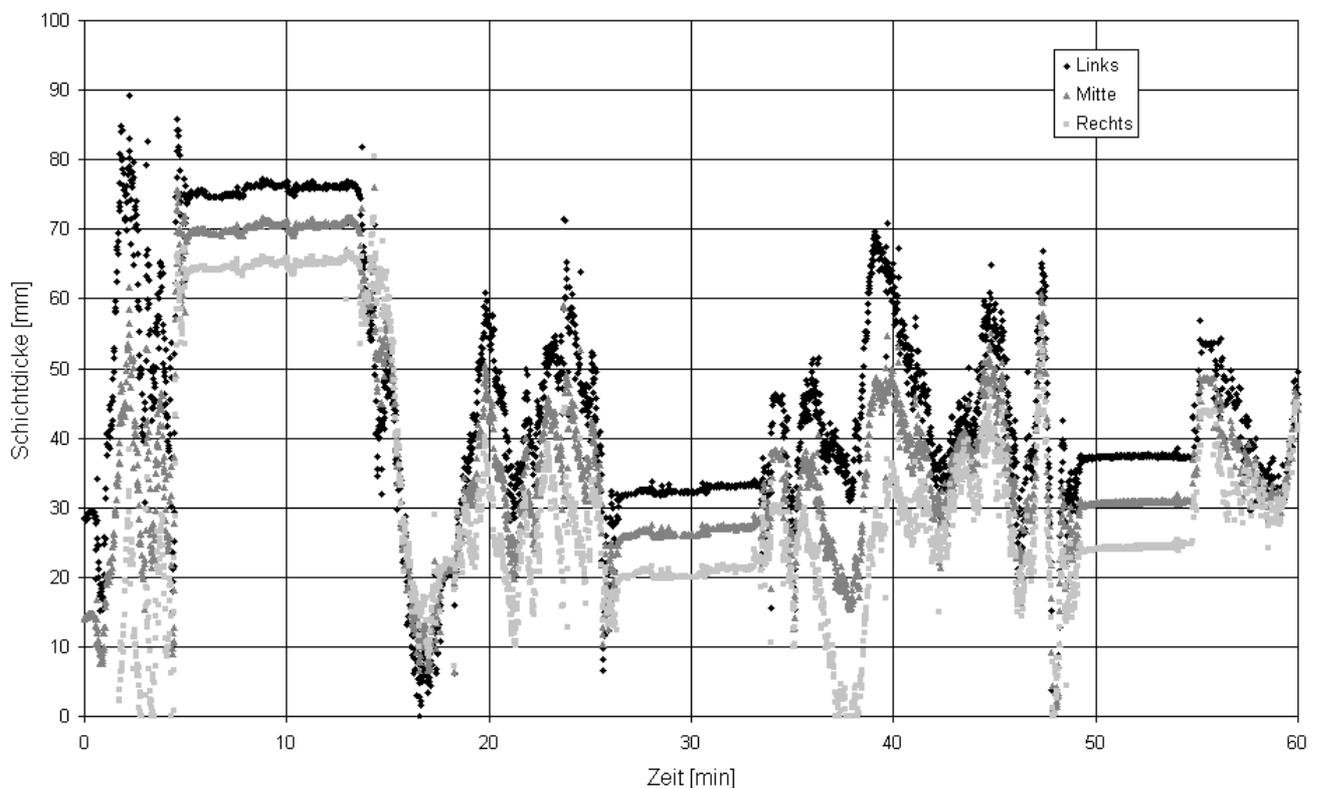


Bild 3.9: Veränderung der gemessenen Schichtdicke an einer Fertigerbohle über einen Zeitraum von 60 min [JURASZ03 ET AL]

In [HORN03] wird ein System zur hochgenauen Messung der Schichtdicke für Asphaltsschichten auf Straßenfertigern beschrieben, das auf folgenden einfachen Messungen basiert:

- ▶ Zugarm-Neigung (Abbildung 3.11, Nr. 4)
- ▶ Neigung des Fertigens (Abbildung 3.11, Nr. 4)
- ▶ Abstand des Zugarmes vom Boden (Abbildung 3.11, Nr. 5)

Mit Hilfe dieser Messungen ist die Berechnung der Schichtdicke als Abstand der hinteren Unterkante der Bohle zum Boden möglich:

$$h = S_1 - A \tan(\alpha - \beta) \quad (1)$$

mit

- S_1 = Abstand des Zugarms zum Untergrund
- A = Abstand des Neigungssensors zur Bohlen-Hinterkante
- α = Neigung des Zugarms zur Horizontalen
- β = Neigung der Chassis zur Horizontalen

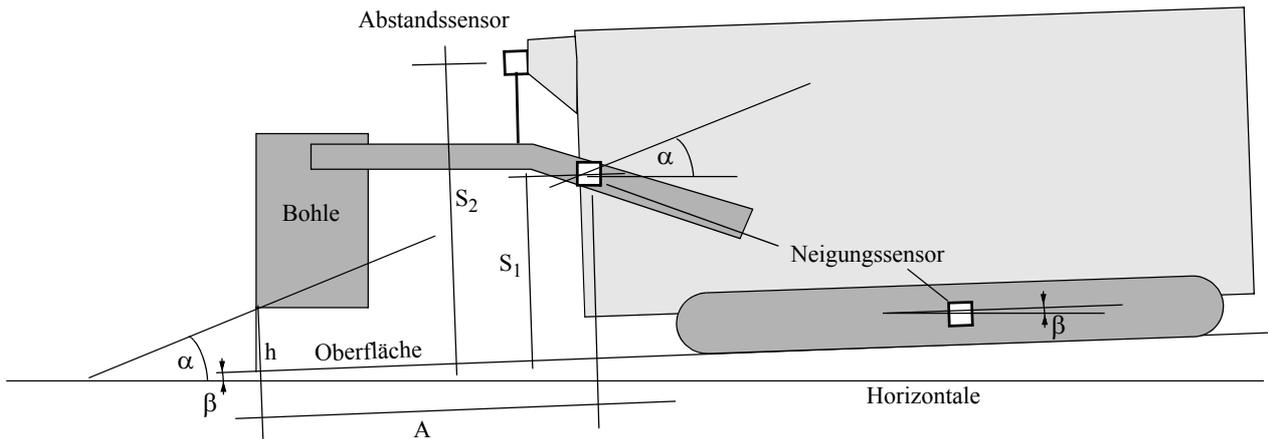


Bild 3.10: Messprinzip zur Ermittlung der Schichtdicke [HORN03]

3.3.4 Überblick

In Bild 3.11 sind alle für das System benötigten Sensoren mit ihren Positionen auf dem Fertiger dargestellt:

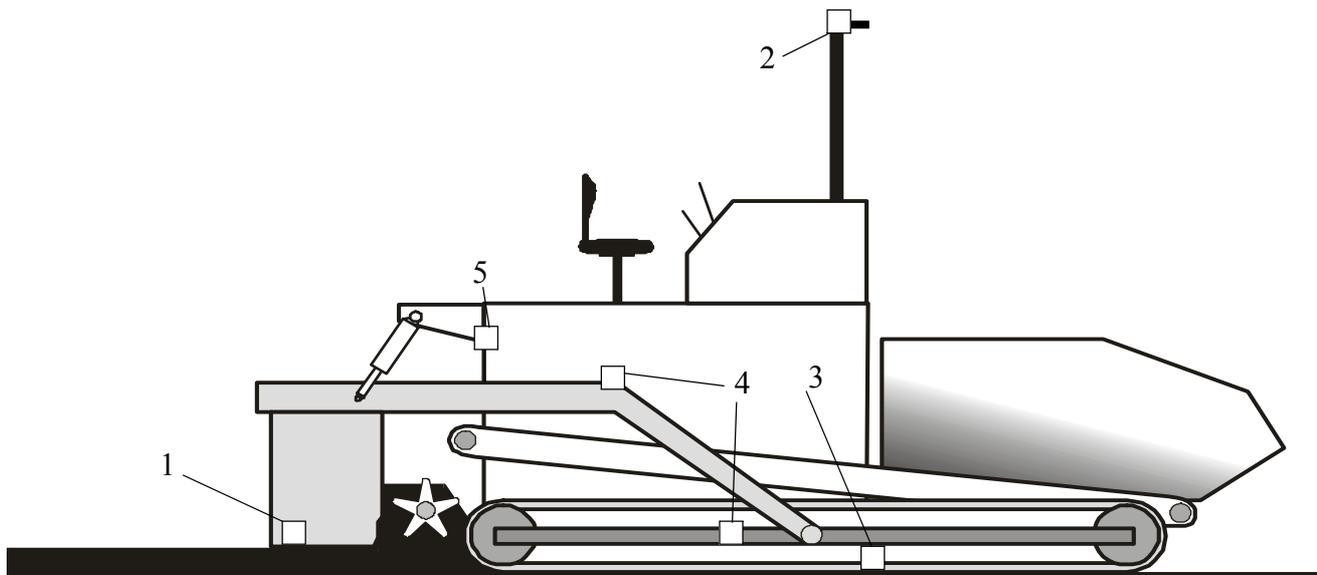


Bild 3.11: gewählte Sensorpositionen: 1: Materialtemperatur, 2: Windgeschwindigkeit, 3: Untergrundtemperatur, 4: Neigungssensoren, 5: Seilzugsensor

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

4.1 Qualität der Abkühlungsvorhersage

Die Vorhersage der Asphaltabkühlung steht im Spannungsfeld zwischen Maximierung der Genauigkeit und Minimierung der Kosten. Die Genauigkeit der Vorhersage kann durch die Bereitstellung aller benötigter Eingabeparameter hoher Qualität erreicht werden. Die Ermittlung dieser Parameter mit Sensoren ist zum Teil nicht möglich (z.B. Wolkenbedeckungsgrad, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität), zum Teil nur mit speziellen Sensoren (z.B. Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung). Eine weitere Möglichkeit der Bereitstellung von Parametern ist die manuelle Eingabe vor Einbaubeginn, oder die Verwendung von Standardwerten. Jede dieser Vereinfachungen führt zu einer Erhöhung des Vorhersagefehlers.

Weitere Fehler ergeben sich aus der Positionierung von Sensoren und Messfehlern von Sensoren. Fehlerhafte Messungen oder der Totalausfall von einzelnen Sensoren oder Sensorgruppen kann zu weiteren Fehlern führen, darf aber das Gesamtsystem nicht zum Abbruch bringen.

Der maximale Fehler ist stark von der Qualität und Quantität der verwendeten Sensoren und somit direkt von den Kosten abhängig. Das in dieser Arbeit entwickelte System hat den Anspruch, mit möglichst wenig Messungen eine akzeptable Genauigkeit zu bieten. Dazu ist die Verwendung von Sensoren

ren für die Messung von Windgeschwindigkeit, Materialtemperatur beim Einbau und Schichtdicke vorgesehen. Alle weiteren Parameter sind manuell einzugeben oder als Konstanten implementiert. Im praktischen Einsatz sind momentan Systeme, die lediglich auf der Infrarotmessung der Oberflächentemperatur beruhen. Diese Messmethode kann lediglich eine Genauigkeit von $\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ liefern [ÅKESSON03]. Der Grund für diesen großen Fehler ist neben sensorbedingten Messfehlern vor allem die große Abweichung der Oberflächentemperatur vom vorhergesagten Wert aufgrund der stark schwankenden Randbedingungen wie Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung, wobei die Windgeschwindigkeit und damit die Konvektion den größten Einfluss hat [DAINES85].

4.2 Berechnungsgrundlagen

4.2.1 Allgemeines

Die Berechnung des Temperaturverlaufes in einem festen Körper unter stationären Bedingungen lässt sich nach [WAGNER98] berechnen mit

$$\rho c(\vartheta) \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \operatorname{div}[\lambda(\vartheta) \operatorname{grad} \vartheta] + \dot{W}(\vartheta, x, t) \quad (2)$$

mit

ρ Dichte des Materials [kg/m^3]

$c(\vartheta)$ spezifische Wärmekapazität

t Zeit [s]

λ Wärmeleitfähigkeit [W/Km]

ϑ Temperatur

$\dot{W}(\vartheta, x, t)$ Leistungsdichte von Wärmequellen innerhalb des Körpers

Folgende **Vorraussetzungen und Vereinfachungen** werden angenommen:

- ▶ temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit

In der Literatur sind keine Angaben über die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit von Asphalt mit der Temperatur zu finden, deshalb wird eine konstante Wärmeleitfähigkeit verwendet.

- ▶ temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität

Aus Tabelle 2.2 ergibt sich eine Steigerung der spez. Wärmekapazität von 1,7 bis 2,1 J/gK bei einer Temperatursteigerung von 0 bis 200 $^\circ\text{C}$, also 0,2 J/gK pro 1 $^\circ\text{C}$. Für die vorliegende Arbeit wird diese Veränderung vernachlässigt.

- ▶ Temperaturveränderung nur in eine Richtung (eindimensionales Problem)

Es wird angenommen, daß es sich bei dem betrachteten Problem um ein eindimensionales System handelt. Randeffekte in Längsrichtung treten aufgrund der quasi unendlichen Längsausdehnung nicht auf, in Querrichtung sind sie lokal auf wenige Zentimeter am Rand der Straße begrenzt.

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

Desweiteren werden Längskanten in der Regel erst während des wiederholten Überrollens der Walze in noch warmem, aber abgekühltem Zustand mit einer Kantenrolle abgetrennt (siehe Abb. 4.1). Die Abkühlung von der Seite ist deshalb vernachlässigbar.



Bild 4.1: Abdrücken der Asphaltkante mit einer Kantenrolle

- ▶ keine inneren Wärmequellen

Damit vereinfacht sich die obige Gleichung zu

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad t \geq 0, x \geq 0. \quad (3)$$

Diese Gleichung zeigt anschaulich die Bedeutung der Temperaturleitfähigkeit k und der Wärmeleitungsgleichung selbst. Nach Gleichung (3) ist die zeitliche Temperaturänderung $\partial \vartheta / \partial t$ an jeder Stelle des wärmeleitenden Körpers der Temperaturleitfähigkeit proportional. Die Gleichung (3) verknüpft die zeitliche Temperaturänderung an einer Stelle mit der Krümmung des Temperaturverlaufs in der Umgebung dieser Stelle. Folgende drei Fälle lassen sich danach unterscheiden (siehe Abbildung 4.2):

- ▶ ist $\partial^2 \vartheta / \partial x^2 > 0$, so steigt die Temperatur (Erwärmung)
- ▶ ist $\partial^2 \vartheta / \partial x^2 < 0$, so fällt die Temperatur
- ▶ ist $\partial^2 \vartheta / \partial x^2 = 0$, so bleibt die Temperatur konstant (stationärer Grenzfall)

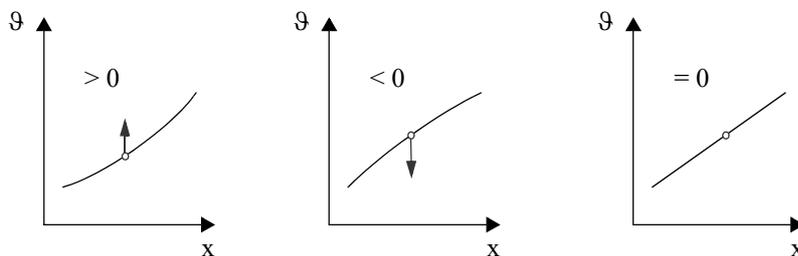


Bild 4.2: Bedeutung der Krümmung für die zeitliche Änderung der Temperatur nach Gleichung (3)

4.2.2 Randbedingungen

4.2.2.1 Kontaktfläche mit Untergrund

An der Unterseite der Platte findet ein Wärmeaustausch ausschließlich durch direkten Kontakt mit dem darunterliegenden Material statt. Im Falle einer Asphaltdeckschicht ist dieses Material ebenfalls Asphalt, im eine Binderschicht kann auch auf einer ungebundenen Gesteinskörnungsschicht liegen.

4.2.2.2 Temperaturverhalten der freien Oberfläche

Die an der Straßenoberfläche wirkenden Wärmeströme können unterteilt werden in Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion. Die Wärmestrahlung an der Straßenoberfläche ist zu unterteilen in die kurzwellige solare Strahlung im Wellenlängenbereich von 0,3 bis 5 μm und die langwellige terrestrische Strahlung im Bereich von 5 bis 100 μm [KÖRTVÉLYESSY98].

Solare Wärmestrahlung

Die auf die Erdoberfläche einwirkende solare Strahlung wird als Globalstrahlung G bezeichnet mit

$$H_S = S \cdot \cos z + M_H \quad (4)$$

mit

S = direkte Sonnenstrahlung [mW/cm^2]

z = Winkel zwischen Flächenlot und Einfallrichtung der Sonnenstrahlung

M_H = diffuse Himmelsstrahlung [mW/cm^2].

Die Globalstrahlung kann bei klarem Himmel und hochstehender Sonne in mittleren Breiten Werte bis ca. $910 \text{ W}/\text{m}^2$ erreichen [KÖRTVÉLYESSY98]. Die diffuse Strahlung ist unabhängig vom Einfallswinkel, da sie als Integral über alle Richtungen der Strahlungskomponente senkrecht zur horizontalen Erdoberfläche definiert ist. Sie kann Werte zwischen $210 \text{ W}/\text{m}^2$ im Winter und $560 \text{ W}/\text{m}^2$ im Hochsommer erreichen. Die thermischen Auswirkungen der solaren Strahlung hängt von dem Absorptions- dem Reflexions- und dem Transmissionsvermögen ab. Dabei entfällt bei Asphaltflächen das Transmissionsvermögen, da keine Strahlung durch den Körper hindurchgeleitet wird. Für Asphalt wurde in [SOLAIMANIAN93A] eine Absorption von 0,85 bis 0,93 ermittelt.

Terrestrische Wärmestrahlung

Auch für die langwellige terrestrische Wärmestrahlung können Absorptions- und Reflexionskoeffizienten angegeben werden. Nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz ist der Emissionskoeffizient identisch mit dem Absorptionskoeffizienten. Somit kann mit Kenntnis des Emissionskoeffizienten für jede beliebige Temperatur die Ausstrahlung nach dem Stephan-Boltzmann-Gesetz berechnet werden:

$$H_T = T^4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \quad (5)$$

mit

T_O = Oberflächen-Temperatur [K]

σ = Stephan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

ε = Emissionsgrad [1]

Atmosphärische Strahlung

Die von der Erde abgestrahlte Energie wird zum Teil von der Atmosphäre wieder reflektiert und als langwellige Wärmestrahlung von der Oberfläche absorbiert. Die aufgenommene Energie beträgt nach [SOLAIMANIAN93A]:

$$H_{TR} = w \cdot T_O^4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_\alpha \quad (6)$$

mit

T_O = Oberflächen-Temperatur [K]

ε_α = $0,77 - 0,28 \cdot (10^{-1,002} \rho)$

ρ = Dampfdruck in der Atmosphäre [Pa]

w = Bedeckungsgrad

$w = 1,0$ für wolkenfreien Himmel

$w = 1,42$ für völlig bedeckten Himmel

Konvektion

Der Wärmefluss aufgrund von Konvektion ist abhängig vom Temperaturunterschied zwischen der Oberfläche und der umgebenden Luft sowie von der Windgeschwindigkeit und beträgt

$$H_K = h_c \cdot (T_O - T_{amb}) \quad (7)$$

mit

h_c = Konvektionskoeffizient [W/m²K]

Der Konvektionskoeffizient wird von [ALLEN95] angegeben mit

$$h_c = 7,4 + 6,39 v^{0,75} \quad (8)$$

Der Wärmefluß an der freien Oberfläche einer Platte kann nach [LUOMA94] mit Gleichung 9 beschrieben werden.

$$q = h_c (T_O - T_{amb}) + \varepsilon \sigma (T_O^4 - W \cdot T_{sky}^4) - \alpha H_s \quad (9)$$

The diagram shows three L-shaped brackets pointing to the terms in the equation above:

- The first bracket (under $h_c (T_O - T_{amb})$) is labeled "Energieaufnahme durch Konvektion".
- The second bracket (under $\varepsilon \sigma (T_O^4 - W \cdot T_{sky}^4)$) is labeled "Energieaufnahme durch Abstrahlung".
- The third bracket (under $-\alpha H_s$) is labeled "Energieaufnahme durch direkte Sonneneinstrahlung".

mit

- T_O = Oberflächentemperatur [°C]
- T_{amb} = Umgebungstemperatur [°C]
- T_{sky} = Effektive Temperatur des Himmels [°C] [ALLEN95]
- α = Absorptionsgrad [1]
- ε = Emmissionsgrad [1]
- H_s = Sonneneinstrahlung [W / m²]
- h_c = Konvektionskoeffizient [W/m²K]
- v = Windgeschwindigkeit [m/s]
- W = Bedeckungsgrad
 - $W = 1,0$ für wolkenfreien Himmel
 - $W = 1,42$ für völlig bedeckten Himmel
- σ = Stephan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

Der Konvektionskoeffizient wird von [ALLEN95] angegeben mit

$$h_c = 7,4 + 6,39 v^{0,75} \quad (10)$$

4.3 Literatursichtung

Eine der ersten Veröffentlichungen, die sich mit der Temperaturberechnung in Asphaltsschichten befasst, stammt von Barber aus dem Jahre 1957 [BARBER57]. Darin wird ein Verhältnis zwischen der Asphaltsschichttemperatur und Wind, Niederschlag, Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung entwickelt. Das Modell liefert - trotz seines einfachen Aufbaus - eine hohe Genauigkeit in der Vorhersage, ist jedoch auf die schon fertiggestellte Straße angepasst und zur Berechnung des Temperaturverlaufes innerhalb einer Zeitspanne von mehreren Tagen geeignet.

1968 wird von Corlew und Dickson eine erste Computeranwendung veröffentlicht [CORLEW68], die die Berechnung von Temperaturprofilen ermöglicht. Ausgehend von den thermodynamischen Grundgleichungen wird ein auf der Finite-Differenz-Methode basierendes Berechnungsmodell entworfen, das mit einer Vielzahl von Parametern genaue Vorhersagen trifft. Mit umfangreichen Messungen in den USA wird das Modell verifiziert. Problematisch ist die zur Berücksichtigung des Windeinflusses verwendete Biot-Zahl, die für jede Messung mit großem Aufwand berechnet werden muss. Besonders

die Studie der Einflüsse von Windgeschwindigkeit, Umgebungs- und Basistemperatur, Sonneneinstrahlung und Schichtdicke bietet eingehende und grundlegende Informationen zum Abkühlungsverhalten.

Das von Corlew und Dickson entwickelte Programm wird 1976 von Jordan und Thomas [JORDAN76] in Standardeinheiten überführt und ebenfalls mit Hilfe von Messungen in heißem Asphalt verifiziert.

Patankar veröffentlicht 1980 mit seinem Buch "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow" [PATANKAR80] eine umfangreiche Darstellung vieler Wärmetransportphänomene sowie Methoden zur numerischen Berechnung. Der in dieser Veröffentlichung vorgestellte Algorithmus zur Berechnung der instationären Wärmeleitung bildet die Grundlage der im nächsten Kapitel dargestellten Berechnungsmethode.

In der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" wird 1981 von Krebs eine weiteres Modell für "Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper" veröffentlicht [KREBS81B]. An eigens hergestellten Asphaltkörpern werden darin Temperaturmessungen unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt und mit einem neu entwickelten Berechnungsverfahren unter eingehender Betrachtung der Randbedingungen und der Materialeigenschaften verglichen. Dieses Verfahren ermöglicht es, unter Benutzung aktueller Wetterbeobachtungen den Temperaturgang in Asphaltsschichten vorherzusagen, die Asphaltabkühlung während des Bauvorgangs, also im Temperaturbereich über ca. 80 °C, wird nicht untersucht.

Von Daines wird 1985 eine interessante Untersuchung [DAINES85] veröffentlicht, die unter Verwendung des von Jordan und Thomas 1976 veröffentlichten Modells (das wiederum auf dem von Corlew und Dickson entwickelten Modelles von 1968 beruht) Tabellen zur Angabe der verbleibenden Verdichtungszeit zur Verfügung stellt. Vor allem der starke Einfluss der Schichtdicke und der Windgeschwindigkeit auf die Abkühldauer wird in dieser Arbeit hervorgehoben. Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein sehr einfaches System, mit dem die Abkühlungsdauer schnell und ohne Computerhilfe abgeschätzt werden kann. Es ist sehr gut geeignet, um die Randbedingungen vor dem Bauprozess zu untersuchen und die Maschinenführer entsprechend anzuweisen. Während des Bauvorganges kann es jedoch aufgrund der notwendigen Verwendung von Tabellen nicht genutzt werden.

Hunter und McGuire verbinden im darauf folgenden Jahr in einem kurzen Artikel [HUNTER86] das von Corlew und Dickson entwickelte Computerprogramm mit dem von Patankar veröffentlichten Berechnungsprinzip zu einer genaueren und schnelleren Berechnungssoftware.

Eine weitere deutsche Veröffentlichung ist die 1989 wieder in der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" erschienene Untersuchung von Arand, Dörschlag und Pohlmann [ARAND89]. In dieser Arbeit wird das Temperaturverhalten eingehend untersucht, um Aussagen über das Ermüdungsverhalten von Asphalt treffen zu können. Die Untersuchung bleibt auf die Vorhersage von Tages- und Jahresganglinien beschränkt und befasst sich nicht mit der Asphaltabkühlung beim Einbau, also mit dem Temperaturbereich über ca. 80 °C.

1993 werden von Solaimanian und Kennedy zwei Arbeiten veröffentlicht [SOLAIMANIAN93A] [SOLAIMANIAN93B], die sich beide mit der Vorhersage der maximalen Asphalttemperaturen mit Hilfe von Wetterbeobachtungen beschäftigen und besonders auf die Oberflächenphänomene eingehen. Da-

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

bei wird in [SOLAIMANIAN93A] eine Parameterstudie durchgeführt, die die berechneten Maximaltemperaturen in Abhängigkeit von Wärmeabstahlung, Wärmeübertragungskoeffizient, geographischer Breite und Lufttemperatur darstellt.

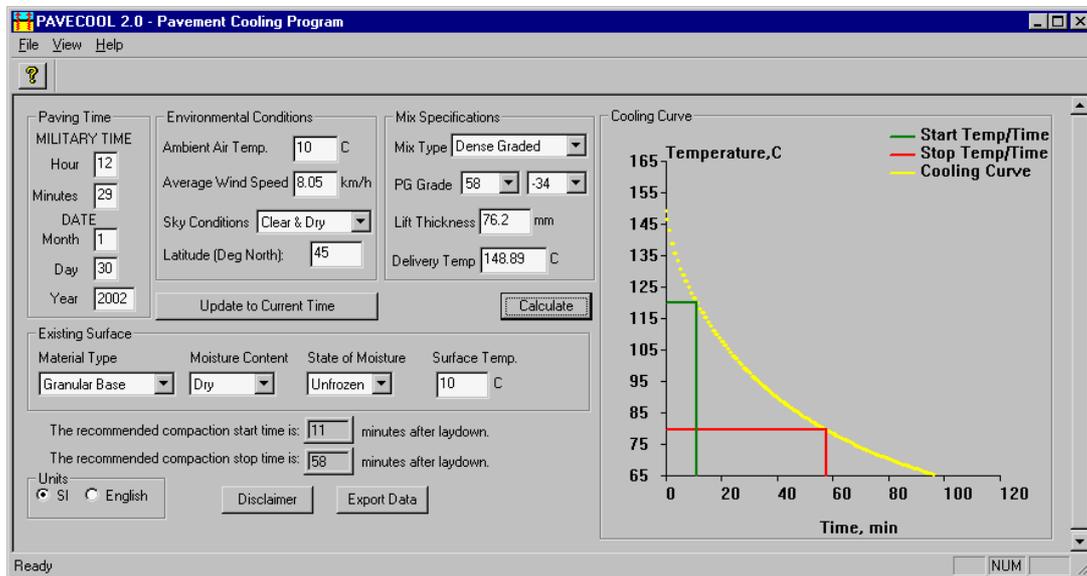


Bild 4.3: PaveCool-Software des Minnesota Department of Transportation

Luoma et al veröffentlichen 1994 in [LUOMA94] eine Weiterentwicklung des Modells von Corlew und Dickson, die auch die Verdichtung, also die räumliche Verkleinerung der obersten Asphaltsschicht mit einbezieht. Diese Veröffentlichung ist der Beginn einer Reihe von Schriften der University of Minnesota, die in kurzer Folge erschienen. 1995 schreibt Allen in [ALLEN95] eine Erweiterung der vorherigen Arbeit, die 1998 wiederum von Chadbourn in [CHADBOURN98] erweitert wird. Das Ergebnis der Forschungsarbeit ist das frei verfügbare Computerprogramm 'PAVECOOL', das es möglich macht, das Abkühlungsverhalten auf der Baustelle nach Eingabe einiger Parameter vorherzusagen (siehe Abbildung 4.3).

Mit dem "Simulation Model for Calculating Pavement Temperatures Including Maximum Temperature" veröffentlicht Hermansson im Jahr 2000 [HERMANSSON00] eine Arbeit, in der eigene Messungen mit den Modellen von Barber und Solaimanian verglichen werden. Hermansson entwickelt ein Berechnungsmodell, das eine Verbesserung der beiden anderen Modelle darstellt. Eine ausführliche Studie der Einflüsse von Umweltparametern führt zu einer sehr genauen Vorhersage des Abkühlungsverhaltens.

4.4 Abkühlungsmodell

Das zur Berechnung des Abkühlungsverhaltens eingesetzte Berechnungsmodell basiert auf dem von Corlew und Dickson in [CORLEW68] entwickelten und von Patankar in [PATANKAR80] modifizierten Modell beruht (siehe Anhang A.2). Die im vorigen Kapitel aufgeführten Berechnungsmodelle sind meist nicht für diesen Temperaturbereich vorgesehen und zum Teil auch nicht vollständig dokumentiert.

4.4.1 Vereinfachungen

Da die Messung aller benötigter Parameter nicht möglich oder nur mit sehr großem Aufwand zu bewerkstelligen ist und diese Parameter nur einen geringen Einfluss haben, werden sie in dem verwendeten Modell bis auf wenige Ausnahmen festgesetzt.

Gemessen werden:

- ▶ Schichtdicke
Die Schichtdicke verändert die Abkühlzeit nach [DAINES85] mit der Potenz 1,8. Dies bedeutet, daß bei ansonsten unverändert Bedingungen die Verdoppelung der Schichtdicke die Abkühlzeit um das 3,5-fache verlängert.
- ▶ Materialtemperatur
Die Temperatur des Asphalts beim Einbau ist aufgrund der großen Veränderungen des Parameters [JURASZ03 ET AL] zwingend erforderlich.
- ▶ Windgeschwindigkeit
Neben der Schichtdicke ist die Windgeschwindigkeit der größte Einfluß auf die Abkühlung des Asphalts [VIDUKA02].
- ▶ Umgebungstemperatur
Die Temperatur der an den Asphalt grenzenden Luftschicht wird mit Hilfe eines Thermoelements gemessen.
- ▶ Temperatur des Untergrundes
Die Temperatur des Untergrundes spielt nach [VIDUKA02] ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Ermittlung der Abkühlung. Pro 10 °C Temperaturunterschied der Unterschicht verlängert sich die Abkühlzeit um 17 bis 30 min, wobei diese Verlängerung mit steigender Untergrundtemperatur größer wird.

Weniger relevante Parameter sind:

- ▶ Absorptionsgrad
- ▶ Emmissionsgrad
- ▶ Sonneneinstrahlung
- ▶ Bedeckungsgrad
- ▶ Materialdichte
- ▶ spezifische Wärmekapazität
- ▶ Wärmeleitfähigkeit

Diese Parameter werden wie in der folgenden Tabelle angegeben fixiert:

Tabelle 4.1: Konstante Materialparameter für die Berechnung

Parameter	Einheit	mögl. Wertebereich	Konstante
Absorptionsgrad	1	---	0,85
Emmissionsgrad	1	---	0,95
Sonneneinstrahlung	W/m ²	0 - 910	800
Bedeckungsgrad	1	1,0 - 1,42	1,0
Materialdichte	kg/m ³	2100 - 2700	2200
spez. Wärmekapazität (nach Tab. 2.6)	J/kgK	840 - 1090	921
Wärmeleitfähigkeit (nach Tab. 2.6)	W/mK	0,76 - 2,88	1,2

Zur Berechnung des Wärmeflusses an der Unterseite werden ebenfalls die Parameter aus Tabelle 4.1 genutzt.

Somit vereinfacht sich die Randbedingung aus Gleichung A.24 in

$$b = h_c (T_O - 12) + 53,87 \cdot 10^{-9} \cdot T_O^4 - 680 + a_i^0 \quad (11)$$

4.4.2 Berechnungsgeschwindigkeit

In Kapitel 5.4.2 wird die Länge für ein Berechnungselement mit 20 m bestimmt, bei drei Streifen nebeneinander. Die maximale Berechnungsdauer ist abhängig von der Einbaugeschwindigkeit des Fertigers, da die Berechnungsergebnisse für die drei Streifen vorliegen müssen, wenn der Fertiger die Länge eines Rasterelements abgefahren hat.

Die maximale Berechnungsdauer lässt sich mit Hilfe von Gleichung 12 berechnen.

$$t_{B,max} = 60 \cdot l / (b \cdot v_e) \text{ [s]} \quad (12)$$

mit b = Anzahl der Streifen

l = Länge jedes Streifens (hier: 20 m)

v_e = Einbaugeschwindigkeit [m/min]

Es ergibt sich beispielsweise bei einer typischen Fertigergeschwindigkeit von 5 m/min eine max. Berechnungszeit von 80 s, bei einer Geschwindigkeit von 10 m/min ergeben sich 40 s. In Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit des zur Berechnung verwendeten Prozessors müssen Parameter wie Netzgröße, Engmaschigkeit und Zeitschrittgröße verändert werden, um eine ausreichende Berechnungsgeschwindigkeit zu erreichen.

4.4.3 Berücksichtigung der Verdichtung

Ein wichtiger Punkt des verwendeten Modelles ist die Möglichkeit der Deformation. Hierdurch kann die Verdichtung berücksichtigt werden. Im verwendeten Berechnungsmodell wird die Verdichtung nach einer Minute vollständig aufgebracht und innerhalb der Asphaltsschicht als linear und gleichförmig verteilt angenommen. Durch die Verdichtung verändert sich sowohl die Dichte als auch die Wärmeleitfähigkeit folgendermaßen [CHADBOURN98]:

$$\rho = (1-g) \rho_{\text{verdichtet}} \quad \lambda = (1-g) \lambda_{\text{verdichtet}} \quad (13)$$

mit g = geleistete Verdichtung (% Verdichtung / 100)

Unter der Annahme einer geringen spezifischen Wärmekapazität des Luftanteils im Asphalt kann die Veränderung der spezifischen Wärmekapazität des Asphaltes als unveränderlich angenommen werden. Die Abkühlung beschleunigt sich durch das Aufbringen der Verdichtung aufgrund der damit einhergehenden Verringerung der Schichtdicke.

4.5 Approximation

Zur Übertragung des Berechnungsergebnisses wird die nach der Berechnung vorliegende diskrete Abkühlungskurve in Form einer Funktion angenähert und die Funktionsparameter übertragen. Im folgenden werden sowohl eine polynomische als auch eine exponentielle Approximation untersucht.

Aufgrund des verzögerten Beginns der Abkühlung in der Schichtmitte werden die ersten fünf Minuten der Abkühlungskurve für die Berechnung der Approximation nicht berücksichtigt.

4.5.1 Exponentielle Näherung

Eine Approximation durch eine exponentielle Funktion hat folgende Form:

$$T(t) = f(x) = a e^{-b t} \quad (14)$$

mit

t Zeit

$T(t)$ Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit

a, b gesuchte Parameter zur Beschreibung der Kurve

Durch Umformung der Gleichung in

$$\log T(t) = c - b x \quad (15)$$

wird die Funktion linear und das Problem zu einem Näherungsproblem von Daten an eine gerade Linie, also einer linearen Regression.

4.5.2 Polynomische Näherung

Die polynomische Näherung hat die Form

$$T(t) = a + b t + c t^2 + d t^3 + \dots \quad (16)$$

und kann mit der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt werden.

4.5.3 Vergleich und Wertung

In Abbildung 4.4 sind für eine exemplarische Messung aus Kapitel 4.6.3 die Näherungen durch ein Polynom dritten Grades und eine exponentielle Kurve dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die polynomische Näherung deutlich besser an die Abkühlungskurve anlegt als die exponentielle.

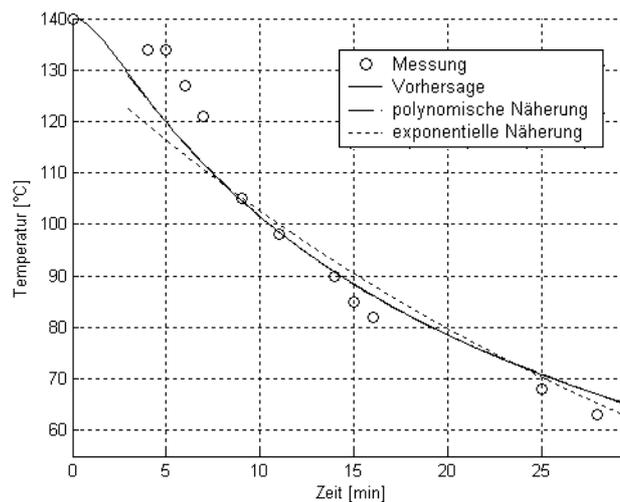


Bild 4.4: exemplarische Messung mit Darstellung der Abkühlungsvorhersage sowie polynomischer und exponentieller Approximation

Für die Näherungsrechnung wird deshalb das Polynom gewählt, wobei durch eine Erhöhung des Grades des Polynoms über den dritten hinaus keine weitere Verbesserung erzielt wird. Die Implementierung der polynomischen Näherung wird nach [PRESS92] mit der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt.

4.6 Messungen und Vergleich

4.6.1 Vorüberlegung

Während der Erstellung dieser Arbeit konnten mehrere Temperatur-Messungen auf Baustellen durch-

geführt werden, die eine Kontrolle des Berechnungsmodells erlauben. Die Messwerte werden mit der eigenen Vorhersagemethode als auch mit den Berechnungsmodellen des Minnesota Department of Transportation (MnDOT) und des Schwedischen Straßenbauinstitutes (VTI) verglichen und gewertet. Sowohl bei der Berechnungssoftware von MnDOT und VTI können nicht alle Parameter und hier in erster Linie Materialkennwerte angegeben werden. Diese Parameter sind bei den beiden Programmen konstant und unveränderlich. Die in den Programmen konfigurierbaren Parameter sind in Tabelle 4.2 aufgezählt.

Tabelle 4.2: *Eingabemöglichkeiten der Berechnungssoftware von MnDOT und VTI (+: Parameter einstellbar, -: Parameter nicht einstellbar*

Parameter	MnDOT	VTI
Tageszeit	+	-
geogr. Breite	+	-
Schichtdicke	+	-
Lufttemperatur	+	+
Windgeschwindigkeit	+	+
Materiatemperatur beim Einbau	+	-
Untergrundtemperatur	+	-
Dichte	_ ^a	+
Wassergehalt	_ ^a	+
Porosität	_ ^a	+
Sonneneinstrahlung	_ ^a	+
Bedeckungsgrad	+	-

a. Materialkennwerte können nur durch die Wahl des Zuschlags (SMA, Dense Grade, Superpave) und Bitumens (46/-46 bis 82/-10) angegeben werden, nicht direkt

Aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur Konfiguration der beiden Vergleichsprogramme kommt es bei diesen in den folgenden Vergleichen mit Messungen und dem eigenen Berechnungsmodell zu Abweichungen.

4.6.2 Messeinrichtung, Messprinzip

Die Durchführung von Temperaturmessungen während des Einbauvorganges erfolgt mit Hilfe eines digitalen Thermometers mit einem Thermoelement von 10 cm Länge. Dieser Messfühler wird von der Seite in der Mitte der Schicht parallel zur Oberfläche eingeführt und kann auch während der Überfahrt der Walzen im Asphalt verbleiben.

Das Messprinzip des Thermoelements beruht auf dem Effekt, dass an den Enden zweier Drähte aus verschiedenen Werkstoffen eine Spannung entsteht, wenn die Temperatur an der Verbindungsstelle der beiden Werkstoffe eine andere ist als die an den Klemmen des Messgerätes [KÖRTVÉLYESSY98].

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

Dieser Effekt beruht auf einer materialspezifischen Eigenschaft von elektrisch leitfähigen Materialien. Im Inneren eines Leiters stellt sich eine Verschiebung der Elektronendichte ein, wenn über dem Leiter ein Temperaturgradient besteht. Die Ansammlung der Elektronen wird dichter im Bereich der niedrigen Temperaturen. Benutzt man ein Thermopaar aus zwei geeigneten Werkstoffen, wie zum Beispiel NiCr und Ni so lässt sich die Thermospannung dieser Materialpaarung messen.

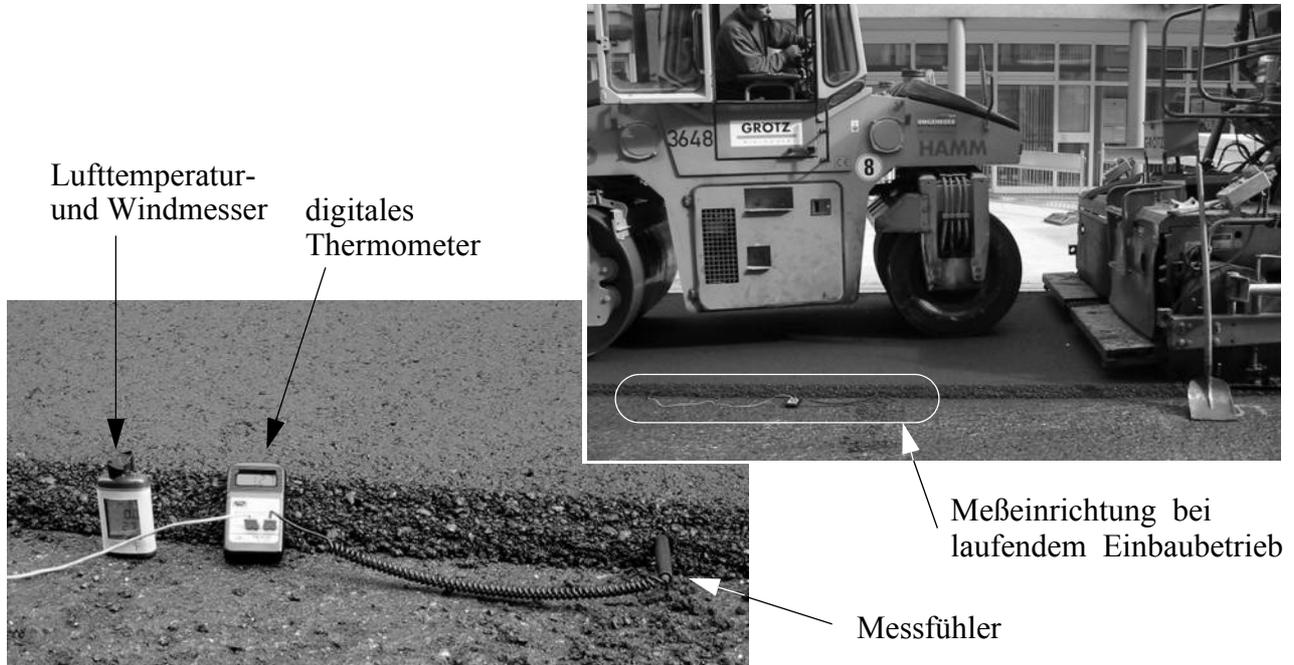


Bild 4.5: Durchführung der Messungen

Bei Thermoelementen werden zwei Drähte aus unterschiedlichen Werkstoffen an der Messstelle verbunden. Werden diese sogenannten Thermoleitungen mit Kupferleitungen verbunden nennt man diese Übergangsstelle Vergleichsstelle. Die an der Vergleichsstelle gemessene Thermospannung ist direkt proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Messstelle und Vergleichsstelle.

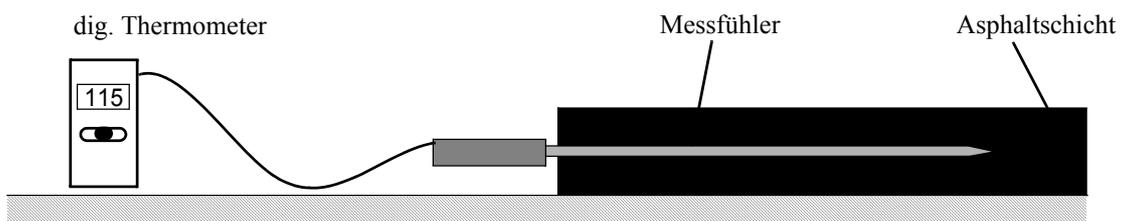


Bild 4.6: Messung der Temperatur während des Straßenbauvorganges

4.6.3 Messungen in Oskarshamn, Schweden

Im Laufe von Baustellentests des OSYRIS-Systemes [JURASZ03 ET AL] wurden mehrere Temperaturmessungen während des Straßenbauvorganges durchgeführt. Bei dem Bauprojekt handelte es sich um die Erneuerung der Deckschicht auf einer dreispurigen Fernstraße in der Nähe von Oskarshamn, Schweden auf einer Länge von ca. 5 km.

Das verwendete Material ist in Anlage A.5 beschrieben. Die Umweltbedingungen sind aus Tabelle 4.3

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

ersichtlich, in Tabelle 4.4 sind die Einbaudicken für die Messstellen vermerkt. Für die Berechnung wurde die Durchschnittswerte der Tabelle 4.3 verwendet.



Bild 4.7: Straßenbaustelle in Oskarshamn, Schweden

Tabelle 4.3: Umweltbedingungen der Temperaturmessungen bei Oskarshamn, Schweden

	min	max	Durchschnitt
Wolken	1/8	3/8	2/8
Lufttemperatur [°C]	7	12	10
Windgeschwindigkeit [m/s]	0	2,5	1,5

Tabelle 4.4: Einbaudicken an den Messstellen

Messstelle	1	2	3	4
Einbaudicke [mm]	35	38	40	68

In der Darstellung der Messungen mit den berechneten Abkühlungskurven ist der Datenbereich grau unterlegt, der für die Berechnung der Approximation berücksichtigt wird. Dieser Bereich beginnt stets nach 5 Minuten nach Abkühlungsbeginn, das Ende liegt in der Regel bei 80 °C.

Die Festlegung des linken Randes erfolgt gemäß Abschnitt 4.5 zeitverzögert, weil durch den verzögerten Abkühlungsbeginn die Abkühlungskurve bei Abkühlungsbeginn zunächst unverändert bleibt und die Approximation hierdurch zu Fehlern führen kann.

Der rechte Rand wird bei der Mindesttemperatur von 80 °C festgelegt. Bei niedrigeren Temperaturen soll Asphalt in der Regel nicht verdichtet werden, so dass das Berechnungsmodell diesen Bereich auch nicht zu berücksichtigen hat.

Die erste Messung zeigt bei Temperaturen unter 70 °C deutliche Abweichungen aller drei Modelle. Die eigene Approximation im grau unterlegten Bereich bis 80 °C zeigt eine maximale Abweichung von weniger als 3 °C, der Bereich unter dieser Temperatur wird für die Ermittlung der Kurve nicht berücksichtigt.

Die große Abweichung der Modelle ab einem Zeitpunkt von 15 min nach Messungsbeginn ist auf eine veränderte Windgeschwindigkeit zurückzuführen, die bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden

kann. Diese hat die Abkühlung deutlich beschleunigt. Keines der Berechnungsmodelle gestattet eine Änderung der Windgeschwindigkeit während des Berechnungsvorgangs.

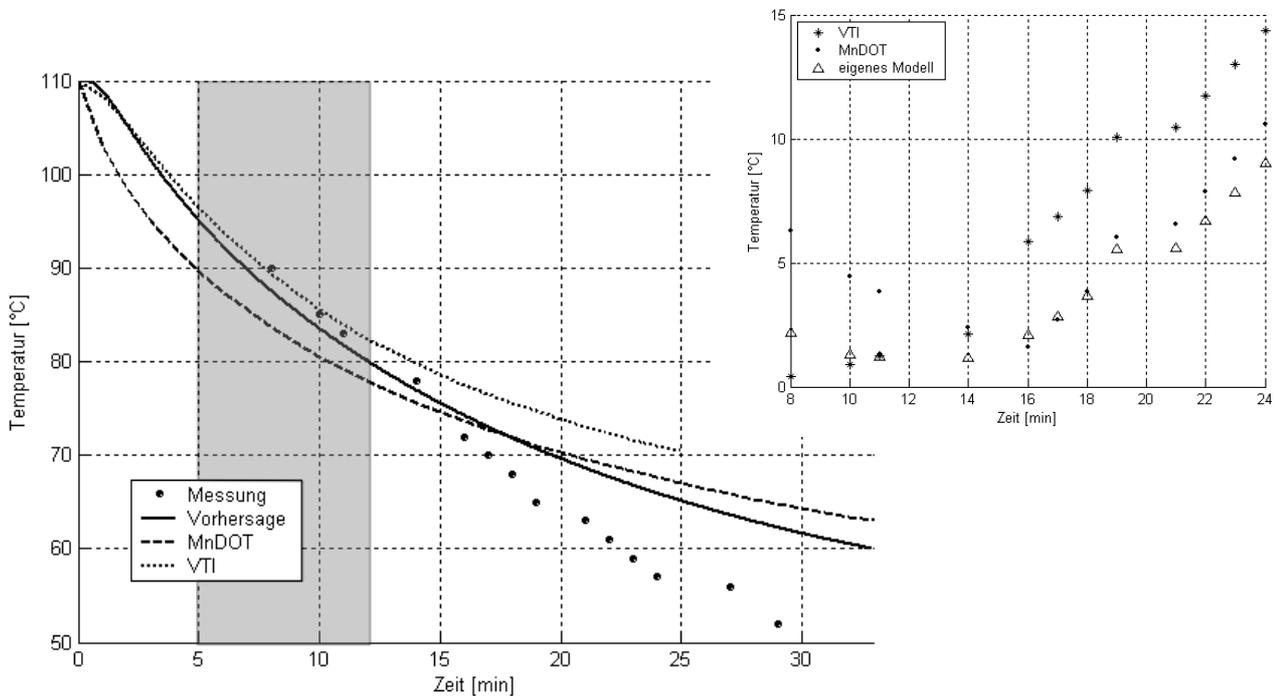


Bild 4.8: Messpunkt 1: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

Tabelle 4.5: Messpunkt 1: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	7,1	5,5	4,1
maximaler Fehler [°C]	14,4	10,6	9,0

Ähnlich wie die erste Messung zeigt auch die der Vergleich der Berechnung mit den Messpunkten der zweiten Messung große Abweichung bei Temperaturen unter 80 °C, das Modell des MnDOT zeigt gerade zu Beginn der Messung eine sehr große Abweichung nach unten. Das VTI-Modell zeigt wie in der ersten und auch der nächsten Messung bei niedrigen Temperaturen große Abweichungen. Wie in Abschnitt 4.6.5 gezeigt wird, treten solche Abweichung bei diesem Modell immer bei geringen Schichtdicken auf.

Tabelle 4.6: Messpunkt 2: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	5,1	7,8	4,7
maximaler Fehler [°C]	11,2	13,4	9,9

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

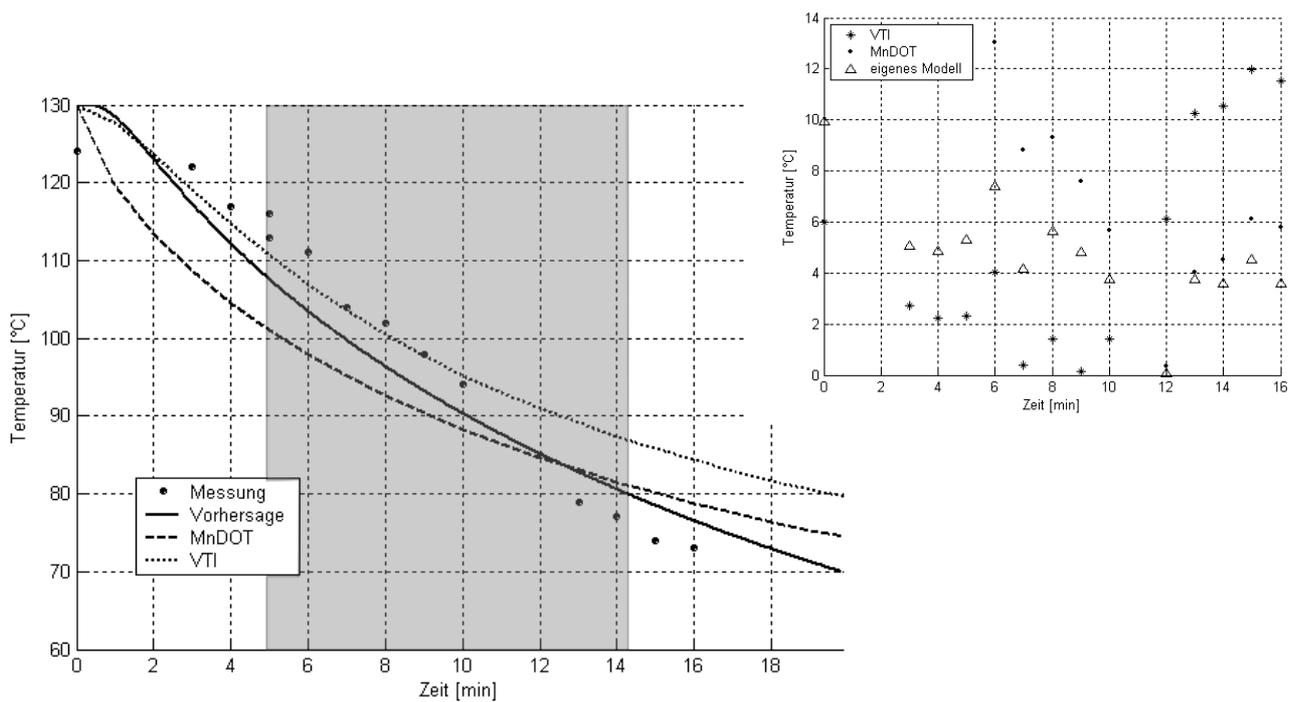


Bild 4.9: Messpunkt 2: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

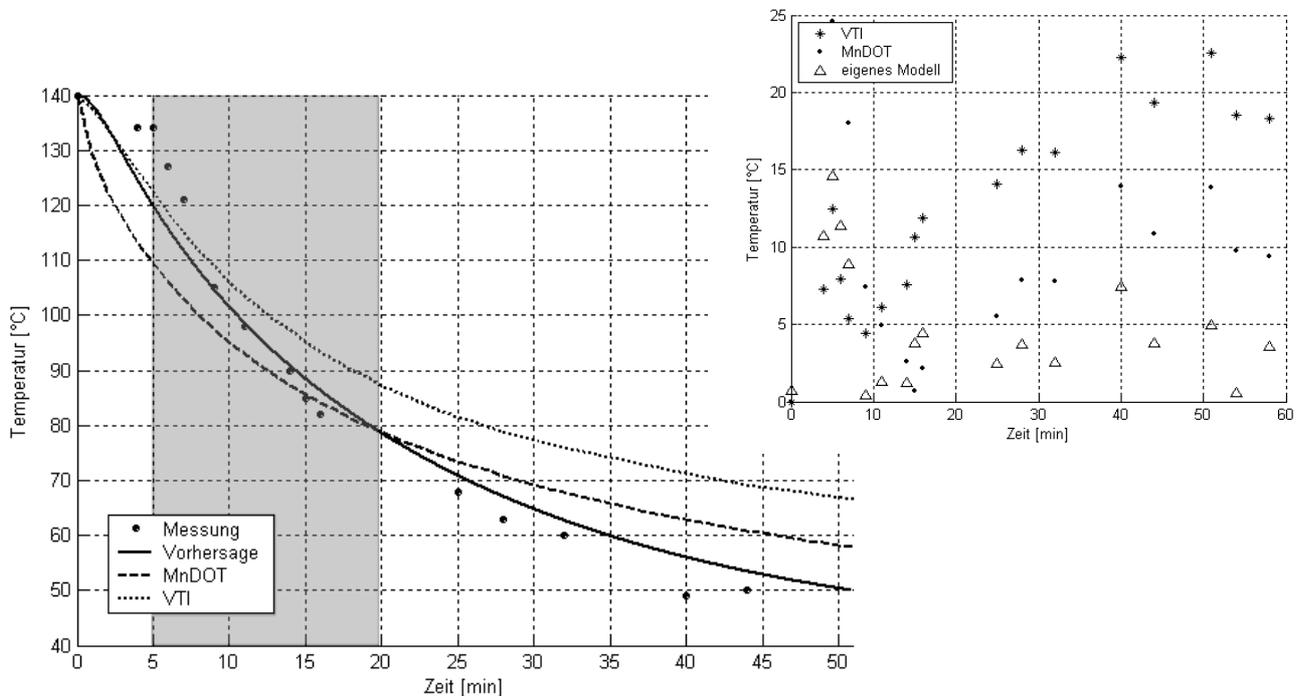


Bild 4.10: Messpunkt 3: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

Die dritte und vierte Messung laufen über 45 min, beginnend bei 140 bis 50 °C. Bei Messung drei fällt die gute Qualität der eigenen Vorhersage im Vergleich mit den beiden anderen Modellen auf, jedoch

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

sind auch hier alle drei Vorhersagen im unteren Bereich zu hoch.

Während der Messreihe 4 konnte aus baubetrieblichen Gründen nur eine Messung nach 26 min zum Zeitpunkt 48 min erfolgen, mindestens eine weitere Messung wäre hier wünschenswert gewesen, um einen etwaigen Messfehler auszuschließen. Es zeigt sich jedoch, dass die eigene Vorhersage zu niedrig liegt, während die anderen beiden wiederum zu hohe Temperaturen vorhersagen.

Tabelle 4.7: Messpunkt 3: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	12,3	10,1	4,8
maximaler Fehler [°C]	22,5	24,6	14,6

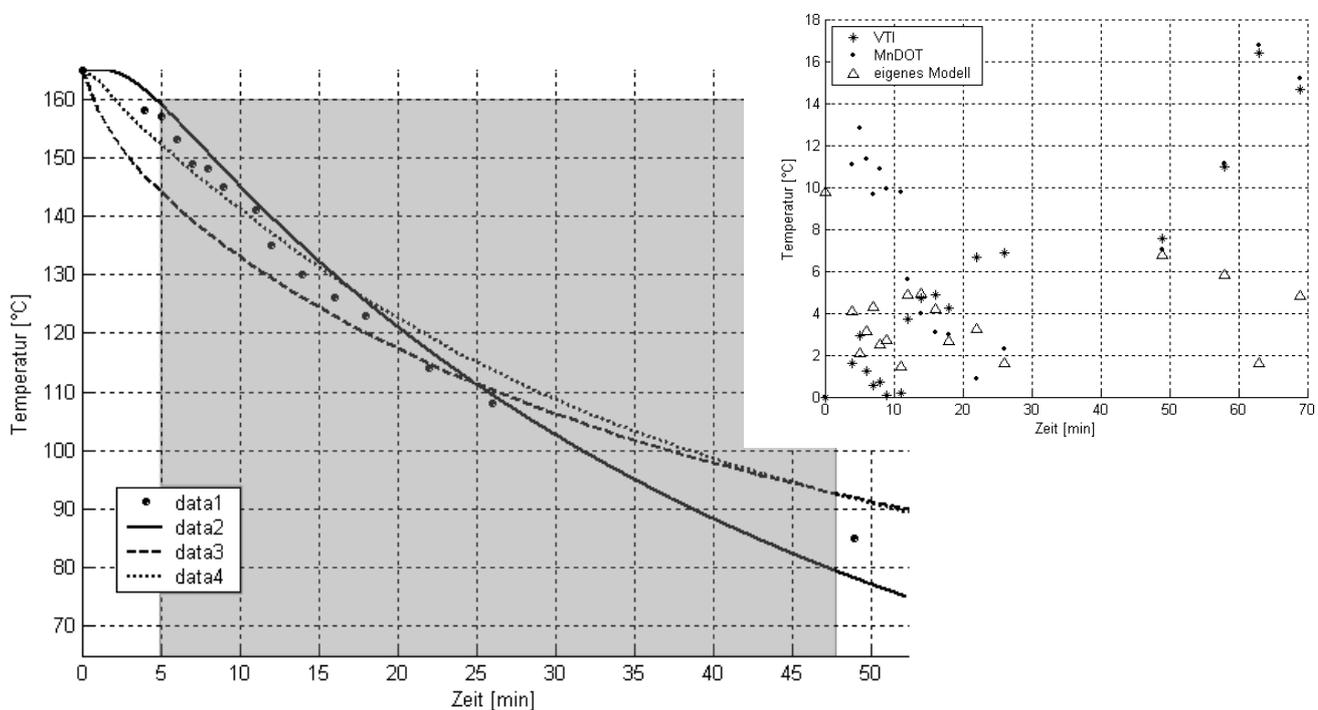


Bild 4.11: Messpunkt 4: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

Tabelle 4.8: Messpunkt 4: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	4,9	8,0	3,9
maximaler Fehler [°C]	16,4	16,8	9,7

4.6.4 Messungen in Karlsruhe

Von August bis Oktober 2003 führte die Bauunternehmung Grötz aus Karlsruhe die Sanierung des Straßenoberbaus und die Sanierung von Infrastruktureinrichtungen im Bereich der Georg-Friedrich-Straße in Karlsruhe durch. Während der Fertigstellung der Asphaltdeckschicht war die Durchführung von Temperaturmessungen möglich (siehe Abbildung 4.12).

Das verwendete Material wurde angegeben als AB 0/11S mit Bitumen B65 (vgl. Tabelle 2.3). Die Umweltbedingungen sind aus Tabelle 4.3 ersichtlich, in Tabelle 4.4 sind die Einbaudicken für die Messstellen vermerkt.

Tabelle 4.9: Umweltbedingungen der Temperaturmessungen in Karlsruhe

	min	max	Durchschnitt
Wolken	3/8	7/8	5/8
Lufttemperatur [°C]	21	26	13
Windgeschwindigkeit [m/s]	0	3,8	1,5

Tabelle 4.10: Einbaudicken an den Messstellen

Messstelle	1	2	3	4	5	6	7	8
Einbaudicke [mm]	52	52	65	65	61	62	55	60



Bild 4.12: Baumaßnahme in der Georg-Friedrich-Straße am 11. Oktober 2003 in Karlsruhe

Die Einbauverhältnisse bei den Punkten 1 und 2 sind identisch, die Punkte liegen nur wenige Dezimeter von einander entfernt. Daher sind auch die Vorhersagen der betrachteten Abkühlmodelle sehr ähnlich.

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

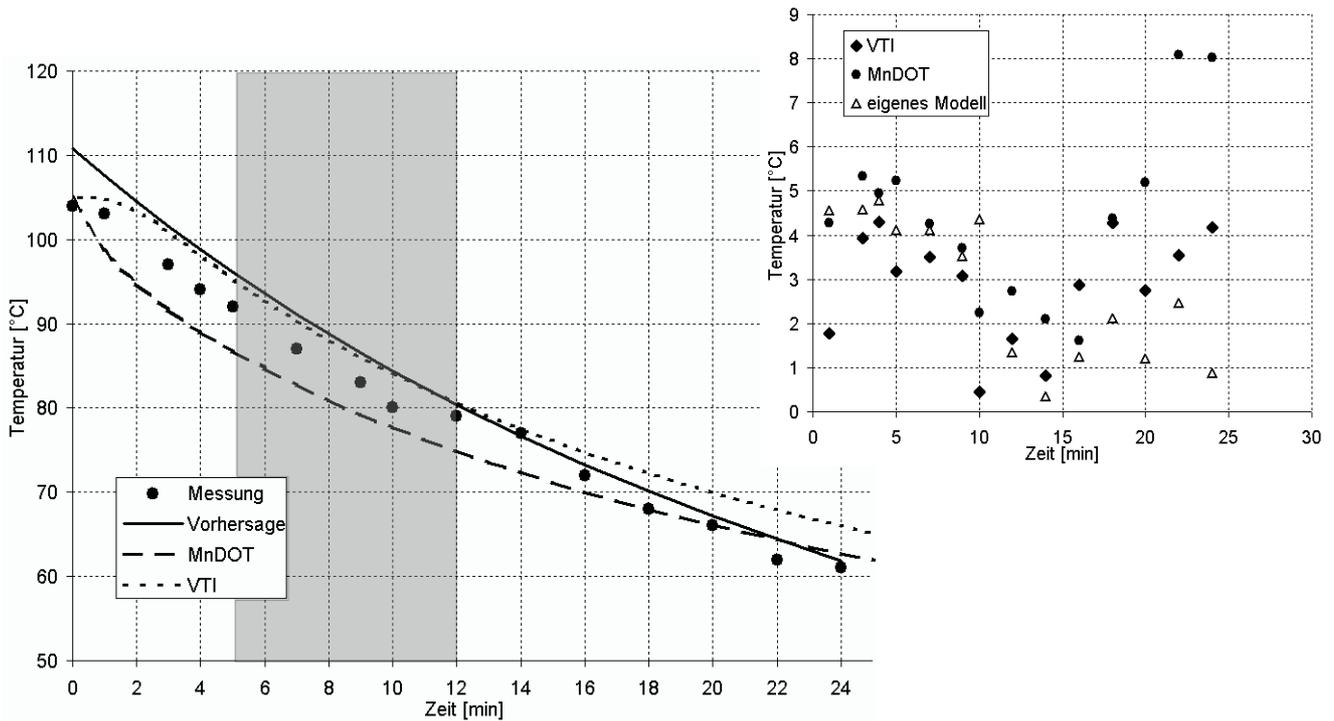


Bild 4.13: Messpunkt 1: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

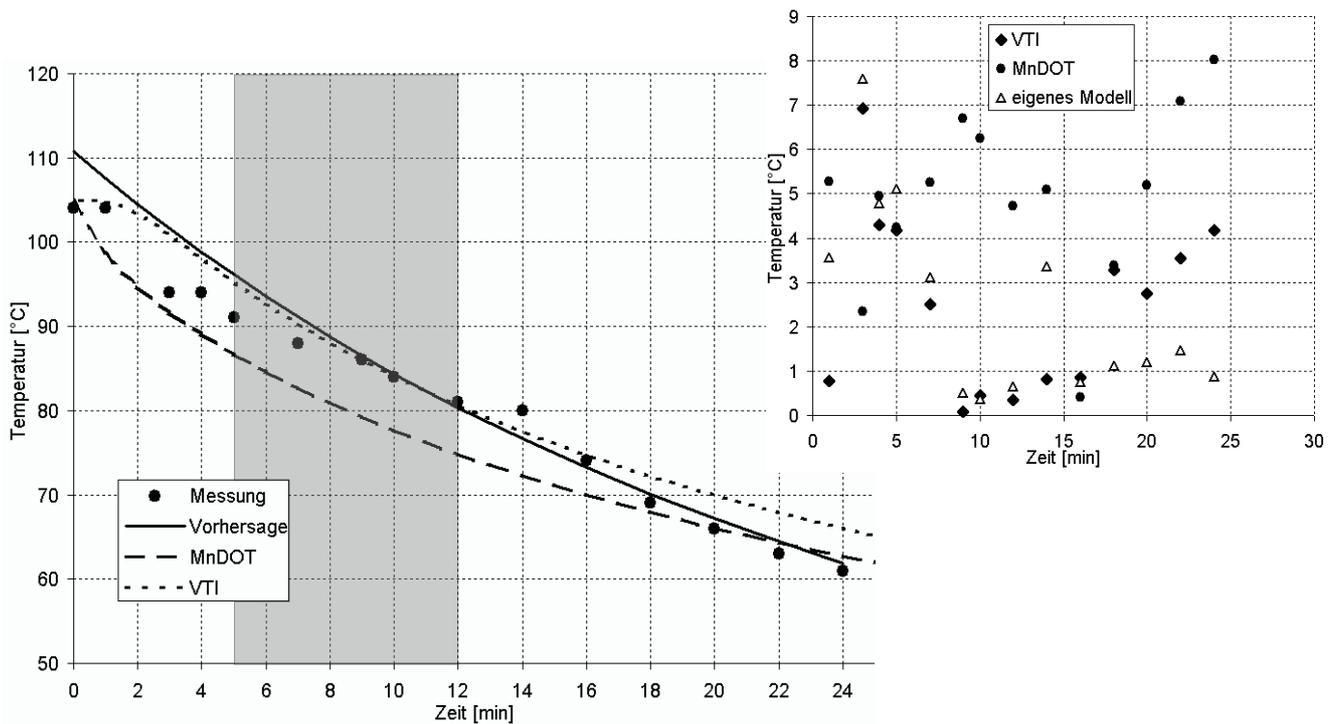


Bild 4.14: Messpunkt 2: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

Tabelle 4.11: Messpunkt 1: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	2,9	4,4	2,8
maximaler Fehler [°C]	4,3	8,1	4,8

Tabelle 4.12: Messpunkt 2: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	2,5	4,9	2,5
maximaler Fehler [°C]	6,9	8,0	7,6

Der durchschnittliche Fehler bei den Messpunkten 1 und 2 ist für das Vorhersagemodell des Minnesota Departement of Transportation (MnDOT) mit über 4 °C deutlich höher als bei den anderen beiden Modellen. Vor allem im frühen Bereich bis 15 Minuten ist läuft die Abkühlung deutlich langsamer als von dem Modell vorhergesagt. Im späteren Verlauf sinkt der Fehler deutlich, hier ist dann die Vorhersage des Schwedischen Straßenbauinstitutes (VTI) zu hoch. Das im Rahmen dieser Arbeit Rechenmodell zeigt im späteren Verlauf ab ca. 70 °C eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. In der folgenden Messung Nr. 3 ist das Verhalten umgekehrt. Hier trifft die Vorhersage von MnDOT im vollständigen Zeitraum die Messwerte mit nur einer sehr geringen Abweichung von weniger als 1 °C. Die Vorhersage des VTI liegt vor allem zu Beginn viel zu hoch, das eigene Modell trifft wiederum ab ca. 70 °C auf die Messwerte. Das die Abkühlungskurve schon nach 6 Minuten die 80 °C-Marke erreicht, wird die Approximation schon ab den Messwerten nach 2 Minuten nach dem Einbau begonnen. Hieraus ergeben sich die extrem hohen Abweichungen unterhalb der 80 °C.

Tabelle 4.13: Messpunkt 3: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	9,5	0,6	5,1
maximaler Fehler [°C]	18,2	3,0	7,1

Tabelle 4.14: Messpunkt 4: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	3,3	1,2	4,4
maximaler Fehler [°C]	4,9	3,0	5,8

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

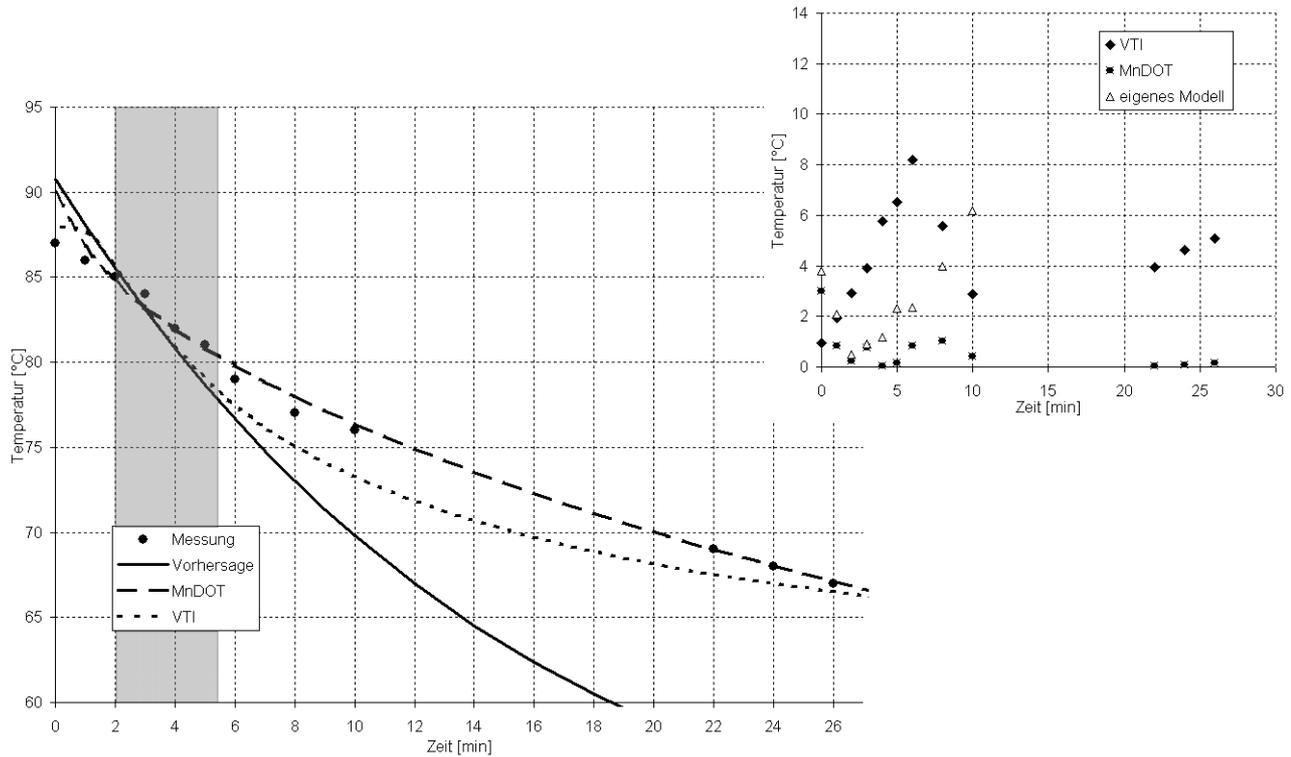


Bild 4.15: Messpunkt 3: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

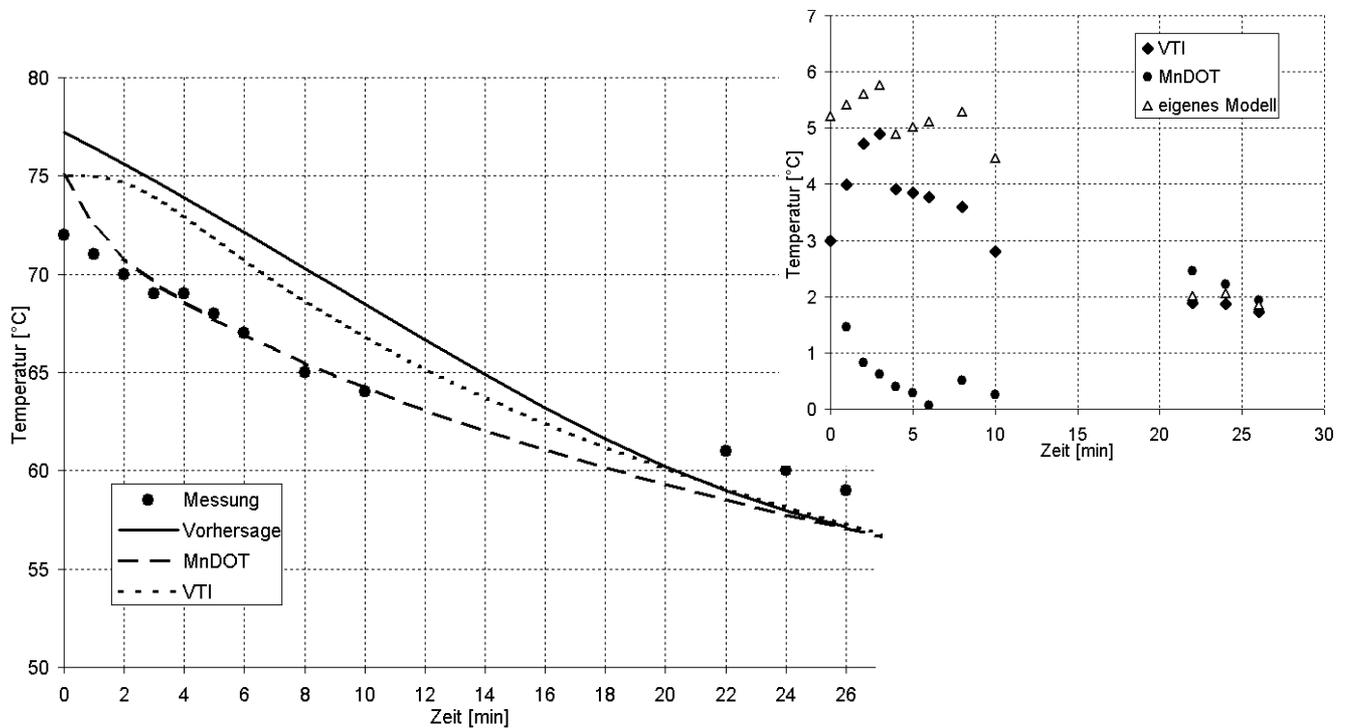


Bild 4.16: Messpunkt 4: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

Die Einbautemperatur bei Messung Nr. 4 liegt bei lediglich 75 °C und ist somit schon unter der Mindesttemperatur für die Verdichtung. Die Approximation kann daher keine sinnvollen Werte liefern. Somit ergibt sich somit für diese Vorhersage der größte durchschnittliche und maximale Fehler im Vergleich mit den beiden anderen Modellen (siehe Tabelle 4.14).

Auch hier ist die Vorhersage von MnDOT wie schon bei der vorherigen Messung mit einem Fehler von durchschnittlich 1,2 °C sehr gut.

Bei den beiden Messungen 5 und 6 ist die Vorhersage nach VTI die am nächsten an den Messwerten liegende. Die eigene Vorhersage ist besonders im Bereich zwischen 100 und 70 °C korrekt, wohingegen das Modell MnDOT im unteren Bereich die Abkühlung zu schwach vorhersagt.

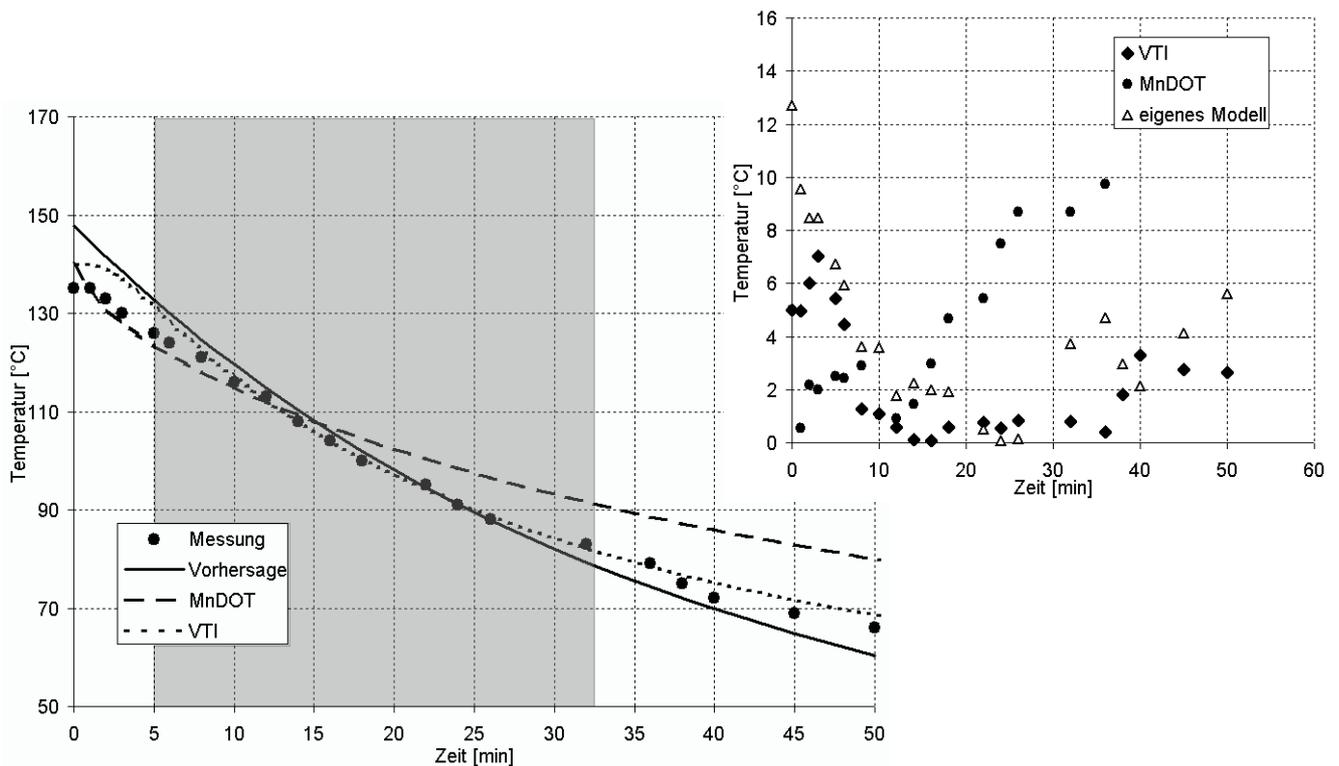


Bild 4.17: Messpunkt 5: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

Tabelle 4.15: Messpunkt 5: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	2,4	5,9	4,3
maximaler Fehler [°C]	7,0	14,1	12,8

Tabelle 4.16: Messpunkt 6: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	5,5	4,8	7,9
maximaler Fehler [°C]	12,6	6,2	14,5

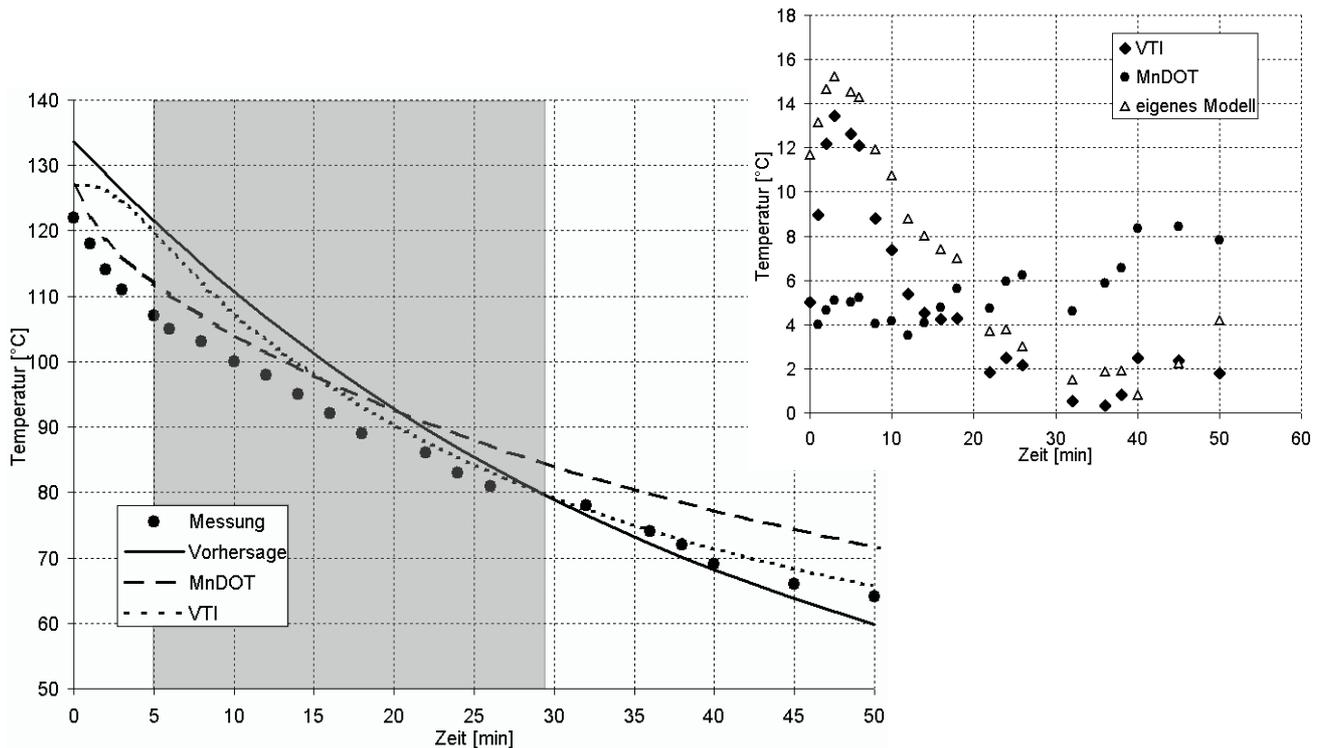


Bild 4.18: Messpunkt 6: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

Bei Messung 6 fällt auf, dass die Kurven der eigenen Vorhersage sowie der des VTI anschaulich sehr nahe an den Messungen liegen (Abbildung 4.18), die tatsächlichen Fehler-Beträge aber einen umgekehrten Eindruck geben (Tabelle 4.16). Dies wird damit begründet, dass beide Vorhersagen vor allem im Anfangsbereich deutlich zu hohe Temperaturen vorhersagen, sich aber später nah an die Messwerte anlegen. Das Modell des MnDOT sagt die Temperatur zumeist mit mehr als 4 °C zuviel voraus.

Die letzten beiden Messungen 7 und 8 liegt die Vorhersage nach MnDOT deutlich (> 15 °C) unter den anderen Vorhersagen, die ihrerseits mit einem geringen Fehler von weniger als 8 °C die Temperatur vorhersagen, aber auch hier weist die eigene Berechnung gerade zu Beginn große Fehler auf.

Tabelle 4.17: Messpunkt 7: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	1,9	8,9	3,1
maximaler Fehler [°C]	6,0	13,3	7,5

Tabelle 4.18: Messpunkt 8: Durchschnitts- und Maximalfehler, eigenes Modell, VTI und MnDOT

	VTI	MnDOT	eigenes Modell
durchschnittlicher Fehler [°C]	2,2	8,5	1,9
maximaler Fehler [°C]	5,0	11,3	4,4

4. Berechnung der Asphaltabkühlung

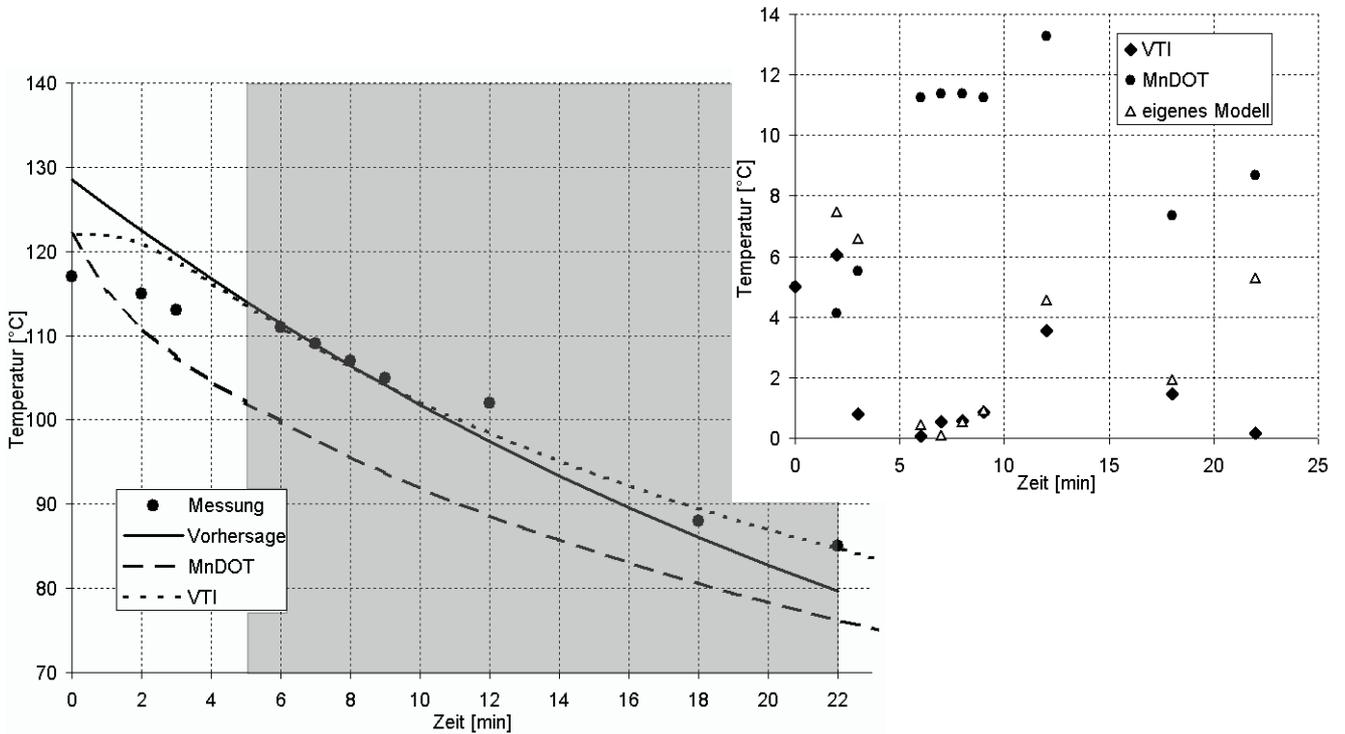


Bild 4.19: Messpunkt 7: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

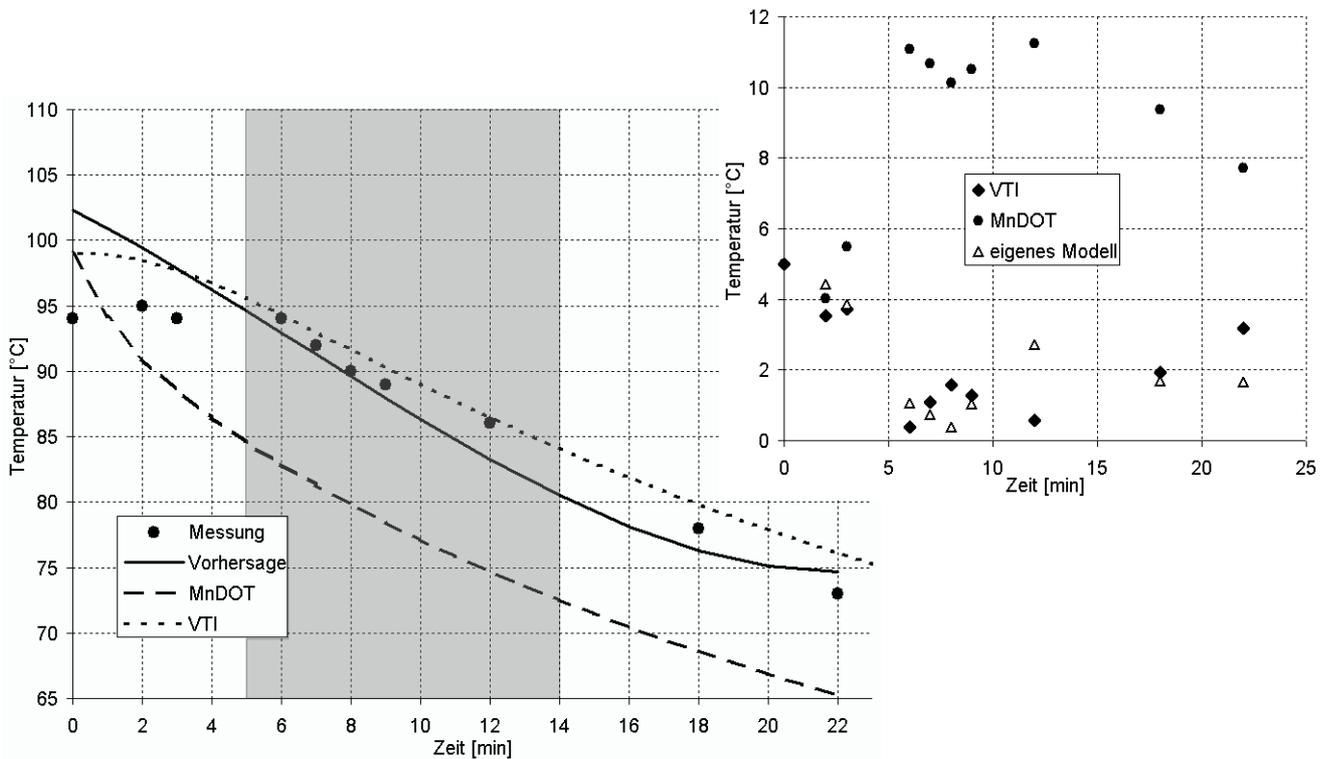


Bild 4.20: Messpunkt 8: Messwerte, eigene Abkühlungsvorhersage und Abkühlungsvorhersagen von VTI und MnDOT sowie deren Abweichung von den Messwerten

4.6.5 Auswertung

In Tabelle 4.19 sind die Fehler der Vorhersagen aller Messungen aufgelistet. Der Gesamtdurchschnitt aller Fehler ist in der letzten Zeile enthalten. Dabei wird deutlich, dass das in dieser Arbeit entwickelte Berechnungsverfahren einen kleineren durchschnittlichen und maximalen Fehler aufweist als die Modelle des Minnesota Department of Transportation und des Schwedischen Straßenbauinstitutes. Dies ist in erster Linie auf die in Abschnitt 4.6.1 beschriebene Problematik zurückzuführen, dass bei den beiden Programmen nicht alle benötigten Berechnungsparameter eingestellt werden können.

Die Anpassung der Berechnungsparameter an das verwendete Material und die Berücksichtigung des Temperaturbereichs zwischen der Einbautemperatur und der Mindesttemperatur für die Approximation liefern die in der folgenden Tabelle gezeigten guten Resultate.

Tabelle 4.19: Zusammenfassung der Fehler aus allen Messungen

Messung	durchschnittlicher Fehler			maximaler Fehler		
	VTI	MnDOT	eigenes Modell	VTI	MnDOT	eigenes Modell
1	7,1	5,5	4,1	14,4	10,6	9,0
2	5,1	7,8	4,7	11,2	13,4	9,9
3	12,3	10,1	4,8	22,5	24,6	14,6
4	4,9	8,0	3,9	16,4	16,8	9,7
5	2,9	4,4	2,8	4,3	8,1	4,8
6	2,5	4,9	2,5	6,9	8,0	7,6
7	9,5	0,6	5,1	18,2	3,0	7,1
8	3,3	1,2	4,4	4,9	3,0	5,8
9	2,4	5,9	4,3	7,0	14,1	12,8
10	5,5	4,8	7,9	12,6	6,2	14,5
11	1,9	8,9	3,1	6,0	13,3	7,5
12	2,2	8,5	1,9	5,5	11,3	4,4
Durchschnitt	5,0	5,9	4,1	10,8	11,0	9,0

5. Systementwurf und Wahl der Hardwarekomponenten

5.1 Systementwurf

Die einzelnen Komponenten des Gesamtsystems sind

- ▶ Sensoren für Wind, Materialtemperatur, Lufttemperatur, Untergrundtemperatur und Schichtdicke
- ▶ GPS System
- ▶ Funk-Komponente zum Empfang der Daten vom Fertiger
- ▶ Datenlogger zum Mitschreiben aller Daten
- ▶ Zentrales Datenverarbeitungs- und Berechnungsmodul
- ▶ Graphische Anzeige / Benutzerschnittstelle

Als zentrale Datenübertragungsmethode wird der digitale Feldbus CAN („Controller Area Network“) gewählt, ein Standard für die Messwerterfassung auf Baumaschinen [KEIL02][ETSCHBERGER94].

In Abbildung 5.1 ist die Struktur des Gesamtsystemes dargestellt. Alle angeschlossenen Sensoren sowie das GPS-Modul versenden CAN-Nachrichten mit den aktuellen Daten. Da die Datenübertragung

per Funk nur in eine Richtung läuft, werden auch bei diesem Modul alle empfangenen Nachrichten per CAN verschickt. Der angeschlossene Datenlogger speichert all diese Nachrichten ab, wobei auch noch zusätzliche Daten mitgeloggt werden können, die von weiteren Sensoren zur Verfügung gestellt und von diesem System nicht genutzt werden. Das Zentralmodul empfängt alle Nachrichten, verarbeitet diese und sendet auch die Berechnungsergebnisse der Abkühlungsberechnung auf den CAN-Bus, damit diese vom Logger ebenfalls aufgezeichnet werden können.

Die Ansteuerung der Benutzerschnittstelle (siehe Abschnitt 5.4) erfolgt über eine direkte interne Verbindung. Dabei werden sowohl die LEDs als auch die Druckflächen für Benutzereingaben mit Hilfe einer seriellen Schnittstelle gesteuert.

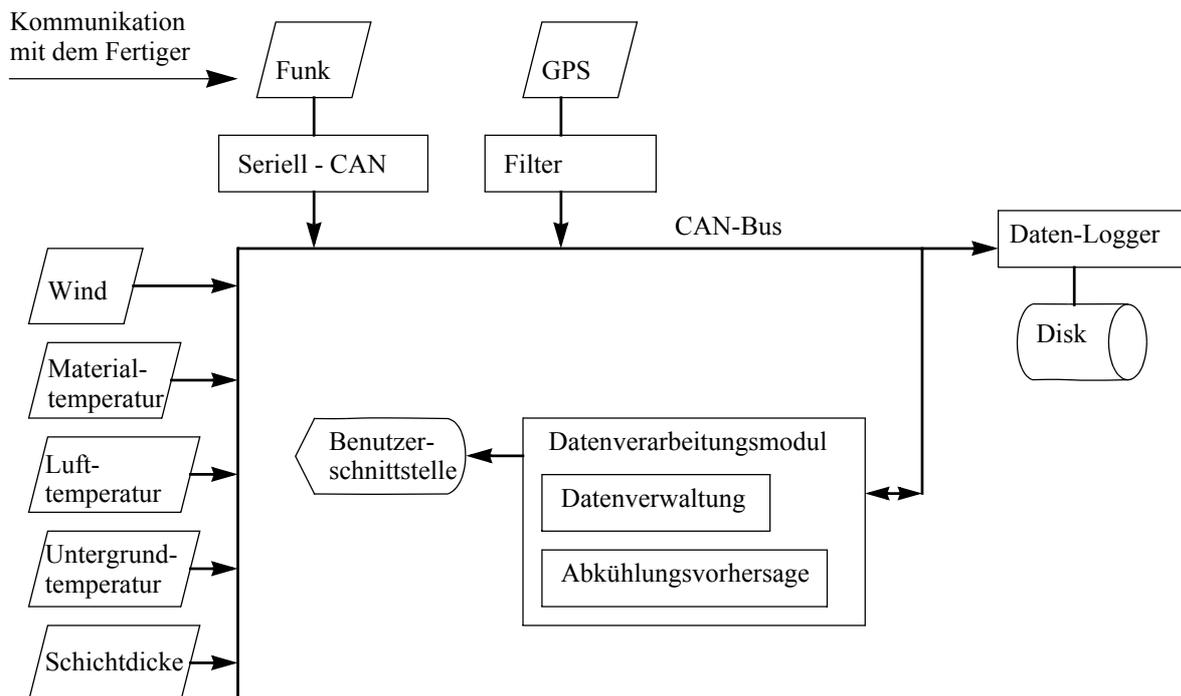


Bild 5.1: Entwurf des Gesamtsystems

5.2 Datenübertragung

5.2.1 Datenmenge

Die Datenübertragung zwischen den einzelnen Maschinen ist notwendig, um die Vorhersage der Kerntemperatur durchzuführen. Ist eine Funkverbindung nicht vorhanden oder ausgefallen, funktioniert das System als Überfahrtenzähler ohne Temperaturvorhersage. Die Menge der zu übertragenden Daten zwischen Fertiger und Walzen ist in Tabelle 5.1 dargestellt, dabei ist der Weg der Daten nur in Richtung vom Fertiger zu den Walzen (Broadcasting). Die Art der Daten wurde in Kapitel 4.4.1 ermittelt.

Tabelle 5.1: Datenübertragung zwischen Fertiger und Walze: Datenbeschreibung, Größe und Frequenz

Beschreibung	Wertebereich	Typ ^a	Größe [Bytes]	Übertragungsintervall [ms]
Position, Ost-Richtung	0 bis ~ 20.000 km	float	4	1000
Position, Nord-Richtung	0 bis~ 20.000 km	float	4	1000
Position: Richtung	-1 bis +1	float	4	1000
Windgeschwindigkeit	0 bis 20	float	4	1000
Schichtdicke	0 bis 200 [0.1 mm]	unsigned int	2	5000
Materialtemperatur	500 bis 2500 [0.1 °C]	unsigned int	2	5000
Temperatur der Unterschicht	-500 bis 1200 [0.1 °C]	int	2	5000

a. Beschreibung siehe Anhang A.6

Somit ergibt sich eine Datenmenge von 17,2 bytes pro Sekunde. Bei einer Benutzung des Datenbusses von 50 % sowie einer Datenmenge von 10 % für das Übertragungsmanagement ergibt sich somit eine minimale Übertragungsrate von 38 bytes pro Sekunde bzw. 300 baud (bit pro Sekunde).

Die Übertragung der Daten hat möglichst schnell und zeitnah zur Messung zu erfolgen, und sollte möglichst innerhalb von 100 ms nach der Messung erfolgt sein. Somit ergibt sich eine empfohlene Datenübertragungsrate von 3000 baud.

5.2.2 Mögliche Technologien

Für die Übertragung der im vorherigen Kapitel dargestellten Informationen per Funk stehen unterschiedliche Technologien zur Verfügung:

- ▶ WaveLAN
- ▶ Radio-Modem
- ▶ GSM

In Tabelle 5.2 werden diese Technologien verglichen.

Tabelle 5.2: Vergleich der verfügbaren Technologien für Datenübertragung per Funk

	WaveLAN	Radio-Modem	GSM
Protokoll	IP	Seriell	nicht spezifiziert
max. Übertragungsrate	100 MBit/s 12,8 Mbyte/s	115200 bit/s 14.400 bytes/s	115200 bit/s 14.400 bytes/s
max. Reichweite	400 m	800 m	unbegrenzt

Tabelle 5.2: Vergleich der verfügbaren Technologien für Datenübertragung per Funk

	WaveLAN	Radio-Modem	GSM
Gerätekosten	~ 250 €	~ 500 €	~150 €
Vorteile	Viele Hersteller, preiswerte Hardware, verbreitete Technologie	stabile Verbindung, robuste, erprobte Technologie	stabile Übertragung, hohe Entfernungen möglich
Nachteile	Notwendigkeit einer PC-basierten Hardwareplattform mit den damit verbundenen Nachteilen (Kosten, Robustheit)	niedrige Übertragungsrate	Hohe Kosten durch Übertragungskosten (Standleitung, Short Message Service)

Aufgrund der hohen Robustheit sowie der relativ hohen Übertragungsentfernung wird im Weiteren das Funkmodem verwendet. WaveLAN fällt wegen der Notwendigkeit einer PC-Hardware aus (siehe Kapitel 5.4.1), und die Verwendung der GSM-Lösung ist aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten nicht möglich.

5.3 Hardwarewahl und Systementwurf

5.3.1 Anforderungen

Die Hardware, also das Mikrocontrollersystem zur Durchführung der Berechnung, der Datenerfassung und -darstellung muss den folgenden Anforderungen genügen:

► **Robustheit**

Da die Hardware auf Baumaschinen eingesetzt wird, ist sie ständigen Vibrationen, starken Temperaturschwankungen sowie chemischen und physikalischen Einwirkungen ausgesetzt. Um diesen Einwirkungen dauerhaft widerstehen zu können, muß eine Hardwareplattform ausgewählt werden, die eine ausreichende Rechengeschwindigkeit bei niedriger Temperaturentwicklung bietet, ohne bewegte Teile (Lüfter, Festplatte) auskommt und gegen Staub und Flüssigkeiten beispielsweise durch Vergießen geschützt ist.

Gängige PC-Systeme kommen nicht in Frage, da sie eine zu große Hitze entwickeln, um Lüfterfrei arbeiten zu können, nicht die benötigte Robustheit aufweisen und die Anbindung spezieller Hardware (CAN, GPS, analoge Anzeige) sehr aufwendig ist [JURASZ03 ET AL]. Für die Verwendung von PC-Technologie spricht die leichte Programmierbarkeit sowie die Verfügbarkeit von Entwicklungs- und Softwaretools.

Die Alternative zu PC-Systemen sind auf Mikrocontrollern basierende Systeme. Diese bieten zwar keine mit PC-Prozessoren vergleichbare Rechenleistung, da sie jedoch aufgrund eines fehlenden Betriebssystems keine weiteren Aufgaben ausführen müssen, sind sie dennoch für eine Verwendung in dem zu entwickelnden System geeignet. Moderne 16-bit-Mikroprozessoren bieten eine Geschwindigkeit von bis zu 40 MHz bei geringer Wärmeentwicklung, so daß bei einer Verwendung

auf eine aktive Kühlung und damit auf bewegte Teile verzichtet werden kann.

► Kosten

Die Kosten spielen bei der Entwicklung eines Systems, das sich auf dem Markt etablieren soll, eine zentrale Rolle und sind zu minimieren. Die Kosten für ein Gesamtsystem inklusive Positionierung, Benutzerschnittstelle und Berechnungskomponenten sollten einen Wert von 5000 € nicht überschreiten, um noch eine Chance aus Vermarktung zu haben [ÅKESSON03]. Dabei sind vor allem die Kosten für die Positionierung zu beachten, die Dank der Entwicklungen des OSYRIS-Projektes den angegebenen Rahmen erreichen lassen [KLEY03][JURASZ03 ET AL].

Ein Gesamtsystem inklusive GPS ist in diesem Rahmen unter Verwendung von PC-Technologie nicht möglich, Preise für Industrie-PCs mit der geforderten Rechengeschwindigkeit und Robustheit betragen mindestens 4000 € [JURASZ03 ET AL].

► Rechengeschwindigkeit

In Kapitel 4.4.2 wurde die maximale Dauer für eine Abkühlungsberechnung mit 40 s bestimmt. Um die Berechnung auch auf weniger leistungsstarken Prozessoren durchführen zu können, ist eine Veränderung der Parameter der Finiten-Differenz-Berechnung notwendig.

5.3.2 Mikroprozessoren und Mikrocontroller

Ein Mikroprozessor ist die Zentraleinheit eines Datenverarbeitungssystems, bestehend aus einem Steuerwerk und einem Rechenwerk (zusammen auch Prozessorkern genannt) sowie einer Schnittstelle zur Außenwelt [BRINKSCHULTE02]. Er hat die Ausführung von Befehlen zur Bearbeitung einer Anwendung zur Aufgabe sowie die Steuerung der weiteren Bestandteile einer Datenverarbeitungsanlage wie Speicher und Ein- und Ausgabeschnittstellen. Ein Mikrorechner oder Mikrocomputer ist ein Rechner oder Computer, dessen Zentraleinheit aus einem oder mehreren Mikroprozessoren sowie Speicher, Ein- und Ausgabeschnittstellen und einem Verbindungssystem besteht.

Ein Mikrocontroller stellt im Prinzip einen Mikrorechner auf einem Chip dar (siehe Abbildung 5.2). Ziel ist dabei, eine Steuerungsaufgabe mit möglichst wenigen Bausteinen zu lösen, und der Prozessorkern, der Speicher sowie die Schnittstellen sind auf die Lösung dieser Aufgabe zugeschnitten.

Aufgrund der hohen Zahl möglicher Aufgabenstellungen existiert eine Vielzahl verschiedener Mikrocontroller, die aus einer kleineren Menge von Mikroprozessoren besteht. Mikrocontroller sind daher in Mikrocontrollerfamilien organisiert. Die Mitglieder einer solchen Familie haben in der Regel den gleichen Prozessorkern, jedoch unterschiedliche Peripherie.

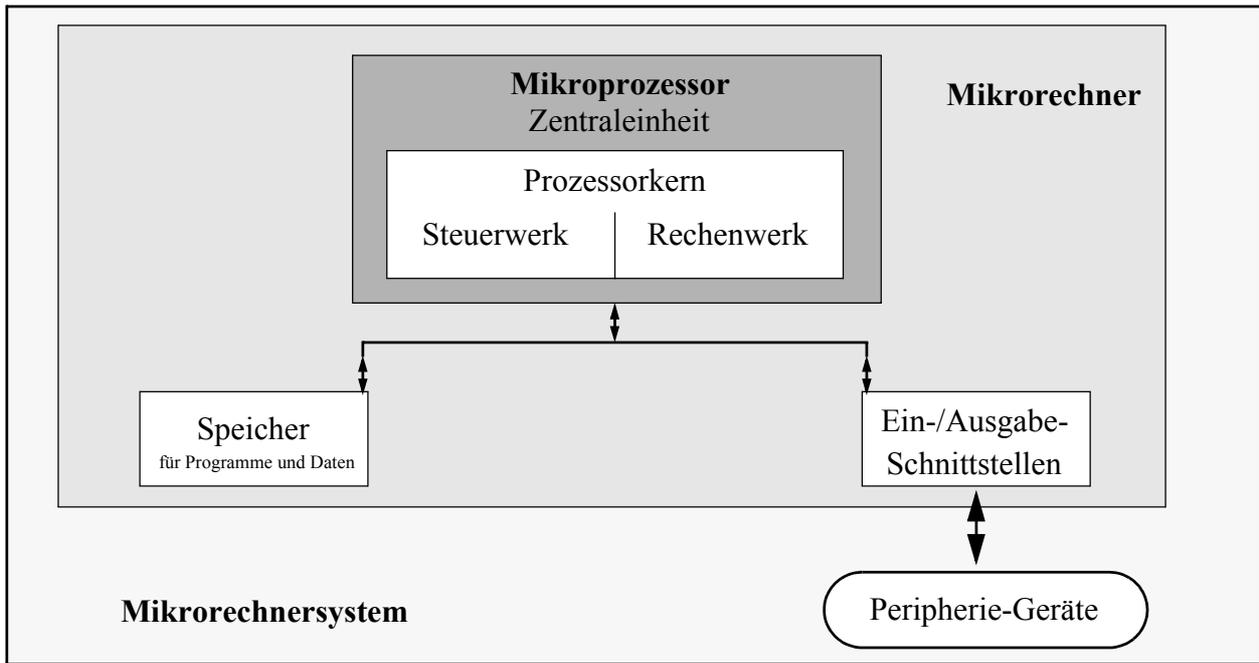


Bild 5.2: Abgrenzung der Begriffe Mikroprozessor, Mikrorechner und Mikrorechnersystem [BRINKSCHULTE02]

Neben der Aufteilung in verschiedene Familien lassen sich Mikrocontroller auch nach Leistungsklassen aufteilen, wobei die Leistungsklasse vom Prozessorkern bestimmt und dabei generell zwischen 8-Bit-, 16-Bit- und 32-Bit-Mikrocontrollern unterschieden wird.

In Tabelle 5.3 sind mehrere ausgewählte Mikrocontroller mit relevanten Daten dargestellt. Dabei wurden lediglich 16-Bit- und 32-Bit-Mikrocontroller ausgewählt, da die 8-Bit-Mikrocontroller in keinem Fall die notwendige Rechenleistung bieten.

Tabelle 5.3: Mikrocontroller verschiedener Hersteller (nach [BRINKSCHULTE02])

Hersteller	Familie	Datenbreite	Festwertspeicher (KBytes)	Schreibespeicher (Bytes)	Zeitgeber (Anzahl) ^a	Serielle E/A	Takt (MHz)
Motorola	MC68HC12	16 bit	0 - 256	1K - 12K	4 - 8	2 - 6	8 - 25
Motorola	MC68HC16	16 bit	0 - 96	2K - 4K	TPU	2 - 11	16 - 25
Motorola	MPC5XX	32 bit	0 - 1024	26K - 36K	TPU	5 - 9	40 - 56
Intel	MSC96	16 bit	32 - 56	1K - 1,5K	3	1 - 2	20 - 50
Intel	StrongARM	32 bit	-	24K	3	5	133 - 206
NEC	K4	16 bit	0 - 256	1K - 12K	4 - 9	4 - 5	12 - 32
NEC	V850E	32 bit	96 - 256	4K - 16K	-	-	33 - 50
Infineon	C166	16 bit	0 - 256	1K - 11K	3 - 9	2 - 4	20 - 40
Infineon	TriCore	32 bit	4 - 32	72K - 1,5M	2 - 6	4 - 5	40 - 100

a.TPU: Time Processing Unit, autonomer Zähler-/Zeitgeber-Coprozessor

5.4 Benutzerschnittstelle

5.4.1 Anforderungen

Die Benutzerschnittstelle auf der Walze muss folgenden Anforderungen genügen:

- ▶ Einfache, leicht erkennbare Darstellung von für den Verdichtungsvorgang wichtigen Daten
- ▶ Sehr gute Sichtbarkeit auch unter widrigen Umständen (Lichteinfall, Dunkelheit, etc.)
- ▶ Hohe Robustheit
- ▶ Niedriger Strombedarf und Unempfindlichkeit bei Spannungsschwankungen
- ▶ Niedrige Kosten

1. Einfache, leicht erkennbare Darstellung der für den Verdichtungsvorgang wichtigen Daten

Der Maschinenführer muss sich während der Verdichtungsarbeit intensiv auf seine Aufgabe konzentrieren. Die Möglichkeit, ihn bei seiner Arbeit zu unterstützen muss in einer Art und Weise erfolgen, dass die notwendigen Informationen schon nach einem kurzen Blick auf die Anzeige deutlich werden. Dabei gilt, dass mit steigender Komplexität der Anzeige die Verarbeitungsdauer für den Bediener steigt. Ein möglichst einfaches Display ist somit zu bevorzugen.

Es gibt grundsätzlich zwei Arten der Darstellung von räumlich bezogenen Daten auf Maschinen, die in dem dahinterliegenden Datenmodell begründet sind: die Darstellung als Raster und die Darstellung als vektorbasierte Grafik [JURASZ03B]. Eine vektorbasierte Darstellung bietet die Möglichkeit der Präsentation von mehr Informationen als die Rasterdarstellung. Hierfür ist jedoch eine Punkt-Matrix-Anzeige (LCD, TFT, ...) zwingend notwendig. Die Rasteranzeige benötigt nicht zwangsläufig eine grafische Anzeige sondern kann beispielsweise auch mit einem Raster aus LEDs verwirklicht werden.

Die Daten, die zur Darstellung kommen, müssen dem Fahrer auf einen Blick zeigen, wo weitere Verdichtungsarbeit zu leisten ist, und wo eine ausreichende Verdichtung geleistet wurde. Weitere Informationen sowie eine Veränderung der Anzeige per Umschalten sind für die Anzeige nicht notwendig. In Tabelle 5.4 sind Anzeigezustände für mehrfarbige LEDs aufgeführt.

Tabelle 5.4: Beispiel für Inhalte einer LED-Anzeige auf der Walze

LED-Farbe	rot	grün	gelb	rot blinkend
Bedeutung	weiter zu verdichten	Verdichtungsziel erreicht oder Temperatur zu niedrig	momentane Walzenposition	Zeit bis zum Erreichen der Mindesttemperatur kritisch

Diese Darstellung kombiniert die Temperaturanzeige mit der Überfahrtenzählung. Die Anzeige grüner Rasterzellen hat dabei eine doppelte Bedeutung: Entweder wurde die geforderte Zahl von Überfahrten erreicht, sodass keine weiteren Überfahren mehr notwendig sind, oder die Temperatur des Asphaltes ist zu niedrig, um weiter verdichten zu können. Diese Kombination ist sinnvoller als die direkte Anzeige der Kerntemperatur, da der Fahrer lediglich daran interessiert ist, ob er weiter zu verdichten hat.

2. Sehr gute Sichtbarkeit auch unter widrigen Umständen (Lichteinfall, Dunkelheit, etc.)

Bei normalem Einsatz der Walze ist jeder Sonnenstand aus allen Richtungen möglich. Dies ist beim Entwurf der Benutzerschnittstelle zu berücksichtigen. Von vielen Herstellern eingesetzte LCD-Anzeigen [BOMAG03] [VÖGELE] führen dabei häufig zu Problemen, da sie bei direktem Lichteinfall nicht mehr ablesbar sind [JURASZ03 ET AL]. Die Verwendung einer LED-Anzeige kann hingegen, vor allem bei Nutzung von in der Lichtstärke variierbaren LEDs, zu einer deutlich besser lesbaren Anzeige führen. Hierbei ist darauf zu achten, möglichst leuchtstarke LEDs zu wählen (> 1500 mcd). Die Leuchtstärke sollte jedoch regelbar sein, um bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen die optimale Sichtbarkeit zu gewährleisten.

3. Hohe Robustheit

Die gesamte Walze und somit auch das Anzeigegerät sind aufgrund einer fehlenden Federung, der großen, flachen Aufstandsfläche und gegebenenfalls durch eine eingeschaltete Vibration sehr starken und langanhaltenden Erschütterungen ausgesetzt. Dennoch darf die Funktion dadurch nicht beeinträchtigt werden. Dies führt zum Verzicht auf bewegte Teile innerhalb des Gerätes wie Festplatten-Speicher, Steckverbindungen und Lüfter, was weiterhin die eingesetzte Hardware einschränkt und PC-Technologie ausschließt. Die Verwendung von Mikrocontrollern wie beispielsweise einem Infineon C167 scheint angeraten, da dieser eine kleine Hitzeentwicklung aufweist und dennoch die benötigte Rechenleistung erbringen kann. Desweiteren entfällt bei der Verwendung von Mikrocontrollern die Verwendung eines Betriebssystems, was Rechenleistung und Lizenzkosten einspart.

4. Niedriger Strombedarf und Unempfindlichkeit bei Spannungsschwankungen

Die Stromversorgung auf Walzen für Bordcomputer und Benutzerschnittstellen erfolgt über das Bordnetz der Maschine. Dieses ist jedoch Stromschwankungen ausgesetzt, da die Bordleistung von der Generatorleistung der Lichtmaschine abhängig ist, und diese wiederum von der Motorleistung. Beim Start des Motors kann die Versorgungsspannung auf ein Viertel der Normalspannung absinken [JURASZ03 ET AL]. Das Berechnungsmodul sowie die Benutzerschnittstelle müssen während solcher Spannungsschwankungen ohne Ausfall weiterarbeiten. Dies kann durch die Verwendung von Komponenten mit niedrigem Strombedarf sowie von Puffern erreicht werden.

5.4.2 Entwurf der Bedienerchnittstelle

Ausgehend von den Erkenntnissen aus dem vorigen Kapitel wird nun eine Benutzerschnittstelle entworfen, die den Anforderungen des praktischen Einsatzes genügt.

In Kapitel 5.4.1 wird ein Raster aus LEDs zur Verwendung vorgeschlagen. Die Größe dieses Rasters ergibt sich aus den folgenden Bedingungen (siehe Abbildung 5.3):

- ▶ Die maximale Länge des Rasters ist durch die maximal mögliche Dauer für die Asphaltabkühlung begrenzt. Diese beträgt etwa 40 min^1 . Bei einer maximalen Geschwindigkeit des Fertigers von 8 m/

min ergibt sich somit eine maximale Länge des Abkühlfeldes von 320 m. Wird eine maximale Rasterzellen-Länge von 20 m gewählt, wären 16 LED-Zeilen notwendig. Bei dreifarbigem LEDs und sechs Spalten ergäbe sich eine Gesamtzahl von 288 anzusteuern LEDs, was den Rahmen sowohl der Stromversorgung als auch der Ansteuerungselektronik sprengen würde. Es wird eine Gesamtzeilenzahl von sieben gewählt (126 LEDs insgesamt), die noch zuvertretende Bedingungen liefert. Die Rasterelementlänge müsste damit auf 50 m gesetzt werden, was sich im Praxistest noch als tauglich erweisen muss.

- ▶ Die Mindestlänge einer Rasterzeile sollte 10 m nicht unterschreiten, um mit der Berechnungsgeschwindigkeit für jede Zelle Schritt zu halten
- ▶ Die Breite des Rasters wird unabhängig von der Einbau- und somit Bohlenbreite gewählt. Für die Einbaufläche werden vier Raster-Spalten gewählt, von denen jede eine Breite von einem Viertel der Bohlenbreite hat. Die Kanten werden gesondert in zwei zusätzlichen Spalten dargestellt, jeweils eine pro Seite.

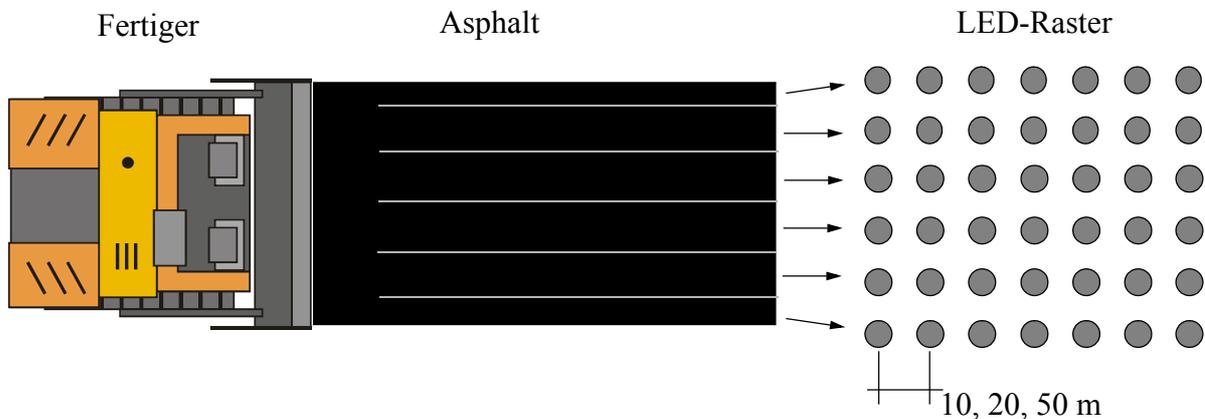


Bild 5.3: Rasterentwurf für Benutzerschnittstelle

Die Benutzerschnittstelle muss neben der Darstellung der Verdichtungsarbeit auch die Möglichkeit zur Einstellung der folgenden Parametern bieten:

- ▶ geforderte Anzahl der Überfahrten
- ▶ Mindesttemperatur
Dieser Wert liegt standardmäßig bei 80 °C und wird vom Bauleiter in Abhängigkeit von der Art und Zahl der verwendeten Walzen und vom Material vorgegeben.
- ▶ Zeitdauer bis zum Erreichen der Mindesttemperatur
Diese Parameter können vom Maschinenführer beliebig nach seinen Bedürfnissen verändert werden. Anhaltswerte für die Mindesttemperatur und die Anzahl der Überfahrten erhält er von der Baustellenleitung.

In Abbildung 5.4 ist ein Beispiel einer Benutzerschnittstelle dargestellt.

1. Einbautemperatur 180 °C, 10 cm Schichtdicke, Unterschicht 50 °C, kein Wind

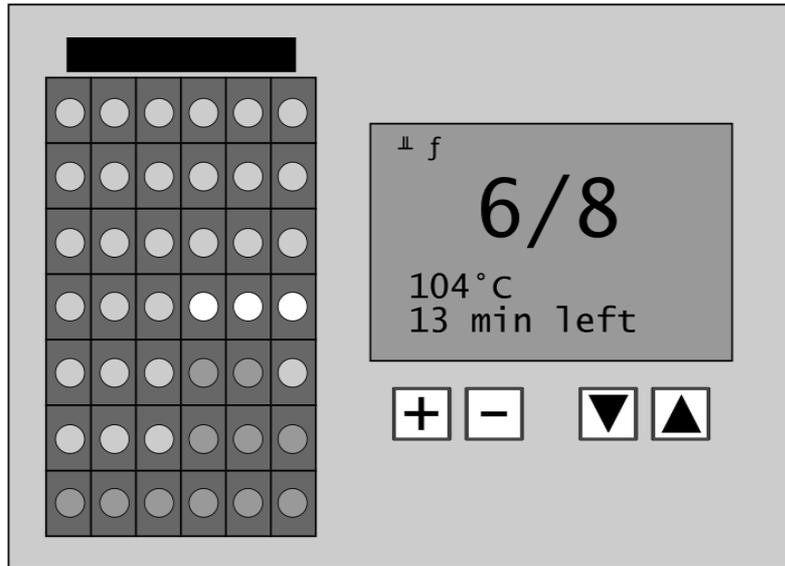


Bild 5.4: Entwurf der Benutzerschnittstelle mit beispielhafter Darstellung des LED-Rasters

Die linke Hälfte der Benutzerschnittstelle nimmt das 6 x 7 Felder große LED-Raster ein, das den Verdichtungs- und Temperaturzustand anzeigt. Auf der rechten Hälfte befindet sich ein Grafik-Display, das die Anzahl der Überfahrten der aktuellen Zelle anzeigt (im Beispiel: 6 von 8 geforderte Überfahrten), die aktuelle Kerntemperatur sowie die verbleibende Zeit bis zum Erreichen der Mindesttemperatur. Unter der Grafikanzeige befinden sich vier Schaltflächen zur Konfiguration des Systems (Einstellen der Mindesttemperatur, max. Anzahl der Überfahrten etc.).

6. Alternativsystem ohne Fertiger

6.1 Überblick

Das in den vorigen Kapiteln entwickelte und dargestellte System hat den Nachteil, dass sowohl auf dem Fertiger als auch der Walze ein Eingriff in die Maschine erfolgen muss, um die benötigten Sensoren anzubringen. Die Beschränkung auf die Walze und der Verzicht auf Messungen auf dem Fertiger hätte mehrere Vorteile:

- ▶ Verringerung der Fehleranfälligkeit durch den Verzicht auf die Funkübertragung der Messdaten
- ▶ Vergrößerung der Robustheit durch Verringerung der Systemkomponenten bei gleichzeitig deutlich verringerten Kosten für das System
- ▶ Eine deutlich vergrößerte Akzeptanz des Systems bei den Herstellern, da nur wenige Maschinenhersteller sowohl Fertiger als auch Walzen herstellen und somit nicht auf andere Hersteller angewiesen sind, um ein funktionierendes Gesamtsystem anbieten zu können [ÅKESSON03].

Im folgenden wird eine Alternative zu dem in den vorigen Kapiteln dargestellten System entwickelt, das ausschließlich auf Messungen auf der Walze beruht. Der Verzicht auf Messungen auf dem Fertiger führt jedoch zwangsläufig zu einem erhöhten Fehler der Vorhersagegenauigkeit. Im folgenden wird

auf die einzelnen Berechnungsparameter eingegangen, die für die Berechnung notwendig sind.

Diese Parameter sind:

- ▶ Schichtdicke
- ▶ Materialtemperatur beim Einbau
- ▶ Windgeschwindigkeit
- ▶ Temperatur des Untergrundes

6.2 Ermittlung der Messwerte

6.2.1 Schichtdicke

Die Messung der Schichtdicke an der Walzenposition ist nicht auf mechanischem Wege (taktil) möglich, ohne die Asphaltsschicht zu beschädigen. Eine weitere Möglichkeit ist die Messung per Induktion (Wirbelstrom) [HORNG]. Dazu ist es notwendig, während des Einbaus in einem regelmäßigen Raster Metallplatten einzulegen (siehe Abbildung 6.1). Ein Sensor induziert in dieser Metallplatte einen Wirbelstrom und misst die Veränderung des elektromagnetischen Feldes. Die Veränderung des Feldes ist direkt vom Abstand der Metallplatte vom Sensor abhängig und wird durch nichtleitendes Material, also den Asphalt, nicht beeinflusst. Somit lässt sich die Dicke der Asphaltsschicht bestimmen.

Um mit diesem Verfahren die Schichtdicke verlässlich zu bestimmen, müssen solche Metallplatten in einem regelmäßigen Raster verlegt werden. Dies macht eine zusätzliche Einrichtung zum Verlegen der Platten auf dem Fertiger notwendig, was wiederum dem in diesem Kapitel angestrebten Ziel eines Systems ohne Fertigerbeteiligung widerspricht. Desweiteren muss eine Möglichkeit gefunden werden, die Metallplatten verlässlich wiederzufinden, um Messungen durchführen zu können. Ein solches System ist momentan nicht auf dem Markt verfügbar [KAUFMANN03].

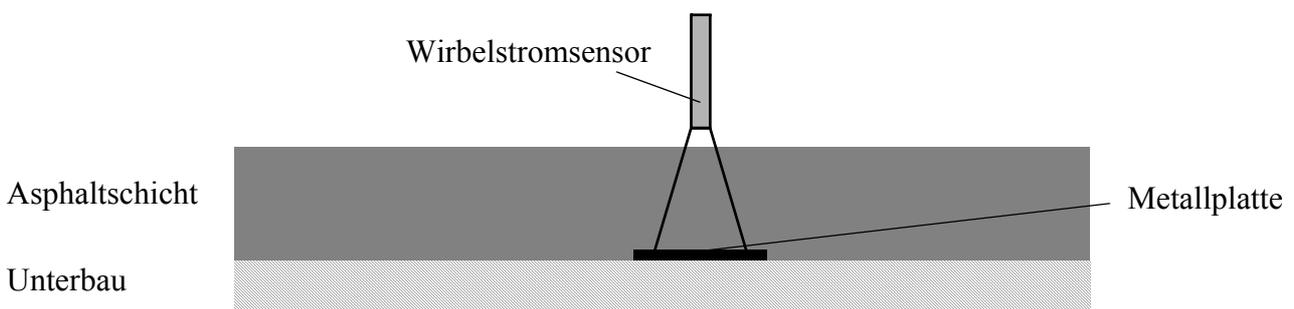


Bild 6.1: Berührungslose Messung der Dicke der Asphaltsschicht (nach [HORNG])

Die Messung der Schichtdicke auf der Walze ist somit nicht möglich. Im Regelfall verändert sich die Schichtdicke beim Einbau allerdings sehr wenig, so dass sie auch manuell eingegeben werden kann. Dies führt zu einer weiteren Verringerung der Vorhersagegenauigkeit.

6.2.2 Materialtemperatur beim Einbau

Die optimale Position zur Messung der Materialtemperatur ist nach Kapitel 3.3 unmittelbar hinter der Bohle. Da nach die Walze bis unmittelbar an den Fertiger heranzufahren hat, kann sie mit einem wie in Abbildung 6.2 dargestellten ausgerichteten Temperatursensor die Oberflächentemperatur unmittelbar hinter der Bohle messen. Hierzu muss sie jedoch die vordere Position detektieren und von dieser Position auf die Fertiger-Position schließen. Fährt sie zu nahe an den Fertiger heran, erfasst sie mit dem Infrarotsensor die Bohle, was zu einer fehlerhaften Messung führt: Die Bohle hat eine deutliche niedrigere Temperatur als der Asphalt, wodurch dieser Fehler leicht zu detektieren ist.

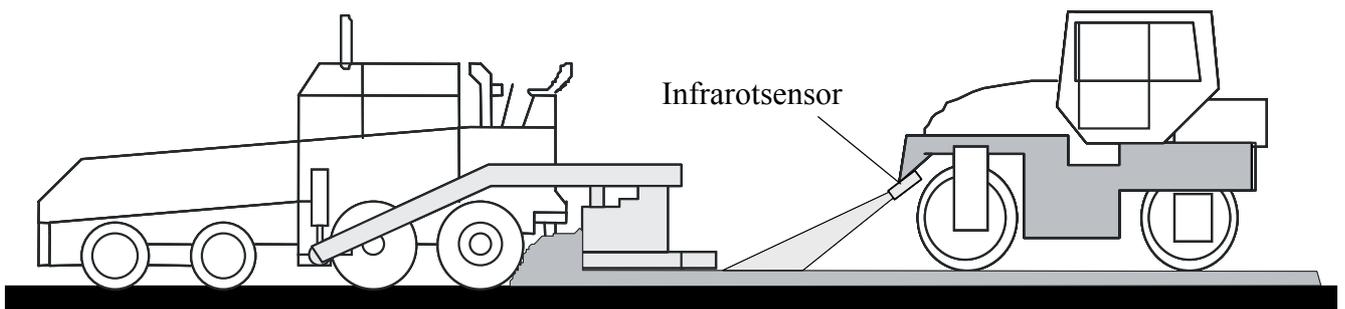


Bild 6.2: Messung der Materialtemperatur auf der Walze

6.2.3 Windgeschwindigkeit

Die Messung der Windgeschwindigkeit erfolgt mit einem Windsensor (siehe Abb. 3.2) auf dem Dach der Walze, jedoch ist der Fahrtwind zu berücksichtigen:

Fährt die Walze mit einer Geschwindigkeit v_f und weht ein Wind mit der Geschwindigkeit w mit einem Winkel β relativ zur Fahrtrichtung, so ergibt sich gemäß Bild 6.3 ein scheinbarer Wind

$$w_s = w_f + w \cos \beta \quad \text{mit } w_f = \text{Fahrtwind} = -v_f \quad (17)$$

Die auf der Walze gemessene Windgeschwindigkeit entspricht während der Fahrt w_s , ansonsten der echten Windgeschwindigkeit w . Aufgrund der starken Schwankung der Windgeschwindigkeit ist eine Filterung (Mittelwertbildung) notwendig. Die Beschränkung der Messung auf Momente des Stillstandes der Walze ist somit nicht praktikabel, die Messung der Windgeschwindigkeit wird während der Fahrt vorgenommen und errechnet sich als Durchschnittsgeschwindigkeit der Vorwärts- und der Rückwärtsfahrten. Hierbei wird angenommen, dass in beiden Fahrtrichtungen eine gleich große und konstante Geschwindigkeit eingehalten wird, was in der Praxis im Allgemeinen der Fall ist [JURASZ03 ET AL].

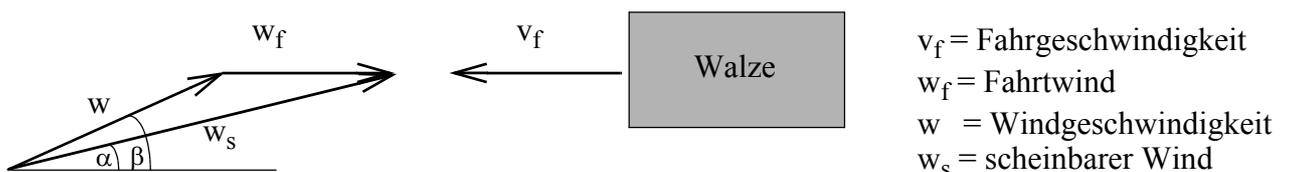


Bild 6.3: Windgeschwindigkeit, scheinbarer Wind und Fahrtwind

6.2.4 Temperatur des Untergrundes

Die Temperatur des Untergrundes vor dem Fertiger ist auf der Walze nicht mehr möglich, deshalb wird ein Standardwert abhängig von der Jahreszeit angenommen.

Tabelle 6.1: angenommene Temperatur des Untergrundes in Abhängigkeit von der Jahreszeit nach [STRAUBE97]

Zeitraum	Temperatur [°C]
Dezember - Februar	5 (mit Heizstrahler vor dem Fertiger 30)
März - April	25 (mit Heizstrahler vor dem Fertiger: 40)
Mai - September	40
Oktober - November	25 (mit Heizstrahler vor dem Fertiger: 40)

7. Entwurf und Entwicklung eines Prototypsystems

Die Firma MOBA Mobile Automation AG ermöglicht die Entwicklung eines Prototypen des in Kapitel 6 vorgestellten Alternativsystems im Rahmen dieser Arbeit mit dem Ziel der kommerziellen Nutzung.

Die Entwicklung des Prototypen erfolgt in mehreren Schritten:

- ▶ Erstellung des Pflichtenheftes
- ▶ vorläufige Definition der Schnittstellen
- ▶ Softwareentwicklung
- ▶ Tests und Anpassung

Gleichzeitig läuft die Entwicklung eines auf den Ergebnissen des OSYRIS-Projektes [JURASZ03 ET AL] basierenden GPS-Positionierungsmoduls, das eine preiswerte Möglichkeit zur Ermittlung der aktuellen Maschinenposition bietet.

Wichtige Schritte innerhalb der Entwicklung ist die Wahl einer Hardwareplattform und die Anpassung der Software an die daran verbundenen Schnittstellen.

7.1 Konzeption

Die Aufgaben des Prototypsystems liegen nicht nur in der Berechnung und Darstellung der Asphaltabkühlung. Vielmehr soll dem Walzenführer mit Hilfe dieses Systems eine Unterstützung für die Verdichtungsarbeit gegeben werden, die in der Regel darin besteht, in einem gewissen Zeitrahmen an jedem Ort genügend Überfahrten durchzuführen. Dazu muss die Software neben der Abkühlungsberechnung auch die Datenverarbeitung und Kommunikationsaufgaben übernehmen, ohne in zeitlichen Verzug zu kommen.

Die einzelnen durchzuführenden Aufgaben der Software sind

- ▶ die Abkühlungsberechnung
- ▶ der Datenempfang vom CAN-Bus (z.B. Prozessdaten)
- ▶ der Datenversand zum CAN-Bus (z.B. Berechnungsergebnisse, Statusmeldungen)
- ▶ die Positionsverwaltung und Zuordnung der Prozessdaten zu Positionen
- ▶ die Steuerung der Anzeige

Da auf einem Mikrocontroller in der Regel kein Multi-Tasking-fähiges Betriebssystem zur Verfügung steht, ist die Software so zu erstellen, dass die einzelnen Aufgaben nacheinander abgearbeitet werden. Dazu muss auch der Berechnungsalgorithmus in Einzelschritte aufgeteilt werden. Dies geschieht mit Hilfe zweier Status-Variablen, `STATE` und `TIME`. Die Funktion `CALC_HANDLE` wird im Hauptprogramm zyklisch aufgerufen und führt bei jedem Aufruf einen Berechnungsschritt aus.

```
void CALC_HANDLE(void)
{
```

Zu Beginn des Berechnungszyklus wird die Initialisierung durch den Aufruf der Funktion `CALC_DoInit` durchgeführt, die die Berechnungsparameter zurücksetzt.

```
if (STATE == 0)
{
    CALC_DoInit();
    TIME = 0;
    STATE++;
}
```

Im nächsten Schritt wird die Berechnung selbst für jeweils einen Zeitschritt durchgeführt, indem die Funktion `CALC_DoStep` aufgerufen wird. Der jeweilige Zeitschritt ist in der Variablen `TIME` enthalten.

```
else if (ATESstate == 1)
{
    TIME++;

    if ((CALC_DoStep()) || (TIME > MaxTime ))
    {
        STATE = 2;
        TIME = 1;
    }
}
```

Die polynomische Näherung wird im darauf folgenden Berechnungsabschnitt durchgeführt.

```
else if (STATE == 2)// approximation
{
    Poly3Fit( );
    STATE == 3
}
```

Abschließend werden die Berechnungsergebnisse, also die Faktoren des Polynoms `Param[...]` in das entsprechende Raster-Element geschrieben.

```
else if ( STATE == 3)
{
    STATE = ATES_start;
    Grid.stoptime = StopTime;
    Grid.temp[1] = Param[1];
    Grid.temp[2] = Param[2];
    Grid.temp[3] = Param[3];
    Grid.temp[4] = Param[4];
}

return;
}
```

7.2 Aufbau des Gerätes

7.2.1 Mikrocontroller

In Kapitel 5.3 werden mehrere Mikroprozessoren diskutiert, die für die Erstellung eines Prototypen in Frage kommen. Aufgrund der positiven Erfahrungen der Firma MOBA mit dem Mikrocontroller C167 der Firma Infineon. Für die Erstellung des Prototypen wird der Mikrocontroller XC164CS [INFINEON02] aus der Controllerfamilie des C167 gewählt. Er bietet

- ▶ 16-bit CPU mit fünffacher Befehlspipeline
- ▶ 25 ns Befehlsabarbeitung bei 40 MHz
- ▶ bis zu 16 MB adressierbarer Speicher für Code und Daten
- ▶ 2 CAN-Bus Schnittstellen
- ▶ Temperaturbereich: -40 °C bis 85 °C

7.2.2 Platinen

Das Gerät besteht aus drei einzelnen Platinen, die über verschiedene Schnittstellen miteinander verbunden sind (siehe Abb. 7.1).

- ▶ Hauptplatine mit Mikrocontroller

7. Entwurf und Entwicklung eines Prototypsystems

Diese Platine ist mit dem Mikrocontroller sowie dessen Peripherie (RAM, EEPROM, CAN-Schnittstellen, serieller Schnittstelle etc.) bestückt. Sie ist mit der Aussenwelt über eine CAN- und eine serielle Schnittstelle verbunden.

► LED-Platine mit LED-Raster und Ansteuerungsbausteinen

Die LED-Platine enthält die Ansteuerung für die LEDs auf der Unterseite und das LED-Raster selbst auf der Oberseite.

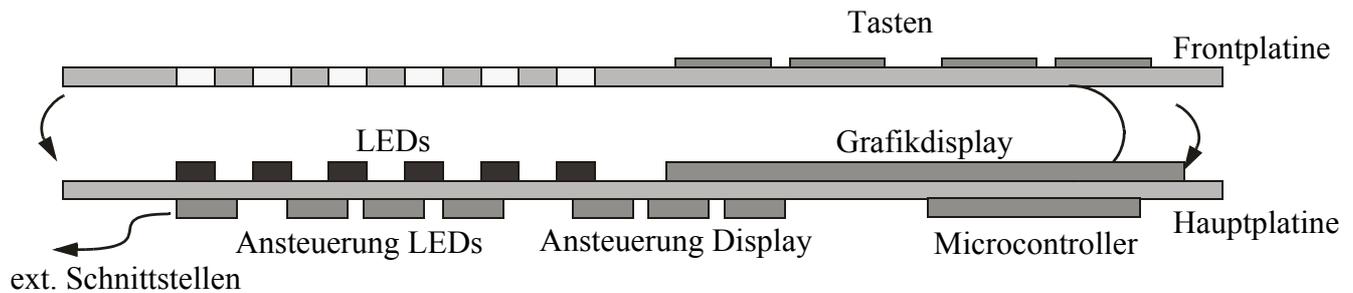


Bild 7.1: Aufbau des Prototypen aus zwei Platinen (Seitenansicht)

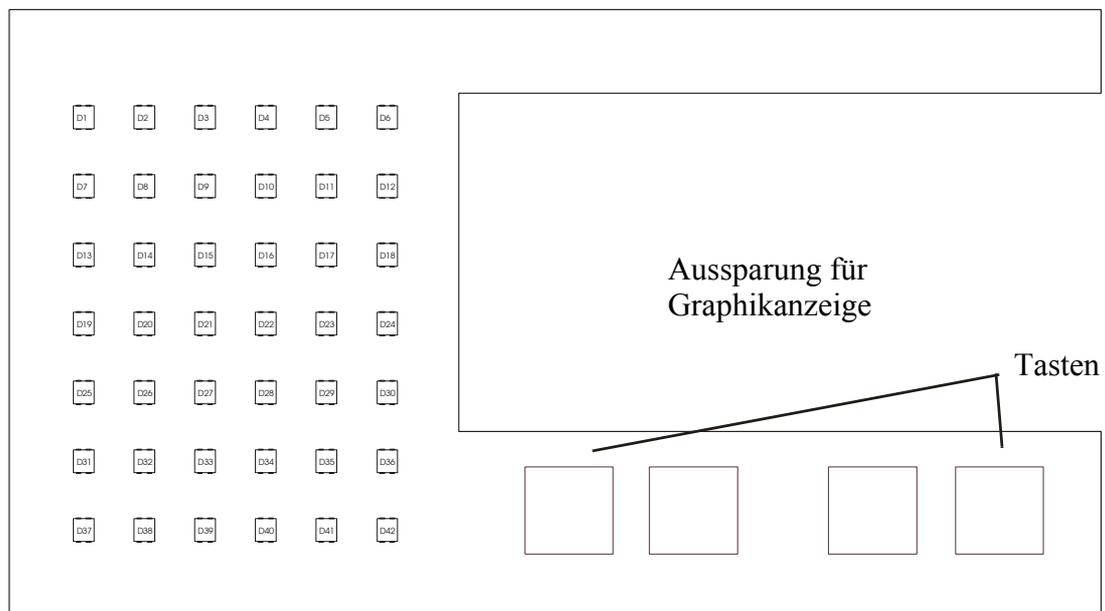


Bild 7.2: Ansicht der Frontplatine mit LEDs, Tasten und Aussparung für die Graphikanzeige

► Frontplatine mit Tasten und Graphikdisplay

Die Frontplatine wird direkt auf die LED-Platine aufgeklebt und hat Aussparungen für die aufgelöteten LEDs. Folientasten sind auf der Oberseite aufgebracht. Desweiteren hat sie eine Aussparung für die Graphikanzeige (siehe Abb. 7.2).

7.3 Datenfluss zwischen den Komponenten

Das Berechnungsmodul hat zwei CAN-Kanäle, von denen einer an eine Buchse im Gehäuse zum Anschluss an die Sensorik geführt wird. Der zweite ist im Gehäuse intern an die LED- und die Grafikdisplay-Ansteuerung angeschlossen (siehe Abbildung 7.3).

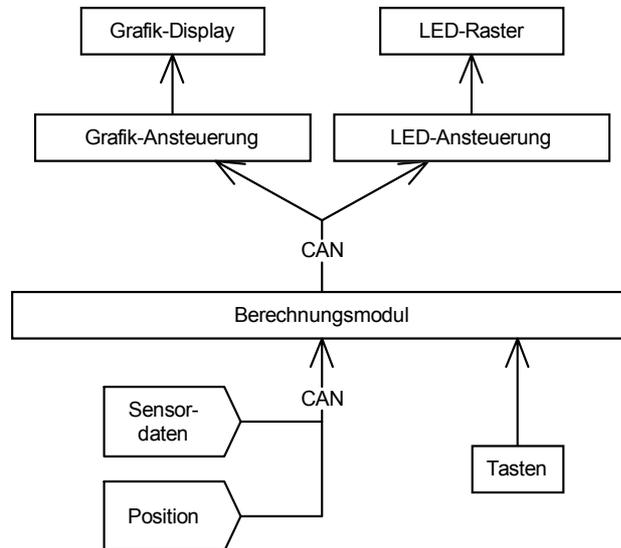


Bild 7.3: Datenfluss zwischen den Hardwarekomponenten

Die Ansteuerung des LED-Rasters erfolgt über CAN-Nachrichten, in denen bitcodiert für jede LED der Ein/Aus-Status angegeben wird. Für jede Nachricht werden dazu 42 Bit verschickt. In einer zweiten, ebenso aufgebauten Nachricht wird für jede LED angegeben, ob ein Blinken vorgesehen ist. Das empfangene Bitmuster wird dann an Schieberegister (siehe Anhang A.7) weitergegeben, die nach der Übertragung die entsprechenden LEDs aktivieren (siehe Abb. 7.4).

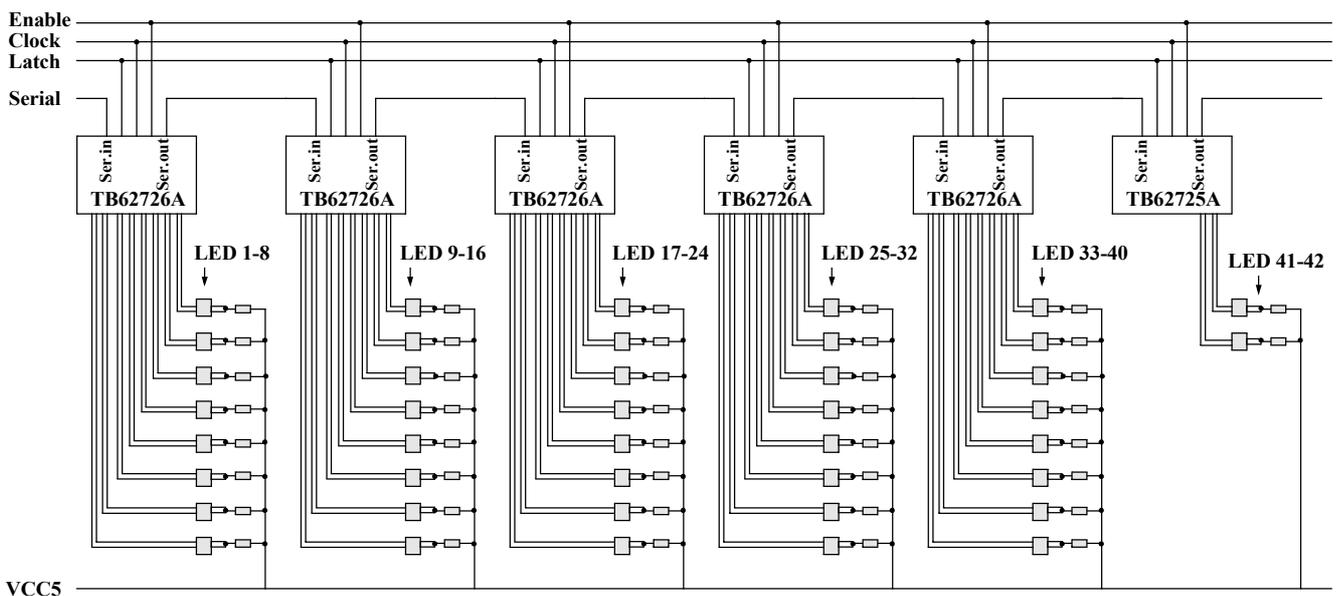


Bild 7.4: LED-Ansteuerung mit Data-Clock-Enable

8. Zusammenfassung und Ausblick

Schäden von Asphaltstraßen und anderen Anwendungsgebieten im Asphaltbau sind häufig auf eine mangelhafte Verdichtungsarbeit während der Herstellung zurückzuführen, die wiederum häufig auf den Einsatz von Walzen bei zu niedrigen Temperaturen des Asphaltes zurückzuführen ist. Die vorliegende Arbeit hat die Entwicklung eines Systems zum Inhalt, das die Kerntemperatur der Asphalt-schicht unter der Walze während des Einbaus vorhersagt und dem Walzenführer damit eine Hilfestellung für eine bessere Verdichtungsarbeit bietet. Die einzelnen Komponenten des Systems (Sensoren, Berechnungsmodul, Anzeige) werden nacheinander betrachtet.

Für die Sensorik ist die Auswahl der optimalen Position sehr wichtig, daher werden die einzelnen Messmethoden der Sensoren dargestellt und geeignete Sensorpositionen diskutiert und gewählt.

Aufbauend auf den Betrachtungen des Materials „Asphalt“ wird ein eindimensionale Abkühlungsmodell diskutiert, das die Berechnung der Abkühlung in einer unendlich ausgedehnten Platte beschreibt. Dieses Modell wird anschließend in einen Berechnungsalgorithmus übertragen und in der Programmiersprache C implementiert. Das Ergebnis der Berechnung wird mit Hilfe eines Polynoms, das an die Abkühlkurve angelegt wird, als einfache analytische Gleichung beschrieben. Anhand von Messungen wird dieses Modell mit der Realität und auch mit Berechnungsmodellen anderer Quellen verglichen und gewertet, wobei sich zeigt, dass das eigene Modell den anderen für diesen Anwendungsfall überlegen ist.

Die Umsetzung des Berechnungsmodells in ein C-Programm und dessen Integration in einen Mikrocontroller bilden die Grundlage für das Gesamtsystem, das zusätzlich noch aus den Sensoren und deren Anbindung an das Berechnungsmodul mit Hilfe des Feldbusses CAN besteht sowie einer Benutzerschnittstelle, die anschließend entworfen wird. Dabei wird stets auf die Minimierung der Kosten des Gesamtsystems geachtet, die neben der Funktionalität der wichtigste Parameter für die Akzeptanz des Systems bei Maschinenherstellern ist.

Ein Prototyp des Systems wird bei der Firma MOBA Mobile Automation AG entworfen und entwickelt.

Ausblick

Seit Jahren schon ist ein Entwicklungsprozess in der Straßenbautechnik im Gange, der mehr und mehr zu einer Automation und Optimierung des Bauprozesses führt. Angefangen hat dies mit dem von der Europäischen Union geförderten CIRC-Projekt und dessen Nachfolger OSYRIS, mit deren Hilfe die Grundlage einer maschinenübergreifenden Kommunikation geschaffen wurde und bei den Herstellern der Baumaschinen Interesse geweckt hat. Grundlegende Schwierigkeiten bei der Markteinführung von Automatisierungs- oder Optimierungssystemen sind aber stets die Kosten, denn die Kunden der Maschinenhersteller, also die Baufirmen, haben nur einen sehr kleinen finanziellen Spielraum für solche Systeme.

Die hohen Kosten entstehen in erster Linie durch die Verwendung von GPS-Positionierungslösungen sowie durch die Verwendung sehr teurerer Bordcomputer. Das OSYRIS-Projekt hat die Grundlage für die Entwicklung preisgünstiger GPS-Lösungen geschaffen. Die Verwendung von Bordcomputern auf Mikrocontroller-Basis hilft weiterhin, die Kosten zu senken. Das in dieser Arbeit entwickelte System hat einen Verkaufspreis von unter 8.000 € zum Ziel (inkl. GPS), der bei Gesprächen mit Maschinenherstellern auf ein großes Interesse gestoßen ist. Haben sich solche Systeme erst einmal am Markt etabliert, wird auch bei den Bauunternehmungen die Bereitschaft da sein, teurere Lösungen mit erweiterter Funktionalität zu erwerben und einzusetzen.

Somit werden sich in den nächsten Jahren zuerst die kleinen Systeme etablieren können, die dann eine Grundlage schaffen für die Entwicklung und den Einsatz komplexer Systeme. Damit bietet sich auch die Chance, dass sich Kommunikationsstandards etablieren, wie sie beispielsweise mit dem OSYRIS-Projekt eingeführt wurden.

9. Literatur

[ALLEN95]

Allen, Bruce: "Consideration of Hot-Mix Asphalt Thermal Properties During Compaction"
University of Minnesota, 1995

[ALFORD39]

Alford, J.S., Ryan, J.E., Urban, F.I.: "Effect of Heat Storage and Variation in Outdoor Temperature and Solar Intensity on Heat Transfer through Walls"
Transaction, American Society of Heating and Ventilation Engineers, 45, 1939

[ARAND89]

Arand, Wolfgang, Dörschlag, Siegfried, Pohlmann, Peter: "Einfluss der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltverfestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur"
Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 558, 1989

[ASKAL01]

„Asphalt Kalender 2001“
Beratungsstelle für Gußasphaltanwendung e.V., 2001, ISBN 3-433-01592-9

[BAEHR94]

Baehr, H. D.; Stephan, K.: „Wärme- und Stoffübertragung“
Springer Verlag 1994, ISBN 3-540-55086-0

[BARBER57]

Barber, E.S.: "Calculation of Maximum Pavement Temperatures From Weather Reports"
Highway Research Board, Bulletin 168, National Research Council, Washington D.C., 1957

[BÖHMER74]

Böhmer, P.: „Verdichtung bituminösen Mischgutes beim Einbau mit Fertigern“
Dissertation, Universität Karlsruhe, 1974

[BOSSEMEYER66]

Bossemeyer, H.: „Temperaturverlauf beim Einbau von bituminösem Mischgut“
Dissertation, TH Darmstadt, 1966

[BOSSEMEYER68]

Bossemeyer, H.: „Die praktische Berechnung der Abkühlung bituminöser Schichten.“
Bitumen 30, 1968

[BRINKSCHULTE02]

Brinkschulte, U.; Ungerer, T.: „Mikrocontroller und Mikroprozessoren“
Springer Verlag, 2002, ISBN 3-540-43095-4

[CHADBOURN98]

Chadbourn, Bruce.A. et al.: „An Asphalt Paving Tool for Adverse Conditions“
Minnesota Department of Transportation, 1998, Univ. of Minnesota

[CORLEW68]

Corlew, J.S., Dickson, P.F.: „Methods for Calculating Temperature Profiles of Hot-Mix Asphalt Concrete as Related to the Construction of Asphalt Pavements“,
Asphalt Paving Technology 1968, Proceedings: Association of Asphalt Paving Technologists, Technical Sessions, Band 37

[DAINES85]

Daines, M.E.: „Cooling of Bituminous Layers and Time Available for Their Compaction“
Transport and Road Research Laboratory Report 4, 1985, Department of Transport, ISSN 0266-5247

[DREES93]

Drees, G.; Schütz, U.: „Baumaschinen und Bauverfahren“
expert-Verlag, 1993, ISBN 3-8169-0666-4

[DÜBNER74]

Dübner, R.: „Bitumen und Asphalt im Straßenbau“
Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie Schriftenreihe Heft 23, 1974

[ETSCHBERGER94]

Etschberger, K., et al.: „CAN Controller-Area-Network: Grundlagen, Protokolle, Bausteine, Anwendungen“
Carl Hanser Verlag München Wien, 1994, ISBN 3-446-17596-2

[FUHRMANN76]

Fuhrmann, W. (Hrsg.): „bitumen und asphalt taschenbuch“
Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie, Bauverlag, 1976, ISBN 3-7625-0715-5

[GEHBAUER00]

Gehbauer, F.: „Einführung in die Asphaltbautechnik“
Vorlesungsreihe, TMB, Universität Karlsruhe, 2000

[GÖSELE97]

Gösele, K.; Schüle, W.; Künzel, Helmut: "Schall, Wärme, Feuchte"
Bauverlag, 1997, ISBN 3-7625-3292-3

[GRÖBER63]

Gröber, Erk, Grigull: "Die Grundgesetze der Wärmeübertragung"
Springer Verlag, 1963

[HERMANSSON00]

Hermansson, Åke: „Simulation Model for Calculating Pavement Temperatures Including Maximum Temperature“
Pavement Management and Monitoring, Transportation Research Record 1699, 2000

[HERMANSSON01]

Hermansson, Åke: „A Mathematical Model for Calculating Pavement Temperatures, Comparisons between Calculated and Measured Temperatures“
Swedish National Road and Transport Research Institute, VTI, 2001

[HOFFMANN01]

Hoffmann, M.-P.: „Automation und Dokumentation im Straßenbau - Marktanalyse und Marktpotentiale“
Diplomarbeit, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Universität Karlsruhe, 2001

[HORN03]

Horn, A.: „Measurement and Control Design“
OSYRIS Projekt, Universität Karlsruhe, 2003

[HUNTER86]

Hunter, Robert N., McGuire, George R.: „A fast and efficient method for predicting cooling profiles in bituminous materials“
Civil Engineering, Juni 1986

[HUTSCHENREUTHER98]

Hutschenreuther, J.: „Asphalt im Straßenbau: aus der Praxis des Verkehrsbaus“
Verlag für Bauwesen, 1998, ISBN 3-345-00613-8

[JORDAN76]

Jordan, P.G., Thomas, M.E.: „Prediction of Cooling Curves for Hot-Mix Paving Materials by a Computer Program“
Transport and Road Research Laboratory Report 729, 1976

[JURASZ03 ET AL]

Jurasz, J., et.al: „OSYRIS Worksite Evaluation Report“
Universität Karlsruhe, 2003

[JURASZ03B]

Jurasz, J.: „Geometric Modelling for Computer Integrated Road Construction“
Dissertation, Universität Karlsruhe, 2003

[KAUFMANN03]

Kaufmann, I.: „Probleme im praktischen Asphaltbau, Analyse und Lösungsvorschläge“
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2003

[KAVIANIPOUR67]

Kavianipour, A.: „Thermal Property Estimation Utilizing the Laplace Transform with Application to Asphaltic Pavement“
International Journal of Heat and Mass Transfer, Band 20, 1967

[KEIL02]

Keil, S.: „Feldbusse im praktischen Einsatz“
Diplomarbeit, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Universität Karlsruhe, 2002

[KLEY03]

Kley, K.-L.: „Wirtschaftliche Positionierungslösung für Straßenwalzen - Grundlage für die kontinuierliche Qualitätskontrolle der Verdichtung im Asphaltbau“
Dissertation, Universität Karlsruhe, 2003

[KÖRTVÉLYESSY98]

Körtvélyessy, L.: „Thermoelement-Praxis“
Vulkan-Verlag, Essen, 1998, ISBN 3-8027-2181-0

[KRASS71]

Krass, K.: „Kriechuntersuchungen an zylindrischen Asphaltprobekörpern“
Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Straßenbau- und Eisenbahnwesen, Heft 5, 1971

[KREBS81A]

Krebs, H.G., Arand, W., Jäger, W.: „Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörpern“
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 334, 1981

[KREBS81B]

Krebs, H.G., Böllinger, G.: „Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper“
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 347, 1981

[LUOMA94]

Luoma, J.A., Allen, B., Voller, V.R., Newcomb, D.E.: „Modeling of Heat Transfer During Asphalt Paving“
Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, 1994

[MILLS99]

Mills, A.F.: „Heat Transfer“
Prentice Hall, 1999, ISBN 0-13-947624-5

[MÜLLER02]

Müller, H.S.: „Baustofftechnologie II“
Institut für Massbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe, 2002

[PATANKAR80]

Patankar, S.V.: „Numerical Heat Transfer and Fluid Flow“
Series in computational methods in mechanics and thermalsciences, Hemisphere Publishing Corp, 1980

[PRESS92]

Press, W., et al.: „Numerical Recipes in C - The Art of Scientific Computing“
Cambridge University Press, 1992, www.nr.com

[RÖDEL74]

Rödel, H.: „Hydromechanik“
Hanser Verlag, München, 1974

[SCHÖN96]

Schön, J.H.: „Physical Properties of Rocks“
Handbook of geophysical exploration. Section I, Seismic exploration: v.18, ISBN 0-08-0410081, 1996

[SOLAIMANIAN93A]

Solaimanian, M., Kennedy, T.W.: „Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation“
Transportation Research Record 1417, 1993

[SOLAIMANIAN93B]

Solaimanian, M. et al.: „Analysis of the Integrated Model of Climatic Effects on Pavements“
Austin, Texas University, 1993

[STRAUBE97]

Straube, E.; Beckendahl, H.: „Straßenbau und Straßenerhaltung“
Erich Schmidt Verlag, 1997

[TEGELER73]

Tegeler, P.A., Dempsey, B.J.: „A Method of Predicting Compaction Time for Hot-Mix Bituminous Concrete“
Asphalt Paving Technology, 1973, Proceedings: Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, Band 42

[TURNER81]

Turner, W.C., Malloy, J.F.: „Thermal Insulation Handbook“
Krieger Publishing, 1981

[VIDUKA02]

Viduka, M.: „Asphalt im Straßenbau, Parameterstudie zur Ermittlung der Einflussgrößen der Asphaltabkühlung“
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2002

[VIZI81]

Vizi, L, Büttner, C.: „Verdichten von Asphalt im Straßenbau - Handbuch für die Praxis“
Werner Verlag GmbH, 1981

[WAGNER98]

Wagner, W.: „Wärmeübertragung“
Vogel Verlag, 1998, ISBN 3-8023-1703-3

[WENDEBAUM03]

Wendebaum, J.: „CANopen application profile for road construction machinery“
CAN Newsletter 3/2003, CAN in Automation, Erlangen

[YAVUZZURK02]

Yavuzturk, Cenk; Ksaibati, Khaled: „Assessment of Temperature Fluctuations in Asphalt Pavements Due to Thermal Environmental Conditions Using a Two-Dimensional, Transient Finite Difference Approach”
Department of Civil and Architectural engineering, University of Wyoming, 2002

Vorschriften und Regelwerke

[RSTO]

„Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen“
2001, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 51427 Bergisch Gladbach

[ZTV-A]

„Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinie für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt“
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2001

[DIN 18317]

„VOB Verdingungsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV); Verkehrswegebauarbeiten, Oberbauschichten aus Asphalt“
Beuth Verlag GmbH, Berlin

[DIN 1996]

„Prüfung von Asphalt“
Beuth Verlag GmbH, Berlin

[FGSV1]

„Merkblatt für das Verdichten von Asphalt“
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1991

Firmen-Quellen

[HORNG]

Horn, Alfons, MOBA Mobile Automation AG, Abteilungsleiter Entwicklung
persönliche Gespräche,
Firma MOBA Mobile Automation AG, Elz, Juni 2002, Mai und September 2003

[GRÖTZ03]

Paschmann, F., Bauleiter Schwarzdeckeneinbau
persönliches Gespräch,
Bauunternehmung Grötz, Karlsruhe, 11.10.2003

[BOMAG03]

„Grundlagen der Boden- und Asphaltverdichtung“
Bomag AG, Bobbard, 2003

[DYNAPAC01]

„Einbau und Verdichtung: Theorie und Praxis“
Dynapac, Svedala Industri AB, Schweden 2001

[INFINEON02]

„XC164 System Units“ und „XC164 Peripheral Units“
Fa. Infineon, München, 2002

[VÖGELE]

„Für jede Aufgabe die richtige Einbaubohle“
Produktprospekt, Joseph Vögele AG, Mannheim

[ÅKESSON03]

Åkesson, Fredrik, Metso Dynapac, persönliches Gespräch, 2003

Online-Quellen

[WEBEKOPOWER]

EKOPOWER Dataloggers, wind & weather stations: www.ekopower.nl

[WEBMIKRON]

Mikron Infrared: www.mikroninfrared.com

[WEBDWD]

Deutsche Wetterdienst, www.dwd.de

[WEBGEODYN]

Geodynamik AB, www.geodynamik.com

Anhang

A.1 Wärmeleitung einer unendlich ausgedehnten Platte

Betrachtet man nun die instationäre Wärmeleitung in einer dicken Platte, deren freie Oberfläche $x = 0$ an die Umgebung grenzt und die sonst als unendlich angesehen werden kann, lässt sich obige Differentialgleichung auf folgende Weise vereinfachen. Zunächst führt man die Übertemperatur $\Theta = \vartheta - \vartheta_0$ ein. Dann gilt statt Gleichung 3:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = \frac{1}{k} \frac{\partial}{\partial t} \Theta = 0 \quad (1)$$

mit der Anfangsbedingung $\Theta(x, t = 0) = 0$.

Setzt man die Fourierzahl

$$Fo = \frac{kt}{x^2} \quad (2)$$

mit

$$k = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (\text{Temperaturleitfähigkeit}), \quad (3)$$

so erhält man mit Hilfe der Laplace-Transformation nach [WAGNER98]

$$\frac{\Theta}{\Theta_S} = \frac{\vartheta \angle \vartheta_0}{\vartheta_S \angle \vartheta_0} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{kt}} = \operatorname{erfc} \xi \quad (4)$$

mit

$$\xi = \frac{1}{2\sqrt{Fo}}. \quad (6)$$

Hierbei bedeutet

$$\operatorname{erfc} \xi = 1 \angle \operatorname{erf} \xi = 1 \angle \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\xi} e^{-w^2} \cdot dw \quad (7)$$

das komplementäre Fehlerintegral (error-function complement), während $\operatorname{erf} \xi$ als Gaußsches Fehlerintegral (error-function) bezeichnet wird.

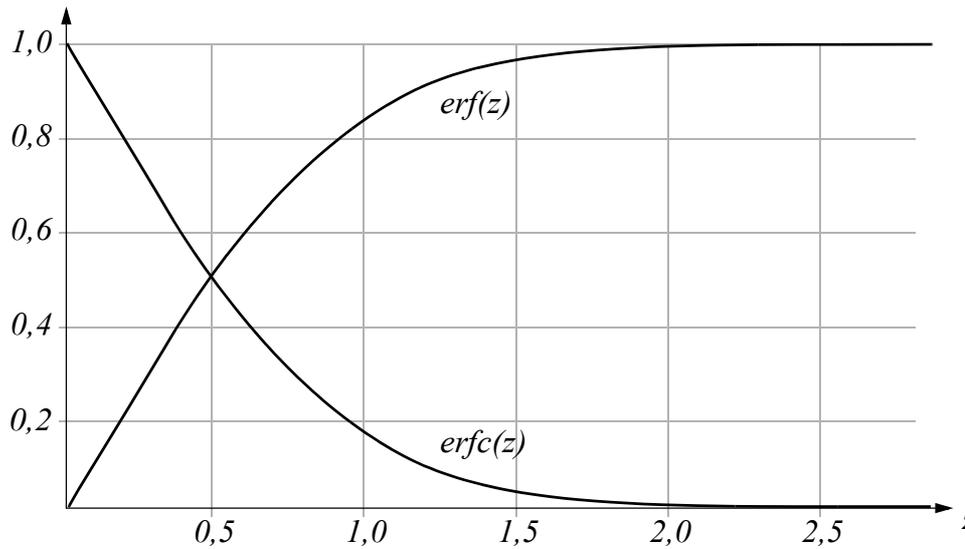


Bild A.1.1: Fehlerintegrale $\operatorname{erf} \xi$ und $\operatorname{erfc} \xi$

Für lange Zeiten ($Fo > 0,5$) sind die Temperaturprofile im Inneren der Platte einander ähnlich [WAGNER98], und man erhält durch Beschreibung der Temperaturprofile als Ortsfunktion

$$\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\vartheta_s - \vartheta_0} = \frac{4}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{s}\right) \cdot e^{-\frac{\pi^2}{4} \cdot Fo} \quad (8)$$

mit

$2s$ Dicke der Platte

x Abstand von Plattenmitte

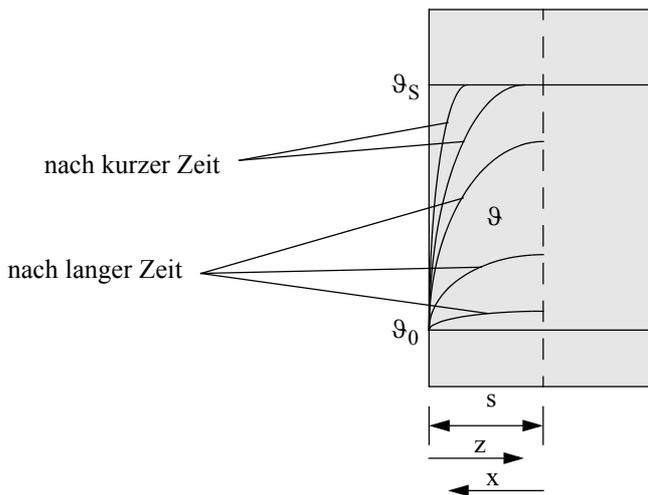


Bild A.1.2: Instationärer Temperaturverlauf in einer Platte

A.2 Berechnungsmodell

Für die numerische Ermittlung des Temperaturverlaufes wird ein Berechnungsmodell entwickelt, das auf den in Kapitel A.1 angegebenen Grundgesetzen aufbaut. Die betrachtete Asphaltsschicht sowie die darunterliegende Basisschicht wird in diskrete Elemente aufgeteilt (siehe Abb. 2.1).

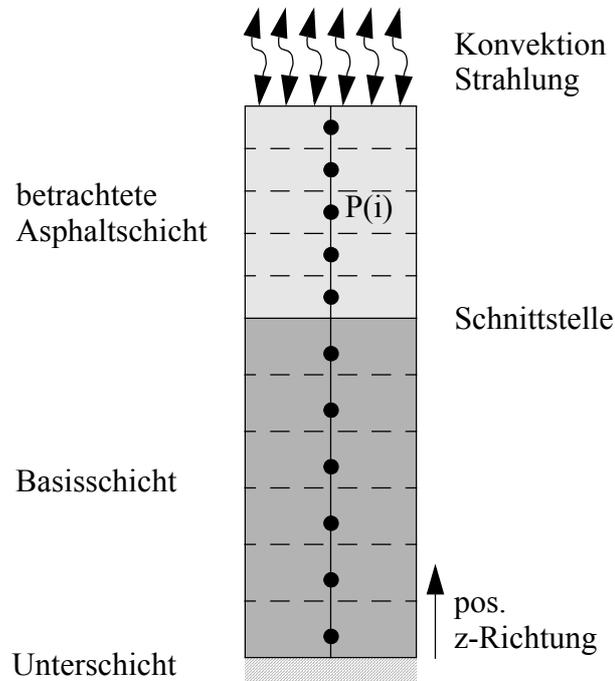


Bild A.2.1: Elemente zur Berechnung der Asphaltabkühlung [CHADBOURN98]

Instationäre Wärmeleitung kann durch Gleichung 9 beschrieben werden, die sich direkt aus Gleichung 3 ergibt.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (9)$$

mit

- ρ = Dichte [kg/m³]
- c = spez. Wärmekapazität
- t = Zeit
- T = Materialtemperatur
- x = Materialtiefe

In Abschnitt 2.3.2 wurde festgestellt, dass die spezifische Wärmekapazität c konstant bleibt, ebenso wird die Dichte als mit der Temperatur unveränderlich angenommen.

Um mit Hilfe von Gleichung 9 den zeitlichen Temperaturverlauf zu ermitteln, wird zu jedem Zeitschritt aus der Temperatur T zum Zeitpunkt t der Temperaturwert zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ ermittelt. Die

alten Temperaturwerte bekommen entsprechend Abbildung 0.1 die Bezeichnung $T_{i-1}^0, T_i^0, T_{i+1}^0$, die neuen (unbekannten) Werte sind T_{i-1}, T_i, T_{i+1} .

Durch Integration von Gleichung 9 über das Kontrollvolumen aus Abbildung 0.1 und über das Zeitintervall Δt erhält man

$$\rho c \int_{i \leq 1}^{i+1} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_{i \leq 1}^{i+1} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad (10)$$

wobei angenommen wird, dass die Temperatur in einem Kontrollvolumen konstant ist [PATANKAR80].

$$\rho c \int_{i \leq 1}^{i+1} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \rho c \cdot \Delta x (T_i \angle T_i^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_{i+1} \cdot (T_{i+1} \angle T_i)}{(\delta x)_{i+1}} \angle \frac{k_{i \leq 1} \cdot (T_i \angle T_{i \leq 1})}{(\delta x)_{i \leq 1}} \right] dt \quad (11)$$

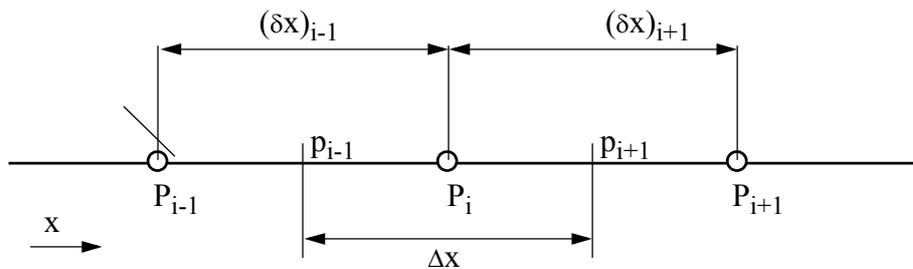


Bild 0.1: Berechnungsabschnitt für das eindimensionale Berechnungsproblem

Wird

$$\int_t^{t+\Delta t} T_i dt = T_i \cdot \Delta t \quad (12)$$

gesetzt, was, nach entsprechender Ersetzung von T_{i-1} und T_{i+1} zu

$$\rho c \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot (T_i \angle T_i^0) = \left[\frac{k_{i+1} \cdot (T_{i+1} \angle T_i)}{(\delta x)_{i+1}} \angle \frac{k_{i \leq 1} \cdot (T_i \angle T_{i \leq 1})}{(\delta x)_{i \leq 1}} \right] \cdot \Delta t \quad (13)$$

führt. Umformen liefert

$$a_i T_i = a_{i+1} T_{i+1} + a_{i-1} T_{i-1} + b \quad (14)$$

mit

$$a_{i+1} = \frac{k_{i+1}}{(\delta x)_{i+1}} \quad (15)$$

$$a_{i-1} = \frac{k_{i \leq 1}}{(\delta x)_{i \leq 1}} \quad (16)$$

$$a_i^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} \quad (17)$$

$$b = a_i^0 T_i^0 \quad (18)$$

$$a_i = a_{i+1} + a_{i-1} + a_i^0 \quad (19)$$

In der Berechnung sind der obere freie Rand und die Unterkante im Kontakt mit dem Untergrund gesondert zu berücksichtigen. Für beide Punkte (siehe Punkt P_r in Abbildung 2.2) kann der Wärmefluss gemäß Kapitel 4.2.2.1 und 4.2.2.2 angegeben werden.

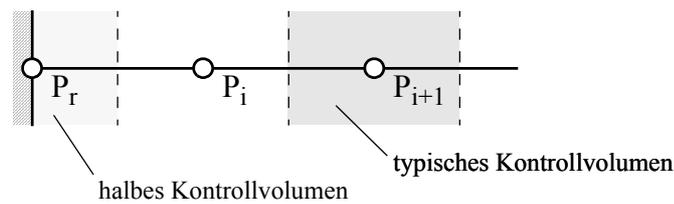


Bild A.2.2: Kontrollvolumen für einen Randpunkt (nach [PATANKAR80])

Zur Berechnung der Temperatur T_r am Punkt P_r entfällt Gleichung 14 der Punkt P_{i-1} .

$$a_r T_r = a_i T_i + b \quad (20)$$

mit

$$a_r = a_i + a_i^0 \quad (21)$$

$$a_i = \frac{k_i}{(\delta x)_i} \quad (22)$$

$$a_i^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} \quad (23)$$

$$b = q_r + a_i^0 \quad (24)$$

Für die freie Oberfläche ist der Wärmefluß q_r in Gleichung 9 angegeben.

A.3 Algorithmus und Implementation

A.3.1 Algorithmus

Für die Lösung der Diskretisierungsgleichung wird die Methode der Gaußschen Elimination verwendet, die aufgrund der Art der verwendeten Gleichung zu einem tridiagonalisierten Problem vereinfachen lässt [PATANKAR80].

Jede Temperatur T_i aus Gleichung 14 ist abhängig von den benachbarten Temperaturen T_{i-1} und T_{i+1} . Es wird angenommen, dass die Temperatur in großer Tiefe unverändert konstant bleibt, somit ist die Temperatur für den untersten Punkt bekannt, womit dann $a_i = 1$, $a_{i+1} = 0$, $a_{i-1} = 0$ wird und b der Anfangstemperatur entspricht. Dies impliziert jedoch, dass T_1 in Abhängigkeit von T_2 bekannt ist. Die Gleichung für $i=2$ ist eine Relation zwischen T_1 , T_2 und T_3 , da jedoch T_1 als eine Funktion von T_2 ausgedrückt werden kann, kann T_2 wiederum als eine Funktion von T_3 ausgedrückt werden. Dieser Vorgang wird fortgesetzt bis zum oberen Rand P_r , an dem T_{r+1} keine Bedeutung hat. Dort kann jedoch der Wert von T_r mit Hilfe von Gleichung 9 berechnet werden. Rücksubstitution ergibt dann alle Temperaturwerte bis T_1 .

Wird angenommen, dass die Temperatur am aktuellen Punkt der Gleichung

$$T_i = P_i T_{i+1} + Q_i \quad (25)$$

genügt, so ergibt sich mit

$$T_{i-1} = P_{i-1} T_i + Q_{i-1} \quad (26)$$

durch Substitution in Gleichung 14

$$a_i T_i = a_{i+1} T_{i+1} + a_{i-1} (P_{i-1} T_i + Q_{i-1}) + b. \quad (27)$$

Durch Umformen in eine Gleichung zu einem Term wie Gleichung 25 erhält man

$$\gamma_i = \frac{a_{i+1}}{a_i - a_{i-1} P_{i-1}} \text{ und} \quad (28)$$

$$\varrho_i = \frac{b + a_{i-1} Q_{i-1}}{a_i - a_{i-1} P_{i-1}}. \quad (29)$$

Für den Rand gilt $a_{i-1} = 0$, wodurch die Werte von P_1 und Q_1 gegeben sind mit

$$P_1 = \frac{a_2}{a_1} \text{ und } Q_1 = \frac{b_1}{a_1}. \quad (30)$$

Am anderen Ende der P_i, Q_i -Sequenz ist $a_{i+1} = 0$, was zu $P_r = 0$ führt und damit zu

$$T_r = Q_r. \quad (31)$$

Von diesem Punkt wird die Rücksubstitution begonnen, und man erhält das Temperaturprofil für den momentanen Zeitpunkt.

A.3.2 Implementation in C

Für die Umsetzung des Rechenmodelles in ein C-Programm ist die Verfügbarkeit aller Eingabeparameter in einer Art voraus, die einen schnellen und einfachen Zugriff auf die Daten ermöglicht.

Die Asphaltsschicht wird wie in Bild 2.1 diskretisiert. Dabei ist die Schicht 1 am untersten Punkt, die Anzahl aller Diskretisierungssektionen ist in `NumOfSections` abgelegt. Der erste Teil des Algorithmus („Vorwärtsrichtung“) läuft somit von $i = 1$ bis $i = \text{NumOfSections}$.

Die aktuellen Temperaturen werden im Vektor `TempN()` gespeichert, die Temperaturen des vorherigen Zeitschrittes sind in `TempO()` enthalten. Die Materialeigenschaften Dichte, Wärmekapazität sowie die jeweilige breite des Diskretisierungselements sind ebenfalls in Vektoren gespeichert, da sie sich über die Höhe hinweg verändern können. Die Parameter a_i , a_{i+1} , a_{i-1} und b aus Gleichung 14 werden im Programm durch `a`, `b`, `c` und `d` ersetzt:

```
for (i = 1; i <= NumOfSections; i++)
{
```

An der Oberfläche ist $i = \text{NumOfSections}$:

```
if (i == NumOfSections)
{
```

Zur Berechnung des Wärmefflusses an der Oberfläche werden Konvektion, Strahlung und Adsorption einzeln berechnet (vgl. Gleichung 9 S. 33):

```
q1 = hc * ( TempO(i) - (TempAmb + TempNull) );
q2 = (Emit/100.0)*Sigma*(pow(TempO(i),4)-pow((TempNull + TempSky),4));
q3 = (Absorb / 100.0)* Solar ;
q = q1 + q2 - q3;
e = rho(i) * cap(i) * dz(i) / TimeStep;
```

```
b = k(i)/(2 * dz(i));
c = 0;
a = b + e;
d = b * ( TempO(i-1) - TempO(i) ) + e * TempO(i) - q;
```

```
TempN(i) = (b * TempO(i-1) + d) / a;
```

```
}
```

Am untersten Punkt ist $i=1$. Hier wird die Temperatur als unveränderlich angenommen, was zur trivialen Form der Gleichung 25 führt:

```
else if (i == 1)
{
P(1) = 0;
Q(1) = CmNewData.TempBase + TempNull;
}
```

Für alle sonstigen Zwischenpunkte gilt:

```
else
{
b = k(i-1)/(2 * dz(i-1));
c = k(i+1)/(2 * dz(i+1));
e = rho(i) * cap(i) * dz(i) / TimeStep;
a = b + c + e;
```

```
    d = b * ( TempO(i-1) - TempO(i) ) + c * ( TempO(i+1) - TempO(i) ) + e *  
TempO(i);  
    P(i) = b / ( a - c*P(i-1) );  
    Q(i) = ( d + c * Q(i-1) ) / ( a-c*P(i-1) );  
    }  
} // for (i = 1; i <= NumOfSections; i++)
```

Rücksubstitution:

```
for (i = CmConfig.NumOfSections-1; i >= 1; i--)  
{  
    TempN(i) = P(i) * TempN(i+1) + Q(i);  
}
```

A.4 Abkürzungen

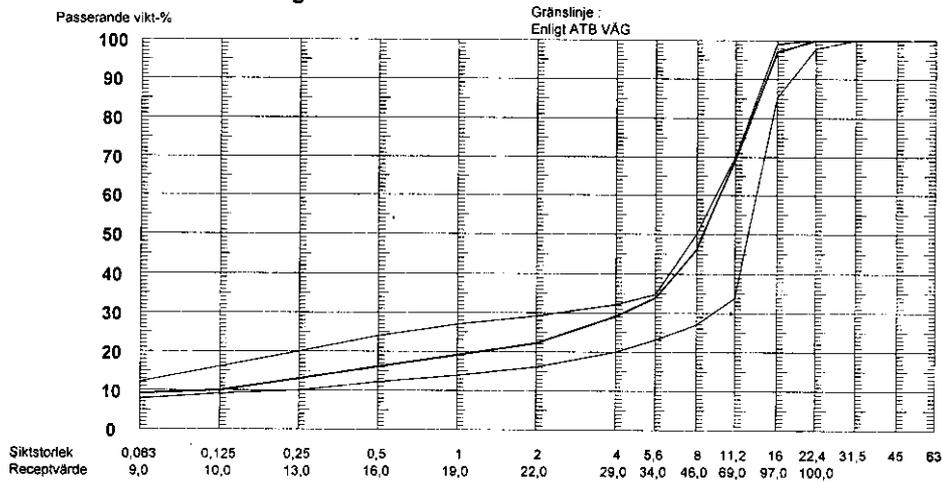
CAN	Controller Area Network
CIRC	Computer Integrated Road Construction
OSYRIS	Open System for Road Information Support
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen
TMB	Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Universität Karlsruhe
VOB	Verdingungsordnung für Bauleistungen
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen

A.5 Materialeigenschaften und Messdaten

A.5.1 Asphaltmaterial der Tests in Oskarshamn, Schweden

ARBETSRECEPT Stenmaterial		Uppdragsgivare :			
Produkt : ABS 16 / 6,6% 70/100		Entreprenör :			
Leverantör : Skanska Sverige AB/Rockneby		Datum fr.o.m 2000-06-06		Datum t.o.m	
Objekt :		Notering :			
Stenmaterial Leverantör Skanska Sverige AB/Rockneby Densitet 2,67 Flisighet 1,30 Sprödhet 35 Kulkvam 7,5		Kontrollpunkt (mm) 0,063 2 4 11,2 Passerad vikt (%) 9,0 22,0 29,0 69,0			
Beläggningssmassa Bindemedelsdensitet 1,020 Bindemedelshalt 6,6 Skrymdensitet 2,345 Kompaktdensitet 2,397 Hålrum 2,2 BFH 87,5					
Tillsatsmedel Cellulosa-fibrer 0,3					

Kornstorleksfördelning



Ort och datum
Rockneby 2001-01-24

Godkänd: Ort och datum

Skanska Sverige AB
VTC-Syd
Bölevägen
380 30 Rockneby

Besöksadress
Styrelsens säte
Malmö

Telefon
0480-66178
Telefax
0480-66512

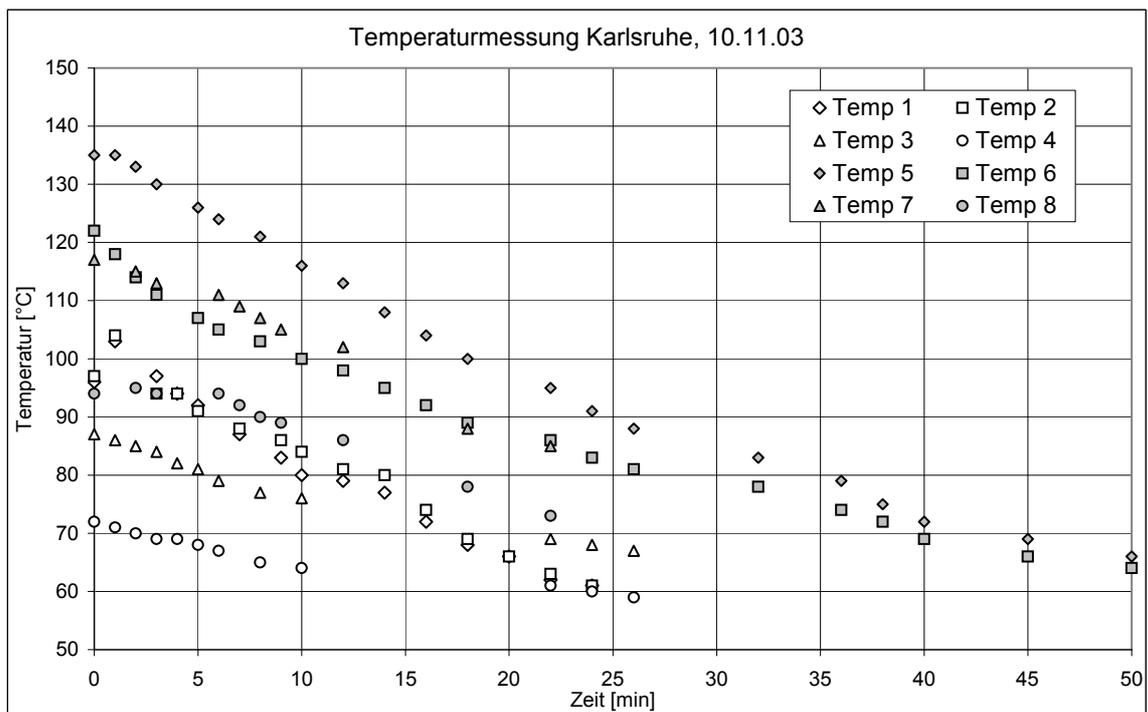
Org.nummer
556033-9086
VAT-nummer

Postgiro
Bankgiro

A.5.2 Messdaten für die Messungen in Karlsruhe

	Messung							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Wind min [m/s]	0,0		0,0		0,0		0,4	
Wind max [m/s]	2,8		1,3		3,2		2,5	
Wind typ. [m/s]	0,7		0,4		0,8		1,5	
Wolken [/8]	6		5		3		3,0	
Temp [°C]	21		24		26		25,0	
Dicke [cm]	5,0	5,8	6,5	6,5	6,0	6,2	4,0	4,0

Zeit	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 6	Temp 7	Temp 8
0	96	97	87	72	135	122	117	94
1	103	104	86	71	135	118		
2			85	70	133	114	115	95
3	97	94	84	69	130	111	113	94
4	94	94	82	69				
5	92	91	81	68	126	107		
6			79	67	124	105	111	94
7	87	88					109	92
8			77	65	121	103	107	90
9	83	86					105	89
10	80	84	76	64	116	100		
12	79	81			113	98	102	86
14	77	80			108	95		
16	72	74			104	92		
18	68	69			100	89	88	78
20	66	66						
22	62	63	69	61	95	86	85	73
24	61	61	68	60	91	83		
26			67	59	88	81		
28								
30								
32					83	78		
34								
36					79	74		
38					75	72		
40					72	69		
45					69	66		
50					66	64		



A.6 Datentypen und Wertebereiche

Tabelle A.6.1: Die für die Implementation verwendeten Datentypen der Programmiersprache C

Datentyp	Größe	Wertebereich
bit	1 bit	0 oder 1
signed char	1 byte	-128 bis +127
unsigned char	1 byte	0 bis 255
signed int	2 bytes	-32768 bis +32767
unsigned int	2 bytes	0 bis 65535
signed long	4 byte	-2147483648 bis +2147483647
unsigned long	4 bytes	0 to 4294967295
float	4 bytes	$\pm 1,176E-38$ bis $\pm 3,40E+38$
double	8 bytes	$\pm 1,7E-308$ bis $\pm 1,7E+308$
pointer	2 oder 4 bytes	Objektadresse

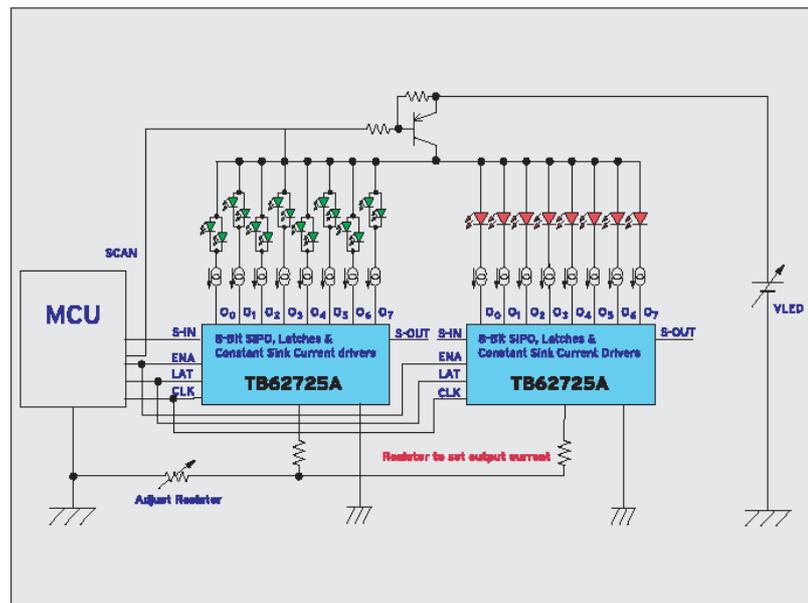
A.7 Bauteile

A.7.1 LED-Treiber

TB62725A/726A Constant Current LED Drivers

from Toshiba

The TB62725A and TB62726A are 8-output resp. 16-output constant current LED drivers with serial input and offer the most advanced driver features for low-voltage applications. They contain all of the features included in the popular TB62705/706 series, but are able to operate down to 3 volts supply voltage. The drivers maintain a constant current flow through an LED or LED cluster independent of variations in the power supply and electronic components within the circuit. They feature a built-in shift register, latch and output enable control, effectively eliminating several components from conventional LED display designs. Each output can supply a maximum current of 90 mA, the actual LED current is set for all outputs with just a single resistor. Due to the good matching of output current between outputs ($\pm 6\%$ max.) and even between devices ($\pm 15\%$ max.), they are especially well suited for colour LED displays, where a tight control of the colour hue is necessary.



Features

- Output current capability:
 - 90 mA \times 8 (TB62725A)
 - 90 mA \times 16 (TB62726A)
- Current range: 2...80 mA
- Application output voltage:
 - 0.7 V (output current 2...80 mA)
 - 0.4 V (output current 2...40 mA)
- For common anode LEDs
- Input signal voltage level: 3.3 V and 5 V CMOS level (Schmitt trigger input)
- Power supply voltage range: 3.0...5.5 V
- Max. output terminal voltage: 17 V
- Serial data transfer rate: 20 MHz (max. cascade connection)
- Operating temperature range: -40...+85°C
- TB62725A packages:
 - DIP-16
 - SSOP-16
- TB62726A packages:
 - SDIP-24
 - SSOP-24

A.8 Ergebnisprotokoll des Geodynamik-Systems

ACD-020
Asphalt Compaction Documentation

