

Schriftenreihe des
Instituts für Straßenwesen
an der Universität Siegen



Marius Robert Florian Wunder

**Weiterentwicklung der Kaltlogistik und
Wiederverflüssigung des Baustoffs Bitumen
unter technischen und wirtschaftlichen
Gesichtspunkten**

Dissertation

Heft 1

Siegen 2012

vollständiger Abdruck der von der naturwissenschaftlich technischen Fakultät der Universität Siegen zur Erlangung des akademischen Grads eines Doktor Ingenieurs genehmigten Dissertation

Vorsitzender der
Prüfungskommission

Univ.-Prof. Dr. Reinhard Trettin
(Universität Siegen)

Gutachter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Zander
(Universität Siegen)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Johannes Beckedahl
(Bergische Universität Wuppertal)

Prüfer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Richard A. Herrmann
(Universität Siegen)

Datum der mündlichen Prüfung

22.12.2011

Vorwort

Seit etwa einem halben Jahrhundert wird bei der Herstellung von Asphalt auf das Bindemittel Bitumen zurückgegriffen. Oft wird dieses Bindemittel etwas despektierlich als bloßer Destillationsrückstand des für unser Zeitalter so bedeutsamen Erdöls bezeichnet, obwohl ihm in der Funktion des Straßenbaustoffs wichtige und beinahe einzigartige Eigenschaften zueigen sind, die es wie bislang kein anderes bekanntes Material für diesen Einsatz prädestinieren: es kann in einer großen Bandbreite von Steifigkeiten (Härten) geliefert werden, verformt sich unter Belastungen viskoelastisch, besitzt eine hohe Klebkraft und dichtet bei weitgehender Unanfälligkeit gegenüber allen Arten von Einwirkungen zuverlässig und langfristig ab.

Ein Baustoff, der im Straßenbau Anwendung findet, muss jedoch auch fast durchweg und mit gleichen Qualitätsanforderungen zu einem verträglichen Preis in ausreichender Menge zur Verfügung stehen. Seit jeher ist das Angebot an Bitumen eng verbunden mit der Herstellung der wirtschaftlich deutlich im Vordergrund stehenden sonstigen Erdölzeugnisse wie beispielsweise der Treibstoffe und Öle. Somit kann es nicht verwundern, dass Bitumen dann, wenn eine erhöhte Nachfrage nach Heizöl besteht – also in der Winterzeit, reichlich und damit preiswert angeboten werden kann, während in den wärmeren Monaten des Jahres, in denen dementsprechend auch der Hauptteil der Bauleistungen abgewickelt wird, die Ressourcen knapp werden. Gravierender ist dabei noch, dass Bitumen eben nicht gezielt hergestellt wird, sondern stets als Teilprodukt der gesamten Erdölverarbeitung anfällt. Eine erhöhte Nachfrage nach Bitumen wird also nicht zielgerichtet befriedigt. Zwar sind die Raffinerien in der Lage, im Winter den Anfall von Bitumen durch eine Veränderung der Rohöle zu reduzieren, eine Erhöhung der Produktion im Sommer ist jedoch nur in engen Grenzen möglich bzw. wirtschaftlich vertretbar. Dieser Umstand führte bereits in jüngster Vergangenheit zu einer spürbaren Beeinträchtigung der Bautätigkeiten, d.h. selbst zu sehr hohen Preisen war das Bindemittel nicht immer beziehbar.

Für die ausführenden Baufirmen ist dies mit vielfältigen Problemen verbunden, stehen sie doch in vertraglichen Verpflichtungen gegenüber ihren Auftraggebern und selbstverständlich unter dem Druck kalkulierter Baumaßnahmen. Den daraus geborenen berechtigten Wünschen wird jedoch von Seiten der erdölverarbeitenden Industrie mit der Forderung nach einer Verstetigung des Absatzes begegnet.

In jüngerer Vergangenheit wurden verschiedene Versuche unternommen, die Verfügbarkeit von Bitumen über eine Kaltlagerung mit einer termingerechten Wiederverflüssigung zu sichern. Dieser Weg birgt wirtschaftlich große Einsparmöglichkeiten, würde er doch beispielsweise Bauunternehmen oder deren Versorger in die Lage versetzen, Bitumen vergleichsweise preiswert einzukaufen und erst dann zu verarbeiten, wenn es benötigt wird bzw. wenn der aktuelle Marktpreis zu hoch ist. Das Potenzial einer damit verbundenen Logistik eröffnet aber auch die Möglichkeit, die Versorgung der Unternehmen mit Bindemittel

international zu gestalten, denn das Bitumen könnte bereits im Ausland hergestellt, abgekühlt und in geeigneten Behältern über weite Entfernungen transportiert werden.

Allerdings stellte bisher vor allem der enorme Energieaufwand und die erforderliche Zeit für die schonende Verflüssigung des Bitumens ein Problem dar, das das Kalthandling von Bitumen zu unwirtschaftlich erscheinen ließ. In der Optimierung der Wiederverflüssigung des Bitumens in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht lag deshalb auch der Schwerpunkt der Arbeit, die durch Herrn Wunder zu erbringen war. Dabei – aber auch über alle weiteren Phasen der Lagerung und Verarbeitung – war selbstverständlich jeweils sicher zu stellen, dass die qualitativen Eigenschaften des Bindemittels nicht negativ beeinflusst werden. Mit der Entwicklung eines Abfüllbehälters, des Entwurfs einer Lagerung und der eingehenden Untersuchung der Möglichkeiten einer Wiedererwärmung zur Verflüssigung des Bitumens hat Herr Wunder die komplette Logistikkette der Verarbeitung betrachtet und praktikable Lösungen gefunden. Insbesondere durch den Einsatz der Mikrowellentechnik ist es ihm gelungen, die Kaltlogistik und Wiederverflüssigung auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgreich zu entwerfen.

Die vorliegende Arbeit von Herrn Dipl.-Ing. Marius Wunder wurde an der naturwissenschaftlich-technischen Fakultät der Universität Siegen als Promotionsschrift angenommen. Es war mir eine Freude, ihn bei seiner sehr engagierten und zielstrebigem Bearbeitung begleiten zu können, und ich hoffe, dass seine Bestrebungen, dieses Thema mit nicht nachlassender Emsigkeit voranzutreiben, erfolgreich verlaufen werden.

Ulf Zander
Siegen, Januar 2012

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Baustofftechnologe und Projektleiter der TPA Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GmbH in Köln im Konzernverband der STRABAG SE. Neben meiner Tätigkeit für die STRABAG SE war ich externer Doktorand des Instituts für Straßenwesen unter Prof. Dr. Ulf Zander an der Universität Siegen.

Mein Dank gilt insbesondere meinem Doktorvater und Hauptgutachter Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Zander der von der ersten Stunde von dem Projekt überzeugt war, und mich deshalb als externen Doktoranden angenommen hat. Danke für die enge Zusammenarbeit in persönlicher Arbeitsatmosphäre.

Ich möchte mich in höchstem Maße bei meinem Vorgesetzten Herrn Dr. Norbert Simmleit für eine kraftvolle Unterstützung, Begeisterung für das Projekt und die viele Zeit, die er in die personelle, infrastrukturelle und finanzielle Unterstützung des Projekts gesteckt hat, bedanken.

Ich möchte Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Beckedahl danken, dass er sich bereit erklärt hat die Arbeit von der ersten Stunde an zu begleiten und als Zweitgutachter zu bewerten.

Ich möchte den drei Menschen danken, die mich in den letzten Jahren auf meinem Lebensweg geführt haben:

- Meinem Vater Dipl.-Ing. Dieter Wunder für seinem Rat und sein Vorbild.
- Prof. Dr.-Ing. Hillemeier dafür, dass er die Faszination der Welt der Ingenieure in den Hörsaal der TU-Berlin getragen hat und mich darüber hinaus für die Thermodynamik begeistern konnte
- Dipl.-Berging. Steinert (MBA) für das große Vertrauen, dass er mit der Übertragung des STRAB A S A-Projekts in mich gesetzt hat und als vielbeschäftigter Manager seine Zeit bei unzähligen Besprechungen investierte.

Ich möchte Danke sagen zu meinen Kollegen im Strabag Konzern, meinem Freund Herrn Dipl.-Ing. Martin Rasch für einen großartige Informationsfluss, Herrn Dipl.-Ing. Reinhard Höbel, der sein Wissen als Bitumenexperte mit mir geteilt hat, Frau Dipl.-Ing. Agnes Loose und Herr Dr.-Ing. Pahirangan Sivapatham für ihre flexible Hilfe bei operativen und theoretischen Fragen und Lösungsansätzen und allen anderen TPA-Kollegen. Vielen Dank für eine heitere Arbeitsatmosphäre, konstruktive Zuarbeit und uneingeschränkte Unterstützung.

Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing Stefan Grohs vom Institut für Straßenwesen der der Universität Siegen für seine Unterstützung in EDV und Simulationstechnik.

Besonderer Dank geht auch an alle externen Projektpartner und Fachexperten im In- und Ausland: Insbesondere Herrn Marcel Mallah und den Mitarbeitern der Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH, Herrn Lothar Moses und seinen Kollegen bei der Fa. Branopac für die Anfertigung zahlreicher Kartonvarianten. und Herrn Dr. Abdel Kader Boutrid von der Fa. Buergofol für die Forschungszusammenarbeit bei Inlinervarianten.

Ich möchte dem Bundestagsabgeordneten Dr. Michael Paul für ein beschwingtes Vorwort voller Weitsicht danken, dass den Leser zusätzlich animiert sich mit der Bitumenkaltlogistik zu beschäftigen.

Schließlich gilt mein Dank noch den Mitarbeitern in den Anlagen der Deutschen Asphalt und anderen Mischanlagen die mit mir bei Schnee und Sommerhitze mit dem Baustoff Bitumen gearbeitet haben.

Meiner Frau Dipl.-Phil. Olga Wunder danke ich für ihre Liebe und unbegrenzte moralische und infrastrukturelle Unterstützung. Ich danke meiner Mutter Eva Wunder für ihr Engagement als meine Fernschullehrerin im Ausland und als unermüdliche Unterstützerin aller meiner späteren Aktivitäten als bayerischer Schüler und berliner Student. Ihr ist diese Arbeit gewidmet.

Köln, 15.06.2010

Dipl.-Ing. Marius Robert Florian Wunder

Vorwort

Die Energiefrage ist eine, wenn nicht sogar die Schlüsselfrage der Zukunft. Nicht nur in Deutschland, sondern weltweit. Verantwortungsvolle Energiepolitik muss ihren Beitrag zu einer sicheren, wirtschaftlichen und klimafreundlichen Energieversorgung leisten. Einer weltweit steigenden Nachfrage stehen nur begrenzte fossile Ressourcen gegenüber. Hinzu kommen die vom Menschen verursachten Klimaveränderungen aber auch die politische Instabilität wichtiger Erdöl und Erdgas exportierender Länder. Wir müssen Abhängigkeiten verringern, Energie effizienter nutzen und erneuerbaren Energien zum Durchbruch verhelfen. Die Herausforderungen des Klimawandels und der Rohstoffverknappung bieten Zukunftschancen, gerade auch für die deutsche und europäische Wirtschaft. Die Steigerung der Energieeffizienz bietet viele ungenutzte Potenziale. Mit Hilfe moderner Technologien muss es gelingen, die Entwicklung des wirtschaftlichen Wachstums von dem Ressourcenverbrauch weiter abzukoppeln.

Die Knappheit beispielsweise des Erdöls erfordert ein besonderes Augenmerk auf eine effiziente Handhabung von Erdölprodukten wie Bitumen. Nur die einzigartige Rheologie und die besonderen thermophysikalischen Eigenschaften dieses Naturprodukts ermöglichen uns die Erstellung dauerhafter Verkehrsstrecken im modernen Straßenbau.

Effizient wird dieser Baustoff auch dann gehandhabt, wenn es gelingt, Baumaßnahmen in Schwellenländern mit möglichst geringen Verlusten an Material und Energie durchzuführen. Dies wird möglich, indem das Bitumen in umweltfreundlichen, wirtschaftlichen Verpackungen dorthin transportiert und unter hohen Anlagenwirkungsgraden wiederverflüssigt werden kann.

Nur durch ideenreiche Unternehmen und gut ausgebildete Fachkräfte können die rohstoffärmeren Länder Europas im Wettbewerb um derartige Technologien bestehen. Wir sind in Deutschland dazu übergegangen, das Bindemittel durch hundertprozentiges Asphaltrecycling weiterzunutzen. Gerade deshalb muss dafür Sorge getragen werden, dass der Baustoff von der Transport-, Lager- und Produktionsweise unversehrt seiner Bestimmung zugeführt wird.

Es spricht für den Forschungsstandort Deutschland, dass es mit dem STRAB A S A-Projekt gelungen ist, diese produktionstechnischen Herausforderungen soweit zu lösen, dass sogar über einen Einsatz des Systems im europäischen Straßenbau nachgedacht wird. Der geplante Kalttransport und die Kaltlagerung des Baustoffs in recyclebaren Karton- oder Kunststoffverpackungen könnten hier zur Energieeinsparung genutzt werden. Der Einsatz von Mikrowellen bei der Wiederverflüssigung macht es zum ersten Mal möglich, den so gelagerten Baustoff bei Bedarf schnell wieder verarbeitbar zu machen, und schafft so Unabhängigkeit von Lieferschwierigkeiten.

Der Erfolg des STRAB A S A-Projekt hat gezeigt, wie sehr sich die Forschung an den Schnittstellen der einzelnen Fachrichtungen lohnt und wie diese im Bereich der effizienten Technologien stärker gefördert werden muss – im Interesse sowohl der Umwelt als auch im Interesse der einzelnen Unternehmen, die diese Technologien einsetzen.

Köln, den 11. Mai 2010

Dr. Michael Paul MdB
Mitglied des Bundestagsausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Zusammenfassung

Der Baustoff Bitumen wird in Europa derzeit in heißflüssiger Form gelagert und transportiert. Um Abhängigkeiten von Lieferanten und unter anderem Lager- und Transportkosten zu verringern, wird über die parallele Handhabung des Asphaltbindemittels in fester Form nachgedacht. Dabei liegen schon einige Erfahrungen zur Bitumenkalthandhabung für Auslandsbaumaßnahmen vor. In dieser Veröffentlichung wurden die verschiedenen dort gängigen Varianten der Baustoffverpackung, Metall-, Kunststoff-, Holz- und Kartongebinde gegenübergestellt und einige hinsichtlich eines Einsatzes auf dem europäischen Markt schrittweise weiterentwickelt. In der Zusammenarbeit mit Projektpartnern der Verpackungsindustrie entstanden dabei eine neue Inlinerfolie und großvolumige Silikonkartongebinde (Strabox).

Die Technologien und thermophysikalischen Vorgänge bei der Wiederverflüssigung des Bindemittels wurden ebenso untersucht. Sowohl konventionelle Verflüssigungsmethoden als auch eine moderne Wiederverflüssigung des Baustoffs mittels Hochfrequenztechnik wurden numerisch simuliert. Die Modelle wurden mit Versuchsreihen verglichen und mit ihrer Hilfe validiert. So konnten einfache praxisrelevante Hilfsmittel für den Anlagenbetrieb und Erkenntnisse für die Anlagenplanung erlangt werden.

Während dieser und anderer Versuche zu weiteren Teilabschnitten der Bitumenlogistikkette fand eine ständige Überwachung der Baustoffeigenschaften zur Qualitätserhaltung statt. Ebenso wurden die Verfahrensvarianten fortlaufend unter kaufmännischen Kriterien diskutiert.

Der akademische Vorstoß in dieses junge Forschungsfeld führte neben dem Schutz mehrerer Gebrauchsmuster zur Erkenntnis, dass die Bitumenkalthandhabung, auch auf dem hochentwickelten europäischen Markt, eine ernstzunehmende Alternative zu gängigen Verfahren darstellt.

Abstract

In Europe presently, the building material bitumen is stored and transported in hot-liquid form. To reduce dependence and (among others) costs for storage and transportation, engineers think about a parallel handling of the asphalt-binder in firm form. Experiences for cold bitumen handling are already present from foreign construction projects. The different current packing-versions, metal, plastic, wood and cardboard were confronted in this publication. Regarding an application on the European market they were developed gradually. In co-operation with project partners of the packaging industry a new Inliner and large volume silicone cardboard bundles (STRAB O X) were developed.

The technologies and thermo-physical procedures for the reheating of the bonding agent were examined likewise. Both, conventional liquefaction methods and modern methods of high-frequency engineering were simulated numerically. The models were compared with test series and validated by their relief. It was possible to attain practice relevant aids for the operation of the plant and expertise for its planning.

During these and other attempts to further sections of the Bitumen-Logistics-Chain a constant monitoring of the characteristics of the building material took place for quality preservation. Likewise the variants of the procedure were discussed sequentially under commercial criteria.

The academic advance into this young field of research led (apart from the protection of several utility models) to the realization, that the cold bitumen handling, even on the highly developed European market, represents a serious alternative to usual procedures.

I Inhalt

Inhalt.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Glossar.....	XV
1. Einleitung.....	1
2. Überblick über das Projekt Strabasa.....	3
2.1 Bitumenverpackung.....	3
2.1.1 Gebindearten.....	4
2.1.2 Formgebung.....	6
2.2 Qualitätssicherung.....	6
2.3 Untersuchungen zur Bitumenverflüssigung.....	7
2.3.1 Problemstellung.....	7
2.3.2 Vorgehensweise.....	7
2.3.3 Validierung der Berechnungen.....	8
2.4 Anlagenbewertung aus betriebswirtschaftlicher Sicht.....	9
3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur.....	10
3.1 Abfüllen des heißen Bitumens in eine geeignete Lagerungsverpackung.....	10
3.2 Eigenschaftsanforderungen und Vorauswahl von Bitumenverpackungen für die genauere Untersuchung.....	11
3.3 Metallgebände: Fässer und Eimer.....	15
3.4 Kunststoffverpackungen für Asphaltbindemittel.....	17
3.4.1 Anforderungen an Kunststofftaschen.....	18
3.4.2 Anforderungen an Kunststofffolien.....	19
3.4.3 Versuchsdokumentation Kunststofffolien.....	20
3.4.4 Auswertung der Versuchsreihe mit Kunststofffolien.....	21
3.5 Versuche zur Ermittlung einer für das Bitumengebinde geeigneten Kartonage.....	23
3.5.1 Herstellung der Formstabilität von Großgebänden aus Silikonkarton.....	24
3.5.2 Weiterentwicklung des Gebindes hinsichtlich Handlichkeit.....	29
3.5.3 Untersuchungen zur Stapelbarkeit der STRABOX.....	32
3.5.4 Abmessungen und Füllhöhe der STRABOX.....	34
3.6 Eigenschaftsveränderungen aus Lagerung und Wiederverflüssigung.....	34
3.6.1 Versuchsaufbau Lagerungssimulation.....	35
3.6.2 Eigenschaftsveränderungen des Baustoffs im Versuch.....	38
3.6.3 Auswertung der Versuche zur Lagersimulation.....	42
3.7 Diskussion der Verpackungsarten.....	43

4.	Herstellung des Bitumenkörpers aus einem erkalteten Bitumenvorrat.....	45
4.1	Konventionelle Zerkleinerungsmethoden.....	45
4.2	Moderne Arten der Bitumenzerkleinerung	49
4.3	Fazit zum Bitumenschneiden	51
5.	Die konventionelle Verflüssigung	52
5.1	Begriffsdefinitionen	52
5.2	Mathematische und physikalische Untersuchungen zur Verflüssigungsdauer	54
5.3	Versuche zur Bestimmung der Verflüssigungsdauer	55
5.3.1	Versuchsplanung zum Verflüssigungsverhalten	55
5.3.2	Versuchsdurchführung	56
5.4	Geschlossene Lösung der partiellen Wärmeleitung zur Bestimmung der Verflüssigungsdauer	59
5.4.1	Grundlegendes zur Wärmeleitungsdifferentialgleichung und zum Stoffphasenübergangsproblem	60
5.4.2	Die Lösung nach Stefan.....	62
5.4.3	Die Lösung nach Neumann	65
5.4.4	Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungen nach Stefan und Neumann	67
5.4.5	Schlussfolgerungen	67
5.5	Anwendung thermodynamischer Theorien zur numerischen Simulation der Dauer des Verflüssigungsvorgangs	68
5.5.1	Ein- und zweidimensionale numerische Simulation der Bitumenverflüssigung im Schmelztopf	69
5.5.2	Simulation im Raum mit drei Richtungsvariablen (3D)	74
5.5.3	Anpassung der Simulationen mittels der Ergebnisse der Praxisversuche.....	77
5.5.4	Fazit zur Erstellung eines Simulationsprogramms.....	81
5.6	Untersuchung der Energieverluste über die Oberflächen der konventionellen Verflüssigungsanlage.....	83
5.6.1	Grundlegendes zum Temperaturverlauf und zu den Annahmen	83
5.6.2	Temperaturverluste in der Behälterwand	86
5.6.3	Temperaturverluste an der freien Oberfläche	87
5.6.4	Abschließende Entwicklung einer Faustformel für die Primärenergieverluste	88
5.7	Fazit zur konventionellen Bitumenverflüssigung.....	90
6.	Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung	92
6.1	Theoretische Grundlagen der Hochfrequenztechnik	92
6.2	Versuche mit dem Bindemittel unter Hochfrequenzerwärmung.....	99
6.2.1	Vorversuche zur Bestimmung der Mikrowelleneindringtiefe in Bitumen	100
6.2.2	Versuche zur thermischen Homogenität bei der Bitumenerwärmung im Hochfrequenzofen.....	105
6.2.3	Untersuchung der Selektivität im Durchlaufofen.....	122

6.2.4	Verflüssigungsleistung pro installierter Leistung als Anlagenwirkungsgrad.....	123
6.2.5	Fazit der Mikrowellenversuche und Diskussion der Konfiguration.....	125
6.3	Simulation der Schnellverflüssigung im Mikrowellenofen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode.....	126
6.3.1	Grundlegendes zur Vorgehensweise	126
6.3.2	Mikrowellenaufschmelzsimulation mit COMSOL	127
6.3.3	Einschränkungen bei der Modellfindung.....	129
6.3.4	Modellvalidierung	131
6.3.5	Variation der Anlagenleistung	137
6.3.6	Variation des Einkopplungssystems	137
6.3.7	Erkenntnisse aus der Simulation für die Anlagenplanung	152
6.4	Versuche zur Eigenschaftsveränderung bei Wiederverflüssigung.....	153
6.4.1	Versuchsaufbau Verflüssigungssimulation	153
6.4.2	Eigenschaft Veränderungen des Baustoffs im Versuch.....	154
6.4.3	Auswertung der Simulationsversuche.....	155
6.5	Abschließendes Fazit zur Mikrowellenverflüssigung von Asphaltbindemitteln ..	155
7.	Abschließender Technologievergleich mit Diskussion unter Einbeziehung ökonomischer Kriterien	157
7.1	Ökonomische Bewertung der Vorteile der Bitumenkaltlogistik	157
7.2	Diskussion der Varianten der Bitumenkalthandhabung	162
7.2.1	Gebindevarianten.....	162
7.2.2	Verflüssigungsvarianten.....	166
7.3	Kombinationsempfehlungen	167
8.	Zusammenfassung und Empfehlung für die Logistik- und Anlagenplanung	168
9.	Physikalische Größen.....	170
10.	Anhänge	174
11.	Literaturverzeichnis	179

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lagerung von Bitumen in Tanks	4
Abbildung 2:	Entnahme von Bitumen aus Eimer (links, Dortmunder Gussasphalt GmbH & Co. KG) und Bitumenfässer (rechts, BENNINGHOVEN GmbH & Co. KG)	4
Abbildung 3:	PE/PP Gebinde (links) und Trinidad Naturasphalt in PE Folie (rechts).....	5
Abbildung 4:	Silikonierte Verpackungsvarianten aus Karton für Bitumen im Hochbau (Börner GmbH und Co. KG).....	5
Abbildung 5:	Clovertainer-System (Greif NZ Ltd)	6
Abbildung 6:	Kunststoffverpackungen mit heißer Bitumenfüllung kühlen in einem Wasserbecken aus [Li08].....	11
Abbildung 7:	Clovertainer. Derartiges Bitumenhandling kann bei hohen Temperaturen problematisch sein (Greif NZ Ltd)	13
Abbildung 8:	Werbeabbildung eines Bitubale [Bi11].....	13
Abbildung 9:	Bitumentransporttank (Archivbild STRABAG SE)	14
Abbildung 10:	Bitumentransportcontainer der Firma Technix zum Kalttransport von Asphaltbindemitteln (Technix Group Ltd.).....	15
Abbildung 11:	Bitumenfässer nach Entleerung auf einer Asphaltmischanlage in Ruanda (Archivbild STRABAG SE)	16
Abbildung 12:	Fassschmelzer Baujahr 2003 (BENNINGHOVEN GmbH & Co. KG)	16
Abbildung 13:	Einfache Kunststoffolie als Trennmittel gegen das Adhäsionsverhalten (Archivbild STRABAG SE)	18
Abbildung 14:	Bitumen verpackt in Polycubes in einem Transportcontainer	18
Abbildung 15:	DSC-Analysebild einer Feldprobe (BUERGOFOL GmbH)	21
Abbildung 16:	Mikroskopbilder einer (links) idealen Verflüssigung eines Kunststoffs in Polymermodifiziertem Bitumen (PmB) als Vergleichsbild und (rechts, charakteristisch für diese Versuchsreihe) einem Staubkorn auf sonst durch den Kunststoff unbeeinflusstem Bitumen 50/70.....	21
Abbildung 17:	Reste der relativ gut im Bitumen gelösten Folie T 069-0	22
Abbildung 18:	Derzeit auf dem Markt verfügbare Systeme der Bitumenverpackung in Kunststoffgebinde im Vergleich	23
Abbildung 19:	Silikonkarton mit den Abmessungen 120*40*40 Zentimeter.....	24
Abbildung 20:	Entwicklungsstufe mit abgeschrägten Seiten bei der Weiterentwicklung von Kartonverpackungen für Bitumen.....	25
Abbildung 21:	Abfüllversuch mit Wasser.....	26
Abbildung 22:	Abfüllung mit Haltebügel	26
Abbildung 23:	Kartongebinde nach Abkühlung und Entfernen des Bügels	27
Abbildung 24:	Bitumenverformung im Kaltzustand trotz Gegendruck durch die Kartonverpackung	27
Abbildung 25:	Graph der Kartongebindeverformung, Lagerung bei 19 °C bis 22 °C.....	27

Abbildung 26:	Kartonverformung bituminöser Fugenvergussmassen im Hochbau	28
Abbildung 27:	Fotodokumentation der Kartonverformung während der Lagerung	28
Abbildung 28:	Die Abstände der oben dargestellten Kartonoberkanten über die Zeit, Lagerung bei 19 °C bis 22 °C	29
Abbildung 29:	Umreifungsband und -bügel aus Metall (links) und Kunststoff (rechts)	30
Abbildung 30:	Im Versuch: unterschiedliche Bindung der Kartongebinde	30
Abbildung 31:	Befüllung der von 144 Liter-Kartonagen aus einem TKW.....	31
Abbildung 32:	Endgültige Bindung der STRABOX für die Massenproduktion	31
Abbildung 33:	Reißkante für Gabelstaplerzinken; erfolgreiche Befüllung; 3er Gebinde mit Deckel	32
Abbildung 34:	Die Abstände der oben dargestellten Kartonoberkanten über die Zeit, Lagerung bei 19 °C bis 22 °C	32
Abbildung 35:	Anheben der STRABOX	33
Abbildung 36:	Stapeln der STRABOX	33
Abbildung 37:	Bitumenproben mit und ohne Verpackungsfolie unter UV Bestrahlung	36
Abbildung 38:	Proben mit jeweiligem Oberflächen-Volumen-Verhältnis.....	37
Abbildung 39:	Vergleich der Nadelpenetrationsänderung nach 5 Tagen offener Lagerung mit dem Ausgangswert	40
Abbildung 40:	Vergleich des Erweichungspunktänderung Ring und Kugel nach 5 Tagen offener Lagerung mit dem Ausgangswert	40
Abbildung 41:	Versuchskörper aus der Lagerungssimulation bei 220°C ohne Rührwerk nach 5 Tagen	41
Abbildung 42:	Differenz der Nadelpenetration nach 1 Monat UV-Lagerung von Bitumen 50/70	42
Abbildung 43:	Differenz des Erweichungspunkts nach 1 Monat UV-Lagerung von Bitumen 50/70	42
Abbildung 44:	Ursprünglich granulierter verklebter Trinidad-Naturasphalt	45
Abbildung 45:	Erhitzung; Rauchentwicklung; Schnitt bis zum Versotten; Entfernen des Glühdrahts.....	46
Abbildung 46:	Foto links: Schnittstellen nach Glühdrahtversuch. Heißflüssiges Bitumen ist seitlich herabgeflossen und die Schnittflächen sind verklebt. Rechts: Prinzipskizze	47
Abbildung 47:	Miniatuurversuch: Schneiden mit Glüh-Scheibe	48
Abbildung 48:	Spröde brechendes Bitumen 50/70 links bei -17 °C und rechts bei +4 °C .	48
Abbildung 49:	Ein Bagger entfernt Bitumen aus einem Erdgrubenlager (Archivbild STRABAG SE).....	49
Abbildung 50:	Ausschnitte aus einem Dokumentationsvideo zum Bitumenschneiden mittels Hochdruckwasserstrahl	50
Abbildung 51:	Dämmung für den Eimer, in dem sich die Schmelze beim Aufschmelz- /Abkühlversuch befindet.....	57
Abbildung 52:	Bestandteile der Versuchsanordnung des Verflüssigungsversuchs	57

Abbildung 53:	Gemittelte Temperaturverläufe an den in der Schmelze befindlichen Thermoelementen aus jeweils drei Schmelzversuchen mit Bitumenquadern 70/100 mit unterschiedlichen Oberflächen-Volumen-Verhältnissen ...	58
Abbildung 54:	Mittel aller Temperaturkurven aus Verflüssigungsversuchen mit Thermoelement im kalten Bitumenquaderkern Quaderklasse 1	59
Abbildung 55:	Wärmestromdichte in einem infinitesimalen Inkrement der Temperaturkurve	60
Abbildung 56:	Qualitativer Temperaturverlauf nach Stefan beim Schmelzen von Stoffen; hier angewendet auf Bitumen	62
Abbildung 57:	Qualitative Temperaturverläufe beim Gefrieren und Schmelzen in der festen und flüssigen Phase	65
Abbildung 58:	Beeinflussung der Temperatur eines Elements zum Zeitpunkt $k+1$ am Ort i in der Differenzenmethode mit Berücksichtigung der beiden nächsten Nachbarn eines Knotenpunktes in der eindimensionalen Berechnung	70
Abbildung 59:	Beeinflussung der Temperatur eines Elements zum Zeitpunkt $k+1$ am Ort i in der Differenzenmethode mit Berücksichtigung der beiden nächsten Nachbarn eines Knotenpunktes in der zweidimensionalen Berechnung	71
Abbildung 60:	Teil des Quelltextes der zweidimensionalen Schmelzsimulation	71
Abbildung 61:	Nutzermaske für eine beliebige Bitumenschmelzsimulation im Schmelztopf	72
Abbildung 62:	Berechnung der Zeit ohne graphische Darstellung der Temperaturfelder, ausgelöst durch Befehlsbutton "2D Zeit Berechnung"	73
Abbildung 63:	Graphische Darstellung nach durch den Simulationsumfang determinierten Zeitabschnitten, ausgelöst durch Befehlsbutton "2D Simulation Graphisch"	73
Abbildung 64:	Veranschaulichung des großen Einflusses der kleinsten Bitumenseitenlänge im unvalidierten Modell	74
Abbildung 65:	Schleifenprogrammierung der dreidimensionalen Simulation	76
Abbildung 66:	Die Oberfläche, die in der Simulation dargestellt wird, hat eine vom Nutzer in der Nutzermaske (unterstes Feld der Temperatureinstellungen) bestimmte Temperatur	77
Abbildung 67:	Die Methode/Funktion „getWS“ setzt die Ausdehnung der Schmelze in die jeweilige Richtung des Tridiagonalsystems fest	78
Abbildung 68:	Temperaturverlauf links aus Simulation und rechts in der Realität	79
Abbildung 69:	Berechnete und gemessene Temperaturverläufe in Bitumen 70/100; Bitumentemperatur 19,8 °C; Schmelze 171 °C; Quadermaße des kalten Bitumens: 9,5*14*12 cm	79
Abbildung 70:	Gerundete Polynome fünften Grades beschreiben die Kurvenverläufe näherungsweise (vgl. oben)	80
Abbildung 71:	Verlauf des Korrekturpolynoms fünften Grades für die Versuche mit kalten Bitumenwürfeln mit 9,5*12*29,5 cm	81

Abbildung 72:	Aus dem Ergebnis mehrerer Berechnungen (hier für Bitumenwürfel) lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Verflüssigungsdauer [min] und der Körpergeometrie generieren; Bitumen 70/100; Ausganstemperatur 20,5 °C; Abbruch bei 70 °C; Temperatur der Schmelze 160 °C	82
Abbildung 73:	Temperaturverlauf bei Abkühlung eines dünnwandigen Behälters.....	84
Abbildung 74:	Darstellung der freien Oberfläche eines Schmelztopfs.....	87
Abbildung 75:	Systembetrachtung der Verflüssigungsanlage, wobei die der Schmelze zugeführte Energie entweder (größtenteils) dem kalten Bitumen im Zuge der Verflüssigung zugeführt wird oder (zu einem geringen Teil) über die Oberflächen dem System verloren geht	88
Abbildung 76:	Das magnetische Feld erzeugt das elektrische Feld \vec{C} in der durchströmten Fläche S [Co73]	94
Abbildung 77:	Silikon- und Benzin-Molekül.....	95
Abbildung 78:	H ₂ O-Molekül mit dargestelltem Dipolcharakter	95
Abbildung 79:	Bitumen als mikrowellenabsorbierendes Material (allgemeine Darstellung gemäß [Bu04])	96
Abbildung 80:	Der Zusammenhang des Verlustwerts δ eines Materials zur komplexen und relativen Permittivität lässt sich mittels eines Zeigerdiagramms verdeutlichen [Bu04]	97
Abbildung 81:	Vorversuch zur Mikrowellenverflüssigung mit (links) einer Prinzipskizze des Versuchsaufbaus von oben und (rechts) einem Foto des Versuchsaufbaus	101
Abbildung 82:	Das bereits verflüssigte Bitumen dringt aus dem Körperinneren des kalten Bitumens an die Oberfläche	102
Abbildung 83:	Temperaturentwicklung im Bitumen und am Karton aus obigen Datenreihen über die Zeit mit einer Trendlinie für die Durchschnittstemperatur am Baustoff; Bitumen 70/100; Ausganstemperatur 20,5 °C	103
Abbildung 84:	Um die Durchschnittstemperaturzunahme bereinigte Temperaturkurven zur Abgrenzung des Bereichs, in dem die interne Konvektion die Verflüssigung im statischen Mikrowellenofen beschleunigt (vgl. oben)	104
Abbildung 85:	Abhängigkeit der Homogenität des Mikrowellenfelds von der Anzahl der eingeschalteten Magnetrons [Bu04]	106
Abbildung 86:	Darstellung des Orts der Pressholzplattenerwärmung	108
Abbildung 87:	Qualitative Darstellung der Erwärmung einer Pressholzplatte mittels Mikrowellen auf Bildern einer Infrarotkamera	109
Abbildung 88:	Aluminiumoxidröhrchen der Längen 40, 30 und 20 Zentimeter	109
Abbildung 89:	Anordnung der Aluminiumoxidröhrchen in Längsrichtung, Abstand jeweils 20 cm.....	110
Abbildung 90:	Erste Versuchsanordnung in der Vorderansicht (Blick durch die Ofentür; Maße in cm)	111

Abbildung 91:	Definitionen von Messflächen, die mit den Begriffen Messebene (3 Temperaturfühler), Messleiste (2 Temperaturfühler) und Längskoordinate (4 Temperaturfühler) zusammengefasst werden	112
Abbildung 92:	Positionierung der Thermoelemente während der Erwärmung von 110 Liter Bitumen mit einer Frequenz von 2,45 GHz im Kammerofen und einer Magnetronleitung von 6 kW (Versuchsanordnung 1).....	113
Abbildung 93:	Temperaturverläufe im Bitumen und der Kartonage während der Erwärmung von 110 Liter Bitumen mit einer Frequenz von 2,45 GHz im Kammerofen und einer Magnetronleistung von 6 kW	114
Abbildung 94:	Maximale Temperaturdifferenzen innerhalb des Bitumenprobekörpers während des Versuchs. Die größte Temperaturdifferenz im Probekörper beträgt hierbei 23,8 °C	115
Abbildung 95:	Mittlere Temperaturverläufe in weiteren Messflächen des Kammerofenversuchs mit 6 kW unter 2,45 GHz (MW3).....	115
Abbildung 96:	Um die Pausen bei der Bestrahlung mit Mikrowellen bereinigte Mittelwerte aller Temperaturverläufe in den drei durchgeführten Versuchen....	116
Abbildung 97:	Vorderansicht Versuchsaufbau 2; 5 kW 915 MHz	117
Abbildung 98:	Temperaturgraphen der 25 Messpunkte im Großversuch MW6 mittels Versuchsanordnung 2 (915 MHz, 5 kW).....	118
Abbildung 99:	Temperaturentwicklung in den drei Messebenen; je größer die Röhrenlängen, desto tiefer die Messebene (915 MHz, 5 kW)	119
Abbildung 100:	Wertevergleich weiterer Messflächen (915 MHz, 5 kW)	119
Abbildung 101:	Maximale Temperaturdifferenz im Bitumenprobekörper bei einer Mikrowellenbestrahlung mit einer Leistung von 5 kW und bei einer Frequenz von 915 Hz (Maximum: 39,0 °C).....	120
Abbildung 102:	Alle Temperaturverläufe von zwei charakteristischen Mikrowellenversuchen der Versuchsanordnungen 1 (rechts) und 2 (links) wobei die roten Pfeile Tendenzen der Homogenität verdeutlichen sollen.....	121
Abbildung 103:	Mittlerer, um die Pausen bereinigter Temperaturverlauf bei der Mikrowellenbestrahlung in Versuchsanordnung 2 (915 MHz, 5 kW); mittlere Steigung: 0,39 K /min.....	121
Abbildung 104:	Eingang des Durchlaufofens der Versuchsanordnung 3 (Maße des Kartons: 40 cm × 20 cm × 20 cm).....	122
Abbildung 105:	Darstellung der Wirkungsgrade bei der Erwärmung von unterschiedlichen Massen von Bitumen mittels Mikrowellenstrahlen verschiedener Leistung und Frequenz	125
Abbildung 106:	Darstellung der Zuordnung der Ränder in der Modellierung eines Mikrowellenofens für Bitumenerwärmung gemäß Versuchsanordnung 2	129
Abbildung 107:	Netz der Mikrowellensimulation mit verringerter Mindestmaschenweite im Baustoff	130
Abbildung 108:	Mögliche Antennenanordnungen im symmetrischen Modell	138

Abbildung 109: Ausgangsvariante 0; identisch zu Versuchsanordnung 1; 2 Antennen oben und 2 Antennen unten angeordnet	139
Abbildung 110: Ausgangsvariante 0; identisch zu Versuchsanordnung 1: mittlere Absorption 387,3 J/s; maximale Absorption 29.380 W/m ³	139
Abbildung 111: Variante 1; 1 Antenne oben exzentrisch	140
Abbildung 112: Variante 1; mittlere Absorption 66,9 J/s; maximale Absorption 8.129 W/m ³	140
Abbildung 113: Variante 2; 1 Antenne nah über und 1 Antenne nah unter dem Probekörper	141
Abbildung 114: Variante 2; mittlere Absorption 385,9 J/s; maximale Absorption 34.120 W/m ³	141
Abbildung 115: Variante 3; 2 Antennen nah über und 2 Antennen nah unter dem Probekörper	142
Abbildung 116: Variante 3; mittlere Absorption 300,4 J/s; maximale Absorption 28.740 W/m ³	142
Abbildung 117: Variante 4; 4 Antennen neben dem Probekörper	143
Abbildung 118: Variante 4; mittlere Absorption 309,3 J/s; maximale Absorption 4.478 W/m ³	143
Abbildung 119: Variante 5; 8 Antennen, rund um den Probekörper angeordnet	144
Abbildung 120: Variante 5; mittlere Absorption 192,1 J/s; maximale Absorption 24.900 W/m ³	144
Abbildung 121: Vergleich von Homogenität und mittlerer Absorption in verschiedenen Modellvariationen des Modells der Versuchsanordnung 1	145
Abbildung 122: Mögliche Hohlleiteranordnungen in den Modellvarianten, die aus dem validierten Modell der Versuchsanordnung 2 entstehen und zentrisch liegendes Wärmgut Bitumen (rot)	146
Abbildung 123: Ausgangsvariante 0; identisch zu Versuchsanordnung 1; 1 Hohlleiter zentral über dem Wärmgut angeordnet	147
Abbildung 124: Ausgangsvariante 0; identisch zu Versuchsanordnung 1; mittlere Absorption 236,6 J/s; maximale Absorption 45.900 W/m ³	147
Abbildung 125: Variante 1; 5 Hohlleiter neben dem Wärmgut angeordnet.....	148
Abbildung 126: Variante 1; mittlere Absorption 140,0 J/s; maximale Absorption 29.340 W/m ³	148
Abbildung 127: Variante 2; 4 Hohlleiter vierseitig (Symmetrie) um das Wärmgut zentral angeordnet	149
Abbildung 128: Variante 2; mittlere Absorption 67,0 J/s; maximale Absorption 20.690 W/m ³	149
Abbildung 129: Variante 3; 22 Hohlleiter vierseitig (Symmetrie) um das Wärmgut angeordnet.....	150
Abbildung 130: Variante 3; mittlere Absorption 117 J/s; maximale Absorption 10.070 W/m ³	150

Abbildung 131: Variante 4; 2 Hohlleiter an den kleinen Seiten des Probekörpers	151
Abbildung 132: Variante 4; mittlere Absorption 681 J/s; maximale Absorption 264.500 W/m ³	151
Abbildung 133: Vergleich von Homogenität und mittlerer Absorption in verschiedenen Modellvariationen des Modells der Versuchsanordnung 1	152
Abbildung 134: Mittlere Nadelpenetration eines Bitumens nach mehrmaliger Ofen- und Mikrowellenverflüssigung	154
Abbildung 135: Mittlere Erweichungspunkte eines Bitumens mit einem (Anfangs-) Erweichungspunkt (RuK) von 51,4 nach mehrmaliger Ofen- und Mikrowellenverflüssigung	154
Abbildung 136: Maximale Heizleistung und Tankinhalt, ermittelt aus Produzentendaten .	158
Abbildung 137: Bitumenpreise im Monatsmittel, berechnet nach Bitumenpreisindex des statistischen Bundesamtes und eigenen Daten	160
Abbildung 138: Qualitative Übersicht über die Eigenschaften der Gebindevarianten	163
Abbildung 139: Qualitative Übersicht über die Eigenschaften der Gebindevarianten	163

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Ergebnis des Ablösens von Bitumen aus Metallbehältern mit unterschiedlicher Innenbeschichtung.....	17
Tabelle 3-2:	Folien aus Verflüssigungsversuchen nach Löseverhalten aus den Versuchen 2 und 3 bei 160 °C geordnet.....	20
Tabelle 3-3::	Probeneigenschaften vor der Lagersimulation	38
Tabelle 3-4:	Darstellung der Messergebnisse und der Versuchsreihen zur Qualitätsänderung des Bitumens	39
Tabelle 3-5:	Vergleichende Bewertung verschiedener Bitumenverpackungen auf einer Werteskala von 1 bis 10.....	44
Tabelle 4-1:	Aufwendungen beim Hochdruckwasserstahlschneiden bei 10.000 t Jahresproduktion	51
Tabelle 5-1:	Überblick über Mechanismen der Wärmeübertragung	54
Tabelle 5-2:	Bitumenkaltquadereigenschaften für die Schmelzversuche	57
Tabelle 5-3:	Versuchsanordnungen der Aufschmelzversuche	58
Tabelle 5-4:	Ergebnisse nach Stefan; Schmelzzeit (Erwärmung des Kerns auf 70 °C) t in Stunden in Abhängigkeit vom Quaderdurchmesser d des kalten Bitumens in Zentimeter	67
Tabelle 5-5:	Ergebnisse nach Neumann; Schmelzzeit (Erwärmung des Kerns auf 70 °C) t in Stunden in Abhängigkeit vom Quaderdurchmesser d des kalten Bitumens in Zentimeter.....	67
Tabelle 5-6	Dokumentation der Simulationen mit (oben) zweidimensionalen quadratischen kalten Bitumenkörpern und (unten) dreidimensionalen würfelförmigen kalten Bitumenkörpern, wobei Abweichungen der Verflüssigungsdauern durch unterschiedliche Erfüllung des Abbruchkriteriums verursacht werden	77
Tabelle 6-1:	Temperaturentwicklung des Bitumens gemessen mittels Infrarotthermometer	101
Tabelle 6-2:	Ermittlung der Wirkungsgrade aller Versuchsdurchgänge ohne Berücksichtigung der Wärmeenergieverluste durch die Verpackung und die Abkühlpausen	124
Tabelle 6-3:	Materialeigenschaften des Bitumens in der Simulation	131
Tabelle 6-4:	Qualitative Darstellung einiger Berechnungsergebnisse bei Variation der komplexen relativen Permittivität im Modell der Versuchsanordnung 1	132
Tabelle 6-5:	Qualitative Darstellung einiger Berechnungsergebnisse bei Variation der komplexen relativen Permittivität im Modell der Versuchsanordnung 2	134

Tabelle 6-6:	Temperaturverteilung in den Schnittflächen (Messebenen nach Abbildung 16) in Versuchsanordnung 1 mit 2,45 GHz und 6 KW Magnetronleistung	135
Tabelle 6-7:	Temperaturverteilung in den Schnittflächen (Messebenen nach Abbildung 90) in Versuchsanordnung 2 mit 915 MHz und 5 KW Magnetronleistung	136
Tabelle 7-1:	Kosten für Schutzkleidung	159
Tabelle 7-2:	Überblick über alle Einsparpotentiale	162

IV Glossar

Ankoppeln	das Verhalten einiger Werkstoffe elektromagnetische Schwingungen im Zuge ihrer Absorption in Wärmeenergie umzuwandeln
Absorptionskennzahlen	Maße für den Wärmeenergieeintrag in das Bitumen im Mikrowellenofen wie Maximale und mittlere Absorption
mittlere Absorption	numerisches Volumenintegral der Erwärmung über das Wärmgut in einem Simulationsmodell
maximale Absorption	maximale Erwärmung in einem Inkrement eines Simulationsmodells
Bitumenverflüssigungsanlage	Anlage zur Verflüssigung von -bei Raumtemperatur gelagert und transportiertem- kaltem Bitumen, inklusive eventueller Vorzerkleinerung, Umwälzpumpen, Rührwerken und Abpumphydraulik
freie Oberfläche	oberste Oberfläche der Schmelze in allen Schmelzvarianten Konvektionsströmen der Luft ausgesetzt
Gebinde	Bitumenverpackung mit Bitumeninhalt. Hierzu werden hier auch Fässer und Kartonagen gezählt
Inliner	Kunststoffolie die dem Zweck dient ein Verkleben des Bindemittels Bitumen mit tragenden Teilen des Verpackungsgebindes zu verhindern. Sie ist im kalten Zustand nicht mehr vom Baustoff trennbar
kalorimetrische Bestimmung	Berechnung von thermophysikalischen Größen mit Hilfe der spezifischen Wärmespeicherkapazität eines Stoffes
kaltes Bitumen	Bitumen mit einer Temperatur größer oder gleich 20 °C
Konduktion	Der Wärmeenergietransport vollzieht sich durch Wechselwirkung zwischen Teilchen (Atomen oder Molekülen), wobei aber kein Stofftransport auftritt.
konventionelle Verflüssigung	Wiederverflüssigung (s.u.) von Bitumen durch den ausschließlichen Wärmeeintrag mittels Konduktion und Konvektion. Alle Verfahren zur Bitumenerwärmung die derzeit in der Asphaltproduktion eingesetzt werden
konventionelle Logistikkette	Heißbitumenhandling; die häufigste Form des Transportierens und Lagerns des Bindemittels im Straßenbau in heißflüssiger Form

Konvektion	Mitführen von Wärme durch Stofftransport; Die Konvektion beschreibt den Transport von Wärmeenergie, die an die Strömung eines Mediums gebunden ist.
Logistikkette	alle Verfahrens- und Transportschritte des Bitumenhandlings beginnend hinter der Erdölraffinerie und endend bei der Zugabe zu Heißlagerbehältern der Asphaltmischanlage
Messflächen	Zusammenfassung von MPVs (s.u.) einer Raumebene. Messebenen, Messleisten und Längskordinaten sind Messflächen
Messpunktvorrichtung (MPV)	Aluminiumoxidröhrchen in dessen geschlossener Spitze ein faseroptisches Thermoelement in Wärmeleitpaste eingebettet ist
Qualitätseinbuße	Eigenschaftsveränderung (dQ) des Baustoffs Bitumen in einem Logistikabschnitt
Schmelze	flüssiges Bitumen. Bitumen mit einer Temperatur von mindestens 70 °C
Schmelzfront	Sie trennt feste und flüssige Phase eines Stoffes (Phasengrenze), wobei sie in eine Raumrichtung voranschreiten.
Schmelztopf	Behälter für die Schmelze in der Verflüssigungsanlage und in Versuchen
Silikonkarton	mit Silikon beschichtete Kartonage. Herkömmliche Wellpappe, die auf der dem Bindemittel Bitumen zugewandten Seite mit Poly(organo)siloxanen beschichtet ist
TKW	Tanklastkraftwagen. Kraftfahrzeug zum Transport von Bitumen in heißflüssiger Form
Wärmeleitpaste (WLP)	Paste auf Silikonbasis mit hoher Wärmeleitfähigkeit λ . hier OMEGATHERM 201 $\lambda=111 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Wiederverflüssigung	alle zur Erhöhung der mittleren Bitumentemperatur von Lager- auf Pumpbarkeitstemperatur benötigten Arbeitsschritte
Verflüssigungsleistung	Durchsatzleistung einer Verflüssigungsanlage; Verflüssigte Bitumenmenge pro Zeit.

1 Einleitung

Bitumen ist einer der ältesten Baustoffe der Menschheit. Bereits 3.000 v. Chr. wurde es zur Abdichtung von Wasserspeichern und als Kleber für Mosaik genutzt. In diesen Anwendungen werden bereits seine wichtigsten Eigenschaften deutlich: Das größtenteils aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel, Sauerstoff und Stickstoff bestehende Bitumen wirkt hydrophob und eignet sich als Bindemittel. So kommt es auch heutzutage zu über 80 % als Abdichtung im Hochbau und als Bindemittel im Asphalt im Straßenbau zum Einsatz. Die Gewinnungsmethoden und die Art und Weise der Verarbeitung von Bitumen haben jedoch einen Wandel erfahren. Während bis ins letzte Jahrhundert hinein überwiegend Naturasphalt aus Asphaltseen zur Anwendung kam, entstehen die rund 102 Millionen Tonnen des jährlichen Weltbitumenbedarfs heute bei der fraktionierten Destillation in Erdö Raffinerien [Eu11]. Der Werkstoff, der dann heiß aus der Produktionsanlage kommt, wird anschließend in Europa größtenteils bis zur Weiterverarbeitung heiß gelagert und transportiert. Hauptursache für dieses energetisch sehr aufwendige Vorgehen ist die starke Temperaturabhängigkeit der Viskosität und damit der Pumpbarkeit des natürlichen Thermoplasts.

Die Handhabung dieses im kalten Zustand hinsichtlich Gesundheitsgefährdung und Umweltschädigung unbedenklichen Naturprodukts birgt jedoch auch Unfallrisiken. Dies hat wiederum Unfallverhütungsvorschriften und deren aufwendige Umsetzung zur Folge. Heißtransport und Heißlagerung können über lange Strecken nur in speziell dafür vorgesehenen Behältern erfolgen. Zwar ist man bei großen Straßenbauvorhaben in Ländern mit infrastrukturellen Problemen dazu übergegangen, Bitumen in den verschiedensten Formen für den Transport erkalten zu lassen und in den Asphaltmischanlagen vor Ort wieder zu verflüssigen, doch herrscht hier keinerlei Klarheit über die technisch am leichtesten zu realisierende Methode, deren Varianten teilweise noch weiterentwickelt werden. Mehrere international agierende Verpackungsunternehmen konkurrieren hier zumeist entweder mit konventionellen Transportbehältern aus Metall oder mit modernen Kunststoffverpackungen auf dem Logistikmarkt. Ihr Ziel ist das Beliefern der genannten Großbaustellen. In Anbetracht der derzeitigen Verhältnisse in den mitteleuropäischen Ländern erscheint es jedoch durchaus überlegenswert, ob die Verwendung von kaltem Bitumen – zumindest als eine weitere Möglichkeit des Einsatzes – nicht auch in anderen Ländern sinnvoll sein kann. Insbesondere eine energetische Betrachtung mag dafür sprechen, dass auch auf einem mitteleuropäischen Binnenmarkt das energieeffiziente Kaltlagern mit einer anschließenden Wiederverflüssigung einige Vorteile mit sich bringen könnte.

Zunächst sind hier Kosteneinsparungen zu nennen, die beim Transport und der Lagerung ohne Energiezufuhr erzielt werden können, zumal nicht nur in den Asphaltmischanlagen, sondern auch in zentralen Tanklagern insgesamt tausende Tonnen des Bindemittels heißflüssig vorgehalten werden. Durch diese Form der Lagerung soll eine gewisse Planungs-, Versorgungs- und damit Kalkulationssicherheit gewährleistet werden, und es werden hierfür

1. Einleitung

sogar die von den externen Tanklagerbetreibern geforderten Mindestumschlagsmengen in Kauf genommen. Dabei könnte Bitumenkaltlagerung eine günstigere und auch langfristige Planungssicherheit gewährleisten, insofern es geschickt mit den konventionellen Verfahren kombiniert würde. Sogar neue Formen von intersaisonalen und langfristigen Rohstoffspekulation könnten erschaffen werden.

Das Ausnutzen all dieser genannten Vorteile würde insbesondere dann erleichtert, wenn es gelänge, den Baustoff schnell und effizient wieder zu verflüssigen. Neben der Verpackung und Lagerung stellt also insbesondere der in der Praxis oft auch als „Schmelzen“ bezeichnete Verfahrensschritt ein interessantes Feld für Untersuchungen dar. Von Auslandsbaustellen ist bekannt, dass die Wiederverflüssigung großer Mengen durch Hitzezufuhr von außen bei größeren Transporteinheiten oft Tage in Anspruch nehmen kann. Unabhängig von der Form einer Stoffmenge und der Art der Energiezufuhr wird theoretisch stets dieselbe Energiemenge benötigt, um den Stoff um eine Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ zu erwärmen. Dies gilt auch, wenn in dem Stoff eine Phasenumwandlung stattfindet. Bitumen aber weist hinsichtlich seiner physikalischen Eigenschaften und seines thermischen Verhaltens Charakteristika auf, die das Durchführen und Verständnis seines Erwärmungsprozesses durchaus zu einer Herausforderung machen.

Eine Möglichkeit, die mit dem bisher fast ausschließlich genutzten Verfahren des Wärmeintrags in das Bitumen mittels Konvektion und Konduktion verbundenen Nachteile zu mindern, mag in der Wiederverflüssigung durch eine „Erwärmung von innen“ durch Mikrowellentechnik bestehen. Gerade die damit erzielbare Zeitersparnis in diesem letzten Verfahrensschritt der Prozesskette der Bitumenkaltlogistik könnte den Ausschlag dafür geben, das gesamte Verfahren auch auf den Märkten technologisch hochentwickelter Länder mit der Zielsetzung eines ökonomischen Nutzens durch die Minderung der Preisabhängigkeit und die Steigerung der Rohstoffverfügbarkeit zum Einsatz zu bringen. Wichtige und entsprechend zu berücksichtigende Aspekte sind dabei die Beibehaltung der qualitativen Eigenschaften des Bitumens sowie aller durch die Einführung neuer technischer Anlagen verursachten Kosten in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Gesamtprozesses. In jedem Fall können die in diesem Kontext erarbeiteten Erkenntnisse auch von Nutzen für die bereits langjährig praktizierte Bitumenkalthandhabung in den Schwellenländern sein.

2 Überblick über das Projekt Strabasa

Das Projekt, in dessen Zusammenhang diese Arbeit entsteht, wurde von einem international agierenden Großunternehmen der Bauwirtschaft angestoßen, um zu eruieren, inwiefern eine sichere Versorgung mit dem Asphaltbindemittel in kalter Form unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten möglich ist. In der Bitumenkalthandhabung wird der größte Technologie- und damit Innovationsbedarf an den Schnittstellen zur konventionellen heißflüssigen Handhabung von Bitumen deutlich. So muss der Baustoff, wenn er heißflüssig aus der Raffinerieproduktion kommt, verpackt und abgekühlt werden. Die kalte Handhabung auf Paletten oder in Containern stellt dann – wie auch die Versorgungspraxis von Auslandsbaustellen zeigt – kein akutes Problem dar. Erst bei der Wiederverflüssigung für die Asphaltproduktion bedarf es spezieller Verflüssigungs-Systeme. Zur Untersuchung dieser Schnittstellenproblematik sollen zunächst unterschiedliche Gebindevarianten vorab als Repräsentanten des restlichen Verpackungsspektrums unter technischen Gesichtspunkten und verschiedene Aufschmelzverfahren dargestellt und verglichen werden. Auf dieser Recherche aufbauend soll sich der Untersuchungsschwerpunkt der Arbeit insbesondere aus der allgemeinen Durchführbarkeit, der Maximierung der Prozessleistung auf Grundlage von Simulations- und Laborergebnissen, Qualitätsuntersuchungen und Wirtschaftlichkeitsüberlegungen zusammensetzen. Damit sind insbesondere die folgenden Forschungsschwerpunkte zu setzen und somit Gegenstand der Bearbeitung des Gesamtkomplexes der Bitumenkaltlogistik.

2.1 Bitumenverpackung

Wie anfangs erwähnt, kommt der Baustoff Bitumen aufgrund seiner besonderen Eigenschaften in den verschiedensten Bereichen der Technik zur Anwendung. Zugleich machen einige dieser Eigenschaften die Prozesse der Bitumenlagerung und des Bitumentransports zu einer technischen Herausforderung. So haftet das Bindemittel an seinen Verpackungen derart stark, dass es teilweise nicht mehr von dieser zu trennen ist. Hinzu kommt dass das Bindemittel bei zu niedrigen Temperaturen nicht mehr pumpbar ist. Auch deshalb ist in Europa heutzutage der Heißtransport üblich. In Ländern des ehemaligen Ostblocks hingegen war schon aufgrund infrastruktureller Probleme eine Kaltlagerung mit anschließendem Aufschmelzen gängig. Auch die großen Transportwege bei internationalen Bauprojekten und gestiegene Energiekosten lassen es jetzt wieder sinnvoll erscheinen, die Möglichkeiten der Kaltlagerung in Verpackungsart, Form und Größe hinsichtlich Eignung und Qualitätsstandards generell zu vergleichen und zu bewerten, um diesen Prozess der Bitumenbereitstellung möglicherweise auch für Straßenbauprojekte in Westeuropa einzusetzen.

2. Überblick über das Projekt Strabasa

2.1.1 Gebindearten

Bei der Lagerung von Bitumen wird in Deutschland wie in den meisten Industriestaaten fast ausschließlich auf die Heißlagerung in Tanks (Abbildung 1) zurückgegriffen.



Abbildung 1: Lagerung von Bitumen in Tanks

Nur in Ausnahmefällen wird Bitumen zur Bevorratung und in verhältnismäßig kleinen Mengen kalt gelagert. Dabei kommen zumeist Metallbehälter in Form von Eimern, Fässern oder Containern (Abbildung 2) zum Einsatz.



Abbildung 2: Entnahme von Bitumen aus Eimer (links, Dortmunder Gussasphalt GmbH & Co. KG) und Bitumenfässer (rechts, BENNINGHOVEN GmbH & Co. KG)

Seltener wird Bitumen zur Kaltlagerung in Kunststoffgebilde (Abbildung 3) oder in Kartonaugen mit und ohne Trennbeschichtung (Abbildung 4) eingebracht. Als Trennmittel bei den eingesetzten Kunststoffgebilden fungieren mindestens eine Kunststofflage und maximal eine weitere aus Polypropylen oder Polyethylen auf der Außenseite des als Tasche ausgebildeten Gebindes.

2. Überblick über das Projekt Strabasa



Abbildung 3: PE/PP Gebinde (links) und Trinidad Naturasphalt in PE Folie (rechts)

Das Trennmittel bei Kartongebinden ist eine dünne Silikonschicht auf der Innenseite. Bei den kleinen Füllmengen der Kartons, die derzeit zumeist für den Hochbau oder für Abdichtungsmassen üblich sind, reicht die Kartonsteifigkeit aus, um ein Verformen der Gebinde aufgrund des hydrostatischen Drucks des thermoplastischen Inhalts weitestgehend zu verhindern.



Abbildung 4: Silikonisierte Verpackungsvarianten aus Karton für Bitumen im Hochbau (Börner GmbH und Co. KG)

Der Vollständigkeit halber sollen hier auch Sonderverpackungsformen erwähnt werden. So gibt es auch noch weitere Systeme wie beispielsweise den Clovertainer (siehe Abbildung 5). Für alle Gebindeformen gilt, sie haben durch ihre äußere Gestalt, ihr Gewicht und ihre Stabilität Einfluss auf den Platzbedarf, den Transport- und den Verarbeitungsprozess, weshalb sie weitergehenden Untersuchungen unterzogen werden müssen. Die jeweiligen Schwerpunkte bei der Weiterentwicklung der Gebinde werden dabei aufgrund ihrer jeweiligen derzeitigen technischen Defizite ausgewählt.

2. Überblick über das Projekt Strabasa

Alle Verpackungsvarianten der Bitumenkaltlagerung kommen jeweils im gesamten Prozess von Abfüllung bis zur Wiederverflüssigung des Baustoffs zur Anwendung. Das heißt das Bindemittel wird in der Bitumenkaltlogistik nicht umgefüllt.



Abbildung 5: Clovercontainer-System (Greif NZ Ltd)

2.1.2 Formgebung

Die endgültige Form der Bitumeneinheiten, deren Charakteristika ihr Oberflächen-Volumen-Verhältnis und das Volumen selbst sind, wird neben ökonomischen Gesichtspunkten durch die Gebindewahl (Abschnitt 3) und die Simulationsergebnisse zum Erwärmungsprozess (Abschnitt 5 und Abschnitt 6) determiniert. Eine Entscheidung hinsichtlich dieser Größen erfolgt also erst am Ende dieser Untersuchungen. Stets ist hier eine Anpassung an gängige Formate wie die Europoolpalette (DIN EN 13698 Teil 1) oder das 200-Liter-Fass unvermeidbar. Die Ergebnisse der Untersuchung hinsichtlich geometrisch bedingter Eigenschaften sind Grundlage einer wirtschaftlichen Untersuchung. Eine Kostengegenüberstellung soll der Differenzierung der technisch möglichen Verfahren dienen und kann Grundlage einer weitergehenden Untersuchung hinsichtlich Logistik-, Versorgungs- und Standortplanung in wirtschaftswirtschaftlich orientierten Forschungsarbeiten sein. Die Untersuchungen zu diesem Themenfeld werden im Abschnitt 7 behandelt.

2.2 Qualitätssicherung

Bitumenlagerung und Bitumenverflüssigung verursachen Eigenschaftsveränderungen im Bitumen. Hierzu wurden schon zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, aus denen man weiß, dass oxidative, destillative und energetische Alterungen auftreten können [AmDaBe-Ja05]. Die Feststellung, inwieweit die Verflüssigungsmethode und die Lagerungsform diese Veränderungsmechanismen der Materialeigenschaften verursachen, soll ebenso vorgenommen werden. In Abschnitt 4 wird detailliert auf die Auswirkungen der Bitumenlagerung auf die qualitativen Merkmale eingegangen.

2.3 Untersuchungen zur Bitumenverflüssigung

Die Bitumenverflüssigung ist der Vorgang, bei dem das thermoplastische Material erwärmt wird. Hier soll zunächst auf die dabei auftretenden Probleme eingegangen werden (Abschnitt 2.3.1). Anschließend soll die geplante Vorgehensweise zur technischen Lösung dieser Probleme aufgezeigt werden (Abschnitt 2.3.2) und Abschließend das methodische Vorgehen kurz dargelegt werden (Abschnitt 2.3.3).

2.3.1 Problemstellung

Bitumen hat sowohl im flüssigen als auch im festen Zustand eine geringe Wärmeleitfähigkeit von ca. $0,16 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, d.h. eine einmal aufgenommene Wärmeenergie wird vom Bitumen nur sehr langsam wieder abgegeben. Diese Eigenschaft verzögert aber auch ein schnelles Erwärmen von außen, zumal bei einer hohen Wärmezufuhr (höher als die Wärmemenge, die in den Stoff hineinströmen kann) die Gefahr einer über die klassischen Alterungsformen hinausgehenden Beeinträchtigung der Bitumenqualität besteht. Um ein besseres Verständnis des Erwärmungsverhaltens zu erlangen und die Möglichkeiten einer Beschleunigung der Erwärmung beispielsweise durch die veränderte Geometrie des kalten Bitumenkörpers zu ermitteln, bietet es sich an, die sich vollziehenden Prozesse durch eine mathematische und numerische Simulation zu beschreiben. Dabei besteht jedoch die Schwierigkeit, dass Bitumen ein Thermoplast ist, d.h. dass keine definierte Phasengrenze zwischen fester und flüssiger Phase existiert. In der vorliegenden Arbeit soll also erstmals versucht werden, die Auswirkungen dieser Besonderheiten zu erfassen, zu einer physikalischen Beschreibung des Aufschmelzverhaltens des Bitumens zu gelangen und Vorschläge für effiziente Verflüssigungsmethoden und -mechanismen zu unterbreiten.

2.3.2 Vorgehensweise

Im Wesentlichen gibt es zwei, aus thermophysikalischer Sicht unterschiedliche Verfahrensweisen bei der Wiederverflüssigung. Die Erste die größtenteils auf Konduktionsprozessen beruht, lässt sich als konventionell bezeichnen, da sie sich in der Logistikkunde der Bitumenkalthandhabung als gängige Baupraxis etabliert hat. Die zweite Variante stützt sich auf die Tatsache, dass die angewandte Hochfrequenztechnik in den letzten Jahren bedeutende Entwicklungssprünge gemacht hat, die in diesem Kontext nicht unbeachtet gelassen werden dürfen. Folglich sind die beiden sich anbietenden Verflüssigungsvarianten:

2. Überblick über das Projekt Strabasa

Variante 1: Vorhalten einer Bitumenschmelze/ Schmelzen im Schmelztopf: In einem Behälter oder einer Wanne definierter Größe (Schmelztopf) befindet sich eine Menge an flüssigem Bitumen bei konstanter oder nur leicht regelbarer Energiezufuhr. Die Bitumeneinheiten definierter Größe werden in bestimmten Zeitabständen dieser Schmelze hinzugegeben.

Variante 2: Im Rahmen des Projekts soll die Möglichkeit der Bitumenverflüssigung mittels Hochfrequenztechnik unter den oben genannten Gesichtspunkten der Durchführbarkeit, Maximierung der Durchsatzleistung und Quantifizierung der Qualitätseinbußen untersucht werden.

Auf der Grundlage von mehreren Versuchsreihen zu den beiden Varianten der Verflüssigung sollen Finite-Elemente-Modelle zur Simulation der Wärmeentwicklung und des Schmelzprozesses des kalten Bitumenkörpers erstellt werden. Für die Simulation der konventionellen Verflüssigung wird dazu aufgrund der allgemeinen Verfügbarkeit die Microsoft-Office-Software Visual Basic for Applications (VBA) verwendet. Für die Simulation der Mikrowellenverflüssigung wird dann die Verfeinerung des Modells mit Hilfe der Multiphysics - Software COMSOL vollzogen. Ziel der angepassten Computermodelle ist es,

- ein Tool zu entwickeln, mit dem die Optimierung des Wärmeeintrags und der erwirkten Wärmeverteilung im Bitumen leicht und optisch erfassbar angegangen werden kann;
- eine nutzerfreundliche Bedienoberfläche zur Verfügung zu stellen, mit der es ermöglicht wird, Berechnungen gemäß abweichender Anforderungen durchzuführen;
- über die Wahl der optimalen Verflüssigungsvariante auf der Grundlage der Simulationsanalysen auch ihre wirtschaftliche Bewertbarkeit zu ermöglichen oder zumindest zu erleichtern.

Auf alle Aspekte der Bitumenverflüssigung wird in Abschnitt 5 und Abschnitt 6 eingegangen.

2.3.3 Validierung der Berechnungen

Um aussagekräftige Simulationsmodelle technischer Verfahrensschritte offerieren zu können, werden die vorhergehenden Berechnungen mittels der Messergebnisse der Versuchsreihen validiert. Je nach Anlagenbauart liegen sehr unterschiedliche Berechnungsmodelle und Versuchskonfigurationen zugrunde. Trotzdem dienen die so kalibrierten EDV-gestützten Berechnungswerkzeuge einer leichten Variation von Randbedingungen wie Temperatur, Bitumen- und Anlagengeometrie. Schließlich ist das Bestimmen der Verfahrensstake, welche wiederum die Grundlage für eine wirtschaftliche Untersuchung sind, unter anderem durch diese Werkzeuge möglich. Auf die Erzeugung praxisnaher numerischer Be-

2. Überblick über das Projekt Strabasa

rechnungsmodelle durch die Integration von Versuchsergebnissen wird in den jeweiligen Abschnitten der Verflüssigungsmethoden eingegangen.

2.4 Anlagenbewertung aus betriebswirtschaftlicher Sicht

Um auch unter kaufmännischen Gesichtspunkten eine vertretbare Empfehlung für oder gegen eine Investitionsentscheidung aussprechen zu können, müssen Investitionshöhe und Betriebskosten ermittelt werden. Insbesondere die energetisch aufwendige Wiederverflüssigung und die Materialien zur Verpackung des Baustoffs verursachen diese Aufwendungen. Sie sind dem Aufwand der konventionellen heißflüssigen Handhabung des Baustoffs als monetäre Größen gegenüberzustellen. Es stellt sich heraus, dass beispielsweise nicht alle Degressionseffekte ausreichend quantifiziert werden können, doch wird trotzdem der Versuch unternommen, unter der Annahme bestimmter Produktionsmengen eine Vorabschätzung zu erarbeiten. Eine vereinfachte Gegenüberstellung unter Wirtschaftlichkeitsaspekten, die um alle den jeweiligen Variantenkombinationen gleichen Randspezifika wie Art des Transports und Bitumenbeschaffungspreis bereinigt ist, stellte eine aufgrund der erlangten technischen Erkenntnisse abschließende Untersuchung dar. Aber auch während des Projekts findet eine ständige Kontrolle der technischen Innovationen unter monetären Gesichtspunkten statt. Der abschließende Vergleich der gewählten Verfahren zum jetzigen Stand der Bitumenkaltlogistik soll in einer einfachen Gegenüberstellung der Verfahrenskosten erfolgen. Eine Kostengegenüberstellung der Logistikkonzeptionen aus betriebswirtschaftlicher Sicht findet in Abschnitt 7 statt.

3 Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Der Prozess der Verarbeitung kalt gelagerter Bitumenvorräte birgt an vielen Stellen verfahrenstechnische Herausforderungen, die in der konventionellen Vorgehensweise mit einer Heißlagerung des Bitumens unberücksichtigt bleiben können. Diese technischen Fragestellungen sind stets unter Wahrung der Qualität des Baustoffs, aber auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu beantworten. Es dürfen sich also weder bei der Verarbeitung des Bitumens zu lagerfähigen Körpern, noch bei der im Vergleich zur herkömmlichen Methode langandauernden Lagerung oder bei der Wiedererwärmung Veränderungen im Bitumen wie die Bildung von Inhomogenitäten oder übermäßige Alterung einstellen, noch darf die Prozesskette zusätzliche Kosten verursachen, die die ökonomischen Vorteile eines solchen Verfahrens gänzlich aufzehren.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst auf die Techniken der Abfüllung von Bitumen in verschiedenen Bitumenverpackungen eingegangen. Zunächst wird eine für die Lagerung des kalten Bitumens geeignete Verpackung entworfen (Abschnitt 3.1). Anschließend wird hierzu auf die Anforderungen an Bitumen- beziehungsweise Asphaltbindemittelverpackungen eingegangen und eine Vorauswahl getroffen (Abschnitt 3.2). Dann werden drei als anforderungsgerecht erscheinende Verpackungen untersucht und hinsichtlich ihrer Defizite weiterentwickelt (Abschnitt 3.3 bis Abschnitt 3.5). Abschließend findet eine Diskussion der drei Verpackungen unter Gesichtspunkten der Technik und der Ökonomie statt (Abschnitt 3.6).

3.1 Abfüllen des heißen Bitumens in eine geeignete Lagerungsverpackung

Der Abfüllprozess kalt zu lagernder Bitumen ist dahingehend kritisch, als dass für manche Verpackungsarten hieraus eine Belastung aus Kombination von Hitze und mechanischer Beanspruchung entstehen kann. Darüber hinaus soll bei allen Verpackungsarten eine ausreichend hohe Taktzeit bei der Befüllung und gegebenenfalls eine schnelle Abkühlung für den Transport erfolgen. Das größte Problem stellt hierbei die beschriebene Beanspruchung dar. Mehrere Verfahren kommen zur Anwendung, um die hiervon insbesondere betroffenen Kunststoffverpackungen zu schonen.

Zunächst wird ein Verfahren bei den Herstellern von Vergussmassen praktiziert, bei dem die Wärmeenergie von außen schnell durch ein entsprechendes Medium abgeführt wird. An der gefährdeten Folie stellt sich damit annähernd eine Kontaktflächentemperatur zwischen diesem Medium und dem Bitumen (mit relativ geringem Wärmeeindringvermögen) ein. Als Medium wird zumeist Wasser mit hohem Wärmekonduktionsvermögen (Wasserbecken sie-

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

he Abbildung 6) oder Luft mit hohem Konvektionsvermögen (Ventilation) zur Ableitung der Bitumenwärme eingesetzt.



Abbildung 6: Kunststoffverpackungen mit heißer Bitumenfüllung kühlen in einem Wasserbecken aus [Li08]

Ein weiteres verhältnismäßig aufwendiges und patentiertes Verfahren (Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 2004/048204 A1) stellt das Abfüllen mittels einer Abfüllstation dar, die das Bindemittel entsprechend den thermischen Parametern der Verpackung herunterkühlt, bevor es abgefüllt wird.

Die genannten Verfahrensvarianten sind nur bei den temperaturempfindlichen Kunststoffverpackungen notwendig. Zur Erhöhung der Taktzeiten werden teilweise Förderbänder eingesetzt, auf denen die leeren Verpackungen unter den Befüllhahn transportiert werden. Teilweise sind weitere automatisierte Verfahrensschritte an dieses System angeschlossen. Zum Herunterkühlen der heißen Gebinde werden offene und geschlossene Lager eingesetzt. Geschlossene Lager können mit und ohne Belüftungssysteme ausgestattet sein. Alle Metallgebilde und einige Kunststoffgebilde können heißflüssig verladen werden, worauf in den nächsten Abschnitten noch ausführlicher eingegangen werden soll.

3.2 Eigenschaftsanforderungen und Vorauswahl von Bitumenverpackungen für die genauere Untersuchung

Das Verpackungsmaterial des Bitumens unterliegt während des Verfahrensprozesses der Befüllung, Lagerung und der Übergabe in die heiße Bitumenschmelze verschiedenen Anforderungen, die sich teilweise auf die Einwirkungen aus den Umgebungsbedingungen, teilweise aus der Prozessgestaltung selbst ergeben.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Die zu berücksichtigenden technischen Eigenschaften der Verpackungen beziehen sich im Wesentlichen auf die folgenden Aspekte:

- die Verpackung muss den bei der Befüllung mit heißflüssigem Bitumen vorhandenen Temperaturen standhalten;
- die Verpackung muss sich unter dem aufzunehmenden Gewicht relativ formstabil verhalten;
- die Verpackung sollte während der Lagerung nur eine geringe chemische und physikalische Alterung des Bitumens zulassen;
- die Verpackung sollte leicht vom kalten Bitumen trennbar sein bzw. eventuell mit in das Heißbitumen eingebrachte Verpackungsteile dürfen keine Qualitätsveränderungen im Baustoff erwirken.

Darüber hinaus sind jedoch auch wirtschaftliche Anforderungen wie

- die Recyclebarkeit bzw. die preiswerte Verwertung der Verpackung,
- der möglichst geringe Aufwand in der personellen und gerätetechnischen Handhabung,
- die möglichst geringen Beschaffungskosten.

Grundsätzlich scheinen alle bisher im Hochbau und im Straßenbau verwendeten Verpackungsbehälter für die Lagerung von kleinen Mengen kalten Bitumens auch für die Lagerung größerer Mengen geeignet. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen sollen die folgenden drei gängigen Bitumenverpackungen zunächst unter technischen Gesichtspunkten verglichen werden, um sie hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile gegeneinander abzugrenzen:

- Metallfässer (Abschnitt 3.3)
- Kunststoffverpackungen (Abschnitt 3.4)
- Silikonkarton (Abschnitt 3.5)

Zusätzlich seien hier weitere Verpackungsvarianten aufgeführt, die aus verschiedenen jeweils genannten Gründen nicht untersucht und weiterentwickelt wurden. Als weitere Bitumenverpackungen, die hier lediglich kurz analysiert werden sind noch Clovertainer, das Bitubale-, das Transporttank- und das Technix-System zu nennen.

Die Variante des Clovertainer (Abbildung 7 links) besteht aus einer dünnen beschichteten Pressholzplatte, die das Bindemittel mit einiger Überlappung horizontal umfasst. Boden und

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Deckel bestehen aus Brettschichtholz. An jeder Seite steift ein Holzbrett den Clovertainer gegen Schub- und Druckbelastungen aus. Schließlich hält ein Umreifungsband aus Kunststoff die Konstruktion auf einer Palette. Die großen Vorteile des Systems gegenüber anderen Bitumenverpackungen liegen in seiner bis zu 5-lagigen Stapelbarkeit. Allerdings muss der Baustoff vor der Zugabe zur Verflüssigungsanlage entpackt werden, und seine Handhabung ist dann durch die thermoplastischen Eigenschaften und die Duktilität des Bindemittels stark erschwert.



Abbildung 7: Clovertainer. Derartiges Bitumenhandling kann bei hohen Temperaturen problematisch sein (Greif NZ Ltd)

Die Firma Bitubale hat ein gleichnamiges System (Abbildung 8) entwickelt, das auch den Kunststoffverpackungen zugeordnet werden könnte. Allerdings kommt hier ein verfahrenstechnischer Schritt zum Einsatz, der in dieser Art bei keiner anderen Logistikkette zu finden ist. Denn die Extruderdüse wird bei der Produktion des Inliners im Kreis um die Bitumendüse der Gebindeherstellung angeordnet. Somit entsteht ein flaches (da zu Anfang im heißflüssigen Zustand absackendes) Endlosgebilde, das sich nach Abkühlung zuschneiden und zu sogenannten Ballen aufrollen lässt.

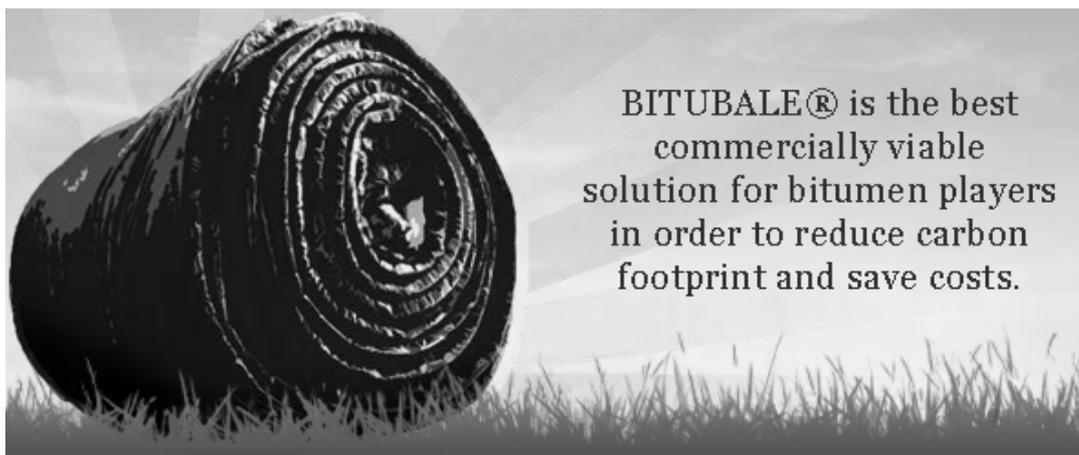


Abbildung 8: Werbeabbildung eines Bitubale [Bi11]

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Ein bedeutender Vorteil ist hier das große Oberflächen-Volumen-Verhältnis, das eine schnelle Wiederverflüssigung ermöglicht. Die großen Mengen von Kunststoffmaterial könnten sich allerdings als schädigend für Pumpen, Rührwerke und Asphaltqualität auswirken. Der Hersteller machte keine Angaben zu der genauen Zusammensetzung der hier verwendeten SBS-Folie.

Der Bitumentransporttank (Abbildung 9) ist ein Bitumentank in ISO- Containerabmessungen, der mit erkaltetem Bitumen gefüllt ist. Die Wiederverflüssigung des Inhalts erfolgt durch ein eigens in diesen Tank eingebautes Flammrohr, durch das auch fluide Wärmeträger gepumpt werden können. Der größte Vorteil des Systems sind die großen Mengen, die damit leicht distribuiert werden können. Der größte Nachteil ist eine – bei schonender Erwärmung unter Qualitätsgesichtspunkten – lange Verflüssigungsdauer. Hinzu kommt eine relativ schlechte Ausnutzung des Transportraums. Die hohe Verflüssigungszeit (ca. 24 Stunden) und die schlechte Transportraumauslastung bei der Anwendung des Transporttanks sind die Ursachen dafür, dass das System hier keinen Untersuchungen zugeführt wird.



Abbildung 9: Bitumentransporttank (Archivbild STRABAG SE)

Um zwei Nachteilen des Transporttanks – der schlechten Transportraumausnutzung und der langen Verflüssigungszeit – entgegenzuwirken wurde dieses System zum Technix-System (Abbildung 10) weiterentwickelt. Der laut Datenblatt dieses Systems maximal mögliche Bitumeninhalt hat eine Masse von 13,5 Tonnen, mit 2,5 Tonnen Transportcontainerergewicht hat das ganze Gebinde damit eine Masse von 16 Tonnen.

Es werden zwei Brenner (70 kW) an den Transportcontainer angeschlossen, der sich vom Standardcontainer nur durch halbe Höhenabmessungen unterscheidet (Höhe: 1,22 m, Breite: 2,44 m, Länge: 6,09 m). Eine ausreichend kurze Verflüssigungszeit (laut Herstellerda-

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

tenblatt ca. 10 Stunden) und damit eine ausreichende Flexibilität stellen sich bei schonender Wärmeenergiezufuhr trotzdem nicht ein. Aus diesem Grund wird auch dieses System im Folgenden nicht weiter betrachtet.

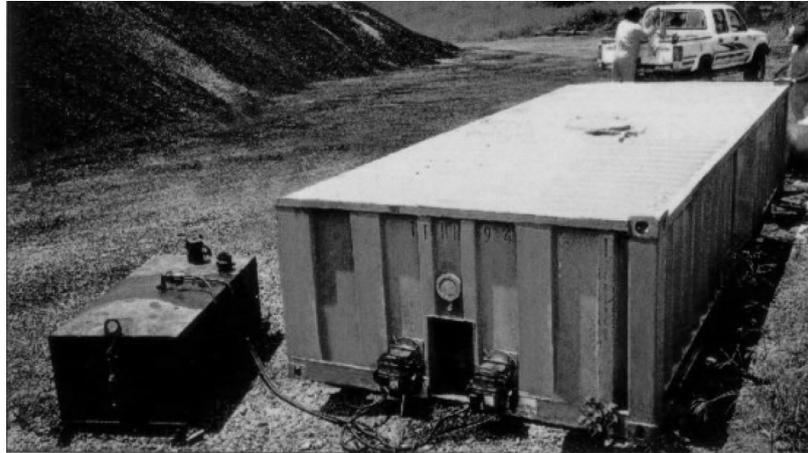


Abbildung 10: Bitumentransportcontainer der Firma Technix zum Kalttransport von Asphaltbindemitteln (Technix Group Ltd.)

3.3 Metallgebilde: Fässer und Eimer

Das Fass stellt eine der ältesten Lager- und Transportvarianten der Menschen dar. Vor der Erfindung von maschinell betriebenen Hubeinheiten lag seine große Stärke gegenüber anderen Verpackungsvarianten unter anderem darin, dass es leicht zu seinem Bestimmungsort gerollt werden konnte [Eb90]. Stählerne Bitumenfässer werden heute zumeist in Containern verpackt, die sich ab Mitte des letzten Jahrhunderts als Standardtransportbehälter durchsetzten. In Containern haben sie eine Raumauslastung von lediglich ca. 78 %. Die Gründe, weshalb sie trotzdem als eines der häufigsten Verpackungsvarianten des Baustoffs Bitumen dienen, liegen auf der Hand:

- 1) Robustheit gegen Witterungsbedingungen
- 2) Verhältnismäßig geringe Bitumenalterung im Gebinde
- 3) Wiederverwertbarkeit

In der Kritik stehen Fässer vor allem aus zwei Gründen:

- 1) Metallfässer sind in der Herstellung nicht ressourcenschonend;
- 2) Fässer sind teuer.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Bei Baumaßnahmen in Schwellenländern (Abbildung 11) werden Bitumenfässer meist zu Niedrigpreisen vor Ort verkauft, da sich eine Rückführung nicht lohnt.



Abbildung 11: Bitumenfässer nach Entleerung auf einer Asphaltmischanlage in Ruanda (Archivbild STRABAG SE)

Aufgrund der Tatsache, dass die oben genannten Anforderungen mit Fässern leicht erfüllt werden können, lag hier der geringste Entwicklungsbedarf vor. Auch der Energiebedarf von Fassheizern (Abbildung 12) und ihrer Durchsatzleistung waren ausreichend bekannt.

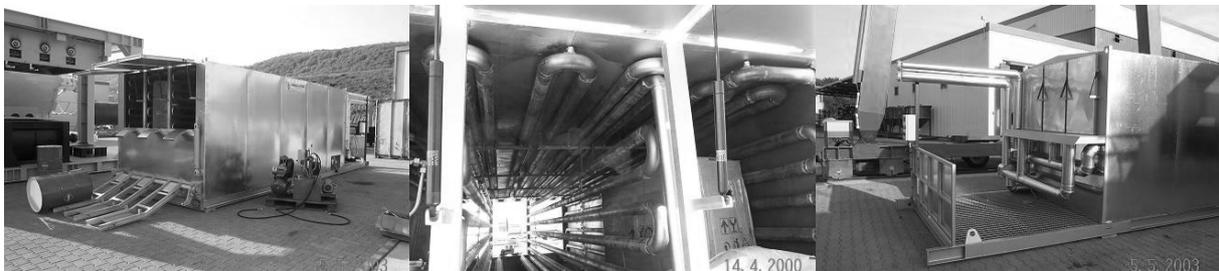


Abbildung 12: Fassschmelzer Baujahr 2003 (BENNINGHOVEN GmbH & Co. KG)

Trotzdem wurden Vorversuche zu Trennmittel- beziehungsweise Beschichtungsvarianten durchgeführt, die zu keiner großen Versuchsreihe umgestaltet wurden, da derartige Hilfsstoffe auf dem Markt erhältlich sind. Die Ergebnisse der drei getesteten Stoffe, die ein kaltes Abtrennen der Metallgebilde vom Bindemittel erleichtern sollten, sind hier, geordnet nach Trenntauglichkeit dargestellt.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Versuchs-Nr.	Trennmittelvariante	Ergebnis nach Tauglichkeit geordnet
1	Levaform (hochviskoses Silikonöl mit einer Zusatzkomponente)	Das Lösen ist ohne große Kraftanstrengung möglich.
2	Standard Sprühsilikon	Lösen mit leichter Kraft möglich. Allerdings verbleiben Bitumenreste an unebenen Stellen
3	Harz	Keine Verbesserung der Trennbarkeit

Tabelle 3-1: Ergebnis des Ablösens von Bitumen aus Metallbehältern mit unterschiedlicher Innenbeschichtung

Die Versuche ergaben auch, dass bei der Beschichtung mit Levaform auf zwei wesentliche Dinge zu achten ist:

1. Das Trennmittel muss gründlich und am besten zweimal ganzflächig aufgetragen werden.
2. Bei einer Abfüllung unter zu hoher Temperatur (größer als ca. 110 °C) kocht das Trennmittel und verdampft. Die Trennwirkung wird dadurch größtenteils aufgehoben.

3.4 Kunststoffverpackungen für Asphaltbindemittel

Für die Distribution bituminöser modifizierter Abdichtungsbaustoffe sind einfache Verpackungen aus Kunststoffolie bereits seit einigen Jahren Stand der Technik. Wie in Abbildung 13 dargestellt, dient die Kunststoffverpackung hierbei zunächst lediglich als Trennmittel gegen das Verkleben.

In neuerer Zeit wird von verschiedenen Herstellern angeboten, Bitumen für die Asphaltproduktion in speziellen Kunststoffen zu lagern und zu verflüssigen. Die Anforderungen einerseits an die Tragfähigkeit und Formhaltigkeit der Kunststoffverpackung und andererseits an die Notwendigkeit im Verarbeitungsprozess, das Bitumen aus der Verpackung zu lösen oder die Verpackung selbst mit in die Schmelze zu geben, lässt es als sinnvoll bzw. gleichwohl als notwendig erscheinen, diese Art der Verpackung in zwei Einheiten zu separieren: zum einen eine Kunststofftasche, die die erforderliche Tragfähigkeit und Formhaltigkeit gewährleistet, zum anderen eine innenliegende dünne Kunststoffolie, die das einzufüllende Bitumen von der Tasche trennt. Bei der späteren Übergabe des erkalteten Bitumenkörpers in die heiße Bitumenschmelze würde der Bitumenkörper aus der Tasche herausgleiten und mitsamt der ihn umschließenden Folie in die Bitumenschmelze sinken. Die Anforderungen an diese beiden Verpackungskomponenten sind im Folgenden dargestellt.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur



Abbildung 13: Einfache Kunststoffolie als Trennmittel gegen das Adhäsionsverhalten (Archivbild STRABAG SE)

3.4.1 Anforderungen an Kunststoffaschen

Wie bereits dargelegt, sind verschiedenste Arten von Kunststoffverpackungen bereits auf dem Markt verfügbar. Hier wird nun ein Konzept herausgegriffen, das speziell für den Massentransport von Asphaltbindern konzipiert wurde. Abbildung 14 stellt den sogenannten Polycube dar. Er ist eine Weiterentwicklung der in der Asphaltproduktion für die Granulatdistribution üblichen Big Bags. Auch hier dient die Kunststofftasche mit Tragschlaufen aus Polypropylen dazu, das Gebinde hinsichtlich der oben genannten Anforderungen robust zu halten. Auf die Anforderungen an den ebenfalls vorhandenen Inliner wird im nachfolgenden Abschnitt eingegangen.



Abbildung 14: Bitumen verpackt in Polycubes in einem Transportcontainer

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Derzeit werden erste Praxiserfahrungen mit dem Gebindesystem auf Herstellerseite gesammelt. Der Hersteller bietet auch eine spezielle Abfüllanlage (Schmelztopf) an, in der der Baustoff mit relativ großem Aufwand auf eine für den Kunststoff erträgliche Temperatur von ca. 100 °C heruntergekühlt wird. Es besteht die Möglichkeit die noch heißen Gebinde zu verladen. Eine Wiederverflüssigung von in Kunststoffgebinden verpackten Bindemitteln muss in der Regel in einem Schmelztopf erfolgen. Der Polycube kann auch einem Fassschmelzer zugegeben werden. Entgegen der Aussagen vieler Hersteller sind Kunststoffgebinde in der Praxis derzeit nicht wiederverwendbar. Polypropylen lässt sich allerdings unter geringem Aufwand wiederverwerten.

3.4.2 Anforderungen an Kunststofffolien

Durch den Umstand, dass die den kalten Bitumenkörper fest umschließende Folie bei dessen Übergabe mit in die heiße Bitumenschmelze eingebracht wird, ist zu untersuchen, wie mit dieser Folie im Weiteren umgegangen werden kann. Aus ökonomischen Gründen erscheint es als nicht praktikabel, die Folie im weiteren Verarbeitungsprozess mechanisch aus der Bitumenschmelze abzutrennen und zu beseitigen. Andererseits ist es bislang nicht gelungen, einen Kunststoff zu finden, der sich auch in der Praxis restlos im heißen Baustoff verflüssigt.

Mehrere Hersteller konnten dafür gewonnen werden, einen solchen Kunststoff, der sich einerseits bei den bei der Befüllung vorherrschenden Temperaturen nicht auflöst und andererseits bei der Übergabe in die heiße Bitumenschmelze in Lösung geht, zu entwerfen. Darüber hinaus wurden Praxisproben bereits in Anwendung befindlicher Kunststoffe aus Asphaltmischanlagen und anderen Zweigen der Bitumenindustrie genommen und für die Untersuchungen herangezogen. Es gab jedoch keinen Marktteilnehmer, der einen Kunststoff anbieten konnte, der die gestellte Anforderung von Haus aus erfüllen konnte.

Für die Überprüfung der gestellten Anforderungen an die Kunststoffvarianten wurden drei Versuche durchgeführt:

1. Zunächst wird ein Bitumen 50/70 auf 110 °C erwärmt und dann flächig auf die Kunststofffolie aufgebracht. Hält die Kunststofffolie dieser thermischen Belastung stand, ist der Kunststoff höchstwahrscheinlich dafür geeignet, dass Bitumen in ihn abgefüllt wird. Damit kann mit den beiden weiteren Versuchen zum Verhalten bei Wiederverflüssigung begonnen werden.
2. Im zweiten Versuch wird ein Gefäß aus Braunglas mit einem Eigengewicht von 255 g mit ca. 400 g Bitumen bei 160 °C befüllt. Die heiße Bitumenprobe wird mit 0,5 g Flocken der Kunststofffolie (0,125 M%) vermengt und anschließend für 24 Stunden in den Ofen bei einer Temperatur von 160 °C gestellt. Anschließend wird ein Mikro-

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

skopobjektträger mit einer Probe des Gemisches bestrichen und zur Vervollständigung der Dokumentation ein Foto des Mikroskopbildes erstellt.

3. Eine zweite Bitumenprobe wird wie zuvor beschrieben in ein Glas gegeben und mit der Kunststoffolie beflockt, jedoch anschließend von einem Einweg-Rührwerkzeug bei einer Temperatur von 160 °C gerührt, um die Verflüssigung der Folie zu beschleunigen. Stellt sich bei der zweiten Untersuchung kein befriedigendes Ergebnis hinsichtlich der Folienlöslichkeit ein, wird derselbe Versuch an der gelagerten zweiten Probe durchgeführt, in der der Kunststoff 24 Stunden Zeit hatte, sich nicht durch mechanische Einwirkung, sondern durch physikalische Ausgleichskräfte zu verteilen. Andernfalls wird aus Gründen der Aufwandsminderung hierauf verzichtet.

3.4.3 Versuchsdokumentation Kunststoffolien

Die nachfolgende Tabelle stellt die Ergebnisse nach der zumeist im zweiten der drei beschriebenen Versuchssätze ermittelten Lösbarkeit geordnet dar. Aus Gründen gegenseitiger Vertraulichkeit mit den Herstellern können die Folien lediglich mit ihren Probebezeichnungen, nicht hinsichtlich Rezeptur aufgeführt werden.

Prot.-Nr.	Folien-/Kunststoffbezeichnung	Lösbarkeit nach 24 h		Bemerkung
		Ofen	Rühren	
1	Buergofol T 069-mod	gut	gut	>90% lösbar
2	Buergofol T 069-0	mäßig	mäßig	90% lösbar
3	Buergofol 1	mäßig	schlecht	
4	Buergofol 2	schlecht	schlecht	
5	Buergofol 3	schlecht	schlecht	
6	Polycube-Inliner	schlecht	schlecht	
7	Unterland PP 10 W	schlecht	schlecht	
8	Buergofol T 693	schlecht	schlecht	
9	Buergofol BFCR 539	schlecht	schlecht	Protokollbeispiel oben
10	Bonduplast	schlecht	schlecht	
11	Maywo ABS SMD	schlecht	schlecht	
12	Maywo PS HI	schlecht	schlecht	Bsp. Mikroskopbild

Tabelle 3-2: Folien aus Verflüssigungsversuchen nach Löseverhalten aus den Versuchen 2 und 3 bei 160 °C geordnet

Kunststoffproben, deren Rezepturen nicht vorliegen, da sie beispielsweise in situ probenhalber entnommen werden, können mittels dynamischer Differenzialkalorimetrie (DSC) untersucht werden. Sie fundiert auf der Eigenschaft von Kunststoffen, ihre spezifische Wärmeka-

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

azität bei Erreichen der Schmelz- und Verdampfungstemperaturen sprunghaft zu ändern. Weitere Details zu DSC-Analysen können [FrSt06] entnommen werden. Eine DSC-Analyse einer Probe der derzeit für Vergussmassen zum Einsatz kommenden Polypropylen-Verpackungsfolien (Abbildung 15) zeigt ihre theoretisch starke Tendenz sich bei einer Bitumentemperatur von ca. 160 °C zu verflüssigen.

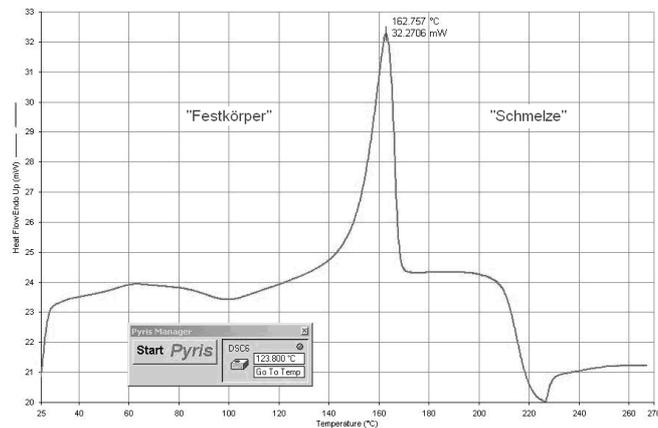


Abbildung 15: DSC-Analysebild einer Feldprobe (BUERGOFOL GmbH)

3.4.4 Auswertung der Versuchsreihe mit Kunststofffolien

Schon früh zeichnete sich in dieser Versuchsreihe die Erkenntnis ab, dass die von vielen Folienherstellern in Aussicht gestellte hundertprozentige Folienlöslichkeit in der Praxis nicht vorliegt. Zwar findet auf der Makroebene eine Auflösung der in den Folien verwandten Kunststoffpolymere von bis zu ca. 50 % statt, aber die Untersuchungen (Abbildung 16) unter dem Mikroskop machten deutlich, wie schwach die Löslichkeit auf der Mikroebene des Bitumens vorstättengeht.

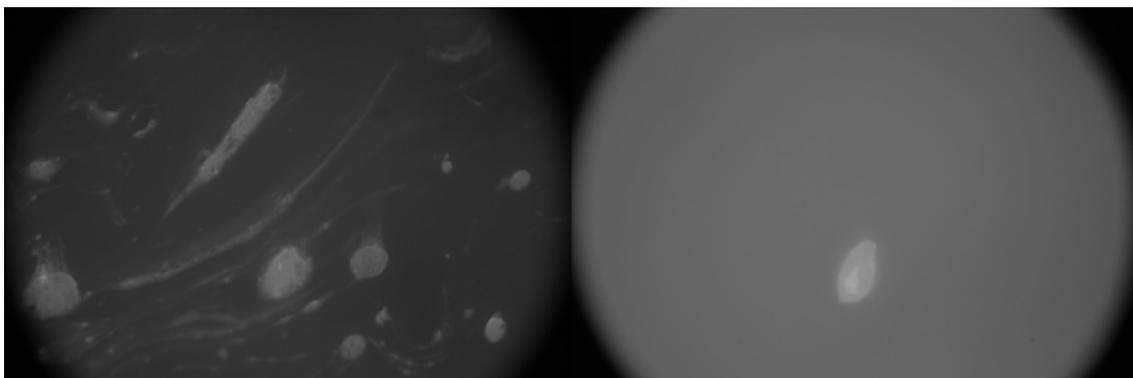


Abbildung 16: Mikroskopbilder einer (links) idealen Verflüssigung eines Kunststoffs in Polymermodifiziertem Bitumen (PmB) als Vergleichsbild und (rechts, charakteristisch für diese Versuchsreihe) einem Staubkorn auf sonst durch den Kunststoff unbeeinflusstem Bitumen 50/70

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Dieser Widerspruch ist auf ein mechanisches Phänomen zurückzuführen, das in den Versuchsreihen beobachtet werden konnte: Der Kunststoff rollt sich zusammen, sobald er mit dem heißen Bitumen in Kontakt kommt und die so entstehenden Klumpen verfügen über eine zu geringe Oberfläche, um eine Verflüssigung im Bindemittel zuzulassen. Dieses Verhalten lässt sich auf einen Spannungszustand in der Folie zurückführen, der nur aus dem unterschiedlichen thermophysikalischen Verhalten der beiden Materialien Bitumen und Inlinerfolie resultieren kann. Zahlreiche Versuchsreihen mit unterschiedlichen Kunststoffkombinationen beim Projektpartner BUERGOFOL zeigen, dass insbesondere die temperaturabhängige Viskositätsfunktion der Werkstoffe ursächlich ist. Entscheidend bei der Zusammensetzung des Inliners ist es, hierfür einen Kunststoff zu kreieren, dessen Viskositätsfunktion im oberen Temperaturbereich dem Funktionsverlauf des Baustoffs entspricht. So entstanden die in der Tabelle 5-2 an erster Stelle aufgeführten Folien mit der Bezeichnung Buergofol T 069-mod und T 069-0 mit der verhältnismäßig höchsten Verflüssigungsneigung. Abbildung 17 zeigt Aufnahmen durch das Mikroskop.

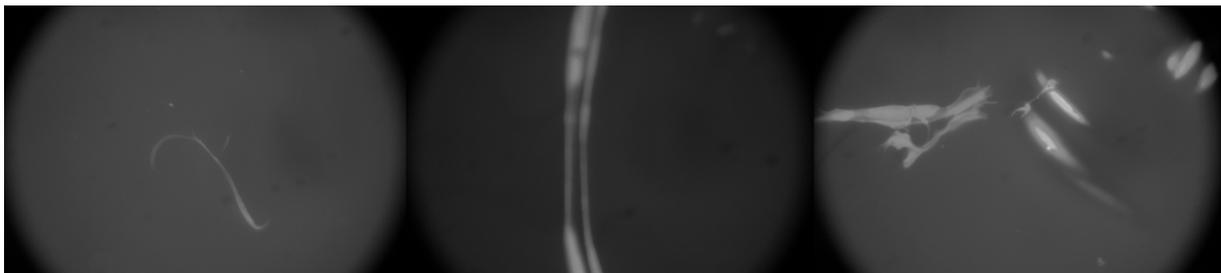


Abbildung 17: Reste der relativ gut im Bitumen gelösten Folie T 069-0

Trotz der, aufgrund dieser Innovation teilweise sehr guten Ergebnisse, verbleibt in allen Versuchen stets ein Folienrest in der Bitumenschmelze. Dies wiederum hieße für die Praxis zunächst, dass versucht werden muss, das Oberflächen-Volumenverhältnis beim kalten Bitumen so gering wie möglich zu halten. Das allerdings steht im Widerspruch zu dem Ziel, eine kurze Verflüssigungszeit durch ein großes Oberflächen-Volumenverhältnis zu erreichen. Abbildung 18 verdeutlicht diesen Zielkonflikt.

Eine hohe Oberfläche zum Wärmeeintrag steht einer großen Folienmenge, die an der Oberfläche benötigt wird, konkurrierend gegenüber.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

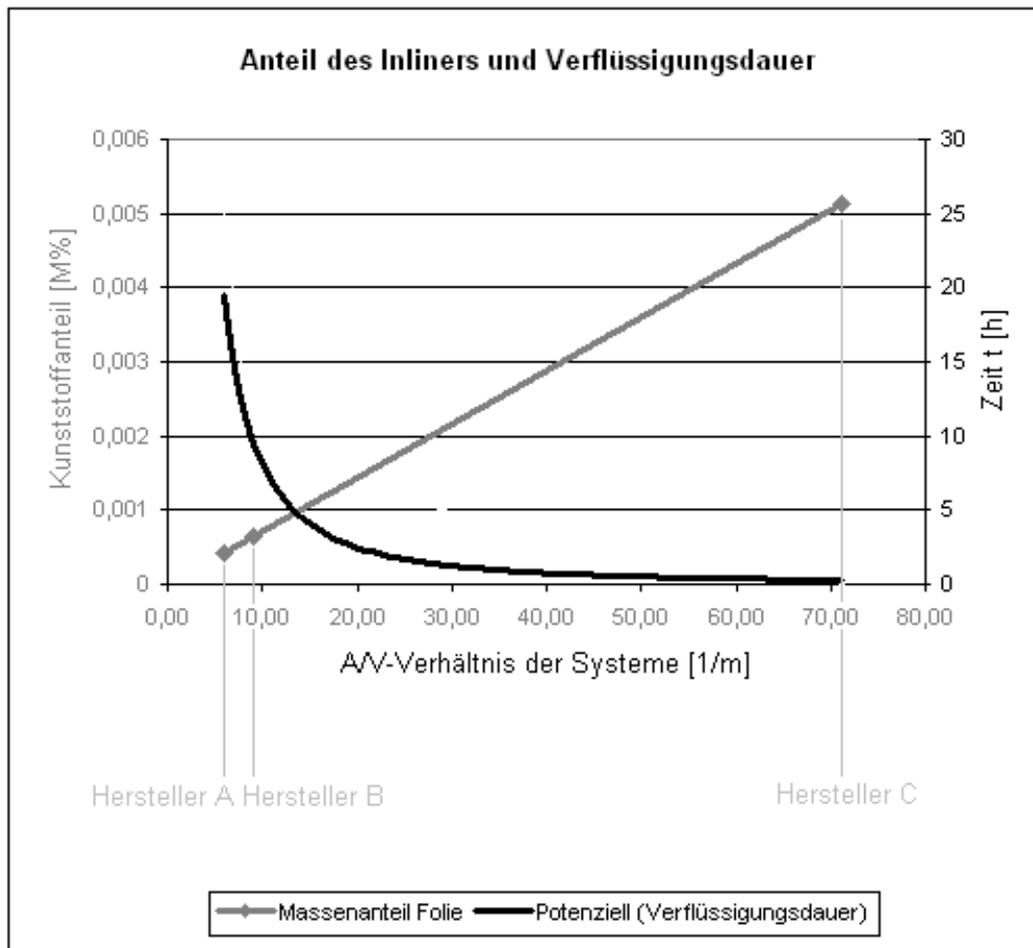


Abbildung 18: Derzeit auf dem Markt verfügbare Systeme der Bitumenverpackung in Kunststoffgebinde im Vergleich

3.5 Versuche zur Ermittlung einer für das Bitumengebinde geeigneten Kartonage

Da die Technik im Bereich der Kartongebinde für Bitumen weiter entwickelt ist als bei Kunststoffverpackungen, wurde hier für die Umsetzung der Anforderungen an eine großindustrielle Transportvariante eine andere Vorgehensweise gewählt. Als Alternative zur praxisbewährten Silikonbeschichtung wurden zwar zunächst auch Vorversuche mit Beschichtungen wie Levaform, Harzen und Wachsen betrieben, doch führten all diese Versuchsreihen zu keinem Ergebnis, das es rechtfertigen würde, hier weiteren Forschungsaufwand zu investieren. Zu erwähnen ist allerdings, dass der Karton sich teilweise unbeschichtet leichter vom Bindemittel lösen ließ als mit einigen der genannten Trennmittelvarianten. Schwerpunkt der Untersuchungen war also die anwendungskonforme Dimensionierung der silikonbeschichteten Kartons. Drei Kriterien erscheinen hier ausschlaggebend:

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

- 1) Die Kartons dürfen nicht – wie in der Hochbaupraxis oft geläufig – geklammert werden, da sie sonst nicht ohne Brandgefahr einem elektromagnetischen Feld im Hochfrequenzbereich ausgesetzt werden könnten.
- 2) Stabilitätskriterien:
 - a) Tragfähigkeit:
 - kein Reißen oder Aufplatzen der Kartons bei Heißabfüllung und Kaltlagerung
 - Stapelbarkeit die Kartonagen ohne Kippen, Reißen oder Einsacken
 - b) Gebrauchstauglichkeit: keine zu starken Verformungen während der Lagerung
- 3) Geometrische Randbedingungen: Die Abmessungen der Kartonagen sollten ein Teiler der Abmessungen von gängigen Ladehilfen wie Europoolpaletten (DIN EN 13698) sein.

In der Produktion eines Silikonkartons wird die Silikonschicht mittels einer Rolle direkt auf den Karton aufgebracht. Durch die Breite der Gummirolle in der Silikoniermaschine, ist also auch die maximal herstellbare Breite eines silikonbeschichteten Kartons begrenzt.

3.5.1 Herstellung der Formstabilität von Großbinden aus Silikonkarton

Zunächst wurden die größtmöglichen Kartonabmessungen hergestellt. Die Länge bestimmt sich damit nach der langen Seite einer Europoolpalette (120 cm; Abbildung 19) und die Breite nach dem oben erwähnten Verfahrensschritt der Silikonierung.



Abbildung 19: Silikonkarton mit den Abmessungen 120*40*40 Zentimeter

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Diese Gebindevariante wurde getestet, indem sie zunächst mit Wasser befüllt wurde. Da die Ecklaschen nicht verbunden waren, reichte allein der hydrostatische Druck aus, die langen Seiten des Kartons so weit herunterzudrücken, dass der Inhalt ausfließen konnte. Das Problem stellte sich auch bei kürzeren Kartons ein, so dass hier eine versteifende Lösung gefragt war. Zwei Lösungsansätze wurden in einem Schnittmuster vereint:

- 1) Abschrägen der Seitenwände (Abbildung 20), so dass sich der kalte Bitumeninhalt selbst trägt;
- 2) Verbinden der Ecklaschen, um über sie einen Teil der Zugkräfte aufnehmen zu können.

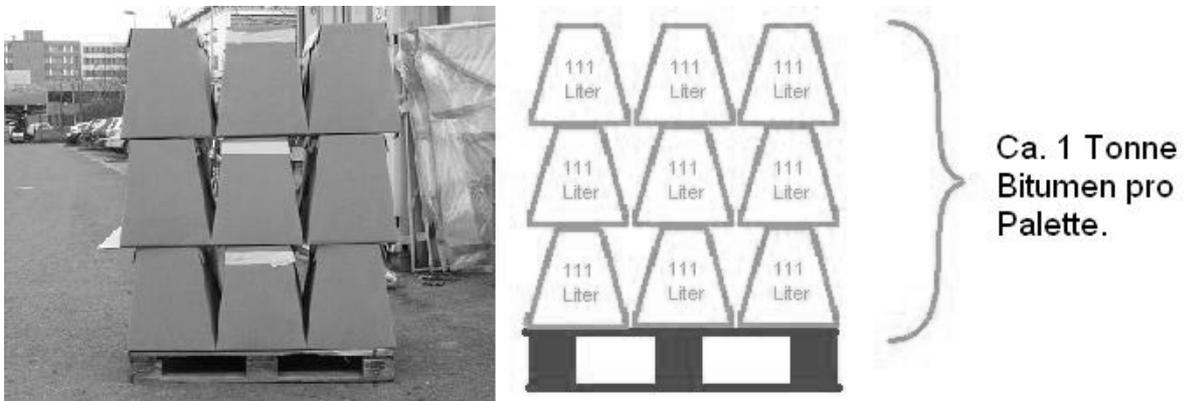


Abbildung 20: Entwicklungsstufe mit abgeschrägten Seiten bei der Weiterentwicklung von Kartonverpackungen für Bitumen

Obwohl auch die Länge der Gebinde verkleinert worden war, stellte sich in Abfüllversuchen mit Wasser heraus, dass auch diese Gebinde bei der Abfüllung nicht ausreichend stabil sind (Abbildung 21).

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur



Abbildung 21: Abfüllversuch mit Wasser

Da der Baustoff abgekühlt viel besser in der Lage ist, sein Eigengewicht zutragen und nicht über hydrostatischen Druck in die Behälterwände einzuleiten, wird ein Metallbügel entwickelt, der das Gebinde beim Abfüllvorgang (Abbildung 22) in Form halten soll.



Abbildung 22: Abfüllung mit Haltebügel

Das Resultat kann zunächst positiv bewertet werden, da das Gebinde, wie in Abbildung 23 dargestellt, in seiner Ausgangsform bei Abfüllung verbleibt.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur



Abbildung 23: Kartongebinde nach Abkühlung und Entfernen des Bügels

Das Gebinde wird anschließend bei einer Lagertemperatur von 21,5 °C unter Beobachtung gestellt (Abbildung 24) und dessen Verformung dokumentiert (Abbildung 25).



Abbildung 24: Bitumenverformung im Kaltzustand trotz Gegendruck durch die Kartonverpackung

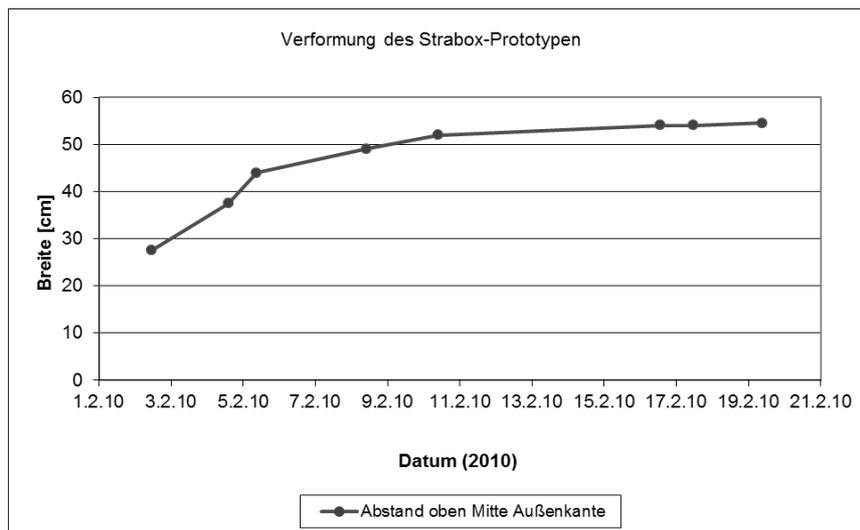


Abbildung 25: Graph der Kartongebindeverformung, Lagerung bei 19 °C bis 22 °C

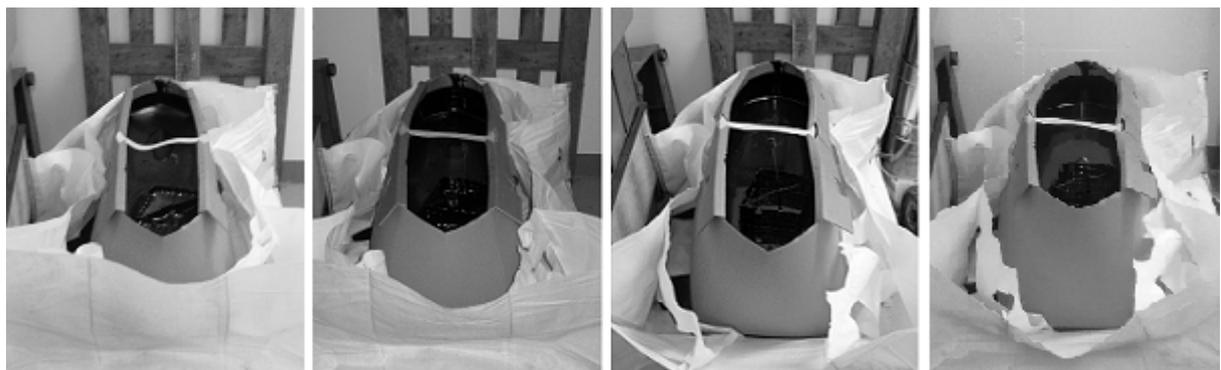
3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Der Karton verdoppelte in der Beobachtungsdauer von zwanzig Tagen seine Breite. Dieser Effekt ist aus der Lagerung des Baustoffs im Hochbau, von der die Kartoninnovation stammt, bekannt (Abbildung 26).



Abbildung 26: Kartonverformung bituminöser Fugenvergussmassen im Hochbau

Es wird ein Kunststoffbügel hergestellt, der die Gebinde auch bei der Lagerung an den steifen Oberkanten der Längsseiten zusammenhalten soll. Außerdem soll die Verpackung mit herkömmlichem Kreppband quer umbunden werden. In beiden Fällen wird damit versucht, ein Material zu verwenden, das mikrowellenresistent ist.



11.03.10 24,6 cm 15.03.10 27,0 cm 22.03.10 27,6 cm 29.04.10 28 cm

Abbildung 27: Fotodokumentation der Kartonverformung während der Lagerung

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

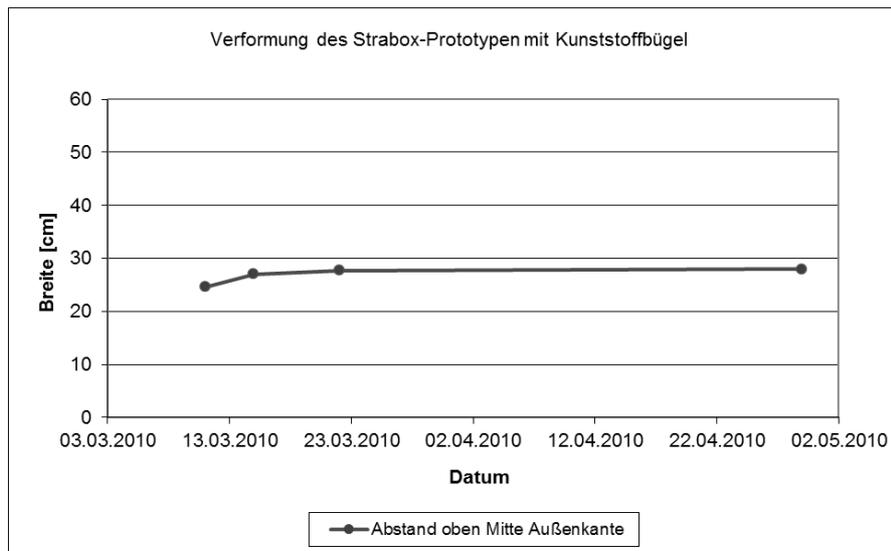


Abbildung 28: Die Abstände der oben dargestellten Kartonoberkanten über die Zeit, Lagerung bei 19 °C bis 22 °C

Wie Abbildung 27 und Abbildung 28 darstellen, erweisen sich beide Variationen als praxistauglich. Das Anwinkeln der Kartonwände wird dadurch überflüssig und die Kartonavolumina wieder größer.

3.5.2 Weiterentwicklung des Gebindes hinsichtlich Handlichkeit

Gerade die Praxiserfahrung während der Versuche zeigt, dass sich die Gebinde in dieser Form nur aufwendig auf einer Palette oder mittels Gurten bewegen lassen. Die Kartonagen werden deshalb mit Umreifungsbändern aus Polypropylen umschnürt. Das Produkt hat mehrere Vorteile:

- 1) keine Erwärmung der Umreifungsbänder in der Mikrowelle,
- 2) hochzugfest bis ca. 350 kg pro Band je nach Spezifikation,
- 3) die Bänder wurden mit Bügeln gebunden, die sowohl aus Metall als auch aus Polyethylen lieferbar waren.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

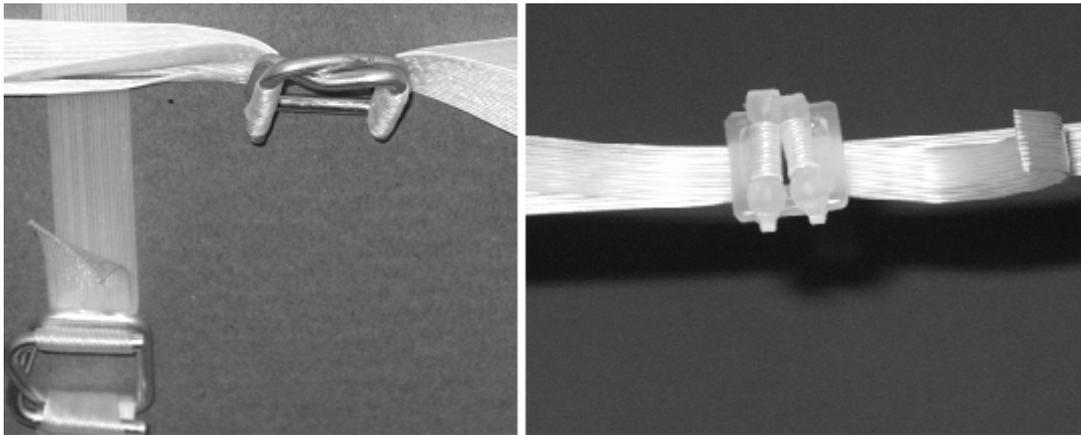


Abbildung 29: Umreifungsband und -bügel aus Metall (links) und Kunststoff (rechts)

An diesen Bändern kann der Karton angehoben werden. Die STRABOX-Entwicklungsstufe wird mit den Umreifungsband auf verschiedene Arten gebunden (Abbildung 30) und dann befüllt.



Abbildung 30: Im Versuch: unterschiedliche Bindung der Kartongebinde

Die Befüllung erfolgt direkt aus dem Tankwagen (Abbildung 31) und machte deutlich, welche Art der Gebindebindungen überflüssig ist.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur



Abbildung 31: Befüllung der von 144 Liter-Kartonagen aus einem TKW

Es ließ sich außerdem feststellen, wie weit die Gebinde mit heißflüssigem Inhalt (185 °C) über die Abmessungen der Palette hinaus verformt werden. Diesem Überstand soll bei der nächsten Befüllung durch geringere Kartonabmessungen entgegengesteuert werden. Dadurch entstehen abermals Kartonagen mit 111 Litern Heißinhaltsvolumen, die wie in Abbildung 32 dargestellt geschnürt werden.



Abbildung 32: Endgültige Bindung der STRABOX für die Massenproduktion

In ihrer endgültigen Version (Abbildung 33) verfügen die Kartons an der kurzen Oberkante über eine zusätzliche Sollreißstelle, die exakt die Maße eines Gabelstaplerzinkens hat. So können an der Verflüssigungsanlage je ein bis drei der Gebinde von der Palette, auf der der Baustoff transportiert und abgefüllt worden ist, gehoben werden.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

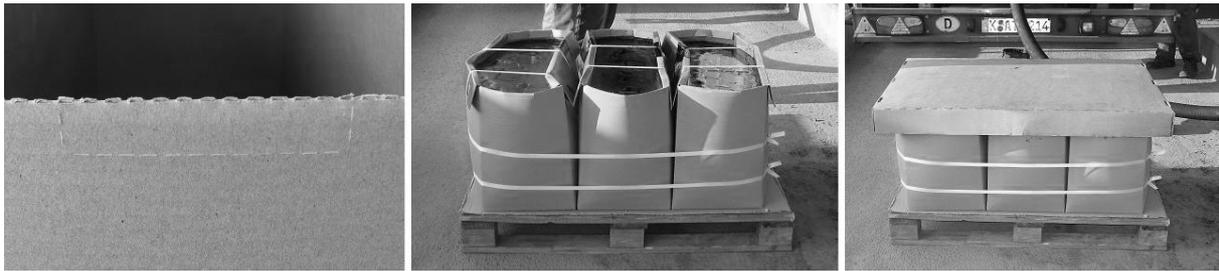


Abbildung 33: Reißkante für Gabelstaplerzinken; erfolgreiche Befüllung; 3er Gebinde mit Deckel

Die Verformungen der Strabox unter Langzeitbeobachtung sind in Abbildung 34 dargestellt. Es findet fast keine Verformung statt.

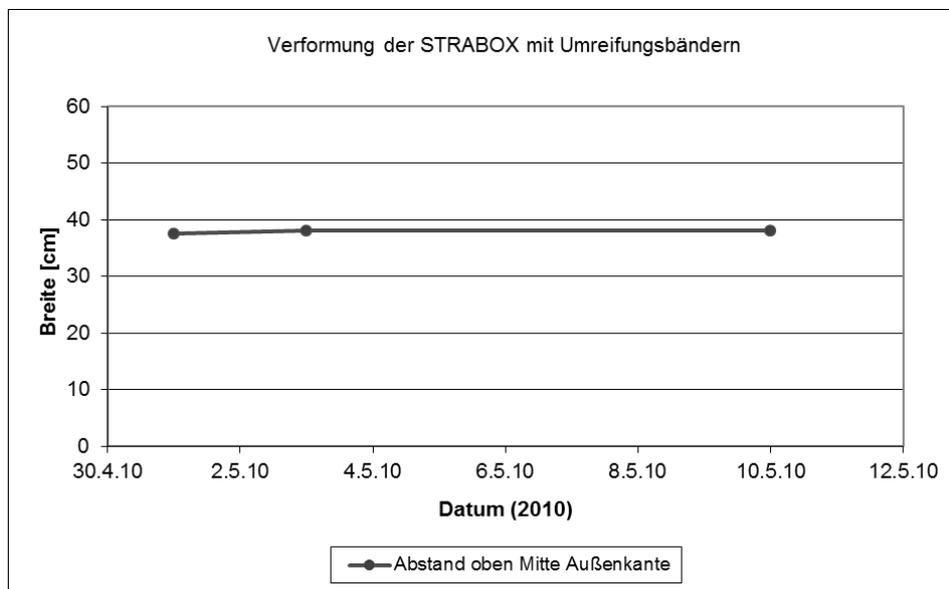


Abbildung 34: Die Abstände der oben dargestellten Kartonoberkanten über die Zeit, Lagerung bei 19 °C bis 22 °C

Nun gilt es herauszufinden, ob es möglich ist, zwei bis drei der Dreiergebinde übereinander auf eine Palette zu stapeln.

3.5.3 Untersuchungen zur Stapelbarkeit der STRABOX

Der Prozessablauf der Abfüllung, Lagerung und Wiedererwärmung des Bitumens sieht vor, dass die mit Bitumen gefüllten Kartons mit einem Gabelstapler von einem Ort zum anderen transportiert werden. Dabei soll der Gabelstapler mit drei Zinken ausgestattet sein, die jeweils unter die beiden Umreifungsbänder jedes Kartons fassen und diese daran anheben (Abbildung 35) und zum Bestimmungsort befördern.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur



Abbildung 35: Anheben der STRABOX

Der praxistaugliche Einsatz dieses Verfahrens für den Transport als auch die Lagerbarkeit des gesamten Gebindes in drei aufeinanderliegenden Ebenen wird durch wiederholte Durchführung erprobt. Die Versuche stellten sicher, dass der Transport auch bei einem gerissenen Umreifungsband pro Karton oder die formstabile Lagerung bei 33 % Überladung (Abbildung 36) noch gewährleistet sind.



Abbildung 36: Stapeln der STRABOX

Eine Lagerung unter den beschriebenen Bedingungen wird über den Zeitraum eines Monats hinweg ohne nennenswerte Beeinträchtigung der Stabilität beobachtet. Das Ablösen einer STRABOX von ihrem Bindemittelinhalt ist in weniger als 30 Sekunden möglich. Auf die STRABOX wird Gebrauchsmusterschutz angemeldet.

3.5.4 Abmessungen und Füllhöhe der STRABOX

Die endgültige Version der STRABOX ist 48 cm hoch und hat eine Grundfläche mit einer Länge von 74 cm und einer Breite von 37 cm (entspricht ca. 2.071 cm² Standfläche). Eine nach innen zu klappende aussteifende Lasche an der kurzen Kartonseite mit einer Breite von 3 cm markiert die Heißfüllhöhe von 45 cm. Bei der Berechnung der Füllhöhe der Kartonen und von Bitumengebinden im Allgemeinen gehen mehrere Faktoren ein:

- 1) „Mindestschwapprand“ von der Oberkante ab ca. 3 cm,
- 2) Absacken der Oberfläche beim Befüllen durch Ausbauchen des Kartons (Setzung aus Heißausbauchen): ca. 3-5 cm je nach Kartonmaterial,
- 3) Absacken der Oberfläche des Kartons beim Kaltlagern durch Ausbauchen des Kartons (Kaltsetzung): 3-5 cm je nach Kartonmaterial,
- 4) Kubische Ausdehnung des Baustoffs aus Temperaturänderung: Der kubische Ausdehnungskoeffizient des Baustoffs liegt laut [ReWh03] zwischen 0,0006 K⁻¹ und 0,00062 K⁻¹. Hier sei mit 0,00062 auf der sicheren Seite gerechnet. Das heißt für einen Karton mit einer Grundfläche von 2.071 cm² und einem Heißvolumen von 121,5 Litern eine Setzung um 10,6 Liter (140 K Abkühlung), also 3,9 cm.

Im kalten Zustand beträgt der Inhalt eines Kartons somit nur noch 110,9 Liter. Bei einer Bitumendichte von 1,015 kg/l ergibt sich ein Bitumengewicht von ca. 112,56 kg. Zusammen mit dem Eigengewicht des Kartons in Höhe von 1,688 kg entspricht das Gebinde aus neun gefüllten Kartons auf einer Europalette einer Gesamtmasse von 1,03 t zur Lagerung einer Bitumenmasse von ca. 1,01 Tonne.

3.6 Eigenschaftsveränderungen aus Lagerung und Wiederverflüssigung

Verschiedene Versuchsanordnungen dienen dazu, die Eigenschaftsveränderungen des Baustoffs durch die konventionellen und modernen Varianten der Lagerung und Wiederverflüssigung des Baustoffs in der Praxis zu simulieren. Durch chemische und physikalische Veränderung des Stoffes kommt es hierbei möglicherweise zu einer Zunahme der Bitumenhärte. Hierdurch ändert sich das Viskositäts- und Relaxationsverhalten, welches zu einer Versprödung und Rissbildung führen kann [ScSc94]. Durch die Bitumenalterung ändern sich ebenfalls die Gebrauchseigenschaften, welche eine Erhöhung des Erweichungspunkts Ring und Kugel, eine Absenkung der Penetration und eine Erhöhung der Viskosität hervorrufen [AmDaBe-Ja05]. Deshalb werden mittels der Prüfverfahren zur Bestimmung des Erweichungspunktes

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Ring und Kugel (DIN EN 1427 (2007)) und der Nadelpenetration (DIN EN 1426 (2007)) die Eigenschaftsveränderungen untersucht, die durch folgende Lagervarianten entstehen:

- 1) In geschlossenen Bitumentanks, wie sie in den Asphaltmischanlagen üblich sind;
- 2) Außerdem in einer offenen Lagerung. Vorbild waren Verflüssigungsanlagen mit einem offenen Schmelztopf. Hier sollte unterschieden werden zwischen Lagerung mit und ohne Anlagenkomponenten zur Homogenisierung (zum Beispiel Ruhrwerke).

Aus der Praxis ist bekannt, dass insbesondere UV-Licht in Kombination mit Luftsauerstoff eine negative Beeinträchtigung der Baustoffeigenschaften durch sogenannte UV-Alterung verursacht. So soll die Kaltlagerung unter diesem Aspekt simuliert werden. Die verschiedenen Verpackungsvarianten in der Kaltlagerung werden auf zwei Arten simuliert:

- 1) Lagerung unter Kunststoffverpackungen wie Polypropylengebinde mit Inliner und im Bitumenfüllschlauch aus Polyethylen.
- 2) Offene Lagerung.

Bei den Heißlagervarianten wird der Untersuchungsschwerpunkt auf die Temperaturabhängigkeit gelegt, bei den Kaltlagervarianten gilt es die eventuell vorhandene Abhängigkeit zum Oberflächen-Volumen-Verhältnis darzustellen. Aus Letzterem sollen Erkenntnisse zur Dimensionierung der Verpackungseinheiten abgeleitet werden. Eine Simulation der Kaltlagerung in lichtundurchlässigen stets geschlossenen Metallgebinden, wie bei Bitumenkaltransport mittels Fässern üblich ist, wäre nicht nötig, da hier mit keiner Beeinträchtigung der Materialeigenschaften während der Lagerung gerechnet werden muss. Trotzdem wird diese in der Praxis sehr gängige Variante auch nachgestellt, um Referenzwerte zu erhalten. Erst nach der Analyse der hieraus erlangten Messergebnisse soll eventuell über den Einsatz weiterer Materialprüfverfahren befunden werden.

3.6.1 Versuchsaufbau Lagerungssimulation

Obwohl in den Asphaltmischanlagen der Baustoff zur Hauptbausaison im Bereich einstelliger Tagesabstände angeliefert wird, wird zunächst auf der sicheren Seite eine geschlossene Heißlagersimulationszeit von einem Monat gewählt. Simuliert wird diese Form der Lagerung des Baustoffs im luftdichten Bitumeneimer im Wärmeschrank bei 110 °C und 160 °C.

Die Simulation des Aufenthalts des Bindemittels im Schmelztopf (heißflüssige offene Lagerung) gestaltet sich etwas aufwendiger, da Schmelztöpfe mit unterschiedlichsten Vorrichtungen zur Homogenisierung gebräuchlich sind. Ruhrwerke und Umwälzpumpen sind außerdem von entscheidender Bedeutung, um den Verflüssigungsprozess zu beschleunigen. Um die Auswirkung dieser Anlagenteile auf die Baustoffqualität zu verdeutlichen, werden einige der offen gelagerten

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Proben einmal täglich umgerührt. Allerdings ist es hier lediglich nötig einen Lagerzeitraum von 5 Tagen nachzustellen, da der Baustoff auch in der Praxis niemals länger heißflüssig in Schmelztöpfen verbleiben dürfte. Da auch die in diesem Verfahrensschritt möglichen Temperaturbelastungen (Beispielsweise entlang Thermalölleitungen) auf das Bitumen höher sein können, werden Temperaturbedingungen von 110 °C, 160 °C und 220 °C nachgestellt.

Die Kaltlagerung des Bindemittels unter UV-Einstrahlung (z.B. in Kartonverpackungen) kann in einem international agierenden Konzern überall auf der Welt und dementsprechend stets unter unterschiedlichen UV-Lasten stattfinden. Eine Simulation ist trotzdem möglich, da die bekannten UV-Indizes der Weltkarte mit einem festen Faktor linear von der Bestrahlungsstärke in W/m^2 abhängen. Durch Steigerung der Strahlungsleistung lässt sich folglich die simulierte Lagerungszeit verkürzen. Außerdem ist es lediglich nötig, mit einem UV-Messgerät den UV-Index unter dem nachfolgend dargestellten Strahlungssimulator an der Oberfläche der Probe zu messen, um Rückschlüsse auf die Lagerung unter extremeren Bedingungen zu ermöglichen.

Der in Abbildung 37 dargestellte Strahlungssimulator besteht aus einem Gerüst für die UV-Strahler, den UV-Strahlern und Spiegelwänden zur Homogenisierung der Lichteinstrahlung.



Abbildung 37: Bitumenproben mit und ohne Verpackungsfolie unter UV Bestrahlung

Einige der Proben werden, wie in der Abbildung ersichtlich, mit Verpackungsfolien abgedeckt. Dabei werden Inliner und Polypropylengewebe (PP-Gewebe) eines auf dem Markt gebräuchlichen Systems der Kunststoffgebäude verwendet. Dies dient zum einen dazu, die

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Baustoffalterung in dieser Form der Bitumenverpackung zu simulieren, zum anderen Beeinträchtigungen der Belastbarkeit der PP-Gewebe zu ermitteln. Um die Vergleichbarkeit der UV-Beständigkeit ihrer Produkte zu erhöhen, sind die Hersteller von Kunststoffen dazu übergegangen, hierfür einen Richtwert in Kilolangley ($1 \text{ kLy} = 1 \text{ kW/cm}^2$) anzugeben. Die Folie des Projektpartners wurde durch entsprechende Modifikation in der Produktion mit einer UV-Beständigkeit von 150 kLy hergestellt.

Mittels des UV-Simulators soll auch gemessen werden, wie tief die UV-Alterung in das kalt gelagerte Bindemittel eindringt. Alle Proben werden nach der Belastungszeit wiederverflüssigt, um sie in die für die Eigenschaftsmessung nötige Form zu bringen. Naturgemäß werden sie dabei durchgemischt. Also muss, um das Volumen des gealterten Bindemittels an der Oberfläche zu bestimmen, das Oberflächen-Volumen-Verhältnis der Proben variiert werden.

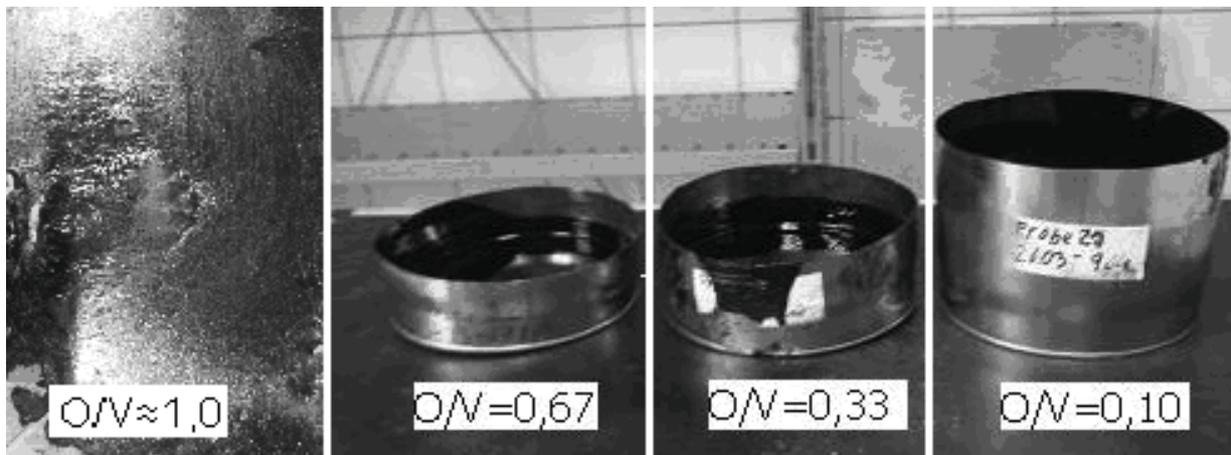


Abbildung 38: Proben mit jeweiligem Oberflächen-Volumen-Verhältnis

Auch die in Abbildung 38 dargestellten Proben werden zwei Wochen einer UV-Belastung bei einem UV-Index von 12 ausgesetzt. Dies entspricht in etwa einer einmonatigen Kaltlagerung unter Sonnenbestrahlung des UV-Index 6. Zur Bestimmung der nachfolgend dargestellten Werte werden jeweils 5 Messwerte gemittelt.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

3.6.2 Eigenschaftsveränderungen des Baustoffs im Versuch

Der Vollständigkeit halber seien in Tabelle 3-3 zunächst die Probeneigenschaften vor der Lagerung dargestellt.

Versuchsabläufe	Penetration	Ring-und Kugel	Penetrationsindex Ip
1-10	48	51,6	-0,9
10-20	47	51,8	-0,9
21-22	51	51,8	-0,7
23-28 + 12	51	51,6	-0,8

Tabelle 3-3: Probeneigenschaften vor der Lagersimulation

Die Übersicht der gemessenen Werte ist hier in Tabelle 3-5 dargestellt.

Lagerungsart mit jeweils 5 Proben		Penetration [1/10mm]		Δ Pen [1/10mm]	EP R&K [°C]		Δ EP R&K [K]
		vor	nach Lagerung		vor	nach Lagerung	
1	1 Monat geschlossen; 160 °C	48	50	2	51,6	51,6	0,0
2	1 Monat geschlossen; 110 °C	48	50	2	51,6	51,6	0,0
3	1 Monat geschlossen; 20 °C	48	49	1	51,6	51,2	-0,4
4	1 Monat geschlossen; -17 °C	48	50	2	51,6	51,4	-0,2
5	5 Tage offen bei 220 °C	48	48	0	51,6	52,4	0,8
6	5 Tage offen bei 160 °C	48	38	-10	51,6	55,0	3,4
7	5 Tage offen bei 110 °C	48	43	-5	51,6	52,4	0,8
8	5 Tage offen bei 20 °C	48	45	-3	51,6	51,4	-0,2
9	5 Tage offen bei -17 °C	48	46	-2	51,6	51,6	0,0
10	5 Tage offen bei 220 °C und 2 maliges Rühren täglich	48	38	-10	51,6	56,8	5,2
11	5 Tage offen bei 160 °C und 2 maliges Rühren täglich	47	37	-10	51,8	55,2	3,4
12	5 Tage offen bei 110 °C und 2 maliges Rühren täglich	51	49	-2	51,8	52,0	0,2

Tabelle 3-4: Darstellung der Messergebnisse und der Versuchsreihen zur Qualitätsänderung des Bitumens

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Lagerungsart mit jeweils 5 Proben		Penetration [1/10mm]		Δ Pen [1/10mm]	EP R&K [°C]		Δ EP R&K [K]
		vor Lagerung	nach Lagerung		vor Lagerung	nach Lagerung	
13	1 Monat UV-Lagerung mit PP/PE- Folie	47	51	4	51,8	51,6	-0,2
14	1 Monat UV-Lagerung mit PP/PE- Folie (Verflüssigung in der Mikrowelle (800 Watt))	47	56	9	51,8	51,0	-0,8
15	1 Monat UV-Lagerung mit PP/PE- Folie → Mikrowellenerwärmung → 5 Tage geschlossene Lagerung bei 160 °C	47	50	3	51,8	51,6	-0,2
16	1 Monat UV-Lagerung mit PE-Folie	47	50	3	51,8	51,4	-0,4
17	1 Monat UV-Lagerung mit PP- Folie	47	50	3	51,8	51,0	-0,8
18	1 Monat UV-Lagerung offen	47	49	2	51,8	51,6	-0,2
19	1 Monat UV-Lagerung offen → Mikrowellenerwärmung (800 Watt)	47	51	4	51,8	51,4	-0,4
20	1 Monat UV-Lagerung offen → Mikrowellenerwärmung → 5 Tage geschlossene Lagerung bei 160 °C	47	49	2	51,8	51,6	-0,2
21	1 Monat UV-Lagerung offen: 10 cm (O/V=0,1)	51	51	0	51,6	51,4	-0,2
22	1 Monat UV-Lagerung mit PP/PE: 10 cm	51	51	0	51,6	51,4	-0,2
23	1 Monat UV-Lagerung offen: 3 cm (O/V=0,33)	51	51	0	51,6	51,6	0,0
24	1 Monat UV-Lagerung mit PP/PE: 3 cm	51	51	0	51,6	51,8	0,2
25	1 Monat UV-Lagerung offen: 1,5 cm (O/V=0,67)	51	51	0	51,6	52,0	0,4
26	1 Monat UV-Lagerung mit PP/PE: 1.5 cm	51	51	0	51,6	51,6	0,0
27	1 Monat UV-Lagerung: dünne Schicht offen	51	41	-10	51,6	54,4	2,8
28	1 Monat UV-Lagerung: dünne Schicht PE/PP	51	45	-6	51,6	53,0	1,4
29	1 Monat UV-Lagerung: dünne Schicht PE	51	40	-11	51,6	54,0	2,4

Tabelle 3-5: Darstellung der Messergebnisse und der Versuchsreihen zur Qualitätsänderung des Bitumens (Fortsetzung)

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Es ist ersichtlich, dass bei der Nachbildung der einmonatigen heißflüssigen Tanklagerung (geschlossen; Tabelle 3-5 Spalten 1-4) keine nennenswerte Beeinträchtigung der Baustoffqualität gemessen wird. Lagert das Asphaltbindemittel jedoch offen (Schmelztopf), so ist der Zusammenhang zwischen der Verschiebung des Erweichungspunktes und der Lagertemperatur linear. Wie in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellt gilt dies nicht, wenn kein Rührwerk eingesetzt wird.

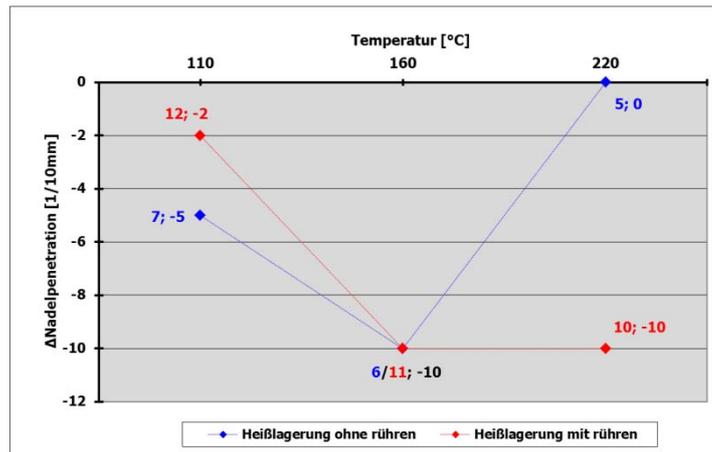


Abbildung 39: Vergleich der Nadelpenetrationsänderung nach 5 Tagen offener Lagerung mit dem Ausgangswert

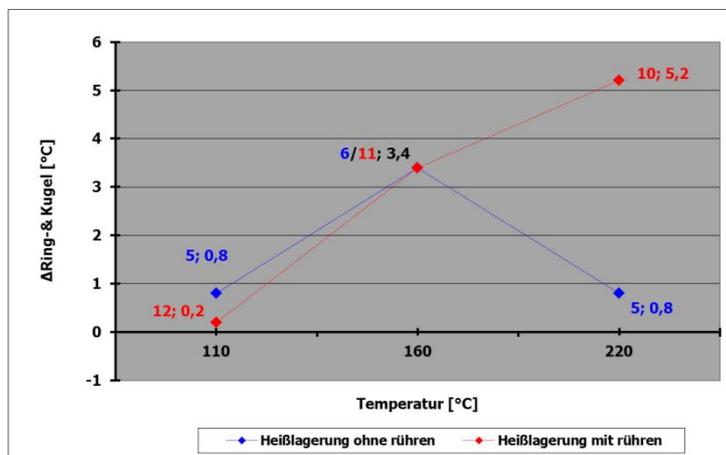


Abbildung 40: Vergleich des Erweichungspunktänderung Ring und Kugel nach 5 Tagen offener Lagerung mit dem Ausgangswert

Ein Blick auf die offen und ohne Rührvorgang gelagerten Proben erklärt die Tatsache, dass bei hohen Temperaturen in der Verflüssigungsanlage die Beeinträchtigung der Baustoffqualität geringer ist als sowohl bei mittleren Temperaturen, als auch bei der Homogenisierung durch ein Rührwerk. Abbildung 41 zeigt, dass gekracktes Bitumen an der Oberfläche der

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Schmelze schwimmt, wenn der Homogenisierungsvorgang fehlt, und zugleich hoher Temperatur vorherrscht. Es ist zu vermuten, dass diese „Kruste“ das Bitumen darunter vor destillativer Alterung schützt.

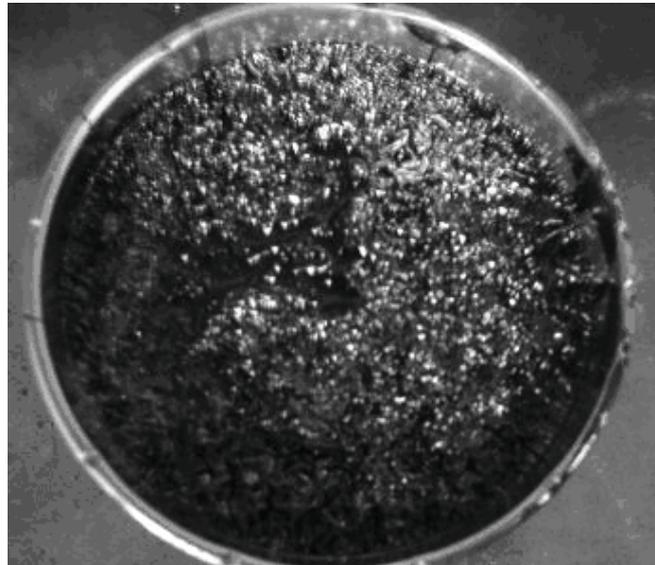


Abbildung 41: Versuchskörper aus der Lagerungssimulation bei 220°C ohne Rührwerk nach 5 Tagen.

Nachdem sich hier gezeigt hat wie stark sich die Lagerung bei zu hohen Temperaturen auswirken kann, wird auch die Kaltlagerung untersucht. Es ist bekannt, dass sich destillative Alterung bei der Bitumenkaltlagerung nicht einstellt. Eine oxidative Alterung an der Oberfläche ist hingegen zu erwarten. Gemessen wird also die eventuell vorhandene Alterung des Baustoffs aufgrund UV-Lichts als Katalysator dieser photochemischen Alterungsform. Es zeigt sich, dass die Auswirkung dieses Einflusses auf das Material zwar auf den Probeoberflächen zu sehen, aber messtechnisch nicht eindeutig nachweisbar ist. Lediglich beim Bitumenfilm, der erstellt wurde, um den Effekt zu überhöhen, gilt es die Alterung und die damit einhergehende Verhärtung des Bindemittels nachzuweisen. Es gelingt hier sogar, die Alterung durch das Aufbringen der Verpackungsfolien zu reduzieren. Nachfolgende Abbildungen zeigen, dass insbesondere die stets außen angeordnete PP-Gewebeplane einen Großteil der UV-Last abhält.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

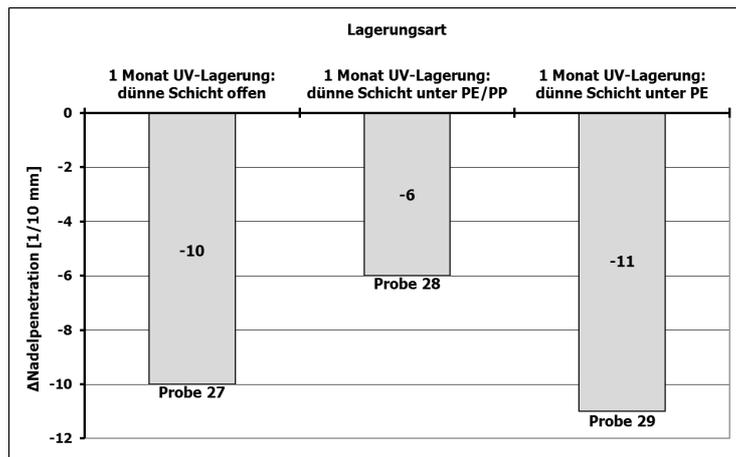


Abbildung 42: Differenz der Nadelpenetration nach 1 Monat UV-Lagerung von Bitumen 50/70

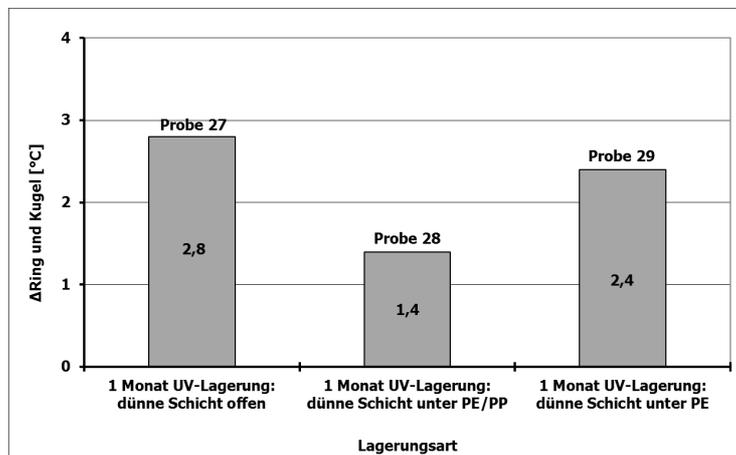


Abbildung 43: Differenz des Erweichungspunkts nach 1 Monat UV-Lagerung von Bitumen 50/70

Dem als Trennstoff fungierenden Inliner kommt dabei fast keine Bedeutung zu.

3.6.3 Auswertung der Versuche zur Lagersimulation

Da die beiden gewählten Standardmessverfahren zumeist keine große Beeinträchtigung der Baustoffqualität durch Alterung messen, wird es als unnötig angesehen, weitere Messverfahren der Bitumeneigenschaften heranzuziehen. Es werden Einflüsse auf das Bindemittel bei einer offenen heißflüssigen Lagerung festgestellt. Auch das Bilden einer Kruste, das bei diesen Temperaturen beobachtet wird, lässt sich nicht nutzen, um den Einfluss der Alterung zu vermindern. Die Krustenbildung sollte stattdessen verhindert werden, wofür Rührwerke, Umwälzpumpen und niedrigere Temperaturen in der Praxis zumeist einen Beitrag leisten.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

Wird der Baustoff kalt unter Kunststofffolien gelagert und ist er dabei UV-Licht ausgesetzt, so weist er in einigen Fällen eine geringe Erhöhung des Erweichungspunktes auf. Es ist allerdings möglich, dass diese Beobachtung auf Messungenauigkeiten zurückzuführen ist. Auch chemische Vorgänge könnten hierfür die Ursache sein, die hier nicht genauer betrachtet werden sollen und Thema einer gesonderten Untersuchungsreihe darstellen können.

Die Versuche zeigen auch, dass UV-Alterung nur in der obersten Bindemittelschicht auftritt, da der Baustoff stark lichtundurchlässig ist. Der Anteil der gealterten Oberflächenschicht am Gesamtvolumen ist dabei so gering, dass sie nach einer mit der Wiederverflüssigung einhergehenden Homogenisierung nicht mehr nachweisbar ist. Dies gilt selbst bei Kleinsteinheiten mit einem ungünstigen Oberflächen-Volumen-Verhältnis von 0,67. Folglich sind alle gängigen und im Projekt behandelten Gebindeformen nicht von der UV-Alterung betroffen. Es ist demzufolge auch nicht die Aufgabe einer Bitumenverpackung, den Baustoff vor der Belastung durch das UV-Licht zu schützen. Eventuelle UV-Schutzkomponenten im Kunststoff können lediglich dazu dienen, die Verpackung vor beispielsweise zu schneller Versprödung zu bewahren.

3.7 Diskussion der Verpackungsarten

In diesem Abschnitt werden die Handhabungsmethoden für die Bitumenkaltlagerung dargestellt und teilweise untersucht und weiterentwickelt. Es wurde zunächst die Abhängigkeit des Abfüllverfahrens von den Materialeigenschaften der Bitumenverpackung dargelegt, anschließend wurden ausgewählte Verpackungsarten genauer hinsichtlich ihrer technischen Defizite analysiert, um sie anschließend weiterzuentwickeln. Die Versuchsreihen zu den Bitumenverpackungsvarianten, haben im Wesentlichen zwei neue Innovationen hervorgebracht: In Zusammenarbeit den Projektpartnern gelang es eine Folie zu entwickeln, die die derzeit marktüblichen Produkte hinsichtlich ihrer Löslichkeit bei der Wiederverflüssigung übertrifft. Darüber hinaus konnte ein standfestes stapelbares Kartongebinde entwickelt werden, dass mit dem Namen STRABOX versehen wurde. Damit wurden die gängigen Verfahren der Bitumenverpackung genau an der Stelle für den Asphaltstraßenbau weiterentwickelt, an der bisher der größte Entwicklungsbedarf vorhanden war. Allerdings stellte sich auch heraus, dass eine Vielzahl von technischen Kriterien bei der Wahl einer geeigneten Verpackung beachtet werden müssen. Diese über die zu Anfang genannten Kriterien hinausgehenden technischen und ökonomischen Kriterien sind in Tabelle 3-6 dargestellt, wobei Verhältnismäßig wichtige Kriterien sind grau hinterlegt sind. Hieraus wird auch deutlich, inwieweit logistische Randbedingungen bei der Wahl einer geeigneten Verpackung Einfluss nehmen sollten.

3. Handhabungsmethoden zur Lagerung des Bitumens bei Kalttemperatur

		Alle Kriterien	wichtige Kriterien
200 Liter Fass	x	Punktesumme: 107	19
Kunststoffgebinde	x	Punktesumme: 104	28
Kartongebinde	x	Punktesumme: 119	29
Transportcontainersystem	x	Punktesumme: 111	26

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Robustheit thermisch	nur bei < 110 °C befüllbar	x								x x x	auch bei 200 °C, kein Problem aus TKW
2	Aufwand bei Befüllung	extra Abfüllanlage notwendig	x								x x x	aus TKW mit Schutzkleidung
3	Abkühlverhalten	ungünstige Geometrie, muss extra ins Abkühlager			x						x x x	kann mit heißem Inhalt verladen werden
4	Geometrie gestaltbar	fest vorgeschrieben	x x				x	x				kann vor Ort modifiziert werden
5	Handhabbarkeit	schweres Spezialgerät ist nötig		x		x			x	x		kann ein Mann leicht handhaben
6	Gebindekosten	über 100 €/t	x	x			x	x				unter 10 €/t
7	Stapelbar	nicht stapelbar				x	x		x	x		quasi unendlich viele Lagen
8	Bewitterbarkeit	Lagerzeit selbst unter Dach beschränkt			x	x				x	x	Lagerung dauerhaft im Freien möglich
9	Transportierbarkeit	Sondermaße						x	x	x	x	gängige Abmessungen der int. Logistik
10	Raumausnutzung b. Transport	Platzausnutzung < 80 %	x					x		x	x	100 % Raumausnutzung
11	Masseausnutzung b. Transport	Verpackung macht mehr als 50 M%			x			x		x	x	Verpackung ist quasi gewichtslos
12	Robustheit mechanisch	empfindlich gegen mechanische Beanspruchung	x					x x			x	Gebinde übersteht Sturz aus 3 m Höhe
13	Erwärmbarkeit	nur ein spezielles Erwärmverfahren möglich								x x	x x	Erwärmung der Verpackung möglich
14	Entpacken	nicht mehr entpackbar	x			x	x					leicht in heißen und kalten Zustand möglich
15	Neuartigkeit	ähnlich zu bestehenden Verpackungssystemen	x	x						x	x	neue Innovation
16	Erfahrung	keine Erfahrung mit System			x	x				x	x	umfassende Praxiserf. in Deutschland vorhanden
17	Resourcechonend	Material ist recourcenintensiv		x	x		x			x		ökologische Verpackung
18	Formstabilität	dauerhaft instabil								x x	x x	verformt sich nicht
19	Wiederverwendbarkeit	nicht wiederverwendbar	x		x					x	x	mehr als 10 mal verwendbar
20	Recyclebar	Recycling unmöglich				x	x	x			x	leicht recyclebar oder muss nicht recyclet werden

Tabelle 3-6: Vergleichende Bewertung verschiedener Bitumenverpackungen auf einer Werteskala von 1 bis 10

Im Wesentlichen haben sich 20 Kriterien herausgestellt, die Einfluss auf die Wahl einer Verpackung für die Bitumenkalthandhabung nehmen können. Teilweise sind sie nicht ganz unabhängig voneinander zu betrachten (Beispiel: „thermische Robustheit“ der Verpackung und „Aufwand bei Befüllung“). Ihnen ist eine Werteskala von null bis neun zugeordnet, wobei null Punkte die schlechteste Bewertung (Beispiel: Verpackung „nicht wiederverwendbar“) und zehn Punkte die bestmögliche Bewertung (Beispiel: Verpackung ist „mehr als zehn Mal wiederverwertbar“) darstellt. Es wird für die vier hier untersuchten Verpackungen eine Punktesumme gebildet. Einige Entscheidungskriterien sind im Allgemeinen von vergleichsweise größerer Bedeutung, wodurch die Punkte hier ein zweites Mal nur für diese hinterlegten „wichtigen Kriterien“ gebildet werden.

Die Aussagekraft der Punktesummen ist allerdings kritisch zu sehen, da die Entscheidungen je nach Randbedingungen und Anforderungen der Baumaßnahme im Einzelfall getroffen werden müssen. Das beste Beispiel hierfür ist eine Auslandsbaustelle, für die Bitumengebinde von einem Muldenkipper über eine verhältnismäßig lange nicht asphaltierte Piste angeliefert und anschließend abgekippt werden. In einem solchen Fall wird neben den Gebindekosten vor allem deren Robustheit (Kriterium 12 in Tabelle 3-6) stark in die Entscheidung einfließen. Die Strabox wäre in diesem Fall trotz der hohen Zahl an allgemeinen Bewertungspunkten ungeeignet. Insbesondere die genannten Kosten für die Verpackung spielen eine fundamentale Rolle bei der Wahl. Deshalb sollte aus den Punktesummen hier noch keine allgemeine Empfehlung abgeleitet werden und später nochmals gesondert auf diesen Aspekt eingegangen. Welches System unter welchen Randbedingungen zum Einsatz kommen soll, ist also nicht zuletzt auch einer ökonomischen Betrachtung überlassen, die im letzten Abschnitt dieser Arbeit durchgeführt wird.

4 Herstellung des Bitumenkörpers aus einem erkalteten Bitumenvorrat

Die Oberfläche der Festbitumenkörper spielt für die erforderliche Dauer bis zu ihrer vollständigen Verflüssigung eine entscheidende Rolle. Es stellt sich somit die Frage, wie durch eine technisch und wirtschaftlich realisierbare Zerkleinerungsmethode die Oberfläche des in den Kartonagen gelagerten erkalteten Bitumens maximiert werden kann, um auf diese Weise den Energieeinsatz und den Zeitaufwand bei der Wiedererwärmung so gering wie möglich zu halten. Dieser Prozessschritt muss der Verflüssigung direkt vorangestellt werden, da sich in der Praxis jegliche Transport- und Lagerformen eines nicht modifizierten Bitumengranulats als nicht realisierbar herausgestellt haben (Abbildung 44). Vielmehr „verbacken“ die Bitumengranulate trotz hoher Gesteinsmehlzugabe.



Abbildung 44: Ursprünglich granulierter verklebter Trinidad-Naturasphalt

Die im Folgenden dargestellten Formen der Bitumenzerkleinerung werden in konventionelle (Abschnitt 4.1) und moderne (Abschnitt 4.2) Arten der Zerkleinerung unterteilt. Dabei soll aufgezeigt werden, wie sich die theoretisch denkbaren Methoden der Zerkleinerung verfahrenstechnisch in der Praxis umsetzen lassen.

4.1 Konventionelle Zerkleinerungsmethoden

Als erste Variante der Zerkleinerung des kalten Bitumens ist theoretisch ein Zersägen denkbar. Die Reibung der Sägeblätter am Baustoff erzeugt allerdings Wärme, die ein Schmelzen und damit ein Verkleben des Baustoffs an der Schnittstelle bewirkt. Durch eine Wasserkühlung lässt sich dieser Effekt zwar reduzieren, allerdings dringt das Kühlwasser

4. Herstellung des Bitumenkörpers aus einem erkalteten Bitumenvorrat

nicht bis zu den Zähnen der Säge vor, wodurch diese in jedem Fall vom Bitumen zugesezt werden.

Ein weiteres Verfahren der Bitumenzerkleinerung, das sich die starke Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Bindemittels zunutze macht, ist die Zerkleinerung mittels Heißdraht. Um die Praxistauglichkeit dieser Variante bewerten zu können, wurde ein zinkbeschichteter Eisendraht mit einem Durchmesser von einem Millimeter über einer Gasflamme bis zur Rotglut erwärmt. Anschließend wurde versucht, einen Bitumenquader an einer 16 Quadrat-zentimeter großen Schnittfläche zu durchtrennen.

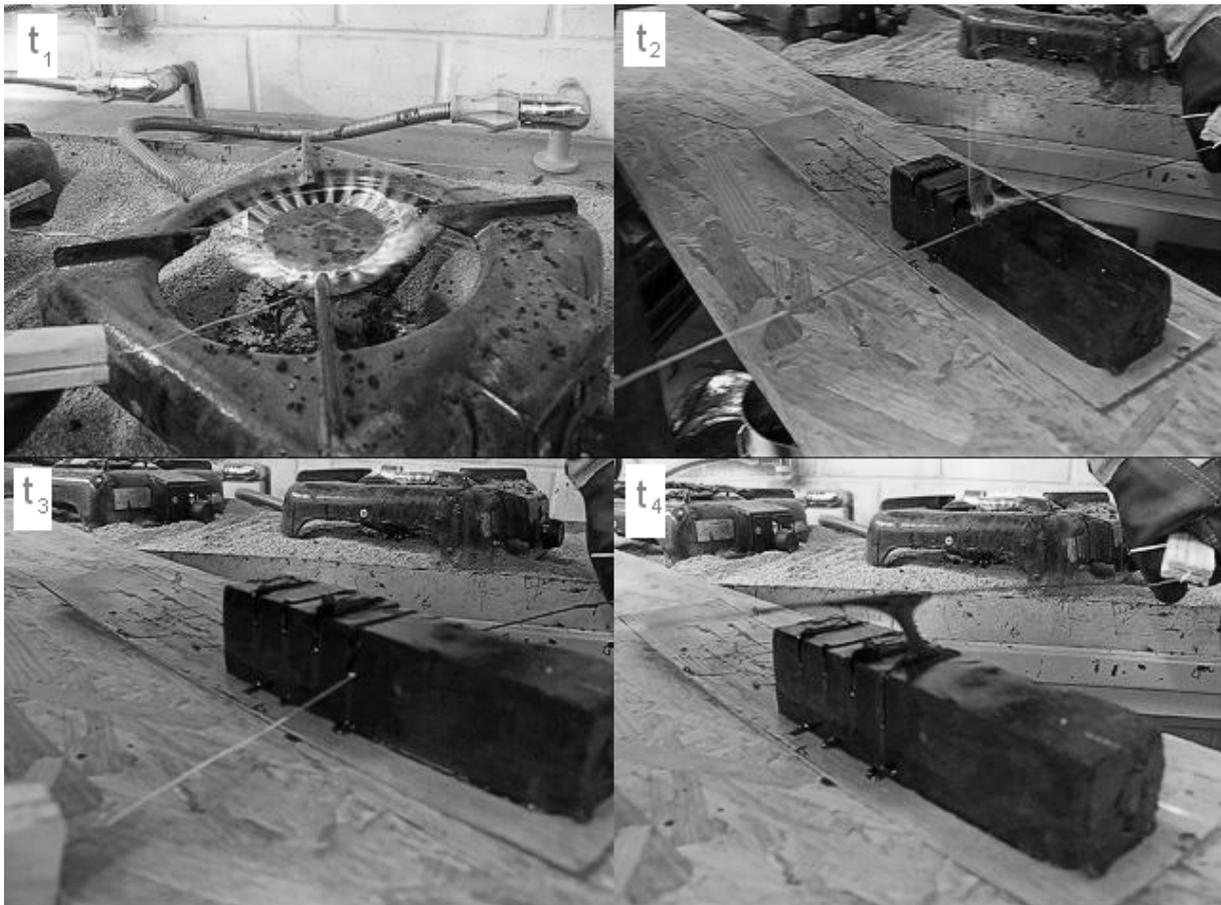


Abbildung 45: Erhitzung; Rauchentwicklung; Schnitt bis zum Versotten; Entfernen des Glühdrahts

Es gelang mit rotglühendem Draht (Temperatur ca. 525 °C [Hi06]), den Baustoff (50/70) bis auf die Hälfte seines Querschnitts zu schneiden. Es wurden außerdem folgende Phänomene beobachtet (Abbildung 45, Abbildung 46):

- 1) starke Rauchentwicklung beim Schnitt,
- 2) Verkleben der Schnittflächen über dem Glühdraht,

4. Herstellung des Bitumenkörpers aus einem erkalteten Bitumenvorrat

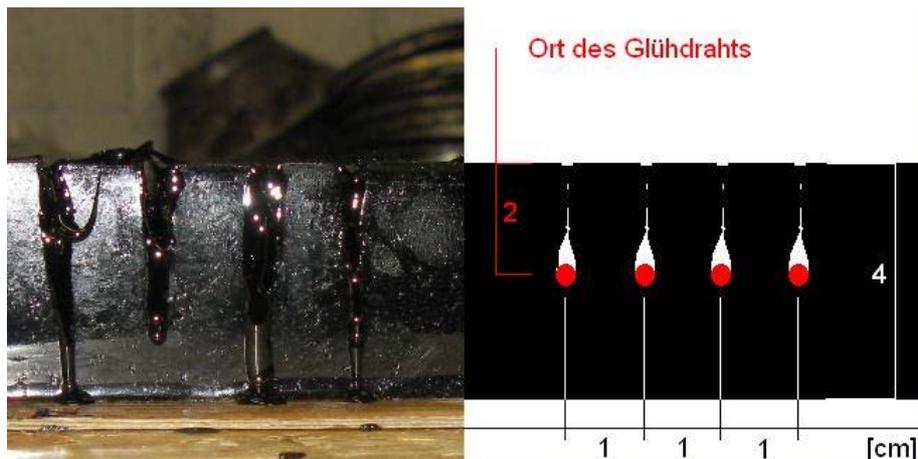


Abbildung 46: Foto links: Schnittstellen nach Glühdrahtversuch. Heißflüssiges Bitumen ist seitlich herabgeflossen und die Schnittflächen sind verklebt. Rechts: Prinzipskizze

- 3) schnelles Abkühlen des Glühdrahts an der Luft: 25 Sekunden zur Grauglut (ca. 400 °C [Hi06]),
- 4) Verkleben des Glühdrahts mit dem Bindemittel,
- 5) seitliches Abfließen von verflüssigtem Bitumen.

Um das schnelle Abkühlen des Metalls und das Verkleben des Glühdrahts zu verringern, wurden die Versuche mit einem heißen Spachtel als Trennwerkzeug wiederholt (Abbildung 47). Tatsächlich speicherte die Metallfläche die Wärmeenergie besser und machte es so möglich, das Bindemittel zu durchtrennen. Die Untersuchung des durch die sehr hohe und zudem unzulässige Hitze (max 220 °C [EnIn05]) beanspruchten Baustoffs ergab einen Erweichungspunkt (RuK.) von 55 (vorher 50). Die große Hitze dieses Verfahrens hatte zu energetischer und destillativer Alterung geführt. Es ist außerdem zu vermuten, dass das Verfahren auch in Großapplikationen energetisch aufwendig und damit unwirtschaftlich ist.

Die Idee, Bitumen in einem tiefen Temperaturbereich durch Schläge, beispielsweise in einem Prallbrecher zu granulieren, wurde nach kurzen Überlegungen verworfen. Die erforderliche Sprödigkeit ist selbst bei harten Bitumen erst bei sehr niedrigen Temperaturen gegeben (Abbildung 48). Um eine Tonne Bitumen um einen Grad Celsius abzukühlen, muss dem Baustoff eine Wärmeenergie von ca. 1,8 Megajoule entzogen werden. Einen derart aufwendigen Prozessschritt zwischenschalten, der zudem der eigentlichen Gesamtaufgabe, einer schnellen Wiederverflüssigung des Baustoffs entgegenwirkt, ist wirtschaftlich nicht vertretbar.

4. Herstellung des Bitumenkörpers aus einem erkalteten Bitumenvorrat

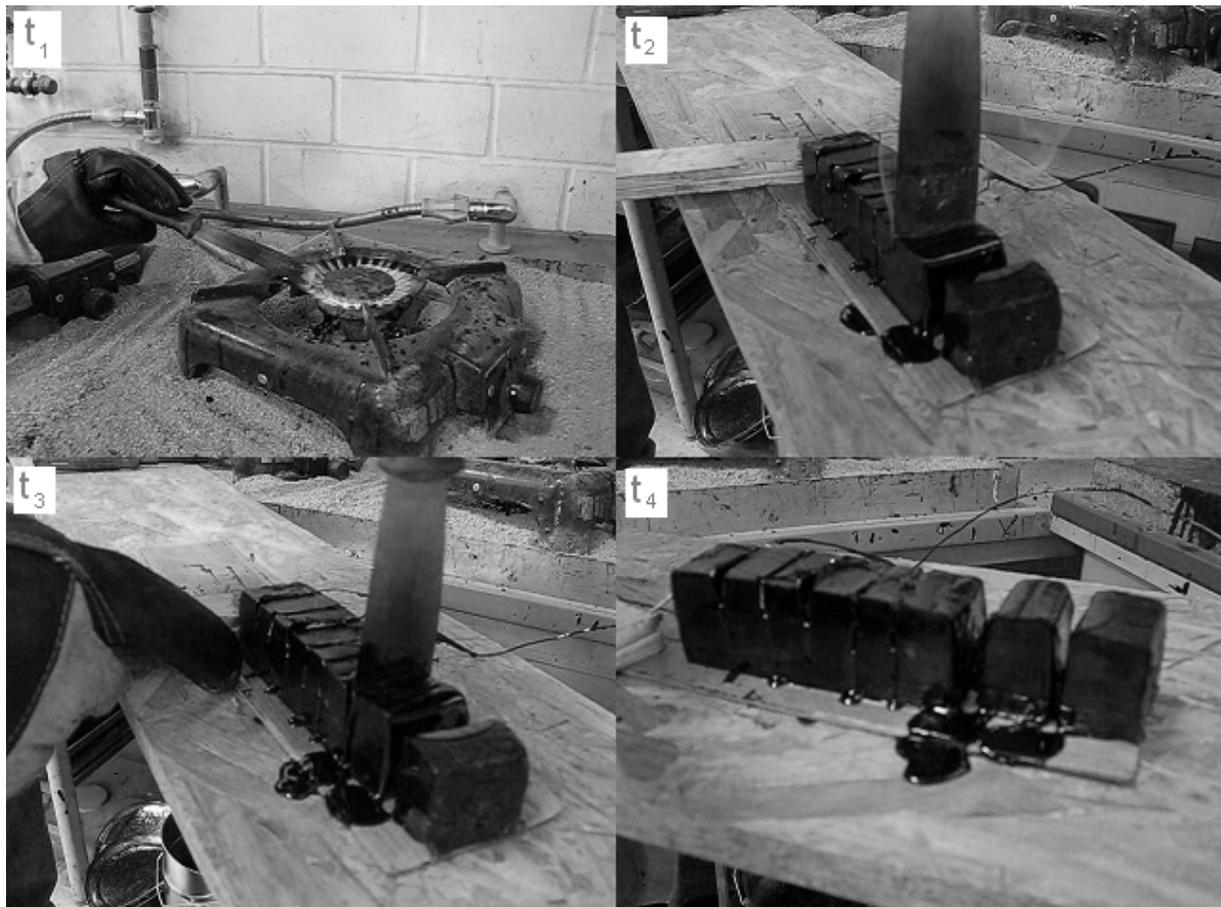


Abbildung 47: Miniaturversuch: Schneiden mit Glüh-Scheibe

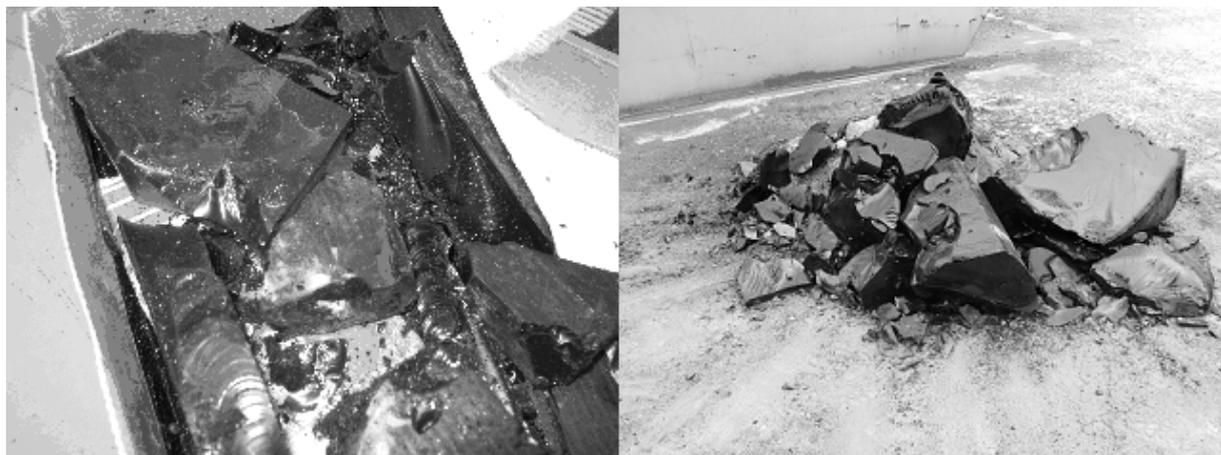


Abbildung 48: Spröde brechendes Bitumen 50/70 links bei -17 °C und rechts bei +4 °C

In der ehemaligen östlichen Staatengemeinschaft wurde Bitumen aufgrund infrastruktureller Probleme oft kalt gelagert. Hierzu wurden oft Erdgruben ausgehoben oder vorhandene tekto-

4. Herstellung des Bitumenkörpers aus einem erkalteten Bitumenvorrat

nisch bedingte Senken genutzt, in die das Bindemittel abgefüllt wurde. Bei Bedarf lassen sich solche großen Bitumenvorkommen mit einem Hydraulikbagger abbauen (Abbildung 49).



Abbildung 49: Ein Bagger entfernt Bitumen aus einem Erdgrubenlager (Archivbild STRABAG SE)

Bei der Wahl einer ausreichend kleinen Schaufelgröße ist diese eine technisch mögliche Variante, zu niedrigen und leicht kalkulierbaren Kosten Verflüssigungseinheiten zu erzeugen. Auch heute wenden einige kleinere Betriebe das Verfahren noch an. Zum Lösen des Bitumens aus solchen Seen wurde teilweise auch Wasserdampf genutzt. Vom Dampfkessel aus wurde der Dampf zur Abbaustelle im Bindemittelvorkommen geleitet. Das durch den Dampfwärmeeintrag verflüssigte Bitumen wurde über einen Absaugrüssel abgezogen. Die Lagerung von Bitumen in offenen Seen und die Verflüssigung mit Hilfe von Wasserdampf wird zu einer starken Bitumenalterung führen und ist deshalb mit einem heute geforderten Qualitätsmanagement in keiner Weise zu vereinen.

4.2 Moderne Arten der Bitumenzerkleinerung

Theoretisch ist eine Zerkleinerung des Bitumens auch mittels Lasertechnik denkbar. Es gibt aber in der Praxis mehrere Gründe, die das Schneiden mittels Laser für die hier benötigte Anwendung ausschließen.

- Es wird eine unverhältnismäßig hohe Primärenergiemenge benötigt. So bedarf ein 1,8 KW Laser, mit dem ca. 9 mm dicke Bitumenkörper geschnitten werden könnte, 40 KW Leistung. Zusätzlich werden Sauerstoff, Stickstoff und Helium verbraucht.
- Die Laser-Schneidanlagen sind nur insofern mobil, als nach einer ca. zweitägigen Aufbauzeit eine bis zu dreitägige Kalibrierung nötig ist.

4. Herstellung des Bitumenkörpers aus einem erkalteten Bitumenvorrat

- Die hohen Temperaturen an der Schneidfläche sind für das Bitumen unverträglich.
- Die Anlagentechnik weist insbesondere hinsichtlich Temperaturschwankungen keine ausreichende Robustheit auf.

Eine weitere neue Art der Formgebung von Werkstoffen stellt das Schneiden mittels Wasserstrahl dar. Diese besondere Form des Kaltschneidens wird immer dann eingesetzt, wenn Werkstücke bei Wärmeentwicklung im Schneidprozess nur unzureichend geschnitten werden können. Besonders wirtschaftlich ist der Einsatz bei Einzelstücken und bei kleineren bis mittelgroßen Produktserien [Öj06]. Die in Schweden durchgeführten Versuchsreihen (Abbildung 50) zum Schneiden von Bitumen lieferten bei 2.500 Bar Pumpendruck auf einer Düse die Möglichkeit, 100 Millimeter dicke Bitumenstücke kalt zu schneiden.

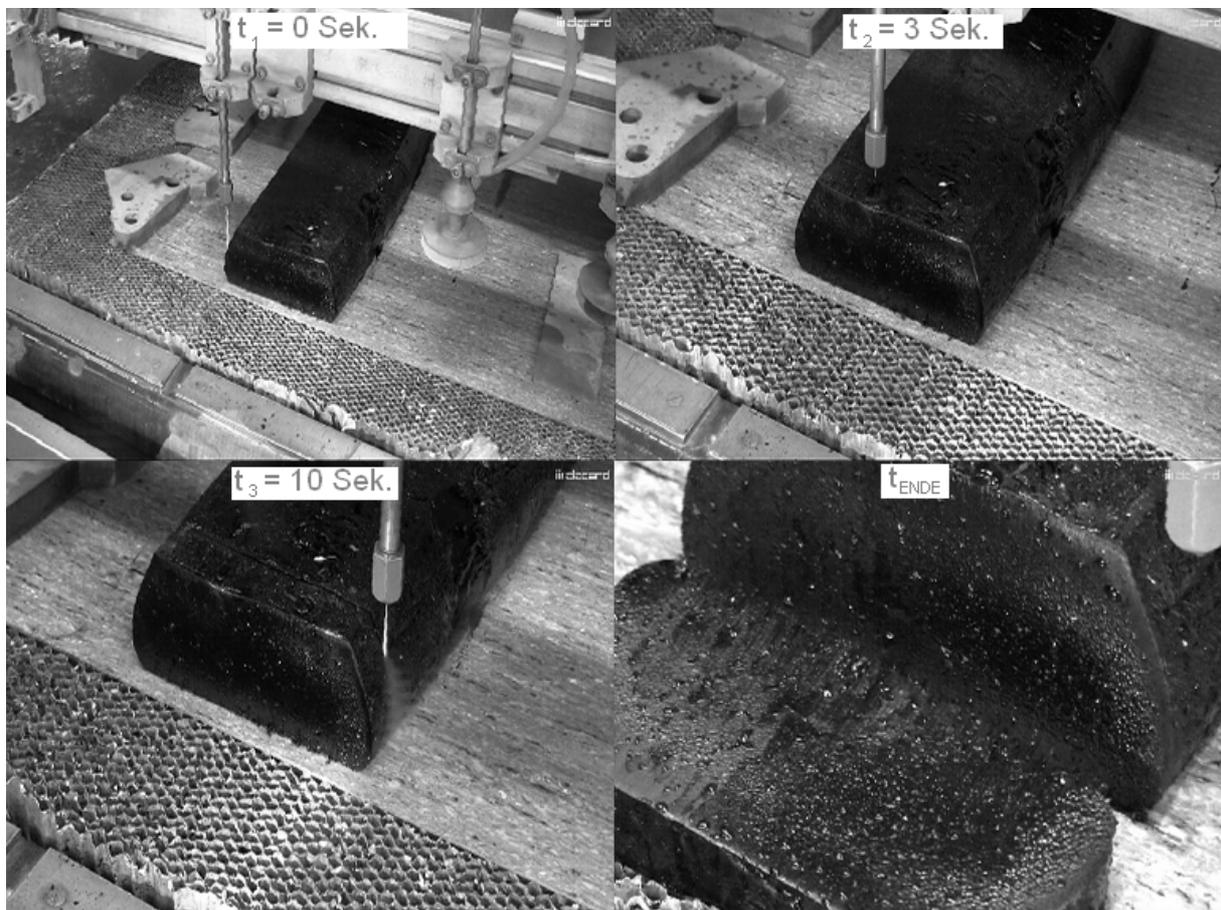


Abbildung 50: Ausschnitte aus einem Dokumentationsvideo zum Bitumenschneiden mittels Hochdruckwasserstrahl

Derartige Bearbeitungen sind bis zu einer Länge von 3,5 Metern möglich. Eine Durchsatzleistung von 12 Tonnen pro Stunde (Bedarf einer großen Asphaltmischanlage) bei ca. 200 Liter umfassende Bitumenscheiben ist dann mit sechs Düsen möglich. Ein großer Vorteil dieser

4. Herstellung des Bitumenkörpers aus einem erkalteten Bitumenvorrat

Anlagen ist die Tatsache, dass sie in vier Stunden aufgebaut werden können. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist dieses Verfahren allerdings nicht sinnvoll. Energiekosten, Abschreibung und Verschleiß einer geplanten Bitumenschneidanlage mit Hochdruckwasserstahl sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

	Wert	Einheit
Verschleiß	4,50	€/t
Lineare Abschreibung	ca. 17,-	€/t
Energiebedarf	ca. 1,-	€/t

Tabelle 4-1: Aufwendungen beim Hochdruckwasserstahlschneiden bei 10.000 t Jahresproduktion

Insgesamt ist bei einer Jahresproduktionsmenge von 10.000 Tonnen Bitumen mit einem Aufwand allein aus dem Schneidprozess von ca. 22,50 Euro pro Tonne zu rechnen. Während also diese Variante des Bitumenschneidens unter technischen Gesichtspunkten durchaus realisierbar ist, erscheint eine Realisierung nach Betrachtung der monetären Aspekte nicht empfehlenswert.

4.3 Fazit zum Bitumenschneiden

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die anfangs beschriebene Problemstellung zur Bitumenzerkleinerung nicht zufriedenstellend gelöst werden konnte. Während die meisten Verfahren wie Sägen, Dampflosen, Brechen und Laserschneiden technisch (bzw. unter Qualitätsgesichtspunkten) bei einem hinsichtlich seiner Eigenschaften und Qualitätsanforderungen speziellen Werkstoff wie Bitumen nicht realisierbar sind, schließt sich das Schneiden mittels Wasserstrahl aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten aus. Dies bedeutet, dass für die im Rahmen dieses Projekts geplante Logistikkette auf eine Vorzerkleinerung des Bitumens zur Erstellung einer großen und damit energiesparenden Oberfläche bei der Verflüssigung verzichtet werden muss, beziehungsweise der Baustoff in der Form abgefüllt werden soll, aus der heraus er am Ende wiederverflüssigt wird.

5 Die konventionelle Verflüssigung

Thermischen Vorgängen in Anlagen zur Wiederverflüssigung von Asphaltbindemitteln beeinflussen den Anlagenwirkungsgrad und damit die Energiekosten direkt über Wärmeverluste. Darüber hinaus wird auch die Durchsatzleistung einer Anlage durch die Geschwindigkeit der Schmelzvorgänge in ihr determiniert. Somit nehmen thermische Vorgänge auch indirekt über Taktzeiten Einfluss auf die betriebswirtschaftlichen Erträge der Produktionsstätten. Deshalb sind die beiden technischen Größen der Taktzeiten und der Wärmeverluste in Bitumenverflüssigungsanlagen Gegenstand dieses Abschnitts. Darüber hinaus beeinflussen geometrische Parameter den Erwärmungsvorgang und die Anlagenverluste. Die Untersuchung dieser geometrischen Einflussgrößen ist besonders dahingehend interessant, dass sie in der jungen Technologie der Bitumenkalthandhabung an vielen Stellen noch leicht modifiziert werden kann. Folglich wird auch auf geometrische Einflussgrößen ein Untersuchungsschwerpunkt gelegt. Abschließend soll auch eine Aussage über die Auswirkung thermophysikalischer und geometrischer Größen auf die technische Funktionsweise und Wirtschaftlichkeit möglich sein.

5.1 Begriffsdefinitionen

Es gibt drei Mechanismen der Wärmeübertragung, Wärmeleitung (Konduktion), Wärmeströmung (Konvektion) und Wärmestrahlung (Radiation) [BaKrSch07]. Die Begriffe Konduktion und Konvektion sind in der Fachliteratur teilweise unterschiedlich definiert. So schreiben Groth und Müller [GrMü09] zu Wärmeleitung (Konduktion):

„Wärmeleitung (auch Konduktion, eng l. conduction) ist ein physikalischer Effekt, bei dem zwischen benachbarten Molekülen eines Stoffes Schwingungsenergie und kinetische Energie der Leitungselektronen durch Stöße übertragen wird. Dieser Effekt ist nur im Inneren oder an Oberflächen, die sich direkt berühren, von Bedeutung, während in Flüssigkeiten und Gasen meistens andere Effekte (Konvektion) überwiegen“

Auch heißt es hier weiter:

„Mit Wärmeübergang (auch Konvektion, engl. convection) wird die Übertragung von Wärme bezeichnet, bei der Flüssigkeits- oder Gasteile Energie an einer Stelle aufnehmen, sich dann zu einer anderen Stelle hinbewegen und dort die Energie wieder abgeben (oder umgekehrt). Der Energietransport findet daher mit Hilfe von Materialtransport statt. In technischen Anwendungen sind überwiegend Fälle zu berücksichtigen, bei denen an den Oberflächen von festen Bauteilen ein Wärmeübergang zu der umgebenden Flüssigkeits- oder Gasmaterie erfolgt.“

5. Die konventionelle Verflüssigung

Auch bei Bannwarth, Kremer und Schulz [BaKrSch07] heißt es:

„Wärmeleitung bezeichnet den Wärmetransport durch „Weitergeben der Bewegung“ der Teilchen in einem Körper oder Stoff, der fest, flüssig oder gasförmig sein kann“

und:

„Wärmetransport durch den Transport warmer Materie wird Wärmeströmung oder Konvektion genannt. Sie kann daher nur in Flüssigkeiten oder Gasen wirken.“

In einem 1915 von Nusselt verfassten Aufsatz allerdings heißt es:

„Es wird vielfach in der Literatur behauptet, die Wärmeabgabe eines Körpers habe drei Ursachen: die Strahlung, die Wärmeleitung und die Konvektion. Diese Teilung der Wärmeabgabe in Leitung und Konvektion erweckt den Anschein, als hätte man es mit zwei unabhängigen Erscheinungen zu tun. Man muss daraus schließen, dass Wärme auch durch Konvektion ohne Mitwirkung der Leitung übertragen werden könnte. Dem ist aber nicht so.“

Hieraus leiten Böckh und Wetzel [BöWe11] die Regel ab:

„Die Wärmeübertragung kann durch Wärmeleitung und Strahlung erfolgen.“

Und sie schlagen daher vor:

„Wärmeleitung entsteht in Stoffen, wenn in ihnen ein Temperaturgradient vorhanden ist. Bezüglich der Berechnung wird zwischen ruhenden Stoffen (feste Stoffe oder ruhende Fluide) und strömenden Fluiden unterschieden. (...) Zur Unterscheidung der Berechnung nennt man die Wärmeübertragung zwischen einer Wand und einem strömenden Fluid Wärmeübertragung bei Konvektion oder kurz nur Konvektion. [BöWe11] „

Der Wärmetransport soll daher hier als Mittel der Wärmeübertragung verstanden werden womit eine Trennung zwischen Konvektion und Konduktion erfolgen kann. Die Begriffe werden für diese Arbeit wie folgt definiert:

Bei der Wärmeleitung vollzieht sich der Wärmeenergietransport durch Wechselwirkung zwischen Teilchen (Atomen oder Molekülen), wobei aber kein Stofftransport auftritt. Konvektion bedeutet das Mitführen von Wärme durch Stofftransport. Die Konvektion beschreibt den Transport von Wärmeenergie, die an die Strömung eines Mediums gebunden ist. Dabei kann die Strömung von äußeren Kräften erzwungen werden (Umwälzpumpen, Rührwerk) oder sich als eine Strömung als Folge von Dichteunterschieden innerhalb eines Stoffes als freie Konvektion einstellen. Wärmetransport durch Wärmestrahlung ist an keinen materiellen Träger gebunden. Hierbei emittiert oder absorbiert der Körper Energie in Form von Infrarotstrahlung, die jeder andere Körper wiederum absorbiert und emittiert. Tabelle 5-1 liefert eine Übersicht über die Mechanismen der Wärmeübertragung.

5. Die konventionelle Verflüssigung

Konvektion	Konduktion	Radiation
Wärmeströmung	Wärmeleitung	Wärmestrahlung
mit Materialtransport	ohne Materialtransport	ohne Materialtransport
Wärmeübertragung nur durch flüssige oder gasförmige Stoffe	Wärmeübertragung durch feste, flüssige oder gasförmige Stoffe	Wärmeübertragung durch IR-Strahlung
innerhalb eines Stoffes	innerhalb eines Stoffes an berührenden Oberflächen	zwischen Stoffen

Tabelle 5-1: Überblick über Mechanismen der Wärmeübertragung

5.2 Mathematische und physikalische Untersuchungen zur Verflüssigungsdauer

Als konventionelle Methoden der Baustoffverflüssigung werden hier all jene Techniken bezeichnet, die bereits bei Beginn dieses Projekts Stand der Technik in der Praxis waren. Es handelt sich hierbei um Verfahren, die auf konduktiven und konvektiven oder ausschließlich konduktiven Erwärmungsprozessen basieren. Aus der Praxis ist hier vor allem der auf Auslandsbaustellen übliche Fassschmelzer oder der Schmelztopf zu nennen. Der Schmelztopf ist ein Behältnis, in dem eine bestimmte Menge an heißflüssigem Bitumen mittels Thermalölheizung oder einem Brenner-Flammrohr-System vorgehalten wird. Der heißflüssige Inhalt des Schmelztopfs, der im Folgenden auch „Schmelze“ genannt wird, dient dazu, einen gleichmäßigen Wärmeeintrag in die Bitumenkalteinheiten, die den Schmelztopf zugegeben werden, sicherzustellen. Die Bitumenkalteinheiten schmelzen in den Taktzeiten ihrer Zugabe auf und ein kontinuierliches Abpumpen des heißflüssigen Bindemittels wird möglich.

In diesem konventionellen Erwärmungsprozess liegen zwei Betriebsphasen in der Anlage vor:

Betriebsphase I: Aufheizen einer großen Bitumenmenge zur Schmelze.

Betriebsphase II: Halten einer konstanten Temperatur in der Schmelze und Zugabe von kaltem Bitumen.

Für die **Betriebsphase I** liegen in der Praxis Erfahrungswerte vor, da in zahlreichen Asphaltmischanlagen die Bitumentanks im Winter für ca. einen Monat heruntergefahren werden. Nachdem die dort gelagerte Bitumenmenge heruntergekühlt ist, muss sie wieder erwärmt werden. Hierzu ist laut Read und Whiteoak insbesondere die Temperatur an den Heizelementen zu überwachen [ReWh03]. Diese Temperatur darf einen Maximalwert von 300 °C nicht übersteigen und sollte zunächst so niedrig gehalten werden, dass der Baustoff lediglich seine Erweichungstemperatur erreicht. Dann tritt automatisch ein Effekt ein, der die

5. Die konventionelle Verflüssigung

weitere Erwärmung beschleunigt: Das verflüssigte Bitumen beginnt zu zirkulieren [ReWh03]. Bei neueren Anlagen wird das frühe Eintreten dieses konvektiven Prozesses durch eine geschickte Anordnung der Heißelemente beschleunigt. Die damit einhergehende Konvektion der Wärmeenergie macht es möglich, die Leistung der Heizelemente auf eine zweite, höhere Heizstufe zu bringen. Dies beschleunigt wiederum die Wärmekonvektion.

In **Betriebsphase II** gilt es, die hinzugegebenen Bitumenkaltblöcke in möglichst kurzer Zeit aufzuschmelzen. Die hierfür tatsächlich benötigte Zeitdauer ist die entscheidende Zielgröße, der im Rahmen dieses Abschnitts nachgegangen werden soll. Diese Zeitdauer (Taktzeit) zwischen den Zugabezeitpunkten von kaltem Bitumen aus dem Lager in die Schmelze ist für die ökonomische Gestaltung des Produktionsprozess von entscheidender Bedeutung. Somit kann durch die thermophysikalische Berechnung auch die wirtschaftliche Effizienz der Verfahrensvariante, bei der ein Bitumenkörper noch zu definierender Abmessung und Form zu einer Bitumenschmelze mit wesentlich höherer Temperatur hinzugegeben wird, untersucht werden. Bei der Ermittlung der erforderlichen Zeitdauer handelt es sich um eine klassische Aufgabenstellung der Wärmelehre. Da der Temperaturverlauf zeit- und ortsabhängig ist, liegt ein instationäres Wärmeleitproblem vor, dessen Lösung gemäß Baehr und Stephan [BaSt06] auf drei Arten gefunden werden kann:

1. durch praktische Versuche (Abschnitt 5.3),
2. als geschlossene Lösung der partiellen Wärmeleitungsdifferentialgleichung unter Erfüllung der Randbedingungen (Abschnitt 5.4),
3. als numerische Simulation am Computer beispielsweise mit Hilfe der Methode der finiten Elemente (Abschnitt 5.5).

5.3 Versuche zur Bestimmung der Verflüssigungsdauer

5.3.1 Versuchsplanung zum Verflüssigungsverhalten

Ziel der Versuchsreihe ist es, das Aufschmelzverhalten von Bitumen in einer Schmelze zu ermitteln und genau zu dokumentieren und damit zu einem späteren Zeitpunkt eine EDV-unterstützte Berechnung im Rahmen einer Validierung anpassen zu können. Der Untersuchungsparameter ist die Zeit, in der sich das Bitumen in der Schmelze löst. Es ist aus Vorversuchen bekannt, dass die Abkühlkurve durch das Oberflächen-Volumen-Verhältnis der zugegebenen Bitumeneinheiten beeinflusst wird. Während sich beispielsweise Granulat aufgrund seiner großen Oberfläche schnell löst, benötigt ein Bitumenquader von einem Kubikmeter Volumen viel Zeit, bis über seine verhältnismäßig geringe Oberfläche die Wärme der Schmelze in ihn einströmt. Der Zeitpunkt, zu dem der gesamte kalte Bitumenkörper ver-

5. Die konventionelle Verflüssigung

flüssigt worden ist, wird also durch seine Geometrie bestimmt. Die Energie allerdings, die benötigt wird, um das Bindemittel zu verflüssigen, ist unabhängig von der Oberfläche des kalten Bitumens. Sie bestimmt sich nach der Formel:

$$Q = m \cdot \Delta T \cdot c$$

Formel 5-1

Um nun die Aufnahme dieser Wärmeenergie bei verschiedenen Oberflächen-Volumen-Verhältnissen gegeneinander abzugrenzen, werden hier die Abkühlkurven verschiedener Bitumenkaltquader in Schmelze durch Messung der Behältertemperatur untersucht. Die Verflüssigungsdauer wird in derselben Versuchsanordnung durch das Einbringen von Thermoelementen in den Bitumenkaltkörper einer Untersuchung unterzogen. Ein schnelles Abfallen der Temperatur in der heißflüssigen Schmelze sollte auf eine starke Aufnahme der Wärme im kalt zugegebenen Bindemittel schließen lassen.

5.3.2 Versuchsdurchführung

Es werden Quader aus kaltem Bitumen in drei unterschiedlichen Größen aus Bitumensorte 70/100 (Gemäß DIN EN 1426 (2007)) hergestellt. Tabelle 5-2 stellt die vier Quaderklassen dar, die Modelle für die in der Praxis verwendeten Bitumenkalteinheiten sind. Die Versuche mit Modell-Probekörper, die im Verhältnis zu praktischen Anwendungen relativ klein sind, sollen es ermöglichen, Daten für eine konvergente Abschätzung der Verflüssigungszeiten von Großapplikationen zu gewinnen.

Zur Simulation des Auflösungsprozesses wurde ein Modell eines Schmelztopfs hergestellt. Es bestand aus einem Bitumeneimer, in dem ein Bitumen 70/100 bei einer Temperatur von 160 °C aufbewahrt wurde, und einer Wärmedämmung, die ein Abfließen der Wärme aus dem Versuchsbehälter möglichst gering halten sollte. Abbildung 51 zeigt den wärmege-
dämmten Versuchsbehälter.

Das kalte Bitumen wird in einem Drahtkorb vollständig in das heißflüssige Bitumen getaucht. (siehe Abbildung 52).

Der Abkühlungsprozess des heißen Bitumens wird mittels eines Chrom-Nickel-Thermoelements aufgezeichnet. In einer ersten Versuchsreihe wird die Probekörpergeometrie der kalten Bitumenprobe in drei Stufen variiert. Dabei wird das Volumen bzw. das Gewicht der Proben in allen Fällen beibehalten, während die Oberfläche des Probekörpers deutlich verändert wird. Das Oberflächen-Volumen-Verhältnis (A_{PK}/V_{PK}) in den Varianten des Versuchs lässt sich Tabelle 5-3 entnehmen.

5. Die konventionelle Verflüssigung

	Maße [cm]	Oberfl. $A_{\text{Hei\ss}}$ [cm ²]	Volumen $V_{\text{Hei\ss}}$ [cm ³]	A/V-Verhältn. [cm ⁻¹]	mittleres Gewicht [g]
Quaderklasse 1	16·4·4	288	256	≈ 1,13	256
Quaderklasse 2	16·4·9	488	576	≈ 0,85	576
Quaderklasse 3	16·4·14	688	896	≈ 0,77	896

Tabelle 5-2: Bitumenkaltquadereigenschaften für die Schmelzversuche



Abbildung 51: Dämmung für den Eimer, in dem sich die Schmelze beim Aufschmelz-/Abkühlversuch befindet

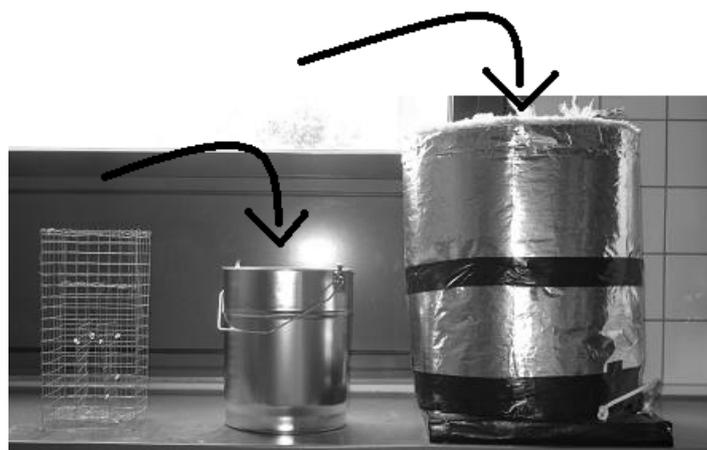


Abbildung 52: Bestandteile der Versuchsanordnung des Verflüssigungsversuchs

5. Die konventionelle Verflüssigung

Variante	Anzahl und Art der Quader nach Tabelle 5-2	A_{PK}/V_{PK} [1/cm]
1	3 x Quaderklasse 1	0,77
2	Quaderklasse 1 + Quaderklasse 2	0,93
3	1 x Quaderklasse 3	1,13

Tabelle 5-3: Versuchsanordnungen der Aufschmelzversuche

Die Datenreihen für die verschiedenen Oberflächen-Volumen-Verhältnisse werden hier aus mehreren Versuchen mit Bitumen 70/100 gemittelt und in Abbildung 53 dargestellt. Die Daten lassen aufgrund der Versuchsstruktur für den konkreten Anwendungsfall nur rein qualitative Aussagen zu. Sie verdeutlichen, wie stark gerade zu Anfang der Verflüssigung der Einfluss einer großen Bitumenoberfläche ist und wie stark dieser Prozess durch große Oberflächen beschleunigt werden kann. Um eine direkte Aussage über die Verflüssigungsdauer treffen zu können, werden in derselben Versuchsanordnung Versuche gefahren, bei denen sich das Thermoelement im Volumenschwerpunkt des kalten Bitumens statt in der Flüssigphase des Bitumens befindet. Mittelt man die so gemessenen Erwärmungskurven, erhält man den in Abbildung 54 dargestellten Kurvenverlauf.

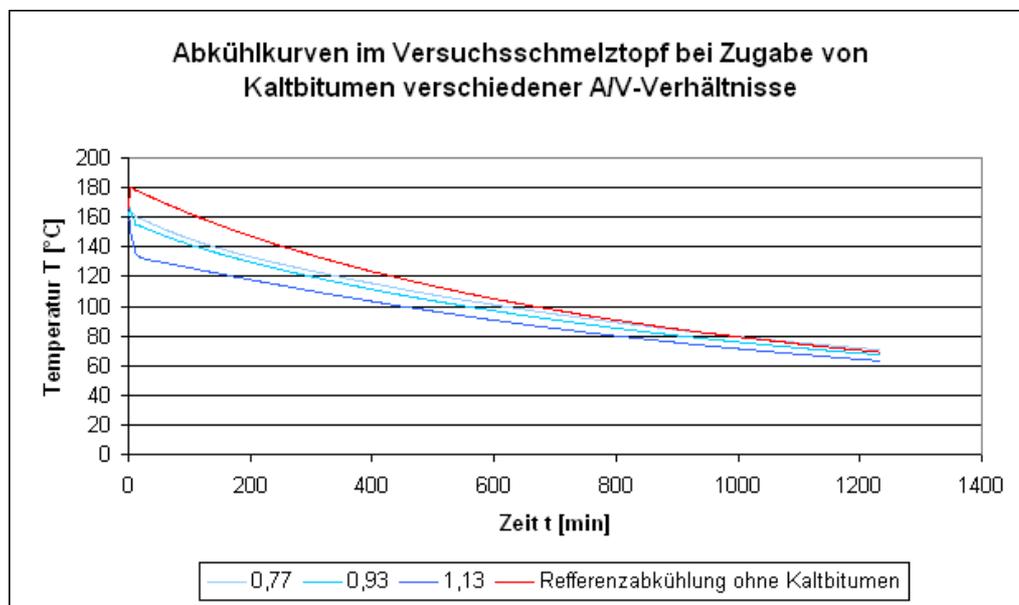


Abbildung 53: Gemittelte Temperaturverläufe an den in der Schmelze befindlichen Thermoelementen aus jeweils drei Schmelzversuchen mit Bitumenquadern 70/100 mit unterschiedlichen Oberflächen-Volumen-Verhältnissen

5. Die konventionelle Verflüssigung

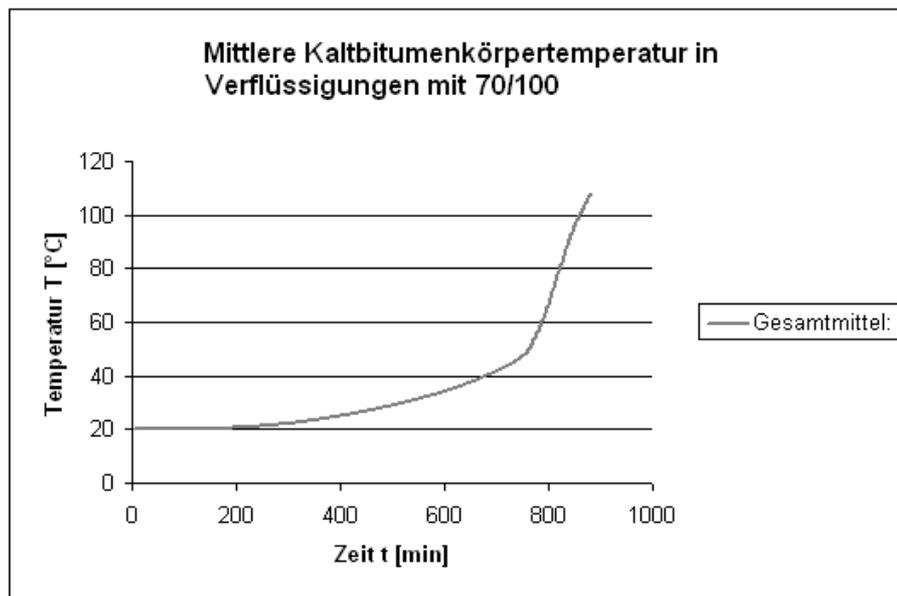


Abbildung 54: Mittel aller Temperaturkurven aus Verflüssigungsversuchen mit Thermoelement im kalten Bitumenquaderkern Quaderklasse 1

Demnach erfolgt beispielsweise das Überschreiten der Temperatur von 70 °C bei einem Quader mit den Abmessungen 16*4*4 Zentimeter (nach Tabelle 5-2 Quaderklasse 1) nach etwa 13 Minuten.

5.4 Geschlossene Lösung der partiellen Wärmeleitung zur Bestimmung der Verflüssigungsdauer

Mit Hilfe der im letzten Abschnitt erlangten Versuchsergebnisse können Berechnungsergebnisse überprüft werden. Um die Verflüssigungszeit von Bitumenquadern berechnen zu können, muss allerdings zunächst eine geeignete Berechnungsmethode eruiert werden. Hierzu sollen in diesem Abschnitt zunächst Lösungen der Wärmeleitungsdifferentialgleichung im Kontext des Stoffphasenübergangsproblems hergeleitet werden. Ziel der Berechnungen ist es erstens, ein grundlegendes Verständnis für die thermophysikalischen Zusammenhänge der Bitumenverflüssigung zu erlangen, zweitens diesen Verfahrensschritt auf Grundlage der Berechnungsergebnisse modellhaft und in der Praxis optimieren zu können und drittens auf Grundlage des Berechnungsmodells ein Werkzeug zu schaffen, das es im operativen Einsatz von Verflüssigungstechnologien ermöglichen soll die Verflüssigungszeiten und damit die Beschickungstaktzeiten zu berechnen.

5. Die konventionelle Verflüssigung

5.4.1 Grundlegendes zur Wärmeleitungsdifferentialgleichung und zum Stoffphasenübergangsproblem

Die geschlossene Lösung ist nur unter Annahme temperaturunabhängiger Stoffwerte möglich. Diese Annahme führt zur partiellen Differentialgleichung [Hi06].

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \nabla^2 \vartheta + \frac{\dot{w}}{c_p \cdot \rho}$$

Formel 5-2

$\frac{\partial \vartheta}{\partial t}$	Ableitung des Temperaturverlaufs nach der Zeit
a	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s]; $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ wobei die Wärmeleitfähigkeit $\lambda(\vartheta)$ W/mK] und die Wärmekapazität c als temperaturunabhängig angenommen werden.
$\nabla^2 \vartheta$	$= \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}$ (eindimensionale Darstellung); doppelte Ableitung des Temperaturverlaufs in x-Richtung
\dot{w}	Leistungsdichte [W/m ³]
c	spezifische Wärmekapazität $\frac{J}{kg \cdot K}$
c_p	isobare Wärmekapazität $\frac{J}{kg \cdot K}$
ρ	Rohdichte des Bitumens [kg/m ³]

Eine Herleitung dieser Formen lautete nach [GrSa90] wie folgt:

Das Gefälle (der Gradient) der Temperatur verursacht in einem Stoff mit der Wärmeleitfähigkeit λ nach Biot und Fourier eine Wärmestromdichte \dot{q} von

$$(1) \quad \dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta$$

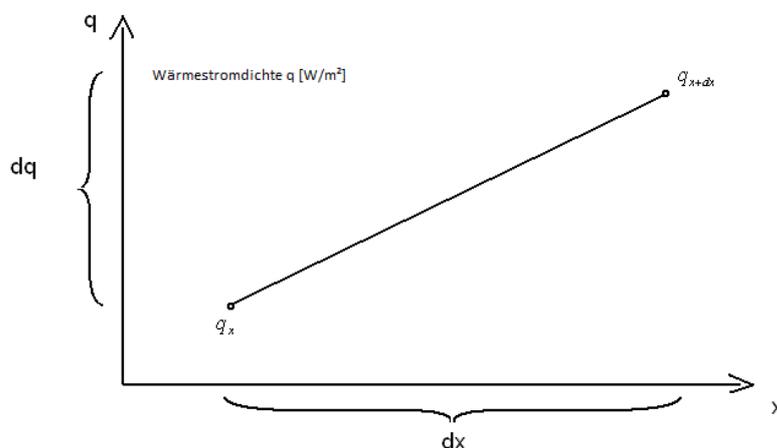


Abbildung 55: Wärmestromdichte in einem infinitesimalen Inkrement der Temperaturkurve

5. Die konventionelle Verflüssigung

Für ein infinitesimal kleines Inkrement des durchströmten Materials kann für die Wärmestromdichte der in Abbildung 55 aufgezeigte Zusammenhang wie folgt ausgedrückt werden:

$$(II) (\dot{q}_{x+dx} - \dot{q}_x) \cdot A \cdot dt = \frac{d\dot{q}_x}{dx} dx \cdot A \cdot dt$$

Im Inkrement innerhalb einer Phase gilt ferner für die Phasenthalpie, also für die benötigte Energie für einen Phasenwechsel eines Stoffes:

$$(III) dh = c_p \cdot \delta\vartheta$$

Hieraus folgt:

$$(II') \dot{q}_{x+dx} = \dot{q}_x + \underbrace{\frac{d\dot{q}_x}{dx} dx}_{*}$$

Hierin ist der letzte Term (*) gleich der Differenz der Wärmeenergie, die durch die Enthalpieänderung

$$(IV) d\dot{q}_x = \overbrace{\frac{m}{v}}^{m} \cdot \overbrace{dx \cdot A}^{\rho} \cdot \underbrace{dh}_{J/kg}$$

verursacht wird.

Auch folgt:

$$(I') \dot{q}_x = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx}$$

Um also die Änderung der Wärmestromdichte über den Ort zu definieren, lässt sich schreiben

$$(I'') -\frac{d\dot{q}_x}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{d\vartheta}{dx} \right)$$

Für die in einem Kontrollvolumen $A \cdot dx$ eingeschlossene Masse gilt nach (III) und (IV):

$$(IV') -\frac{d\dot{q}_x}{dx} = \rho \cdot \underbrace{c_p}_{dh} \cdot \frac{d\vartheta}{dt}$$

5. Die konventionelle Verflüssigung

Durch Gleichsetzen der Gleichungen (I'') und (IV') erhält man die lineare, eindimensionale, nichtstationäre Differenzialgleichung der Wärmeleitung.

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}$$

Formel 5-3

a Temperaturleitfähigkeit $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \left[\frac{m^2}{s} \right]$

Sie entsteht hier unter der Annahme einer temperaturunabhängigen Leistungsdichte $\dot{W}(\vartheta)$ und unter Beschränkung auf eine eindimensionale Betrachtung. Um nun die Zeitdauer er rechnen zu können, die zum Schmelzen eines Stoffes oder Stoffgemischs nötig ist, interessiert insbesondere die Geschwindigkeit $\partial x / \partial t$, mit der sich die Grenze zwischen fester und flüssiger Phase bewegt. Dieses Problem soll mit Hilfe dieser Gleichung im nachfolgenden Abschnitt untersucht werden.

5.4.2 Die Lösung nach Stefan

Die Untersuchung der Geschwindigkeit, mit der das Bindemittel Bitumen im konventionellen Schmelztopf verflüssigt, erfolgt hier mittels physikalischer Lösungsansätze. Eine allgemeine mathematische Lösung dieses Wärmeleitproblems existiert laut [BaSt06, S. 296] nicht. Allerdings hat Stefan [St1891] für dieses nach ihm benannte Stefan-Problem eine geschlossene Lösung angegeben.

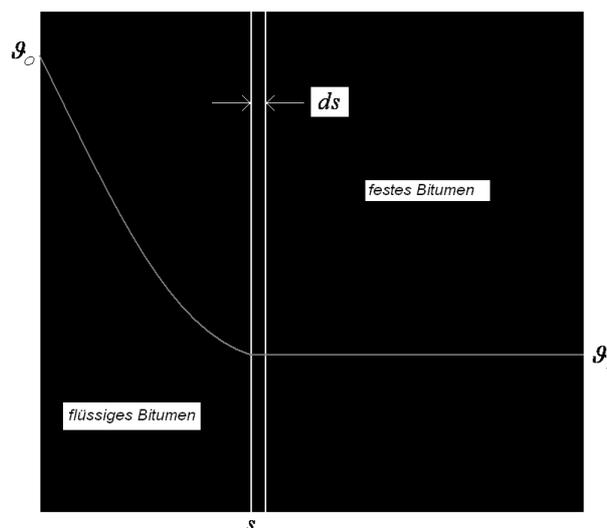


Abbildung 56: Qualitativer Temperaturverlauf nach Stefan beim Schmelzen von Stoffen; hier angewendet auf Bitumen

5. Die konventionelle Verflüssigung

Nach J. Stefan gelten analog zu Abbildung 56 folgende Randbedingungen für die Lösung der Differenzialgleichung:

$$\vartheta = \vartheta_0 \quad \text{für } x = 0, t > 0$$

Formel 5-4

und

$$\vartheta = \vartheta_E \quad \text{für } x = s, t > 0$$

Formel 5-5

sowie die Anfangsbedingung:

$$s = 0 \quad \text{für } t = 0$$

An der Phasengrenze zwischen dem festen und flüssigen Bitumen muss die folgende Energiebilanzgleichung erfüllt sein:

$$\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} dt = h_E \cdot \rho \cdot ds$$

Formel 5-6

h_E spezifische Phasenübergangsenthalpie – die Wärmeenergiemenge pro Kilogramm, die beim Phasenübergang des Baustoffs Bitumen gebunden oder freigesetzt wird. Im Folgenden sei für diese Eigenschaft des Bindemittels ein Wert von 200 kJ/kg nach Wiedmann (vgl. [Wi00]) angesetzt.

Aus obiger Formel erhält man die Verflüssigungsgeschwindigkeit zu:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\lambda}{h_E \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_{x=s}$$

Formel 5-7

Eine Lösung der Wärmeleitungs-Differenzialgleichung ist das Fehlerintegral

$$\vartheta = \vartheta_0 + C \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right)$$

Formel 5-8

C Konstante

5. Die konventionelle Verflüssigung

Es erfüllt die erste der oben genannten Randbedingungen. Damit gilt:

$$\vartheta_E = \vartheta_0 + C \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$$

Formel 5-9

Das Argument des Fehlerintegrals muss danach unabhängig von t gleich einer Konstanten γ sein, für die gilt:

$$s = \gamma \cdot 2\sqrt{at}$$

Formel 5-10

Die umgewandelte Schicht wächst damit proportional zur Wurzel aus t, womit auch die Anfangsrandbedingung erfüllt ist. Aus

$$\vartheta_E = \vartheta_0 + C \cdot \operatorname{erf}(\gamma)$$

Formel 5-11

erhält man für die Temperatur [°C] in der betrachteten Schicht gemäß Abbildung 56:

$$\vartheta^+ := \frac{\vartheta - \vartheta_0}{\vartheta_E - \vartheta_0} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4at}}\right)}{\operatorname{erf}(\gamma)} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\gamma x}{s}\right)}{\operatorname{erf}\gamma}$$

Formel 5-12

ϑ^+	Temperatur an einem Ort [°C]
ϑ_0	Ausgangstemperatur der flüssigen Phase [°C]
ϑ_E	Temperatur der festen Phase [°C]

Die Ableitung von s nach der Zeit ergibt

$$\frac{ds}{dt} = \gamma \sqrt{\frac{a}{t}}$$

Formel 5-13

und es ergibt sich mit Formel 5-7 [BaSt06]

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\lambda}{h_E \rho} \frac{\vartheta_E - \vartheta_0}{\operatorname{erf}(\gamma)} \frac{e^{-\gamma^2}}{\sqrt{\pi} \sqrt{at}}$$

Formel 5-14

Unter Benutzung der Reihenentwicklung des Fehlerintegrals lässt sich hieraus die Formel für die Verflüssigungszeit t näherungsweise formulieren:

5. Die konventionelle Verflüssigung

$$t = \frac{h_E \cdot \rho \cdot s^2}{2\lambda(\vartheta_E - \vartheta_0)} \left(1 + \frac{1}{3} Ph^{-1} - \frac{2}{45} Ph^{-2} + \frac{16}{945} Ph^{-3} - \dots \right)$$

Formel 5-15

Ph	Phasenübergangszahl $Ph = \frac{h_E}{c \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_E)}$ [-]
λ	Wärmeleitfähigkeit. [$W \cdot m^{-1} K^{-1}$]
ϑ_0	Temperatur der Schmelze (siehe Abbildung 56) [$^{\circ}C$]
ϑ_E	Bitumenkaltlagertemperatur [$^{\circ}C$]

5.4.3 Die Lösung nach Neumann

Alternativ zu dem im letzten Abschnitt behandelten Lösungsansatz nach Stefan soll hier ein weiterer Lösungsansatz zur Bestimmung der Verflüssigungsdauer des Bindemittels untersucht werden. U. Grigull und H. Sander [GrSa90] haben die geschlossene Lösung von F. Neumann angewendet und dabei sowohl in der festen als auch in der flüssigen Phase einen instationären Wärmestrom angenommen.

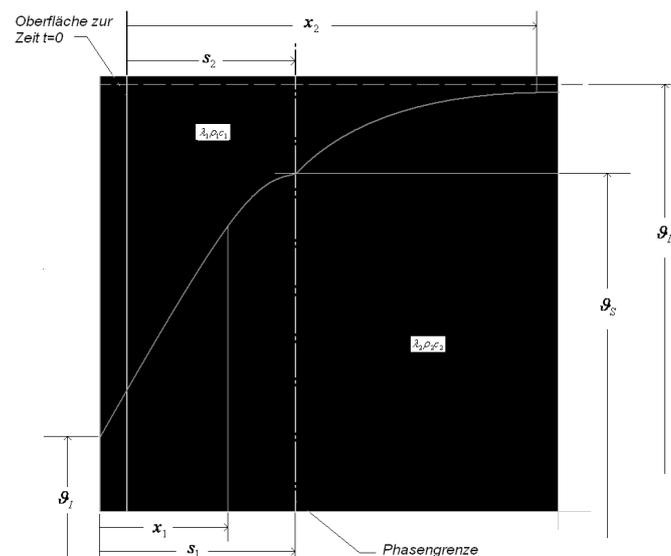


Abbildung 57: Qualitative Temperaturverläufe beim Gefrieren und Schmelzen in der festen und flüssigen Phase

Laut ihrer Lösung findet auch eine rein mechanische Verschiebung aufgrund der unterschiedlichen Volumen der Phasen statt (Abbildung 58). Das heißt, zunächst folgt aus dem Massenerhaltungssatz für die Koordinaten der Phasengrenzen $s_1(t)$ und $s_2(t)$

5. Die konventionelle Verflüssigung

$$ds_1 \cdot \rho_1 = ds_2 \cdot \rho_2 \text{ bzw. } s_1 \cdot \rho_1 = s_2 \cdot \rho_2$$

Formel 5-16

Wieder gilt die Vereinfachung:

$$s = \gamma \cdot 2 \cdot \sqrt{at}$$

Formel 5-10

Damit ist die zum Aufschmelzen einer Schicht der Dicke s_2 benötigte Zeit

$$t = \left(\frac{s_2 \cdot \rho_2}{\gamma \cdot \rho_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{4a_1}$$

Formel 5-17

Für

$$\gamma = \frac{s}{2\sqrt{at}}$$

Formel 5-18

wird in [GrSa90] nach einer Fourier-Transformation folgende Grenzlösung angeboten:

$$\gamma \approx \frac{1}{2\varepsilon\sqrt{\pi}} \left(\sqrt{\beta^2 \cdot \theta^2 + 2\pi\varepsilon - \beta \cdot \theta} \right)$$

Formel 5-19

wobei

$$\varepsilon = Ph + \frac{1}{3} + \frac{2 \cdot \beta \cdot \theta}{\pi \cdot \delta \cdot \sqrt{\alpha}}$$

Ph Phasenübergangszahl, siehe oben [-].

$$\beta = \frac{b_2}{b_1} = \frac{\sqrt{\lambda_2 \cdot c_{p,1} \cdot \rho_2}}{\sqrt{\lambda_1 \cdot c_{p,1} \cdot \rho_1}} \quad [-]$$

ϑ_E Bitumenkaltlagertemperatur [°C]

$$\theta = \frac{\vartheta_{II} - \vartheta_s}{\vartheta_s - \vartheta_I} \quad [-]$$

$$\delta = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1} = \frac{\lambda_2 \cdot c_{p,1} \cdot \rho_1}{\lambda_1 \cdot c_{p,2} \cdot \rho_2} \quad [-]$$

5. Die konventionelle Verflüssigung

Damit wurden mit Formel 5-15 und Formel 5-17 zwei mögliche Lösungsformeln zur Berechnung der Verflüssigungszeit hergeleitet. Inwieweit sich diese Theorien in der Praxis als robust erweisen, soll mittels des Vergleichs praktischer Versuche, in denen Bitumen in handlichen Einheiten verflüssigt wurde, festgestellt werden. Anschließend wird die so erkundete Praxis mit den Theorien von Stefan und Neumann verglichen.

5.4.4 Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungen nach Stefan und Neumann

Vergleicht man die Praxisergebnisse mit den zuvor vorgestellten theoretischen Betrachtungen, stellt sich eine erhebliche Divergenz heraus. Die Ergebnisse von Berechnungen nach Neumann und Stefan stellen Tabelle 5-4 und Tabelle 5-4 dar.

In den Berechnungen mit den geometrischen und physikalischen Werten mittels der hier nachvollzogenen Formeln von Neumann und Stefan wird deutlich, wie wenig robust sich diese Lösungsansätze im Praxisvergleich beim Baustoff Bitumen erweisen.

d [cm]	4	5	7	10	15	20	25	30	40	50	60	70	100	150	200
t [h]	1,7	2,6	5,2	10,6	24,0	42,6	66,6	95,9	170	266	383	521	1065	2396	4260

Tabelle 5-4: Ergebnisse nach Stefan; Schmelzzeit (Erwärmung des Kerns auf 70 °C) t in Stunden in Abhängigkeit vom Quaderdurchmesser d des kalten Bitumens in Zentimeter

d [cm]	4	5	7	10	15	20	25	30	40	50	60	70	100	150	200
t [h]	4,37	6,8	13,4	27,3	61,5	109	170	245	437	683	983	1338	2731	6146	10927

Tabelle 5-5: Ergebnisse nach Neumann; Schmelzzeit (Erwärmung des Kerns auf 70 °C) t in Stunden in Abhängigkeit vom Quaderdurchmesser d des kalten Bitumens in Zentimeter

Eine Ursache hierfür kann sein, dass im thermoplastischen Bindemittel Bitumen eine Phasengrenze fehlt. Letztlich müssen die Lösungsansätze nach Neumann und Stefan deshalb für die Anwendung auf die Bitumenverflüssigung verworfen werden. Beispielrechnungen mittels der beiden Formeln werden im Anhang dargestellt.

5.4.5 Schlussfolgerungen

Nachdem die Phasenübergangstheorien von Stefan und Neumann hinsichtlich ihrer theoretischen Grundlagen dargestellt und Beispielrechnungen durchgeführt und einander gegen-

5. Die konventionelle Verflüssigung

übergestellt wurden, stellt sich heraus, dass die Ergebnisse beider Theorien sowohl im Vergleich miteinander als auch mit den Versuchsergebnisse aus der Praxis keine Übereinstimmungen aufweisen. Ursache hierfür kann sein, dass die Lösungsformeln von Neumann und Stefan nicht für thermoplastische Stoffe wie Bitumen anwendbar sind. Um alle thermophysikalischen Zusammenhänge im Kontext der Bitumenerwärmung zu verstehen, müssen weitere theoretische Überlegungen aus dem Bereich der numerischen Simulation herangezogen werden. Hierzu muss auch untersucht werden, inwieweit diese EDV-unterstützten Berechnungen den Labormessungen der Versuchsreihen entsprechen.

5.5 Anwendung thermodynamischer Theorien zur numerischen Simulation der Dauer des Verflüssigungsvorgangs

Ziel dieses Abschnitts ist es, aufbauend auf den durchgeführten Laboruntersuchungen zum Verflüssigungsverhalten von Bitumenquadern, die thermophysikalischen Vorgänge im Kontext der Bitumenverflüssigung in konventionellen Verflüssigungsverfahren (mittels Konduktion) zu verstehen und ein variables Berechnungsmodell für die Praxis zu erzeugen. Das heißt eine realitätsnahe Modellierung des thermodynamischen Prozesses wird auch als erforderlich erachtet, um die in praktischen Versuchen unter definierten Randbedingungen abgesicherten Ergebnisse mit wenig Aufwand auf andere geometrisch-technische Größenverhältnisse übertragen zu können. Die Modellierung kann somit beispielsweise hilfreich sein, um die Auswirkungen des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses einer geometrischen Veränderung des kalten Bitumenkörpers auf die benötigte Verflüssigungsdauer abzuschätzen und damit diesbezüglich zu optimieren. Dementsprechend soll hierfür ein Softwaretool für die praktische Anwendung in der Produktionsanlage erarbeitet werden. Dabei wird auf eine benutzerfreundliche Oberfläche geachtet, um sie später auch vom Anlagenpersonal für die Festlegung der Taktzeit in Abhängigkeit von der gelieferten Gebindegeometrie auf Grundlage von wenigen Größen oder nur einer Geometrieangabe nutzen zu können.

In Großanlagen und in der Versuchspraxis wird die Temperatur, bei der Bitumen verflüssigt wird, maßgeblich von seiner Spezifikation bestimmt. Im Rahmen der hier durchgeführten Modellierung wird angenommen, dass das dabei relevante Bitumen 70/100 bei einer Temperatur von ca. 70 °C verflüssigt wird. Gelagert wird das heiße Bindemittel im derzeitigen Just-In-Time-Handling bei einer Temperatur von ca. 160 °C, was sich hier in der Temperatur der Schmelze in den Schmelztopfversuchen wiederfinden soll.

Für die Versuche, Berechnungen und Simulationen wird darüber hinaus festgelegt, dass sich das kalte Bitumen in der Praxis bei einer Kaltlagertemperatur von 20 °C befindet. Hinsichtlich seiner Geometrie sollten keine Festlegungen getroffen werden, da es unter anderem genau auf Grundlage dieser Größen die Verflüssigungsmenge pro Zeit zu maximieren gilt.

5.5.1 Ein- und zweidimensionale numerische Simulation der Bitumenverflüssigung im Schmelztopf

Nach der Durchführung der in Abschnitt 5.3 beschriebenen Versuchsreihen zur Bitumenverflüssigung und dem Vergleich der Ergebnisse mit den Berechnungen mit den Formeln von Neumann und Stefan (Abschnitt 5.4) zeigt sich, dass für ein exaktes Verständnis des Produktionsabschnitts eine numerische Simulation der Konduktion innerhalb des näherungsweise einphasigen Baustoffs (Anfangsrandwertaufgabe) eine bessere Herangehensweise zur Erreichung der drei in Abschnitt 5.4 genannten Ziele ist. Hierdurch wird zwar mathematisch keine Phasengrenze modelliert, und die an ihr gebundene Phasenumwandlungsenthalpie vernachlässigt, letztlich ist die Verflüssigungstemperatur des Bitumens aber bekannt, wodurch die Phasengrenze zumindest (beispielsweise bei 70 °C) definiert, und graphisch dargestellt werden kann.

Zur Verfahrenswahl schreiben Baehr und Stephan:

„Zur numerischen Behandlung von Anfangsrandwertaufgaben stehen zwei Verfahren zur Verfügung, das Differenzenverfahren und die Methode der finiten Elemente.“[BaSt06]

Das Verfahren der finiten Elemente wird aufgrund seiner hohen Flexibilität als geeignet für Berechnungen der Festkörper und Strukturmechanik mit unter anderem komplizierter Geometrie bezeichnet. Das Differenzenverfahren hingegen ist einfach in seiner Handhabung und von geringerem mathematischen Aufwand [BaSt06].

Beim Differenzenverfahren werden die Ableitungen $\frac{\partial \vartheta}{\partial t}$, $\frac{\partial \vartheta}{\partial x}$ und $\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2}$ durch Differenzenquotienten ersetzt.

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}$$

Formel 5-3

Die in Formel 5-3 gezeigte Wärmeleitungsdifferentialgleichung, die in Abschnitt 5.4 hergeleitet wurde geht damit in eine Differenzengleichung über. Die durch sie beschriebene Lösung approximiert im Allgemeinen die in den Wärmeleitungsdifferentialgleichungen beschriebene Thermophysik durch ein flächiges (zweidimensional) oder ein räumliches (dreidimensional) Gitternetzmodell an den diskreten Stellen der Gitternetzpunkte [BaSt06]. Dabei errechnet sich die Temperatur als Eigenschaft eines der genannten Knotenpunkte am Ende eines von der Simulationskonvergenz determinierten Zeitintervalls aus einem Differenzenquotienten, der sich aus der Temperatur des Knotenpunktes selbst und einer Anzahl von nächsten Nachbarn im Gitternetz zum Zeitintervallanfang ergibt. Abbildung 58 verdeutlicht diesen Vorgang.

5. Die konventionelle Verflüssigung

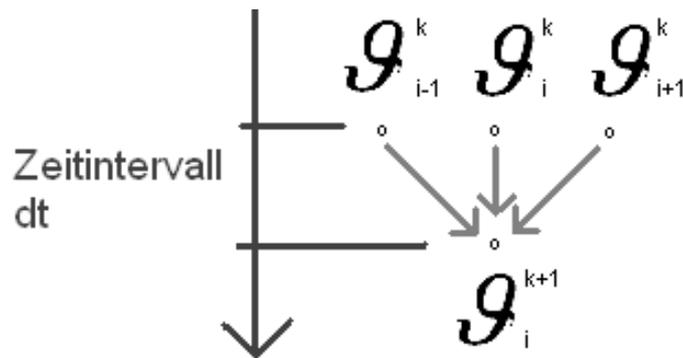


Abbildung 58: Beeinflussung der Temperatur eines Elements zum Zeitpunkt $k+1$ am Ort i in der Differenzenmethode mit Berücksichtigung der beiden nächsten Nachbarn eines Knotenpunktes in der eindimensionalen Berechnung

Hinzu kommt ein Diskretisierungsfehler O , der für ausreichend kleine räumliche und zeitliche Intervalle gegen null strebt. Für die zweite Ableitung der Wärmeleitungsdifferentialgleichung heißt dies

$$\left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}\right)_i^k = \frac{\vartheta_{i-1}^k - 2\vartheta_i^k + \vartheta_{i+1}^k}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2)$$

Formel 5-20

und für die erste Ableitung der Wärmeleitungsdifferentialgleichung

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial t}\right)_i^k = \frac{\vartheta_i^{k+1} - \vartheta_i^k}{\Delta t} + O(\Delta t)$$

Formel 5-21

Setzt man diese Differenzenquotienten in die Wärmeleitungsdifferentialgleichung ein, erhält man

$$\vartheta_i^{k+1} = M\vartheta_{i-1}^k + (1 - 2M)\vartheta_i^k + M\vartheta_{i+1}^k$$

Formel 5-22

ϑ_i^k Temperatur am Ort i zum Zeitpunkt k [$^{\circ}\text{C}$]

M Modul; [-] $M = a \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$

5. Die konventionelle Verflüssigung

Im zweidimensionalen Gitternetz werden dann zur Temperaturberechnung die vier nächsten Gitternetz-knotenpunkte herangezogen (Abbildung 59).

$$\vartheta_{i,j}^{k+1} = (1 - 4M)\vartheta_{i-1}^k + M(\vartheta_{i-1,j}^k + \vartheta_{i+1,j}^k + \vartheta_{i,j-1}^k + \vartheta_{i,j+1}^k) + \frac{\Delta t}{c\rho} \dot{W}_{i,j}^k$$

Formel 5-23

$\dot{W}_{i,j}^k$

interne Wärmegewinne. Für die konventionelle Bitumenverflüssigung im Schmelztopf gilt, dass die internen Wärmegewinne gleich Null sind.

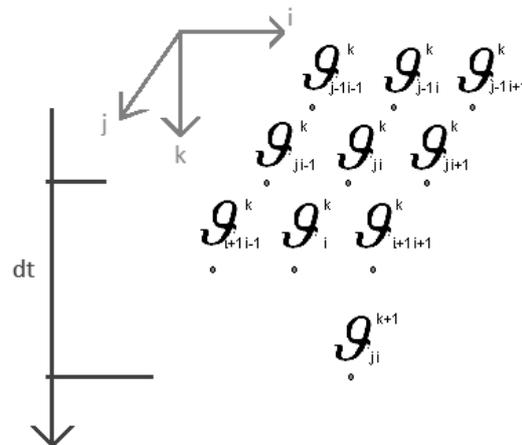


Abbildung 59: Beeinflussung der Temperatur eines Elements zum Zeitpunkt $k+1$ am Ort i in der Differenzmethode mit Berücksichtigung der beiden nächsten Nachbarn eines Knotenpunktes in der zweidimensionalen Berechnung

Im Quelltext einer Wärmestromsimulation in VBA (Abbildung 60) wird diese Formel in zwei Schleifen implementiert, welche die Raumkoordinaten des Gitternetzes in zwei Richtungen durchlaufen.

```

Do
  For j = 2 To WS - 1
    For i = 2 To WS - 1
      Tneu = xy(i, j)
      c = getC(Tneu)
      a = lab1 / (c * rohl) 'Temperaturleitfähigkeit in m²/s
      M = a * 60 / 0.0001 'dt=in Sekunden/ dx²=(1cm)²
      xy2(i, j) = Cdbl((1 - 4 * M) * xy(i, j) + M * (xy(i - 1, j) + xy(i + 1, j) + xy(i, j - 1) + xy(i, j + 1)))
    Next
  Next
  xy = xy2

Loop Until xy(Runden(WS / 2, 0), Runden(WS / 2, 0)) > Tf Or xy2(Runden(WS / 2, 0), Runden(WS / 2, 0)) > Tf
  
```

Abbildung 60: Teil des Quelltextes der zweidimensionalen Schmelzsimulation

5. Die konventionelle Verflüssigung

Als Programmiersprache für das Programm wird VBA gewählt, da diese Sprache leicht und ohne zusätzliche Copyright-Erfordernisse verfügbar und ausreichend mächtig für die gewünschte Bitumenschmelzsimulation ist. Darüber hinaus können Microsoft Office Excel-Anwendungen auf beinahe jedem Windows-Rechner standardmäßig ausgeführt und angepasst werden, was insbesondere beim Verschicken des Werkzeugs in die Asphaltmischanlagen auf die Rechner der Mischmeister problemlos vonstattengehen kann. Der Anspruch einer derart praxisbezogenen Anwendung macht auch eine einfache Nutzermaske erforderlich, welche in Abbildung 61 mit den voreingestellten Materialparametern einer Versuchs-konfiguration aus Abschnitt 5.3 dargestellt ist.

The screenshot shows a window titled "STRABASimulator" with a close button in the top right corner. The main title is "Eigenschaften der Schmelze und des Kaltbitumens".

Under the sub-header "Physik des Bitumens", there are three input fields for temperature in degrees Celsius: "Temperatur Kaltbitumen" with the value 21,5, "Temperatur Schmelze" with the value 160, and "Simulation bis Kaltbitumenkerntemperatur" with the value 70.

There are two sections for geometry:

- Geometrie des Kaltbitumens 2D:** Includes input fields for "Breite" (4 cm) and "Höhe" (4 cm). To the right are buttons for "2D Zeit Berechnung" and "2D Simulation Graph."
- Geometrie des Kaltbitumens 3D:** Includes input fields for "Breite" (14 cm), "Höhe" (29,5 cm), and "Länge" (9,5 cm). To the right are buttons for "3D Zeit Berechnung" and "3D Simulation Starten".

At the bottom center of the window is a large button labeled "Abbrechen".

Abbildung 61: Nutzermaske für eine beliebige Bitumenschmelzsimulation im Schmelztopf

Der Nutzer hat durch die beiden Schaltflächen die Wahl zwischen einer einfachen Berechnung der erforderlichen Zeit, ohne dass die Entwicklung der Temperatur graphisch dargestellt wird, und einer Darstellungsform, bei der bei bestimmten Zeitintervallen zusätzliche Temperaturverteilungen graphisch wiedergegeben werden. Während die erste Variante schnelle Berechnungsergebnisse liefert (Abbildung 62), dient die zweite Darstellungsart der Überprüfung der mathematischen Simulationskonvergenz (Abbildung 63) in der Entwicklungsphase und kann bei einer Modifikation der Numerik durch den Nutzer gut eingesetzt werden.

5. Die konventionelle Verflüssigung

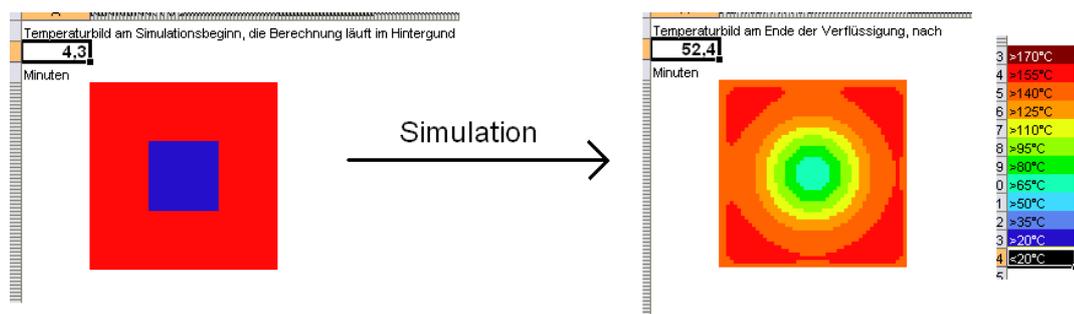


Abbildung 62: Berechnung der Zeit ohne graphische Darstellung der Temperaturfelder, ausgelöst durch Befehlsbutton "2D Zeit Berechnung"

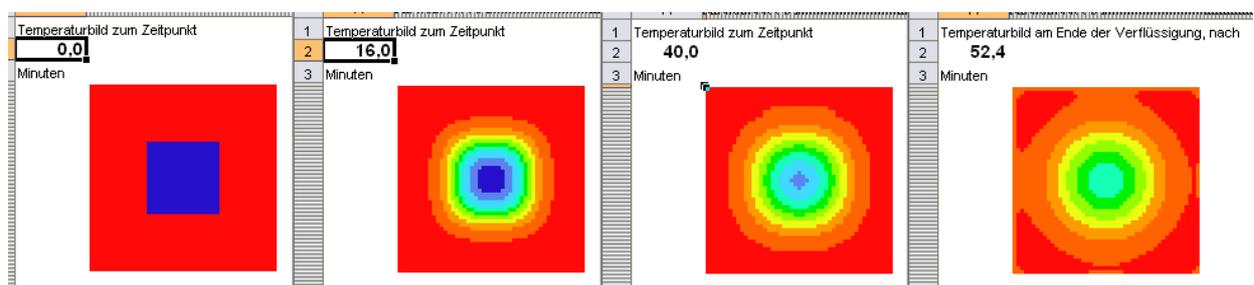


Abbildung 63: Graphische Darstellung nach durch den Simulationsumfang determinierten Zeitabschnitten, ausgelöst durch Befehlsbutton "2D Simulation Graphisch"

Die mathematische Konvergenz beziehungsweise die Stabilität des Verfahrens wird insbesondere durch die Wahl der Zeitintervalle, aber auch durch die Maschenweite beeinflusst. Die Literatur [Sm96] nennt hier als Stabilitätsbedingung für das Modul M:

$$M = \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \leq 0,5$$

Formel 5-24

Diese Abhängigkeit zwischen Maschenweite und Zeitschrittweite wird auf die Berechnung des Moduls M ausgerichtet. Dabei wird die Temperaturleitfähigkeit des Baustoffs hier mit $a_{\text{Bitumen}} \approx 7,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ angenommen. Bereits im unvalidierten Zustand lässt sich allerdings aus dem Vergleich der Verflüssigungsdauer von Bitumenquadrern unterschiedlicher Geometrie eine wichtige Erkenntnis ableiten: Ausschlaggebend für die Verflüssigungsdauer ist die kürzeste Seite der Quaders aus Kaltem Bitumen.

5. Die konventionelle Verflüssigung

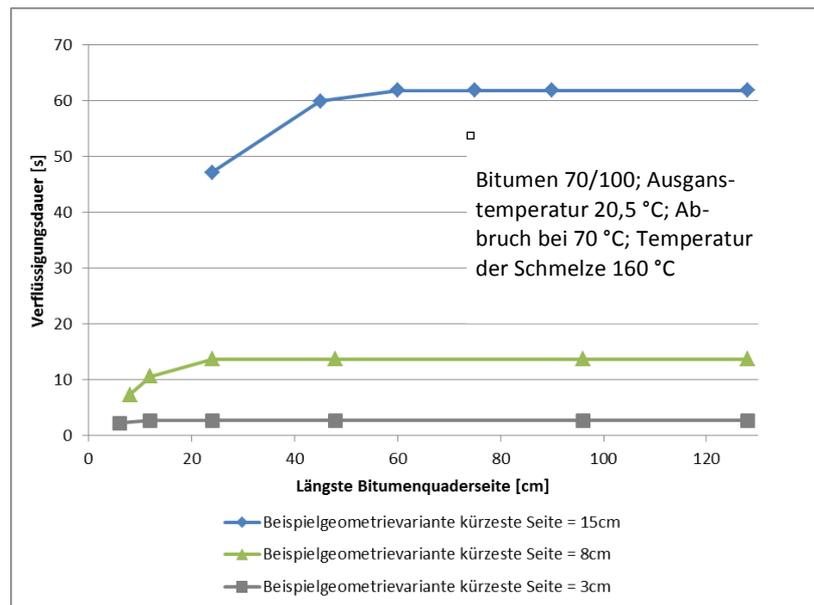


Abbildung 64: Veranschaulichung des großen Einflusses der kleinsten Bitumenseitenlänge im unvalidierten Modell

Abbildung 64 macht deutlich, dass ab einem Seitenverhältnis von ca. 1:3 nur noch die kürzere Seite des Bitumenkaltgebundes die Verflüssigungsdauer in der Produktion beeinflusst.

5.5.2 Simulation im Raum mit drei Richtungsvariablen (3D)

Nach den Ergebnissen bei der zweidimensionalen numerischen Simulation der Bitumenverflüssigung zur Ermittlung der Zugabetaktzeiten in der Verflüssigungsanlage wird nun auch eine dreidimensionale Berechnung angestrebt. Die Praxis hat gezeigt, dass der Baustoff unterschiedliches Verhalten beim Eintauchen in die Schmelze zeigt. Es kann zu zwei Erscheinungen kommen:

- 1) Das kalte Bitumen schwimmt auf.
- 2) Das Bindemittel versinkt in der heißflüssigen Phase.

Mögliche Erklärungsweisen für das erste Verhalten liegen in leichten Produktionsunregelmäßigkeiten in der Ausgangsrohndichte des Baustoffs oder anderen logistisch bedingten Eigenschaftsunterschieden zwischen dem in der Schmelze befindlichen Baustoff und dem Transportbitumen. Nicht zuletzt deshalb ist dieses Verhalten äußerst selten, wesentlich häufiger tritt der zweite genannte Effekt auf. In diesem Fall versinkt der Baustoff auf den Boden des Schmelztopfes, wo sich zumeist die Thermalölleitungen oder andere Heizeinheiten befinden. Ein gegenüber 1) verhältnismäßig ungestörter Verflüssigungsvorgang ist dann si-

5. Die konventionelle Verflüssigung

hergestellt. Bei Betrachtungen der Produktionskosten über die Produktionszeit ist allerdings der erste Fall als kritischer anzusehen. Deshalb wurde als Simulationsmodell das Verflüssigungsverhalten des Baustoffs bei einer Verflüssigung mit einer freien Oberfläche ohne Wärmeeintrag erstellt. Zur Herleitung der zu implementierenden Berechnungsformel der Konduktion in diesem räumlichen Modell ist vor allem auf die verschärfte Stabilitätsbedingung gemäß Baehr und Stephan [BaSt06] zu achten.

$$\Delta t \leq S_{3D} = \frac{\Delta x^2}{2a \left[1 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right)^2 \right]}$$

Formel 5-25

Δt	Zeitintervall
Δx	Differenzeninkrement in Richtung der ersten Raumkoordinate
Δy	Differenzeninkrement in Richtung der zweiten Raumkoordinate
a	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s]; $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$
$\lambda(\vartheta)$	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
c	spezifische Wärmekapazität [J/(kg*K)]
ρ	Rohdichte [kg/m ³]

Hierbei gilt bereits bei einer Raumnetzmaschenweite von einem Zentimeter in x- und y-Richtung des Tridiagonalsystems:

$$S_{3D}^{Bitumen} = \frac{0,0001 \text{ m}^2}{2 \cdot 7,6 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 2} \approx 329 \text{ s}$$

Formel 5-26

Die hohe zu erwartende Stabilität bei gewählten Zeitschritten von 60 Sekunden in diesem Verfahren rechtfertigt, dass nicht das stabile Verfahren nach J. Douglas und H. H. Rachford [Do62][DoRa56] gewählt wurde. Die aus der Wärmeleitungsdifferentialgleichung mit Hilfe der Differenzenquotienten in Anhang 4 (unter den dort getroffenen Annahmen und Vereinfachungen) hergeleitete Formel lautet:

$$\vartheta_{i,j,k}^{k+1} = (1 - 6M)\vartheta_{i,j,k}^k + M(\vartheta_{i-1,j,k}^k + \vartheta_{i+1,j,k}^k + \vartheta_{i,j-1,k}^k + \vartheta_{i,j+1,k}^k + \vartheta_{i,j,k-1}^k + \vartheta_{i,j,k+1}^k)$$

Formel 5-27

5. Die konventionelle Verflüssigung

Sie findet sich in dieser Form im Quelltext wieder (Abbildung 65).

```
Do While xyz(WSx / 2, breakhight, WSz / 2) < Tf
  zähler = zähler + 1
  For k = 1 To WSz - 1
    For j = 1 To WSy - 1
      For i = 1 To WSx - 1
        c = 1000 * 1.7181 * Exp(0.0012 * xyz(i, j, k)) ' getC(Tneu)
        a = lab1 / (c * roh1) 'Temperaturleitfähigkeit in m²/s
        M = a * 60 / 0.0001 'dt=60sekunden dx²=(1cm)²
        'Call setTemperaturKorekturbeiwert(Zeit) ' Erzeugt korT aus Valiedierung
        xyz1(i, j, k) = Cdbl((1 - 6 * M) * xyz(i, j, k) + M * (xyz(i - 1, j, k) + xyz(i + 1, j, k)
        + xyz(i, j - 1, k) + xyz(i, j + 1, k) + xyz(i, j, k - 1) + xyz(i, j, k + 1))) '+ korT

      Next
    Next
  Next

  For k = 0 To WSz
    For j = 0 To WSy
      xyz1(WSx, j, k) = Ts
      xyz1(0, j, k) = Ts
    Next
  Next
  For k = 0 To WSz
    For i = 0 To WSx
      xyz1(i, WSy, k) = Ts
      'xyz1(i, 0, k) = Tk
    Next
  Next
  For i = 0 To WSx
    For j = 0 To WSy
      xyz1(i, j, WSz) = Ts
      xyz1(i, j, 0) = Ts
    Next
  Next

  xyz = xyz1

Loop
```

Abbildung 65: Schleifenprogrammierung der dreidimensionalen Simulation

Dass die implementierte Formel korrekt ist, zeigt sich vor allem in einer zusätzlich erzeugten Dokumentationsanwendung, die die Ergebnisse der zweidimensionalen und dreidimensionalen Simulation darlegt und vergleicht.

Wählt der Programmnutzer über die Schaltfläche „3D Simulation Starten“ der in Abbildung 61 dargestellten Oberfläche eine anschauliche graphische Darstellung während der Simulation, so werden ihm nach durch den Modellumfang determinierten Zeitintervallen die Elemente angezeigt, die bereits die unter „Physik des Bitumens“ eingegebene Temperatur aufweisen. Diese Veranschaulichung diente der Überprüfung der mathematischen Konvergenz (Abbildung 66) der Simulation in der Entwicklungsphase.

5. Die konventionelle Verflüssigung

Kürzeste Seitenlänge [cm]	4	5	8	10	20	30
Dauer bis Abbruchkriterium in 2D-Berechnung [min]	1,5	1,5	7,3	11,9	52,4	122
Dauer bis Abbruchkriterium in 3D-Berechnung [min]	1,3	4,8	6,9	11,4	51,5	121

Tabelle 5-6 Dokumentation der Simulationen mit (oben) zweidimensionalen quadratischen kalten Bitumenkörpern und (unten) dreidimensionalen würfelförmigen kalten Bitumenkörpern, wobei Abweichungen der Verflüssigungsdauern durch unterschiedliche Erfüllung des Abbruchkriteriums verursacht werden

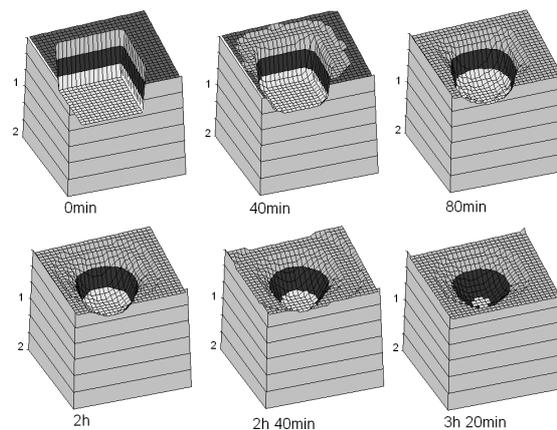


Abbildung 66: Die Oberfläche, die in der Simulation dargestellt wird, hat eine vom Nutzer in der Nutzermaske (unterstes Feld der Temperatureinstellungen) bestimmte Temperatur

5.5.3 Anpassung der Simulationen mittels der Ergebnisse der Praxisversuche

Unter Validierung versteht man in der Informatik die

„Gültigkeitsprüfung im Softwareentwicklungsprozess, die eine Analyse hinsichtlich der Übereinstimmung von Zielsetzung und Ergebnis vornimmt.“ [Zw03]

Die Zielsetzung der eigens für dieses Projekt implementierten Software war es, eine Zeitangabe für den Produktionsschritt der Bitumenverflüssigung bereitzustellen. Eine lineare Anpassung dieser Größe an die tatsächlichen Werte der im 5.3 beschriebenen Aufschmelzversuche liegt also auf der Hand. Darüber hinaus stellt das Programm dem Nutzer unabhängig von seiner Wahl hinsichtlich der graphischen Darstellung den Verlauf der Bitumenkerntemperatur zur Verfügung.

5. Die konventionelle Verflüssigung

Diese zusätzliche Darstellung einer approximierten Temperatur hat mehrere Vorteile:

- 1) Überprüfung der physikalischen Konvergenz
- 2) Berechnungsstandanzeige bei umfangreichen Simulationsdurchläufen
- 3) Erleichterung der Validierung

Unter der physikalischen Konvergenz wird die rein thermodynamische Übereinstimmung mit der Praxis verstanden. Um die Anpassung der Numerik auf Grundlage dieser Eigenschaft der Simulation zu begründen, musste zunächst dafür Sorge getragen werden, dass insbesondere die geometrischen Randbedingungen der Simulation mit denen der Praxisversuche übereinstimmen.

So beschreibt das Programm in seiner Standardkonfiguration nicht das Verhalten eines kalten Bitumenquaders in einer unendlich ausgedehnten Schmelze, sondern in einer Schmelze, die in jeder Richtungsvariablen genau viermal größer als die jeweils diagonale Quaderlänge, jedoch mindestens 32 und maximal 800 Zentimeter lang ist (Abbildung 67).

```
Private Function getWS(seitenlaenge As Integer) As Integer 'Funktion der Schmelzweite WS
    If seitenlaenge > 200 Then
        WS = 800 'Maximalausdehnung der Schmelze
    Else
        If seitenlaenge > 8 Then
            WS = seitenlaenge * 4
        Else
            WS = 32 'Minimale Schmelzweite entspricht ca. dem Eimerdurchmesser und ist kgV von 4
        End If
    End If
End Function
```

Abbildung 67: Die Methode/Funktion „getWS“ setzt die Ausdehnung der Schmelze in die jeweilige Richtung des Tridiagonalsystems fest

Dies entspricht annähernd der Geometrie der Versuchsanordnungen. Insbesondere die Untergrenze (von 32 Zentimeter) ist an den Eimerversuch angepasst.

Für den verfahrenstechnisch interessanteren Teil der Anpassung der – aus Berechnungsergebnissen generierten – Temperaturkurve an die tatsächliche Temperaturkurve während der Verflüssigung wurden diese Kurven einander gegenübergestellt (Abbildung 69).

5. Die konventionelle Verflüssigung

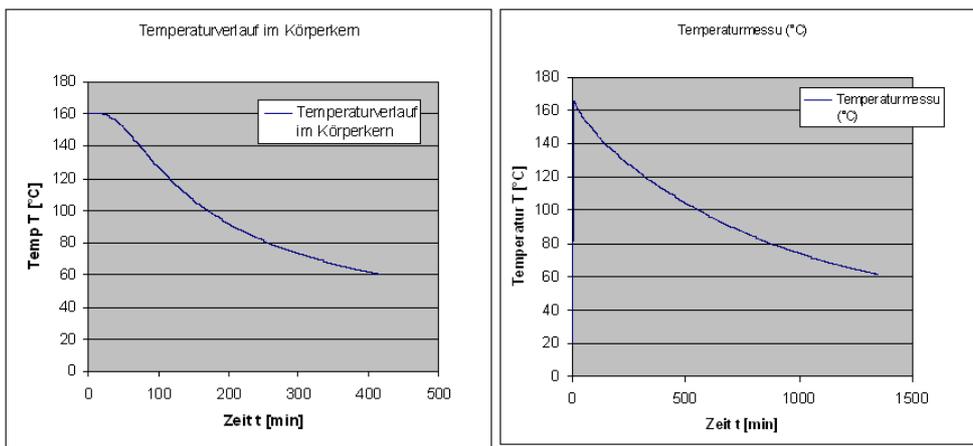


Abbildung 68: Temperaturverlauf links aus Simulation und rechts in der Realität

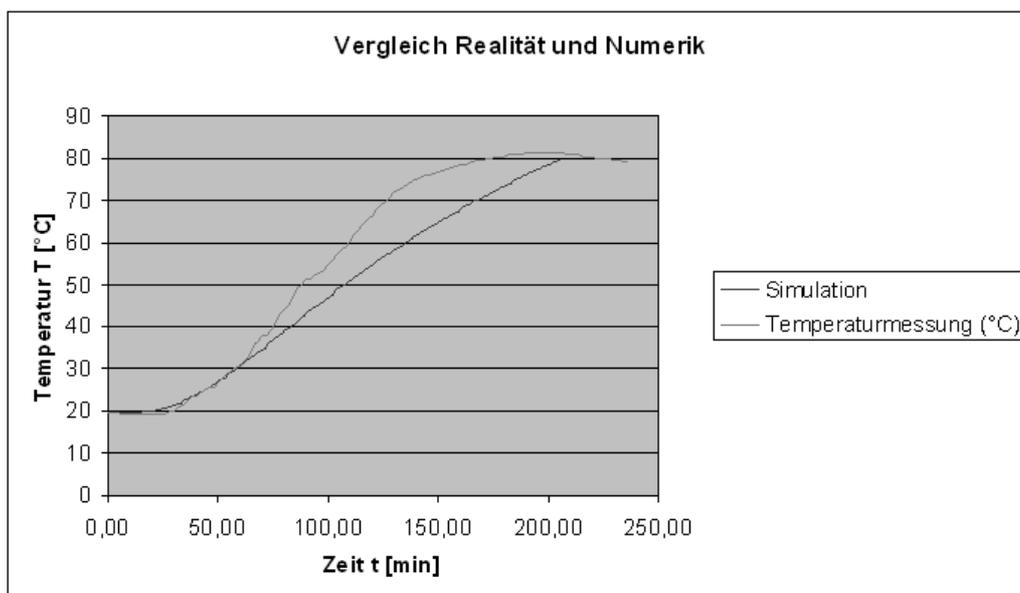


Abbildung 69: Berechnete und gemessene Temperaturverläufe in Bitumen 70/100; Bitumentemperatur 19,8 °C; Schmelze 171 °C; Quadermaße des kalten Bitumens: 9,5*14*12 cm

Mittels Abbildung 70 wird nun gezeigt, dass es möglich ist, hinreichend passende Polynome zu generieren, die sich an den Verlauf der Mess- und Berechnungwertkurven anschmiegen.

5. Die konventionelle Verflüssigung

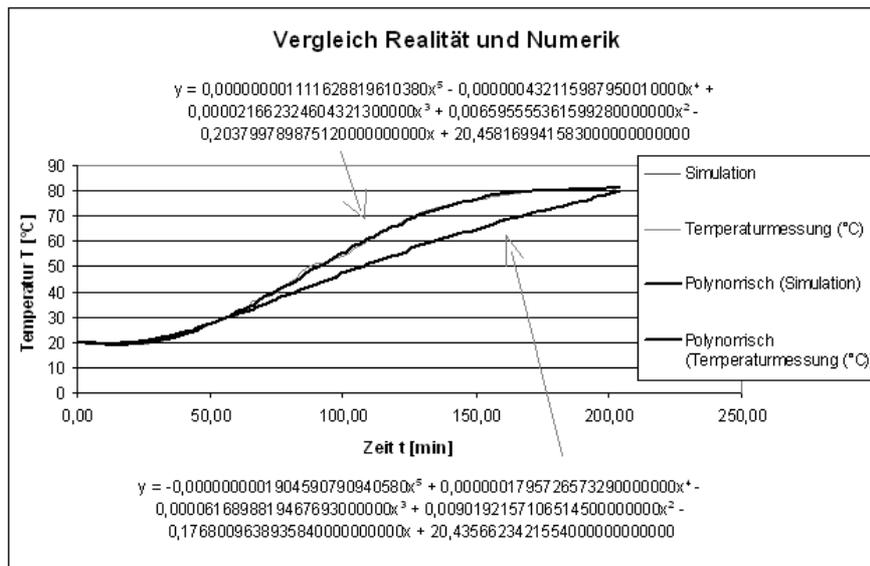


Abbildung 70: Gerundete Polynome fünften Grades beschreiben die Kurvenverläufe näherungsweise (vgl. oben)

Bildet man nun die Differenz der Polynome, erhält man das Korrekturpolynom:

$$g^{Kor}(t) = \left[\begin{array}{l} 0,00000000130208789880778x^5 - 0,000000611688645331702x^4 \\ +0,000083352206560805x^3 - 0,00242366034984443x^2 \\ -0,0269988259461229x + 0,0225075984312753 \end{array} \right]$$

Formel 5-28

Die jeweiligen Werte der Korrekturfunktion lassen sich den berechneten Werten im Quelltext hinzuaddieren und sorgen so für ein auf diesen Fall exakt angepasstes Ergebnis. Allerdings sind hier einige wesentliche Punkte zu beachten.

- 1) Die Korrekturfunktion variiert für verschiedene Geometrien leicht.
- 2) Der berechnete Temperaturverlauf weicht bis zu ca. 10 % von den Ergebnissen der Praxisversuche ab und gibt dann längere Verflüssigungsdauern vor. Damit befindet er sich auf der sicheren Seite.
- 3) Numerische Werkzeuge zur Generierung von Polynomen aus Kurvenverläufen sind aufwendig in der manuellen Erstellung.
- 4) Für die Berechnung der Verflüssigungsdauer ist diese Form der Kalibrierung größtenteils nicht erforderlich.

5. Die konventionelle Verflüssigung

Aufgrund dieser Überlegungen wird auf eine Anpassung des Temperaturgraphen im Weiteren verzichtet. Diese Entscheidung hat keine Auswirkung auf die Funktionalität des Programms in Bezug auf die drei eingangs in Abschnitt 5.5 definierten Anforderungen.

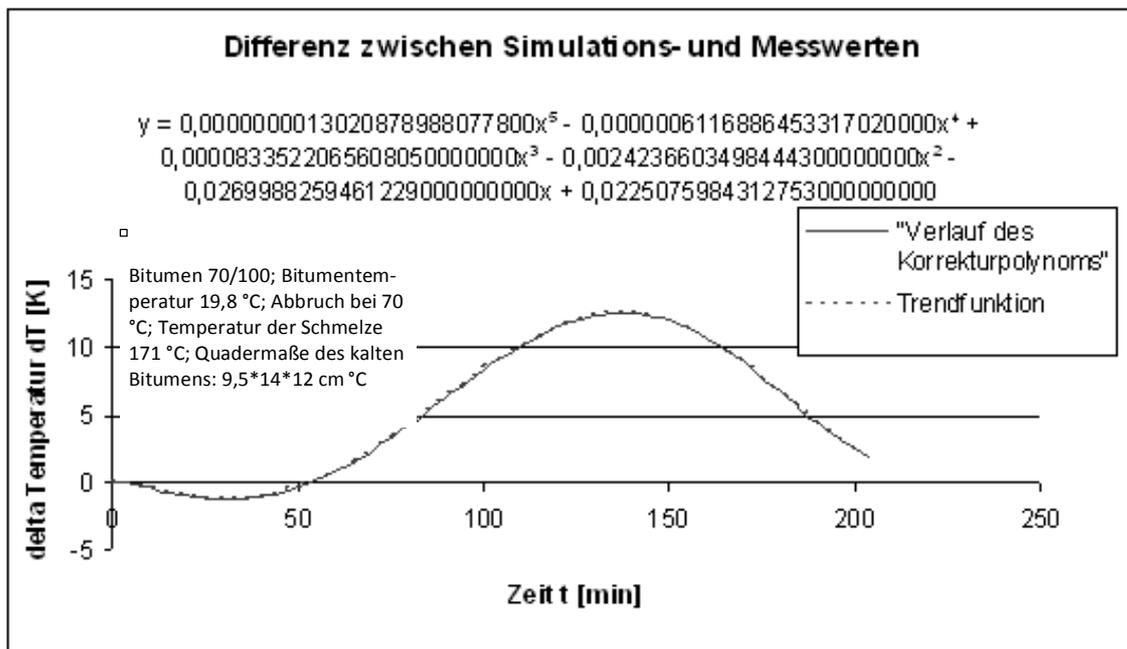


Abbildung 71: Verlauf des Korrekturpolynoms fünften Grades für die Versuche mit kalten Bitumenwürfeln mit 9,5*12*29,5 cm

5.5.4 Fazit zur Erstellung eines Simulationsprogramms

Die zu Anfang gestellten Aufgabenstellungen wurden mit der erzeugten Numerik gelöst. Es liegt ein Simulationswerkzeug vor, das sowohl den Anforderungen aus den physikalischen Begebenheiten während des Schmelzvorgangs, als auch der Optimierung der Produktion in der Praxis genügt. Im Rahmen dieses Projekts kann die Software nach ausreichender Anpassung im Rahmen der Validierung mittels Aufschmelzversuchen herangezogen werden, um Geometrievarianten schnell und flexibel hinsichtlich ihres Verflüssigungsverhaltens zu untersuchen. Als größte nicht numerisch bedingte Einschränkung ist zu berücksichtigen, dass lediglich Konvektion simuliert wird. Damit stellt das Programm hier die verfahrenstechnische Basis dar, auf der in der Praxis durch Rührwerke und insbesondere Umwälzpumpen eine erhöhte Verflüssigungsleistung erzielt werden kann.

Während also die Dimensionierung dieser Gerätekomponente einen linearen Zusammenhang zur Anlagenleistung hat, muss hier noch ein wesentlicher anderer Zusammenhang

5. Die konventionelle Verflüssigung

der mit Hilfe der Simulationssoftware erlangt worden ist, herausgestellt werden: Es ist gelungen eine nachfolgend dargestellte Faustformel für die konvektive Bitumenverflüssigungsdauer in Abhängigkeit von der kürzesten Quaderseitenlänge des kalten Bitumens zu generieren. Die in Tabelle 5-6 dargestellte Abhängigkeit macht bereits deutlich, wie leicht dies möglich geworden ist. In Abbildung 72 sei der tatsächliche Kurvenverlauf dieser Funktion mittels eines hieraus erzeugten Polynom zweiten Grades dargestellt.

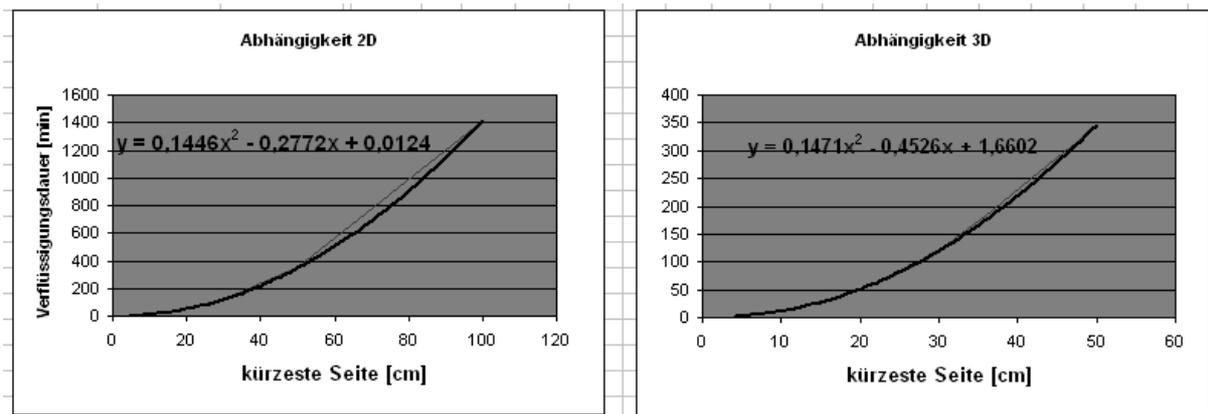


Abbildung 72: Aus dem Ergebnis mehrerer Berechnungen (hier für Bitumenwürfel) lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Verflüssigungsdauer [min] und der Körpergeometrie generieren; Bitumen 70/100; Ausganstemperatur 20,5 °C; Abbruch bei 70 °C; Temperatur der Schmelze 160 °C

Eine Mittelung der Kurvenverläufe aus den beiden Berechnungsverfahren lässt folgende

Polynome als Faustformel für die Verflüssigungsdauer (Abbruchkriterium bei $\vartheta_{\text{Erweichung}}^{\text{Bitumenker n}} \geq 70 \text{ °C}$) des Baustoffs in einer Bitumenschmelze ohne Konvektion in Abhängigkeit von der kürzesten Seitenlänge in Zentimeter festhalten:

$$t_{\text{Bitumenverflüssigung}}^{1:1}(l_{\text{min}}) = 0,15l_{\text{min}}^2 - 0,3l_{\text{min}} + 0,8$$

Formel 5-29

für die Prozessdauer bei Quadern aus kaltem Bitumen mit gleichen Seitenlängen,

$$t_{\text{Bitumenverflüssigung}}^{<1:3}(l_{\text{min}}) = 0,14l_{\text{min}}^2 - 0,3l_{\text{min}} + 0,2$$

Formel 5-30

für die Prozessdauer eines kalten Bitumenquaders, dessen kurze Seite maximal ein Drittel so lang wie die zweitlängste Seite ist. Die beiden Gleichungen können als Faustformeln für eine Abschätzung der Verflüssigungszeit (Zeitpunkt bei dem die Kerntemperatur des kalten Bitumenquaders 70 °C übersteigt) herangezogen werden. In ihnen spiegelt sich die Min-

5. Die konventionelle Verflüssigung

destanlagendurchsatzleitung einer Bitumenverflüssigungsanlage unter den zu Anfang aufgeführten thermodynamischen Annahmewerten wieder.

für die Prozessdauer eines kalten Bitumenquaders, dessen kurze Seite *maximal ein Drittel so lang* wie die zweitlängste Seite ist. Die beiden Gleichungen können als Faustformeln für eine Abschätzung der Verflüssigungszeit (Zeitpunkt bei dem die Kerntemperatur des kalten Bitumenquaders 70 °C übersteigt) herangezogen werden. In ihnen spiegelt sich die Mindestanlagendurchsatzleitung einer Bitumenverflüssigungsanlage unter den zu Anfang aufgeführten thermodynamischen Annahmewerten wieder.

5.6 Untersuchung der Energieverluste über die Oberflächen der konventionellen Verflüssigungsanlage

Nachdem die Wärmeströme an der Oberfläche von kalten Bitumenkörpern bei der Wiederverflüssigung untersucht wurden, gilt es in diesem Abschnitt, auch die Wärmeströme aus der in einer Anlage vorgehaltenen Schmelze zu bestimmen. Sie ist die zweite thermophysikalische Einflussgröße auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Durch sie werden die spezifischen Produktionskosten nicht indirekt über die Taktzeit, sondern direkt über Wärmeverluste bestimmt. Die Energie, welche über die Oberflächen der Schmelze verloren geht, setzt sich aus Konduktion, Radiation und Konvektion zusammen. An der freien Oberfläche sind Radiation und Konduktion vernachlässigbar. An den Behälterwänden hingegen sind Konvektion und Radiation zu vernachlässigen. Im Folgenden sollen also der Wärmestrom an den Behälterwänden und der teilchengebundene Wärmetransport (Luftströmung) an der freien Oberfläche dargestellt werden.

5.6.1 Grundlegendes zum Temperaturverlauf und zu den Annahmen

Um die Beziehungen des stationären Wärmedurchgangs auf die Lösung eines instationären Wärmeübergangsproblems wie der Abkühlung dünnwandiger Behälter (Abbildung 73) zurückführen zu können, sind zwei vereinfachende Annahmen zu treffen:

1. Die Temperatur ist an jedem Ort im Behälterinneren gleich.
2. Die in der Behälterwand gespeicherte Energie kann vernachlässigt werden.

Die Anwesenheit eines Rührwerks oder einer Umwälzpumpe im Bitumentank rechtfertigt die erste Annahme. Die zweite Annahme ist gerechtfertigt, wenn die spezifische Wärmekapazität des Behälterinhalts die der Behälterwand so weit übersteigt, wie es bei mit Flüssigkeit gefüllten Metallbehältern zutrifft. [BaSt06].

5. Die konventionelle Verflüssigung

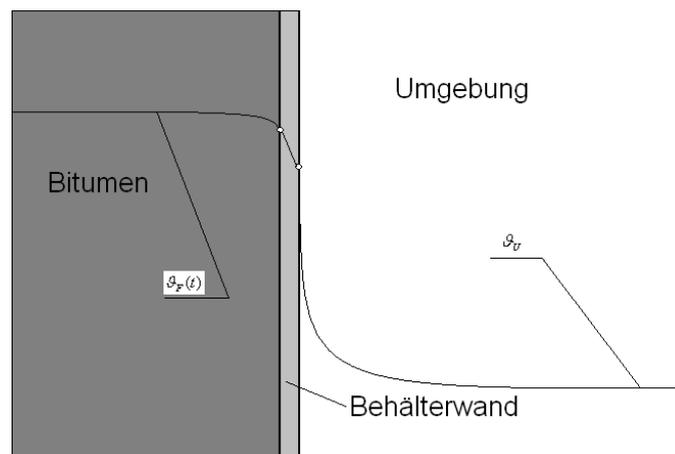


Abbildung 73: Temperaturverlauf bei Abkühlung eines dünnwandigen Behälters

Der Wärmestrom innerhalb der Behälterwand (BW) wird durch folgende Formel beschrieben.

$$\vec{Q}_{BW}(t) = \dot{q} \cdot A_{BW} = \alpha_{BW} \cdot A_{BW} \cdot (\vartheta_F(t) - \vartheta_u) \left[\frac{J}{s} \right]$$

Formel 5-31

α_{BW}	Wärmeübergangskoeffizienten der Behälterwand [W/m ² K]
A_{BW}	Oberfläche der gedämmten Behälterwand [m ²]
ϑ_F	Fluidtemperatur [°C]
ϑ_u	Umgebungstemperatur [°C]

Dieser abfließende Wärmestrom bewirkt eine Abnahme der inneren Energie U_F des Bitumens.

$$\vec{Q}(t) = - \frac{dU_F}{dt}$$

Formel 5-32

dU_F	Innere Energie $dU_F = m_f \cdot c_p \cdot d\vartheta_F$
m_F	Masse des Bitumens [kg]
c_p	spezifische Wärmekapazität des Bitumens (ca. 1800 J/kgK)
$d\vartheta_F$	Temperaturdifferenz im Fluid Wärmeverlust [K]

5. Die konventionelle Verflüssigung

Hieraus folgt:

$$\vec{Q}(t) = -m_f \cdot c_p \cdot \frac{d\vartheta_F}{dt}$$

Formel 5-33

Durch Einsetzen von Gleichung 5-33 in Gleichung 5-32 und Umformen erhält man die gewöhnliche lineare Differentialgleichung erster Ordnung für die Flüssigkeitstemperatur:

$$\frac{d\vartheta_F}{dt} + \frac{\alpha_{BW} \cdot A_{BW}}{m_F \cdot c_p} (\vartheta_F - \vartheta_U) = 0$$

Formel 5-34

Gemäß Baehr und Stephan [BaSt06; S.43f] lautet die Lösung unter den Anfangsbedingungen $\vartheta_F = \vartheta_{F0}$ zur Zeit $t = 0$:

$$\frac{\vartheta_F - \vartheta_U}{\vartheta_{F0} - \vartheta_U} = e^{\left(\frac{\alpha_{BW} \cdot A_{BW}}{m_F \cdot c_p} t\right)}$$

Formel 5-35

Sollte sich das Vorhalten einer großen Schmelze unter konstanter Temperatur im Rahmen dieser Untersuchungen als Teil der besten Aufschmelzvariante erweisen, muss dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik folgend in einer Betriebsphase I (Erstellung der Schmelze) dem sich in Umgebungstemperatur ϑ_U befindlichen Bitumen die Heizleistung $\vec{Q}_H = \vec{Q}_H(t)$ zugeführt werden. Da das Bitumen den Wärmestrom $\vec{Q}_H(t)$ an die Umgebung verliert, folgt weiter:

$$\frac{dU_F}{dt} = -\vec{Q}(t) + \vec{Q}_H(t)$$

Formel 5-36

Hieraus folgt die Differenzialgleichung.

$$\frac{d\vartheta_F}{dt} + \frac{\alpha_{BW} \cdot A_{BW}}{m_F \cdot c_p} (\vartheta_F - \vartheta_U) = \frac{\vec{Q}_H(t)}{m_F \cdot c_F}$$

Formel 5-37

5. Die konventionelle Verflüssigung

Ihre allgemeine Lösung unter Beachtung der Anfangsbedingung $\vartheta_F = \vartheta_{F0}$ zum Zeitpunkt $t=0$ lautet gemäß Baehr und Stephan [BaSt06; S.45]:

$$\vartheta_F = \vartheta_U + e^{\left(\frac{-t}{t_0}\right)} \cdot \int_0^t \frac{\bar{Q}_H}{\alpha_{BW} \cdot A_{BW}} \cdot e^{\left(\frac{-t}{t_0}\right)}$$

Formel 5-38

Dabei ist $t_0 = \frac{m_F \cdot c_p}{\alpha_{BW} \cdot A_{BW}}$. Nimmt man eine *konstante* Heizleistung \bar{Q}_H an, so folgt:

$$\vartheta_F = \vartheta_U + \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{t_0}\right)}\right] \cdot \frac{\bar{Q}_H}{\alpha_{BW} \cdot A_{BW}}$$

Formel 5-39

In Betriebsphase II existiert die Schmelze bei ihrer Solltemperatur und es kann mit einer Zugabe von kaltem Bitumen begonnen werden (Mathematisch: $t \rightarrow \infty$). Dann erreicht die Temperatur des Bitumens den Wert:

$$\vartheta_{F\infty} = \vartheta_U + \frac{\bar{Q}_H}{\alpha_{BW} \cdot A_{BW}}$$

Formel 5-40

Die zugeführte Heizleistung reicht dann gerade aus, um den Verlustwärmestrom \bar{Q} zu decken. Der Temperaturverlauf innerhalb der Bitumenaufschmelzanlage ist stationär.

5.6.2 Temperaturverluste in der Behälterwand

In der Praxis wird eine geeignete Wärmedämmung (Mineralfaserdämmwolle, Vakuumpaneele) der in Abschnitt 5.6.1 betrachteten dünnen Behälterwand angebaut werden. Deshalb sei hier nur eine theoretische Betrachtung der konduktiven Energieverluste an den Behälterwänden aufgeführt. Der Wärmestrom bestimmt sich nach Gleichung 5-31. Die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α_{BW} der Behälterwand (Einheit W/m^2K) erfolgt nach der Formel:

$$\alpha_{BW} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\frac{d_i}{\lambda_i}} \right)$$

Formel 5-41

Dabei sind im n-schichtigen Wandaufbau die Dicken d der einzelnen Schichten (Blech, Dämmung usw.) und λ die Wärmeleitfähigkeiten der jeweiligen Schichten. Für eine Ab-

5. Die konventionelle Verflüssigung

schätzung der Kosten aus Energieverlusten wiederum muss man nur die Energie mit dem Kilowattpreis (z.B. 0,16 €/kWh) und der Betriebsdauer oder dem Betrachtungszeitraum (z.B. 24h) multiplizieren.

5.6.3 Temperaturverluste an der freien Oberfläche

An den freien Oberflächen der Schmelzanlage (Abbildung 74) ist mit großen Energieverlusten aus Konvektion zu rechnen.

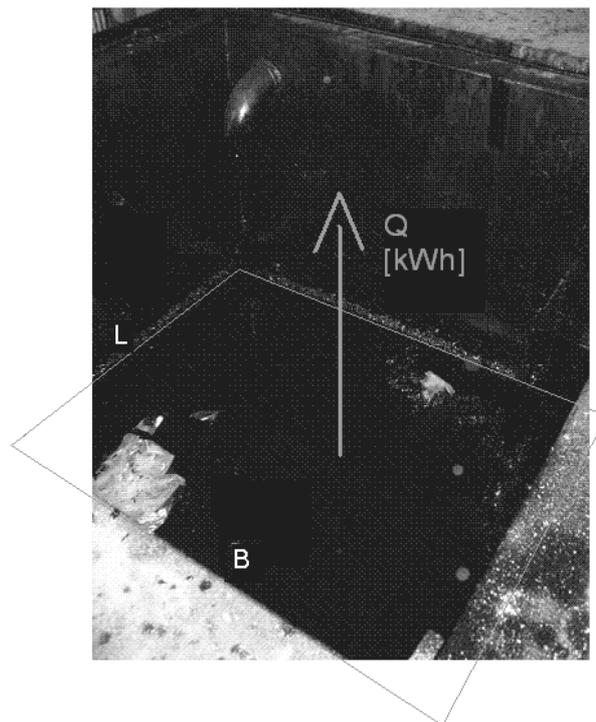


Abbildung 74: Darstellung der freien Oberfläche eines Schmelztopfs

Der Wärmestrom wird dabei durch

$$\bar{Q}_{fo} = \alpha \cdot A_{fo} \cdot \Delta\vartheta$$

Formel 5-42

beschrieben. Der konvektive Wärmeübergang beschreibt dabei den Transport der Wärme von einem Körper zu einem Fluid. Da sich die Fluidität des Bitumens stark von der der Luft unterscheidet, kann man auch hier in erster Näherung von einem Wärmeübergang zwischen Feststoff und Fluid mit dem Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ ausgehen.

5. Die konventionelle Verflüssigung

Hier soll also der Wärmeübergang wie bei einer Platte mit freier Konvektion simuliert werden, womit sich folgende Gleichung zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α anbietet:

$$\alpha_{fo} = 2 + 12 \cdot \sqrt{v}$$

Formel 5-43

$$\text{Luftgeschwindigkeit} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

5.6.4 Abschließende Entwicklung einer Faustformel für die Primärenergieverluste

Bei der konventionellen Bitumenverflüssigung im Schmelztopf ist neben dem Primärenergieaufwand zur Bitumenerwärmung der Primärenergieverlust über die Oberflächen des Schmelztopfs – über Behälterwände und Bitumenoberflächen mit Luftkontakt (freie Oberflächen) – maßgebend. Alle bisher in diesem Abschnitt durchgeführten Berechnungen gingen von einer annähernd unendlich ausgedehnten Schmelze aus, aber im Zuge einer Verfahrensdimensionierung ist eine Optimierung des Schmelztopfvolumens erforderlich. Dies soll mit Hilfe der in diesem Abschnitt vorgenommenen Überlegungen zu Energieverlusten möglich werden. Hierzu sollen die Verluste über Oberflächen und Behälterwände mittels der in den letzten Abschnitten dargestellten Gleichungen berechnet und aufaddiert werden.

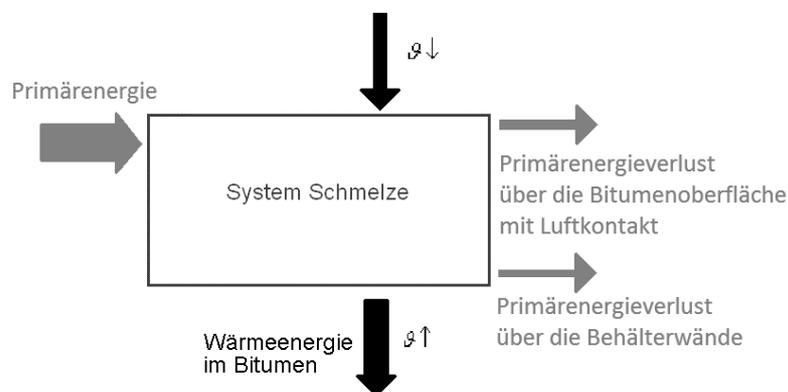


Abbildung 75: Systembetrachtung der Verflüssigungsanlage, wobei die der Schmelze zugeführte Energie entweder (größtenteils) dem kalten Bitumen im Zuge der Verflüssigung zugeführt wird oder (zu einem geringen Teil) über die Oberflächen dem System verloren geht

Die Energieverluste an den Oberflächen der Schmelze lassen sich näherungsweise durch die Konduktionsströme an den Behälterwänden und dem Behälterboden (Abbildung 75), integriert über die Zeit beschreiben. Da sich durch ständige Energiezugabe ein wie in Abschnitt 5.6.1 beschriebener stationärer Zustand einstellt, lässt sich die Energiemenge auch beschreiben durch:

5. Die konventionelle Verflüssigung

$$Q_{BW} = U_{BW} \cdot A_{BW} \cdot \Delta\vartheta \cdot \Delta t$$

Formel 5-44

Ähnliches gilt für den Konvektionsstrom an der freien Oberfläche (fO) der Schmelze:

$$Q_{fO} = \alpha \cdot A_{fO} \cdot \Delta\vartheta \cdot \Delta t$$

Formel 5-45

Hierbei sind:

A_{BW} Oberfläche der Schmelze, die den Behälter berührt [m²].

A_{fO} Oberfläche der Schmelze zur Luft (freie Oberfläche) [m²]

Es seien vereinfachend die Werte aus Abschnitt 5.6.2 und 5.6.3 gewählt und folgende Annahmen getroffen:

$\varphi_{WB} = 0,10$ Verlust über Wärmebrücken

$d_{BW} = 0,004$ Dicke der Behälterwand aus PS-Hartschaumplatten [m] $\left(d_{BW} = \lambda_{BW} = 50 \frac{W}{m \cdot K}\right)$

$d_{PS} = 0,16$ Dicke der Behälterwanddämmung aus PS-Hartschaumplatten [m] $\left(\lambda_{PS} = 0,04 \frac{W}{m \cdot K}\right)$

$\Delta\vartheta = 140$ durchschnittliche Temperaturdifferenz bei der Bitumenerwärmung von 20 °C Raumtemperatur auf 160 °C Standardlagertemperatur [K]

Δt Betrachtungszeitraum [h]

$\alpha = 2 + 12 \cdot \sqrt{v}$ Näherungsformel für freie Konvektion [W/(m² K)]

$v = 1 \frac{m}{s}$ Luftgeschwindigkeit

An der Außenoberfläche der Behälterwand soll ein Wärmedurchlasswiderstand von $R_a=0,04$ [m²K/W] angenommen werden, woraus sich mit den oben genannten Werten der Wärmedurchgangskoeffizient U der Wand wie folgt berechnet:

$$\alpha_{BW} = \frac{1}{0,04 \frac{m^2 \cdot K}{W} + \frac{0,004 m}{50 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,16 m}{0,04 \frac{W}{m \cdot K}}} = 0,247 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Formel 5-46

Die Faustformel für die Energieverluste über die Oberflächen leitet sich also wie folgt her:

5. Die konventionelle Verflüssigung

$$Q_{Faust} = \left[\left(1 + \overline{0,10}^{\varphi_{WB}} \right) \cdot 0,247 \cdot A_{BW} + \overline{14}^{\alpha} \cdot A_{f0} \right] \cdot \overline{140}^{\Delta\vartheta} \cdot \Delta t \text{ [Wh]}$$

Formel 5-47

$$Q_{Faust} \approx (0,038 \cdot A_{BW} + 1,96 \cdot A_{f0}) \cdot \Delta t \text{ [kWh]}$$

Formel 5-48

Die erforderliche Energiemenge, die für eine bestimmte aufzuschmelzende Bitumenmasse m in der Zeit Δt_m benötigt wird, ergibt sich näherungsweise zu:

$$E_{Faus}^{Durchsatz} = [c_p \cdot \Delta\vartheta + h_E] \cdot m \frac{h}{3600 s} \cdot \frac{kW}{1000 W} + Q_{Faust}$$

Formel 5-49

Hierbei sind:

m	zu schmelzende Bitumenmasse in kg (maximal 15.000 kg/h für die Ausfuhrmengen eines großen Asphaltmischwerks)
c_p	spezifische Wärmekapazität des Bitumens. Für die Faustformel: 2.000 Ws/kg K
$\Delta\vartheta$	durchschnittliche Temperaturdifferenz ca. 140 K
h_E	≈ 200.000 Ws/kg Bitumenenthalpie
Δt_m	Zeit zum Schmelzen der Masse $m_{Bitumen} \cdot \Delta t$ in $Q_{Faust} = \Delta t_m$ [h]

Damit ergibt sich die erforderliche Energiemenge zu:

$$E_{Faus}^{Durchsatz} = 0,13 \cdot m + (0,038 \cdot A_{BW} + 1,96 \cdot A_{f0}) \cdot \Delta t_m \text{ [kWh]}$$

Formel 5-50

Mit Hilfe der beiden in diesem Abschnitt ermittelten Faustformeln sind eine schnelle und ausreichend genaue Vorabschätzung des Bitumenaufschmelzanlagenenergiebedarfs und damit eine Vordimensionierung der Anlage möglich.

Mit Hilfe der beiden in diesem Abschnitt ermittelten Faustformeln sind eine schnelle und ausreichend genaue Vorabschätzung des Bitumenaufschmelzanlagenenergiebedarfs und damit eine Vordimensionierung der Anlage möglich.

5.7 Fazit zur konventionellen Bitumenverflüssigung

Ziel dieses Abschnitts war es, die thermophysikalischen Vorgänge in konventionellen Verflüssigungsanlagen darzustellen. Hierzu wurden zunächst Verflüssigungsversuche im Labor

5. Die konventionelle Verflüssigung

durchgeführt, deren Messergebnisse herangezogen werden, um die verfahrenstechnisch kritische Größe der Verflüssigungsdauer zu bestimmen und genauer zu untersuchen. Um wesentliche Einflussparameter auf die Verflüssigungsdauer zu eruieren, werden verschiedene Berechnungsansätze ausprobiert, von denen sich letztlich eine Simulation des Schmelzvorgangs mittels der Methode der finiten Differenzen als ausreichend genau (maximale Abweichung: 10% längere Verflüssigungszeit) erweist. Durch die Variation der Berechnungsparameter lässt sich nun eine Aussage über kritische Einflussgrößen bei der Wiederverflüssigung von Bitumen nennen. Zunächst zeigte sich, dass die kürzeste Seitenlänge von kalten Bitumeneinheiten der wichtigste geometrische Einflussparameter auf die wirtschaftlich bedeutsame Taktzeit der Bitumenkaltzugabe ist.

Einen noch stärkeren Einfluss hat eine physikalische Größe, die vom Anlagenbetreiber nicht gesteuert werden kann: Die niedrige Wärmeleitfähigkeit des Asphaltbindemittels nimmt Einfluss auf Thermophysik und Wirtschaftlichkeit, denn sie verursacht die hohen Verflüssigungszeiten des Asphaltbindemittels und nimmt damit indirekt Einfluss auf die Taktzeiten und die Anlagenproduktivität. Es wird daher notwendig, über Erwärmungstechniken im Bereich Bitumenkaltlogistik nachzudenken, bei denen der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit reduziert werden kann. Da konduktive und konvektive Erwärmungsprozesse keine ausreichende Verflüssigungsgeschwindigkeit gewährleisten können, muss über den Einsatz von Hochfrequenztechnik nachgedacht werden.

6 Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

In vorangegangenen Abschnitten dieser Arbeit wurde versucht, die Verflüssigungsdauer des erkalteten, in speziell hierfür entworfene Kartonagen gefüllten und bei Umgebungstemperatur gelagerten Bitumens rechnerisch zu ermitteln. Dieser analytische Ansatz sollte im Weiteren dazu dienen, den Erwärmungsprozess energetisch und wirtschaftlich zu optimieren. Hierzu wurde eine lineare Lösung auf Grundlage der Wärmeleitungsdifferentialgleichung entwickelt, für die angenommen wurde, dass ein Stefan-Problem vorlag. Praxisversuche stellten allerdings bald heraus, dass der Lösungsansatz nach Stefan oder der nach Neumann für das Verflüssigungsverhalten des Baustoffs nicht zutreffend ist. Ausschlaggebend hierfür ist der große Einfluss der relativ niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs von etwa $0,16 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Mit Blick auf die wirtschaftlichen Aspekte des Verflüssigungsverfahrens müsste somit

- 1) die Konvektion bei der konventionellen Bitumenverflüssigung im Schmelztopf so hoch wie möglich eingestellt werden, um die erforderliche Zeitdauer des Prozesses so gering wie möglich zu halten, oder
- 2) ein anderes Verfahren der Bitumenverflüssigung eingesetzt werden.

Da ersterer Ansatz einen höheren Energieeinsatz erfordert und somit zunächst zu höheren Kosten führen würde und zudem die Gefahr einer qualitativen Schädigung des Bitumens birgt, wird im Weiteren versucht, die Hochfrequenztechnik (Mikrowellen) als modernes Verfahren der Erwärmung für die Bitumenverflüssigung nutzbar zu machen. Hierzu muss auf die Grundlagen und Möglichkeiten der Mikrowellentechnik explizit eingegangen werden. Darauf aufbauend wird auch hierfür eine Modellierung der Verflüssigung erarbeitet, um später auf dieser Basis Rückschlüsse auf Materialeigenschaften und Anlagenkonfiguration zu ziehen.

6.1 Theoretische Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Der Begriff Hochfrequenztechnik bezeichnet das Anregen eines elektromagnetischen Feldes unter hoher Frequenz. Hierdurch werden alle dipolbildenden Moleküle in Schwingung versetzt. Zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder folgen den Gesetzen, die durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben werden. Die Kraft, die auf die unsymmetrischen Moleküle des Bitumens wirkt, welche durch Mikrowellen zur Schwingung angeregt werden, wird durch die Lorenzgleichung bestimmt:

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \cdot \vec{B})$$

Formel 6-1

\vec{F}	Kraft [N]
q	Ladung [As]
\vec{E}	elektrische Feldstärke [V/m]
\vec{v}	Geschwindigkeit [m/s]
\vec{B}	magnetische Induktion/Magnetfeld [T (Tesla)]

Die Vektorform wurde hier gewählt, da \vec{B} und \vec{E} Vektorfelder sind. Zusätzlich zu den Feldern \vec{B} und \vec{E} gibt es die Nebenvektorfelder der Verschiebungsdichte, für die im Vakuum gilt:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$$

Formel 6-2

und die magnetische Feldstärke oder Intensität

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \vec{B}$$

Formel 6-3

ε	Dielektrizitätskonstante/elektrische Feldkonstante/(komplexe) Permittivität
ε_0	$= \varepsilon_{\text{Vakuum}} = 8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{As}}{\text{Vm}} \right]$
μ_0	Permeabilitätskonstante/magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \right]$

Das Faradaysche Induktionsgesetz besagt, dass ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld ein elektrisches Feld erzeugt.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

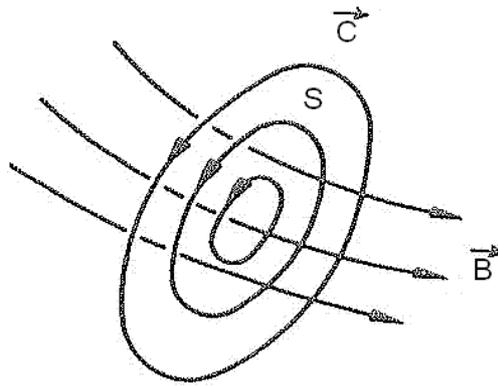


Abbildung 76: Das magnetische Feld \vec{B} erzeugt das elektrische Feld \vec{C} in der durchströmten Fläche S [Co73]

In Abbildung 76 gilt dann für die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses durch die Oberfläche S , dass sie gleich dem negativen Wert der gesamten Spannung entlang \vec{C} ist.

$$\frac{\partial \left(\int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \right)}{dt} = - \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Formel 6-4

Das zeitlich veränderliche Magnetfeld \vec{B} wird als Wirbelquelle für das elektrische Feld \vec{C} mit nicht verschwindender Rotation bezeichnet. Die dargestellte Differentialgleichung ist allerdings für die Analyse von physikalischen Problemen nicht geeignet [Co73]. Eine äquivalente Differentialgleichung kann mit Hilfe des Stokesschen Satzes aus der Vektoranalysis erzeugt werden [Co73]. Er besagt, dass das Linienintegral eines Vektors entlang einer geschlossenen Berandung C gleich dem Integral der Normalenkomponente des Rotors dieses Vektors über eine Fläche mit C als Berandung ist [Co73] (der Rotor eines Vektors \vec{V} wird dargestellt als: $\nabla \times \vec{V}$).

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_s (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Formel 6-5

Die Fläche S kann hierbei beliebig gewählt werden, das heißt, die beiden Integrale

$$\int_s (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Formel 6-6

sind gleich, wenn folgende Formel gilt:

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Formel 6-7

Dies ist die Differentialgleichung für das Induktionsgesetz. Sie verdeutlicht den Zusammenhang zwischen elektrischer Feldstärke \vec{E} und magnetischem Feld \vec{B} . Durch den Rotor $\nabla \cdot \vec{E}$ lässt sich die Absorption der elektromagnetischen Energie als physikalische Erscheinung beim Einwirken des Feldes auf bestimmte Stoffe erklären. Während einige Materialien, wie das in Abbildung 77 auf Molekularebene dargestellte Silikon und Benzin, keine elektromagnetische Strahlung absorbieren, wird in anderen Materialien, wie dem in Abbildung 78 molekular dargestellten Wasser, die elektromagnetische Energie in Wärmeenergie umgewandelt.

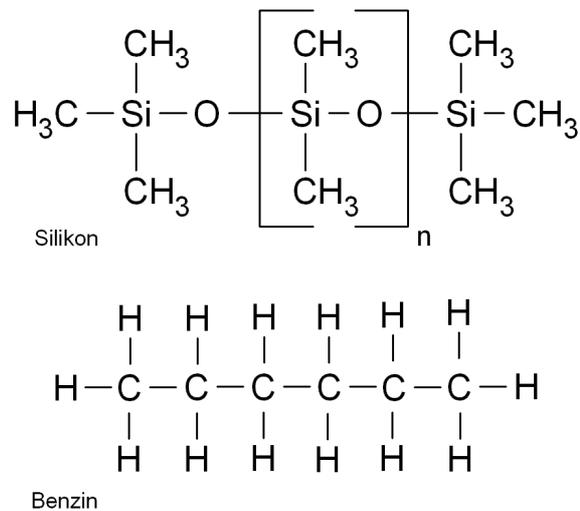


Abbildung 77: Silikon- und Benzin-Molekül

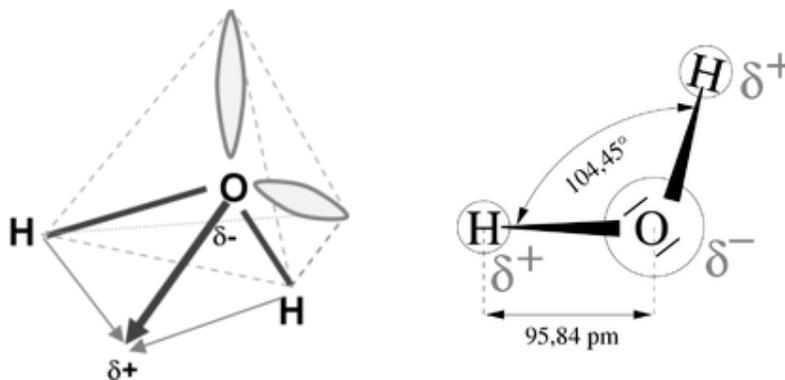


Abbildung 78: H₂O-Molekül mit dargestelltem Dipolcharakter

Die Erklärung für diesen Effekt liegt hierbei in der Dipolbildung erregbarer Moleküle. Sie werden durch die elektromagnetischen Wellen in Rotationsschwingung versetzt, wodurch

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

ein Großteil der Wärme entsteht. Der zweite Erwärmungsanteil resultiert aus der Schwingungsanregung frei beweglicher Ionen, deren Zusammenstöße Energie entstehen lassen, die sich als Wärmeenergie darstellt. Die neben diesen als Orientierungs- und Ionenpolarisation bezeichneten Effekte auftretende Ferro- und Atompolarisation sollen hier vernachlässigt werden. Entsprechend ihres Polarisationsverhaltens können alle Materialien in Bezug auf ihr Verhalten im Mikrowellenfeld in drei Kategorien eingeteilt werden:

- 1) absorbierende Stoffe (Bsp. Wasser)
- 2) transparente Stoffe (Bsp. PE)
- 3) reflektierende Stoffe (Bsp. Stahl)

Zu erwähnen ist, dass in der Regel die drei Effekte der Reflektion, Transparenz und Absorption gleichzeitig auftreten, wobei stets einer von ihnen stark dominiert. Welcher Effekt vorherrschend ist, ist beispielsweise abhängig von der Temperaturabhängigkeit der Permittivität ϵ_r , also der Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder.

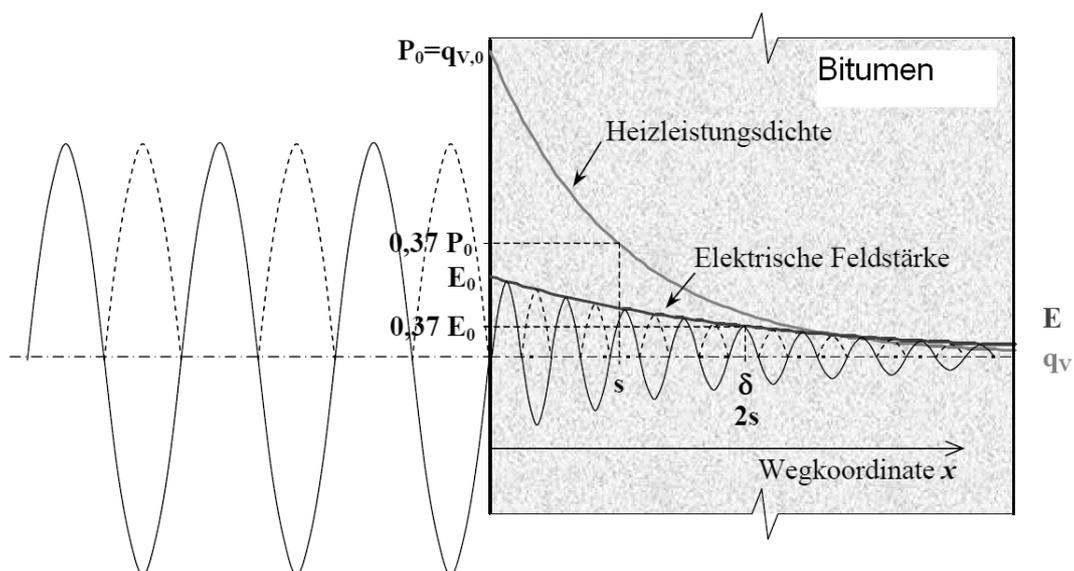


Abbildung 79: Bitumen als mikrowellenabsorbierendes Material (allgemeine Darstellung gemäß [Bu04])

Wie Abbildung 79 zeigt wird die elektrische Feldstärke der Mikrowellen an der Bitumenoberfläche deutlich und sprunghaft gedämpft und klingt mit fortschreitender Eindringtiefe in das Material weiter ab. Die materialabhängige Eindringtiefe der Mikrowellenstrahlen ist definiert als die Entfernung von der Körperoberfläche, in der die Heizleistungsdichte auf 36,8% ihres Oberflächenwertes abgesunken ist [Me98]. Der Verlust an elektrischer Feldstärke bei der Eindringung der Wellen in das Bitumen entspricht bei Integration über die Erwärmungszeit

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

der dem Material zugeführten Wärmenergie und ist ein Maß für die damit erzielte dielektrische Bitumenerwärmung.

Um die Eindringtiefe der Mikrowellenstrahlen in den Baustoff Bitumen zu ermitteln, müssen im Folgenden zunächst die Begriffe der komplexen und der relativen Permittivität abgegrenzt und erläutert werden. Die relative Permittivität ϵ_r ist das Verhältnis der komplexen Permittivität zu der des Vakuums ϵ_0 :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Formel 6-8

Die komplexe Permittivität ϵ – und damit in gleicher Weise die relative Permittivität ϵ_r – lassen sich durch einen Real- und einen Imaginärteil beschreiben:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

Formel 6-9

ϵ'	Realteil der komplexen Permittivität
$j\epsilon''$	Imaginärteil der komplexen Permittivität

Da bei der Verflüssigung von Bitumen nur die vorgeschriebenen Frequenzen von 2,45 GHz und 915 MHz als gängige zugelassene Frequenzen industrieller Mikrowellenanlagen zum Einsatz kommen werden, wird im Folgenden die relative Permittivität als frequenzunabhängig betrachtet.

Die komplexe relative Permittivität lässt sich wie in Abbildung 80 in einem Zeigerdiagramm darstellen [Bu04].

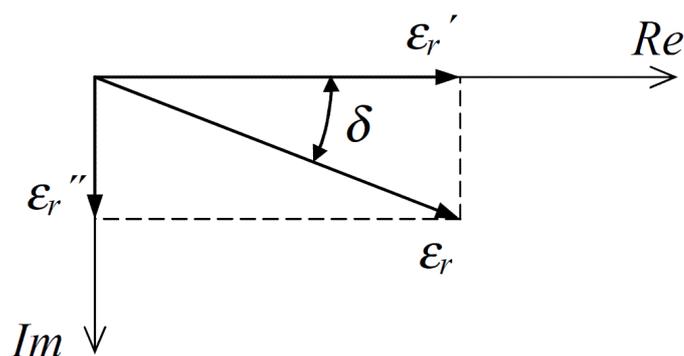


Abbildung 80: Der Zusammenhang des Verlustwerts δ eines Materials zur komplexen und relativen Permittivität lässt sich mittels eines Zeigerdiagramms verdeutlichen [Bu04]

Der Realteil ϵ_r' der Permittivität gibt an, inwieweit die Moleküle eines Materials polarisierbar sind [Bu04]. Die Polarisierung ist mit der Reibung einzelner Bausteine verbunden, d.h. es

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

entstehen Energieverluste [Bu04]. Das Maß hierfür stellt der Imaginärteil der relativen Permittivität dar. Die Verluste haben einen „thermischen Charakter“ [Bu04]. Der Tangens des Winkels δ zwischen dem Vektor ϵ_r'' und dem Realteil ϵ_r' wird als Verlustfaktor (Verlustwert) bezeichnet.

Der Verlustfaktor (Verlustwert) $\tan \delta$ lässt sich somit über die Beziehung

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$$

Formel 6-10

bestimmen.

Für einen Verlustwinkel von weniger als 0,32 lässt sich nachweisen (siehe Anhang 2), dass der Fehler der später getroffenen Vereinfachung

$$\epsilon_r' \approx \epsilon_r$$

Formel 6-11

kleiner als 5 % ist. Eine weitere häufig getroffene und für die meisten absorbierenden Materialien zutreffende Annahme ist, dass

$$\epsilon_r'' \approx \epsilon_r'$$

Formel 6-12

gilt. Dann gilt auch, dass der Tangens des Verlustwerts $\tan \delta$ in etwa gleich eins ist. Generell lässt sich gemäß [Bu04] mit Hilfe der Annahme $\tan \delta \leq 1$ die Gleichung der Eindringtiefe s

$$s = \frac{c_0}{\omega \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}\right)^2} - 1}}$$

Formel 6-13

auf folgende Form vereinfachen:

$$s \approx \frac{c_0}{\omega \cdot \tan \delta \cdot \sqrt{\epsilon_r}}$$

Formel 6-14

c_0	Vakuum-Lichtgeschwindigkeit	$c_0 = 3 \cdot 10^8 \left(\frac{m}{s}\right)$
ω	Kreisfrequenz	$\omega = 2\pi f$ [-], wobei in Deutschland zulässige Mikrowellengeräte zumeist eine Frequenz f von 2,45 [GHz] besitzen.
δ	Verlustwinkel [°].	Der Verlustfaktor $\tan \delta$ eines Dielektrikums ist entweder vom Hersteller angegeben oder kann gemessen werden ([He09], S.75.)

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

$$\varepsilon_r \quad (\text{relative}) \text{ Permittivitätszahl} \quad \varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Da ferner gilt

$$c_0 = f \cdot \lambda_0$$

Formel 6-15

folgt für die Eindringtiefe s mit $\lambda_0 \approx 12,2 \text{ cm}$ als Wellenlänge für in Deutschland zulässige Mikrowellengeräte:

$$s \approx \frac{1,95 \text{ cm}}{\tan \delta \cdot \sqrt{\varepsilon_r}}$$

Formel 6-16

Die Permittivität/Dielektrizitätskonstante des Bitumens ist laut [Wa42 Tab. 1] zwischen 2,45 und 2,54. Hier sei auf der sicheren Seite ein mittlerer Dielektrizitätswert des Baustoffs von 2,54 angenommen.

Die Praxis zeigt, dass im Bitumen eine Eindringtiefe nach oben genannter Definition von ca. 20 bis 23 cm auftritt. Dies verdeutlicht, dass bei diesem Baustoff ein relativ niedriger Verlustwert von ca. 0,05 bis ca. 0,06 vorliegt. Gerade bei einer geplanten großindustriellen Anwendung auf große Massen des Bindemittels ist dies äußerst positiv zu werten.

6.2 Versuche mit dem Bindemittel unter Hochfrequenzerwärmung

Nach der Ermittlung der theoretischen Eindringtiefen im vorangegangenen Abschnitt stellt sich die Frage, ob und in welcher Weise die hochfrequente Strahlung in der Praxis in das Bitumen eindringt und dieses erwärmt. Hierzu werden im Weiteren Vorversuche durchgeführt, die als Versuchsreihe in Abschnitt 6.2.1 vorgestellt werden. Sie dienen dazu festzustellen, ob es möglich ist, Bitumen durch Mikrowellen zu erwärmen und ob die zuvor abgeschätzte Eindringtiefe (Abschnitt 6.1) mit der tatsächlichen Eindringtiefe übereinstimmt. Hierauf aufbauend werden im nächsten Abschnitt (Abschnitt 6.2.1) tiefergehende Untersuchungen zur Homogenität der Erwärmung in unterschiedlich angeordneten Versuchsofen durchgeführt. Dies stellt einen ersten Schritt zur Ermittlung der Konfiguration einer geeigneten Produktionsanlage dar, mit der große Bitumenmengen vom Anwender gesteuert wiederverflüssigt werden können. Die aus diesen Untersuchungen gewonnenen Daten können als Grundlage für weitergehende Optimierungen des Anlagenbaus mittels numerischer Methoden genutzt werden. Sie dienen auch einer ergänzenden Auswertung aller durchgeführten Versuche hinsichtlich des zu erwartenden Anlagenwirkungsgrads (Abschnitt 6.2.4). Ab-

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

schließlich werden die Beobachtungen aus allen Versuchen dieses Abschnitts einer ganzheitlichen Bewertung zugeführt, um daraus weitere Erkenntnisse für die Produktionspraxis abzuleiten.

6.2.1 Vorversuche zur Bestimmung der Mikrowelleneindringtiefe in Bitumen

Zunächst wird ein Vorversuch zur Ermittlung der tatsächlichen Eindringtiefe der hochfrequenten Strahlung in den Baustoff durchgeführt. Mit der Versuchsanordnung soll die Erwärmung von Bitumen in verschiedenen Abständen von der Strahlungsquelle senkrecht zur Strahlungsrichtung untersucht werden. Hierzu wird ein (auf seiner Innenseite silikonierter) 40 Liter fassender Karton vollständig mit Bitumen gefüllt. Die Hohlleitermündung eines elektromagnetischen Strahlungsgebers – eines so genannten Magnetrons – mit einer Leistung von 6 kW und einer Frequenz von 2,45 GHz wird, wie in Abbildung 81 dargestellt, horizontal auf Höhe der Oberkante des kalten Bitumenkörpers montiert.

In Takten von 3 Minuten wird nun mit der Erwärmung begonnen. Die gleichen Taktzeiten stellen sicher, dass dem Versuchskörper aus Bitumen immer die gleiche Energie zugeführt wird. Zwischen den Zeitintervallen werden in horizontalen Abständen (von der Hohlleitermündung) von 6, 12, 22 und 30 cm die Temperaturen mittels Infrarotthermometer berührungslos von der Bitumenoberfläche abgegriffen. Die mit dieser Art der Temperaturmessung verbundenen Ungenauigkeiten in einer Größenordnung von ca. ± 2 °C werden hier als noch hinnehmbar eingeschätzt. Die sich einstellenden Temperaturen in nachfolgender Tabelle sind zur schnelleren Erfassung der maßgeblichen Unterschiede unterschiedlich dunkel hinterlegt dargestellt.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

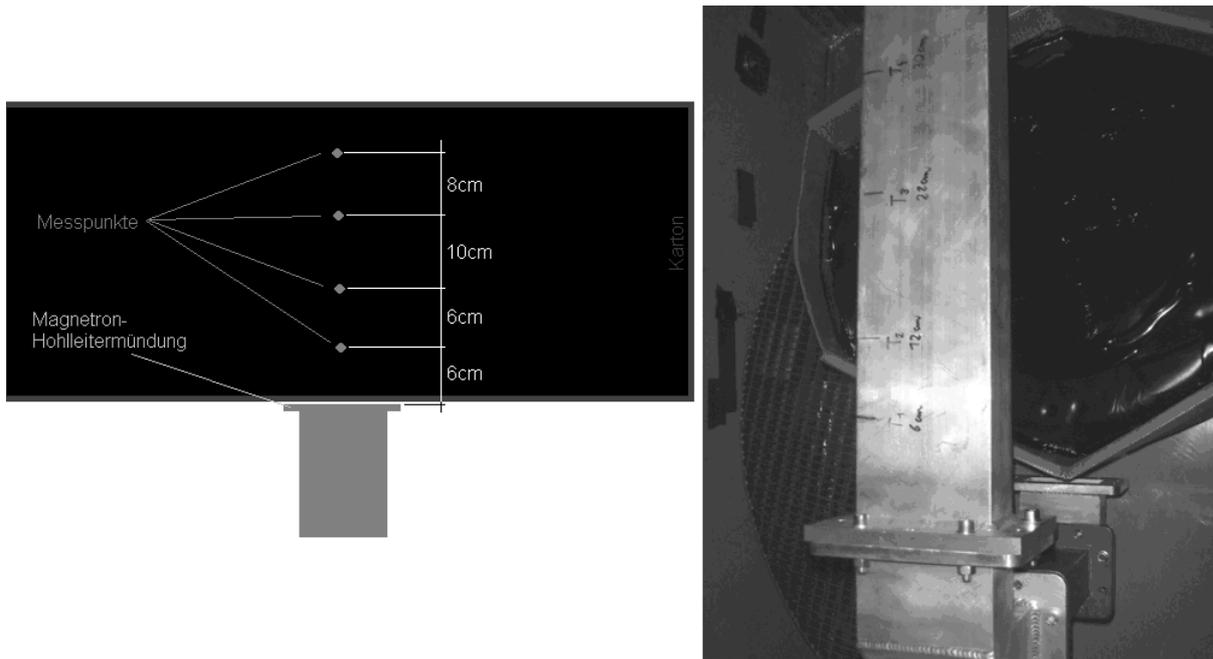


Abbildung 81: Vorversuch zur Mikrowellenverflüssigung mit (links) einer Prinzipskizze des Versuchsaufbaus von oben und (rechts) einem Foto des Versuchsaufbaus

Inter- vall	MW Power (W)	dt (min.)	Temp. Karton (°C)	Temp. Bitumen 6 cm (°C)	Temp. Bitumen 12 cm (°C)	Temp. Bitumen 22 cm (°C)	Temp. Bitumen 30 cm (°C)
			36	35	36	52	49
1	6000	3	58	41	38	52	51
2	6000	3	67	48	43	50	50
3	6000	3	89	54	45	53	53
4	6000	3	92	180	51	55	53
5	6000	3	99	178	52	57	55
6	6000	3	101	172	55	58	57
7	6000	3	98	155	62	60	56
8	6000	3	99	152	64	64	56
9	6000	3	109	147	68	138	58
10	6000	3	107	140	66	96	79
11	6000	3	105	139	70	115	105
12	6000	3	112	141	115	129	109
13	6000	3	104	142	139	138	131
14	6000	3	103	145	142	138	125
15	6000	3	115	144	142	139	111
16	6000	3	105	144	143	142	112
17	6000	3	102	145	145	142	110
18	6000	3	109	145	145	142	107
19	6000	3	111	150	149	145	140
20	6000	3	114	152	151	147	143
21	6000	3	119	153	153	149	137
22	6000	3	109	153	153	150	148

Tabelle 6-1: Temperaturentwicklung des Bitumens gemessen mittels Infrarotthermometer

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

Die starken Sprünge im Farbverlauf verdeutlichen eine Inhomogenität in der Wärmeentwicklung des Probekörpers aus Bitumen. Während des Versuchs ließen sich zusätzlich zu den dokumentierten Temperaturen folgende Vorgänge am Bitumen beobachten:

- 1) An der Bindemitteloberfläche bilden sich an verschiedenen Stellen Öffnungen, aus denen heißflüssiges Bitumen austritt (siehe Abbildung 82).

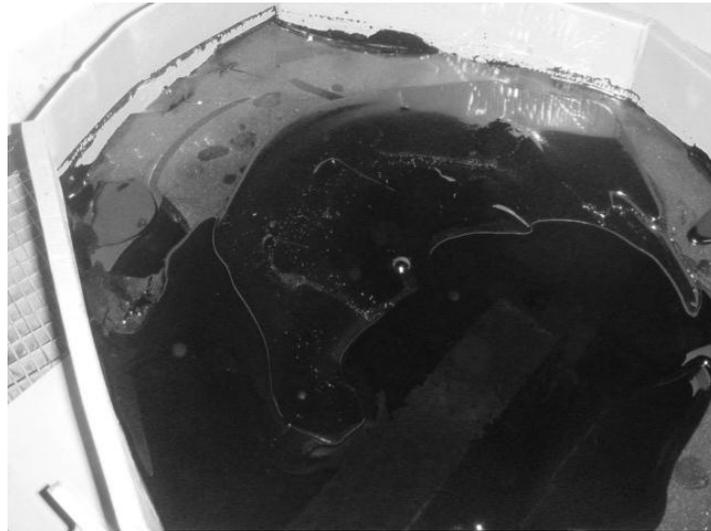


Abbildung 82: Das bereits verflüssigte Bitumen dringt aus dem Körperinneren des kalten Bitumens an die Oberfläche

- 2) Zu einem späteren Versuchszeitpunkt (Intervall 14 bis 19) bilden sich in dem noch unverflüssigten Baustoff Kanäle mit heißflüssigem Bitumen aus.
- 3) Gegen Versuchsende schwimmen noch feste Bitumenbestandteile in der Schmelze und verflüssigen schnell.

Die große Inhomogenität der Erwärmung, die aus den starken farblichen Schwankungen in Tabelle 6-1 bereits hervorgeht, wird ein weiteres Mal durch Abbildung 83 verdeutlicht.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

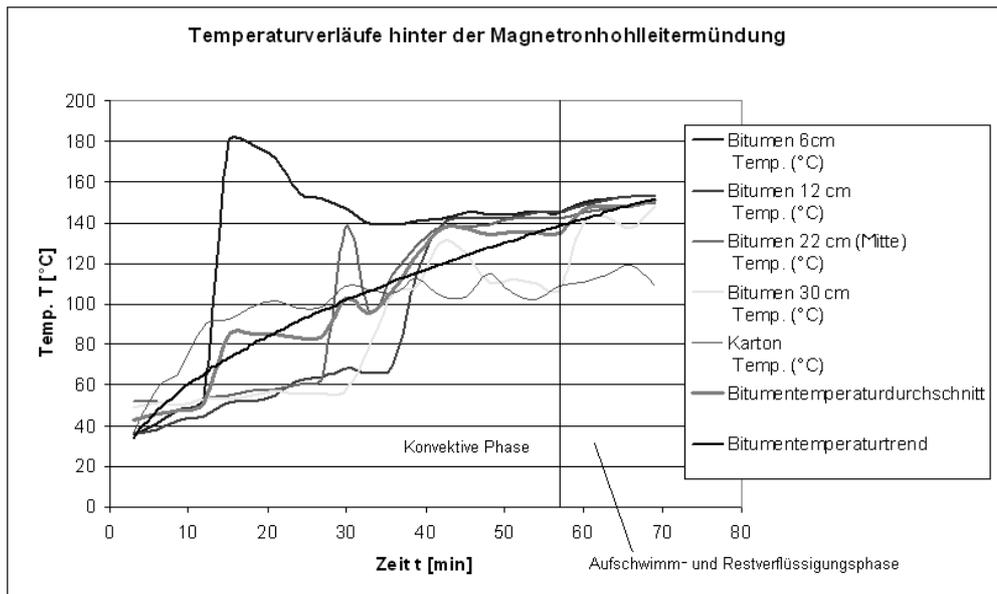


Abbildung 83: Temperaturentwicklung im Bitumen und am Karton aus obigen Datenreihen über die Zeit mit einer Trendlinie für die Durchschnittstemperatur am Baustoff; Bitumen 70/100; Ausgangstemperatur 20,5 °C

Aus den dargestellten Kurven (Abbildung 83) lassen sich unter Rückgriff auf die visuellen Beobachtungen folgende Thesen aufstellen:

- 1) Zu Beginn der Mikrowellenbestrahlung erwärmt sich der Karton am stärksten und schneller als das Bitumen. Seine Temperatur bleibt im weiteren Versuchsverlauf jedoch hinter der Durchschnittstemperatur des Bindemittels zurück.
- 2) Mit steigender Durchschnittstemperatur des Bindemittels wird die Temperaturverteilung im Baustoff homogener.
- 3) Die Fähigkeit des Bindemittels, die elektromagnetische Energie zu absorbieren, ist zu Beginn des Versuchs größer als am Ende.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

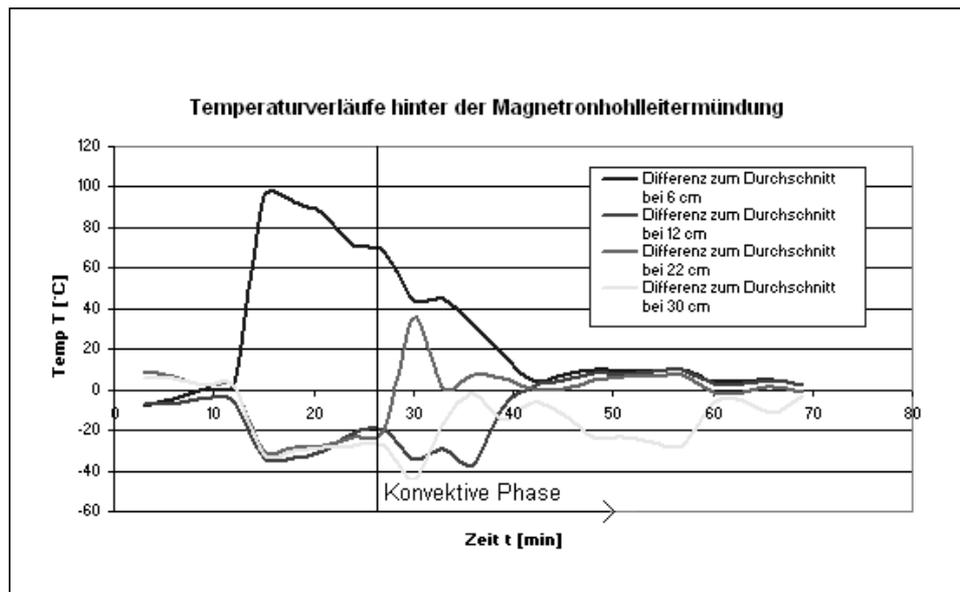


Abbildung 84: Um die Durchschnittstemperaturzunahme bereinigte Temperaturkurven zur Abgrenzung des Bereichs, in dem die interne Konvektion die Verflüssigung im statischen Mikrowellenofen beschleunigt (vgl. oben)

Aus den Differenzen der Temperaturreihen zur Durchschnittstemperatur im Bitumen lässt sich die Tendenz zur internen Wärmekonvektion in den beobachteten Kanälen über einen gewissen Zeitraum hinweg verdeutlichen. Wie aus Abbildung 83 und Abbildung 84 ersichtlich wird, findet beispielsweise nach 28 Sekunden ein starker Wärmetransport von anderen Bereichen des Baustoffs in einen Bereich 22 Zentimeter hinter der Hohlleitermündung statt. Dieser Vorgang der Wärmekonvektion wirkt sich günstig auf den Erwärmungsfortschritt aus und treibt die Bitumenverflüssigung voran. Allerdings sollte verdeutlicht werden, dass dieser für eine schnelle Verflüssigung sehr günstige Effekt bei der geplanten großindustriellen Anwendung nur bedingt nutzbar ist. Im Versuch wurden 40 Kilogramm Bitumen über einen Zeitraum von rund 70 Minuten verflüssigt. Bei einer gewünschten Durchsatzleistung von 12 Tonnen pro Stunde muss die zu planende Mikrowellenverflüssigungsanlage 200 Kilogramm pro Minute verflüssigen. Es ist also davon auszugehen, dass die Kanal-Konvektion bei Weitem zu träge ist, um sich in den geplant kurzen Taktzeiten günstig auszuwirken. Ein Schwerpunkt der durchzuführenden Versuche sollte dementsprechend auf einer Homogenisierung des elektromagnetischen Feldes liegen. Die hier zur Verfügung stehenden Möglichkeiten und das Vorgehen werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

Ein Effekt, dessen Existenz in These 3) vermutet wurde, ist der eines mit steigender Temperatur sinkenden Wärmeabsorptionsgrads des Bitumens. Diese Materialeigenschaft verhindert den bei der Hochfrequenzerwärmung von Wasser bekannten gegenteiligen Effekt, dass bereits erwärmte Bereiche des Wärmeguts die Wärmeenergie stärker absorbieren als noch kalte Bereiche (Selektivität). Sollte es sich zeigen, dass dieses Phänomen beim Asphaltbin-

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

demittel tatsächlich nicht zu erwarten ist, würde sich dies günstig auf die Machbarkeit des geplanten Verfahrens auswirken.

Die nun folgenden Großversuche sollen primär Erkenntnisse im Bereich der Homogenisierung liefern, um so die Planung von leistungsstarken Großanlagen zu ermöglichen. Damit einhergehend wird eine mögliche Selektivität untersucht, die sich in diesem Kontext ungünstig auswirken kann. Letztlich können auch Rückschlüsse auf den für die Anlagenplanung wichtigen energetischen Wirkungsgrad des Verfahrens geschlossen werden. Wenn ausreichende Erkenntnisse über die Homogenisierung vorliegen, sind für die Untersuchung von Selektivität und Wirkungsgrad gegebenenfalls weitere Versuchsanordnungen notwendig.

6.2.2 Versuche zur thermischen Homogenität bei der Bitumenerwärmung im Hochfrequenzofen

Zum Bau der für die Homogenitätsuntersuchung benötigten Versuchsanordnungen sind zunächst einige theoretische Vorüberlegungen nötig. In Abschnitt 6.2.2.1 wird zunächst auf die Wahl der technischen Vorrichtungen zum Einbringen der Mikrowellenstrahlen in die Ofenkammer – das sogenannte „Einkopplungssystem“ – eingegangen. Anschließend wird in Abschnitt 6.2.2.2 der Bau der Temperaturentnehmer, die in die Bitumenprobekörper eingebracht werden sollen, um die Temperaturänderungen zu bestimmen, dargestellt. In den Abschnitten 6.2.2.3 und 6.2.2.4 werden dann an verschiedenen Versuchsanordnungen Großversuche durchgeführt.

6.2.2.1 Vorüberlegungen zum Versuchsaufbau

In einem Mikrowellenofen bildet sich durch die Reflexion der ausgesandten Strahlen ein „komplexes Mikrowellenfeld, welches das Wärmgut umgibt, das aber ohne besondere Maßnahmen sehr inhomogen ist.“ [Bu04]

Zur Homogenisierung des elektromagnetischen Feldes gibt es gemäß Buryan [Bu04] im Wesentlichen drei Möglichkeiten:

- 1) Feldrührer (Stirrer)
- 2) Drehteller für das Wärmgut
- 3) Anschluss mehrerer Hohlleitermündungen oder Antennen (optimales Einkopplungssystem)

Feldrührer sind Vorrichtungen aus Metall, die sich um die eigene Achse drehen und deren Schaufeln die elektromagnetischen Wellen brechen. Sie ähneln in ihrem Aufbau Ventilatoren, dienen aber bei geschickter Anordnung in erster Linie dazu, die Mikrowellen in alle Raumrichtungen zu verteilen.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

Mit Drehtellern werden Mikrowellenöfen zumeist dann ausgestattet, wenn sie für Wärmegüter verschiedener Geometrie eingesetzt werden sollen, wie es bei Haushaltsmikrowellen der Fall ist. Dabei befindet sich das Wärmegut für einen gewissen Zeitraum auf dem rotierenden Drehteller und wird so durch die Zonen unterschiedlicher Feldstärke im Ofen hindurchtransportiert. Hohlleiter leiteten, annähernd verlustfrei, elektromagnetische Wellen von der Strahlungsquelle (in der Regel dem Magnetron) zur Hohlleitermündung an einen bestimmten Ort in der Wärmekammer. Es sind Leitungsrohre mit zumeist rechteckigem, speziell auf die Mikrowellenfrequenz abgestimmtem Querschnitt. Antennen ziehen das elektromagnetische Feld aus einem Hohlleiter in die Wärmekammer. Die Strahlung breitet sich dann gleichmäßig, senkrecht zum zylindrischen Antennenkörper aus. Für die hier durchgeführten Versuche wird lediglich die letzte der aufgeführten Varianten gewählt, da Buryan [Bu04] in seinen Untersuchungen zeigen konnte, dass Feldrührer bei gut absorbierenden Werkstoffen keine Wirkung zeigen und dass Drehteller für die geplanten großvolumigen Verpackungseinheiten, die in kurzen Taktzeiten verflüssigt werden müssen, eine repetierende Arbeitsweise verhindern.

Die nachfolgende Grafik verdeutlicht die positive Auswirkung mehrerer Magnetrons auf die Feldhomogenität.

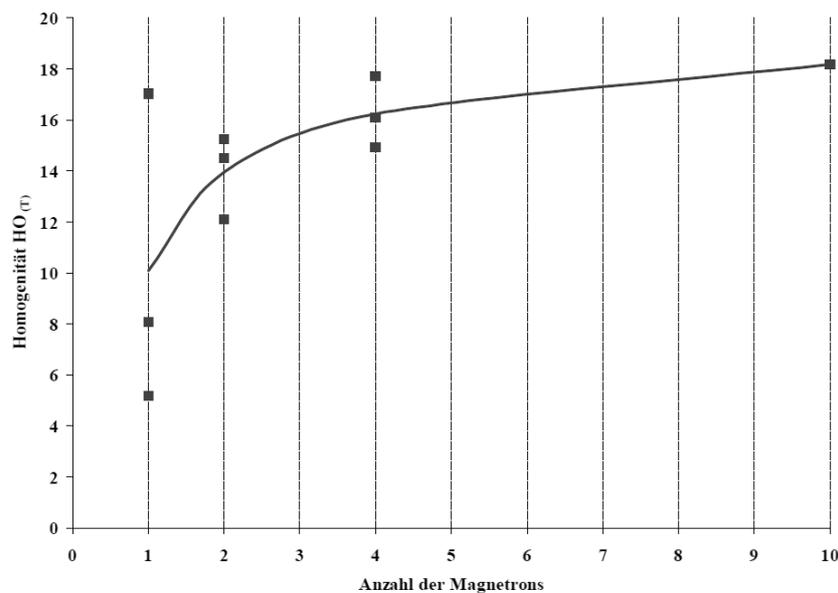


Abbildung 85: Abhängigkeit der Homogenität des Mikrowellenfelds von der Anzahl der eingeschalteten Magnetrons [Bu04]

Für die Untersuchung der erreichbaren Homogenität bei der Erwärmung von Bitumen sowie zum Untermauern der im vorherigen Abschnitt im Rahmen der Vorversuche aufgestellten Thesen wurden deshalb Verflüssigungsversuche in Versuchsanlagen der Firma Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH mit einer ausreichend großen Anzahl von Magnetrons bzw. Magnetronhohlleitermündungen durchgeführt.

6.2.2.2 Bau und Anordnung der Temperaturlaufnehmer

Nachdem im letzten Abschnitt Vorüberlegungen zur Anordnung der Entkopplungssysteme in den geplanten Versuchen angestellt wurden, wird nun eine geeignete Messvorrichtung als Teil der Versuchsanordnung entwickelt. Dabei stehen für die Untersuchung des elektromagnetischen Feldes von Mikrowellen drei Verfahren zur Verfügung:

„Zum einen Verfahren, mit denen das Feld Punkt für Punkt vermessen wird, zum anderen Verfahren, bei denen ein gut mikrowellenabsorbierendes Material über eine Fläche verteilt in den Ofen(innen)raum eingebracht wird und schließlich optische Methoden zu thermographischen Aufnahmen eines konkreten Wärmegutes bzw. Probekörpers, dessen Temperaturverteilung direkt etwas über die Feldverteilung aussagt.“ [Bu04]

Die Punktmessung wird häufig als zu aufwendig verworfen, da faseroptische Thermoelemente (zum Preis von ca. 300 € pro Stück) für viele Forschungsinstitute und Betriebe zu teuer erscheinen. Der hohe Preis dieser speziellen Messsensoren, die die elektromagnetische Strahlung nicht absorbieren und daher auch in Kernkraftwerken und der Raumfahrt zum Einsatz kommen, erklärt sich aus dem aufwendigen Prinzip ihrer Bauweise: Am Ende eines Glasfaserkabels wird ein das elektromagnetische Feld nicht absorbierender Kristall angebracht, der in der Lage ist, einen auf ihn auftreffenden Lichtimpuls durch das Glasfaserkabel zurück zu reflektieren. Durch die Temperaturabhängigkeit des Kristalls unterscheiden sich die von ihm reflektierten und am freien Ende des Glasfaserkabels aufgenommenen Lichtimpulse, wodurch eine Interpretation der im Medium herrschenden Temperatur möglich ist. Alternativ bedient man sich oft eines thermisch empfindlichen Papiers, das in das elektromagnetische Feld eingehängt wird.

Die Nachteile dieses alternativen Messverfahrens liegen auf der Hand [Bu04]:

- Bei zu geringer Mikrowellenleistung ist keine Papierverfärbung sichtbar.
- Die Metalldispersion, die dem Papier zur Stärkung seiner Mikrowellenabsorption dienen soll, verfälscht das Feld.
- Es lassen sich nur quantitative Aussagen treffen.
- Die Beladung des Ofenraums, die zu einer Änderung der Feldhomogenität beitragen kann, verhindert das Einbringen der zweidimensionalen Messschichten.

Thermographische Messmethoden können nur als quantitative Ergänzung zu wissenschaftlichen Versuchseinrichtungen verstanden werden und zur einfachen Schnellmessung insbesondere von Festkörpern (ohne Konvektionsströme im Innern) herangezogen werden. In diesem Sinne sollen sie auch hier zunächst im Rahmen eines weiteren Vorversuchs zur Anwendung kommen, um schnell anschauliche Temperaturbilder zu erzeugen. Anhand der

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

Erwärmung einer Pressholzplatte – siehe Abbildung 86 und Abbildung 87 – soll die Feldhomogenität qualitativ aufgezeigt werden.

Die Darstellungen zeigen, dass die Temperatur über die gesamte Pressholzplatte sehr gut verteilt ist. Das bedeutet, dass in der Versuchsanordnung bereits eine hohe Feldhomogenität erreicht ist. Um nun eine ausreichende Datenmenge zur Validierung eines Finite-Elemente-Modells zu erhalten, wird hier eine dreidimensionale Untersuchung der Feldhomogenität mittels Punktmessverfahren gewählt und durchgeführt. Die faseroptischen Thermoelemente sollen hierzu räumlich möglichst gleich verteilt im Bindemittel angeordnet werden. Um die hochwertige Faseroptik nicht zu verkleben und sie so für alle Versuche wieder verwenden zu können, werden Aluminiumoxidröhrchen unterschiedlicher Länge (Abbildung 88) genutzt, die in den zuvor leicht erwärmten Baustoff abgesenkt und in die die Temperaturmessfühler eingebaut werden (Abbildung 89).

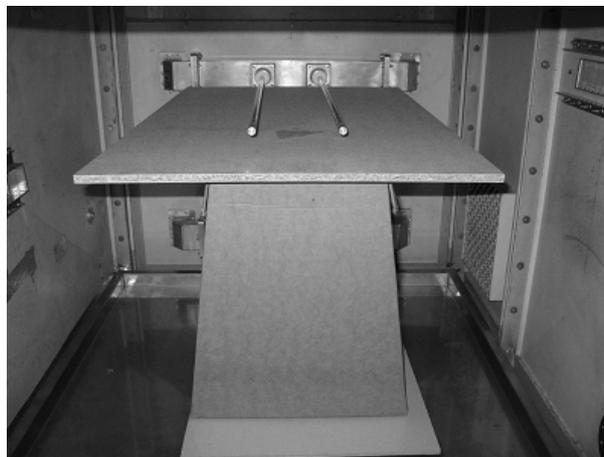


Abbildung 86: Darstellung des Ortes der Pressholzplattenerwärmung

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

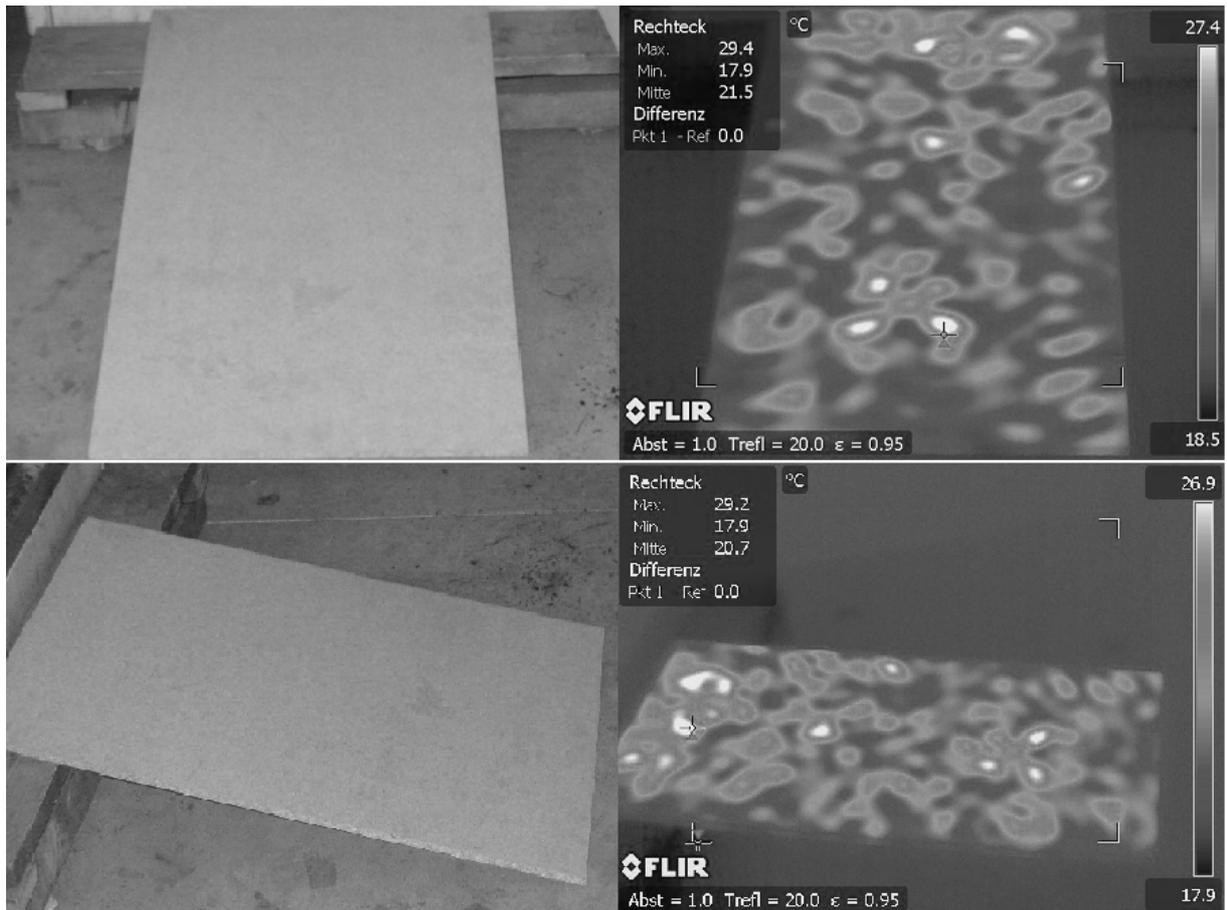


Abbildung 87: Qualitative Darstellung der Erwärmung einer Pressholzplatte mittels Mikrowellen auf Bildern einer Infrarotkamera

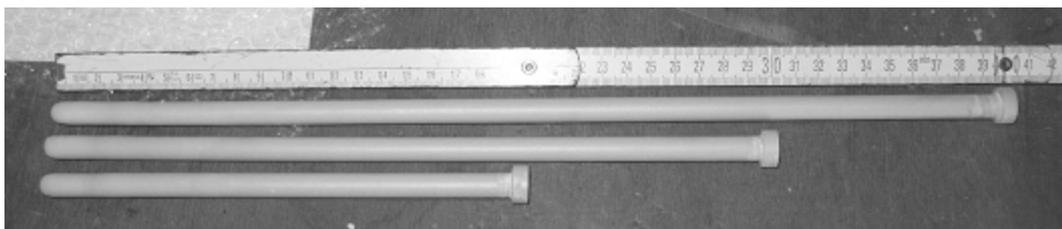


Abbildung 88: Aluminiumoxidröhrchen der Längen 40, 30 und 20 Zentimeter

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

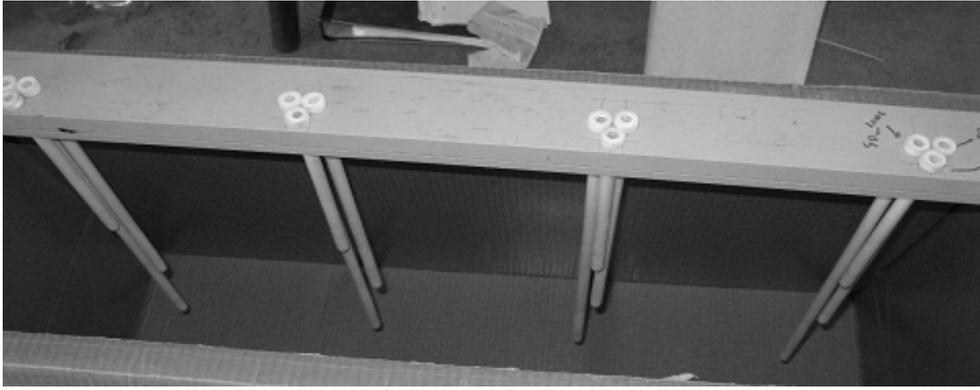


Abbildung 89: Anordnung der Aluminiumoxidröhrchen in Längsrichtung, Abstand jeweils 20 cm

Mit dem Ziel eines guten Kontakts der Thermoelemente mit dem Wärmgut wurde der Kristall der faseroptischen Thermoelemente am untersten Ende des Oxidröhrchens in einige zuvor eingepresste Tropfen Wärmeleitpaste gebettet. Mit diesen Temperaturfühlern werden in den (im Folgenden dargestellten) Versuchsanordnungen 1 und 2 die Temperaturen über das ganze Volumen der Probekörper ermittelt.

6.2.2.3 Erwärmung mittels Antennen bei einer Leistung von 6 kW und 2,45 GHz zur Untersuchung der Homogenität

Bei der Gestaltung der Versuchsanordnungen bestand nur die Möglichkeit, das Einkopplungssystem, also die Anordnung sowie die Anzahl der Antennen oder Hohlleitermündungen zu variieren. Ein kompletter Neubau einer der Versuchsanlagen wäre zu aufwendig gewesen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen unterliegt in dieser ersten Versuchsanordnung zunächst dem Ziel, die in den Vorversuchen beobachtete Inhomogenität der Wärmeentwicklung (Abschnitt 6.2.1) im Mikrowellenwärmgut Bitumen zu konkretisieren und nach Möglichkeit zu reduzieren. Hierfür wurden spezielle Antennen (als Einkopplungssystem) angefertigt, die den Probekörper um ca. 10 cm in seiner Länge überragten. Die geometrischen Größen sowie die Anordnung der Strahlungsgeber und Temperaturmessfühler für die erste Versuchsanordnung sind Abbildung 90 zu entnehmen.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

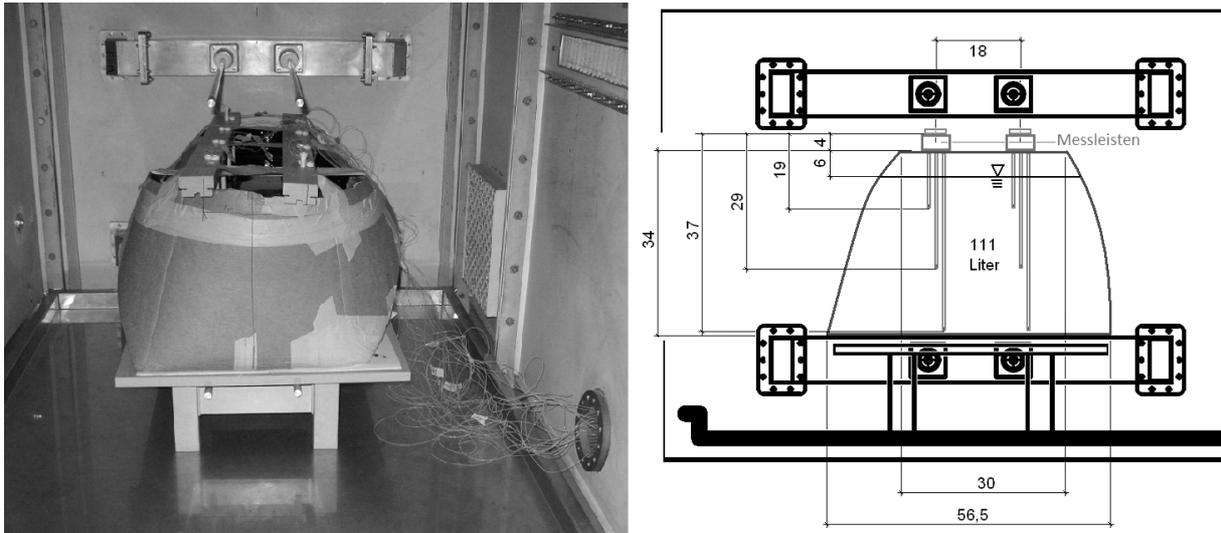


Abbildung 90: Erste Versuchsanordnung in der Vorderansicht (Blick durch die Ofentür; Maße in cm)

Die im Folgenden verwendeten Bezeichnungen „Messebene“ und „Längskoordinate“ für Ebenen im Probekörper werden mittels Abbildung 91 definiert.

Hierauf aufbauend kann Abbildung 92 die genaue Nummernbezeichnung der Temperaturfühler entnommen werden. Ein weiteres Thermoelement wird am Karton an der aufgrund von thermographischen Bildern ermittelten heißesten Stelle befestigt. Die so gemessene Kartontemperatur stieg in den ersten Versuchen zu Beginn der Energiezufuhr derart stark an, dass ein Schwelbrand im Kragen des Kartons ausgelöst wurde. Als Konsequenz daraus wurde der aussteifende Kartonkragen entfernt, was dem Baustoffgebilde seine oben dargestellte Form gibt. Außerdem musste in Versuchsanordnung 1 im weiteren Verlauf mittels Heizintervallen gearbeitet werden, um der Verpackung zwischendurch ausreichend Zeit zum Abkühlen zu geben.

Abbildung 93 zeigt unter anderem die Temperaturentwicklung bei der Erwärmung an der heißesten Stelle am Karton. Die Kartonverpackung zeigt hier hinsichtlich der Temperaturentwicklung ein Verhalten, das sich in nachfolgenden Versuchen als charakteristisch herausstellt. Während der Karton zunächst, wie bereits in den Vorversuchen (Abschnitt 6.2.1) beobachtet, vermutlich aufgrund seiner Restfeuchte stark absorbiert und sich somit in den ersten Bestrahlungsintervallen entsprechend erwärmt, sinkt die Kartontemperatur mit der allmählichen Trocknung auf eine Temperatur von weniger als 50 °C. Aus dem Umstand, dass diese Kartontemperatur geringer ist als die Bitumendurchschnittstemperatur zum gleichen Zeitpunkt, lässt sich erkennen, dass die trockene Kartonage von der Mikrowellenstrahlung selbst nicht erwärmt wird.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

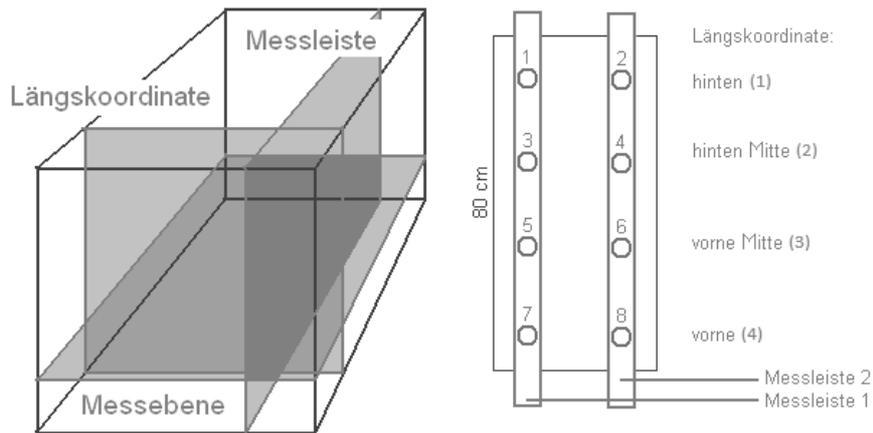


Abbildung 91: Definitionen von Messflächen, die mit den Begriffen Messebene (3 Temperaturfühler), Messleiste (2 Temperaturfühler) und Längskoordinate (4 Temperaturfühler) zusammengefasst werden

Der im Weiteren zu beobachtende, zur Bitumentemperatur zeitlich verzögerte Anstieg der Kartontemperatur resultiert entsprechend fast ausschließlich aus der Wärmeleitung aus dem Bindemittel auf die Verpackung. Wie zudem an den über den Erwärmungsprozess aufgetragenen Temperaturen zu erkennen ist, weisen diese an 17 der insgesamt 18 Messfühler eine Spannweite von weniger als 10 K auf. Dabei nimmt diese Homogenität der Temperaturverteilung im Bitumen mit der Erwärmung allmählich zu. Die Homogenitätsentwicklung wird besonders anhand der in Abbildung 94 über die Zeit dargestellten Differenzen der jeweiligen Maximal- und Minimaltemperatur aller Thermoelemente deutlich.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

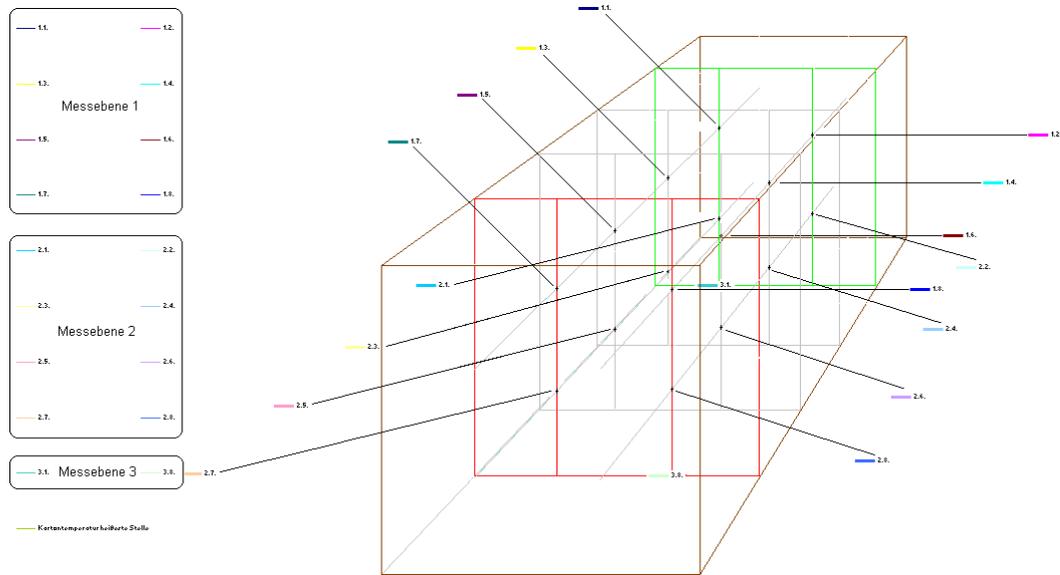


Abbildung 92: Positionierung der Thermoelemente während der Erwärmung von 110 Liter Bitumen mit einer Frequenz von 2,45 GHz im Kammerofen und einer Magnetronleitung von 6 kW (Versuchsordnung 1)

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

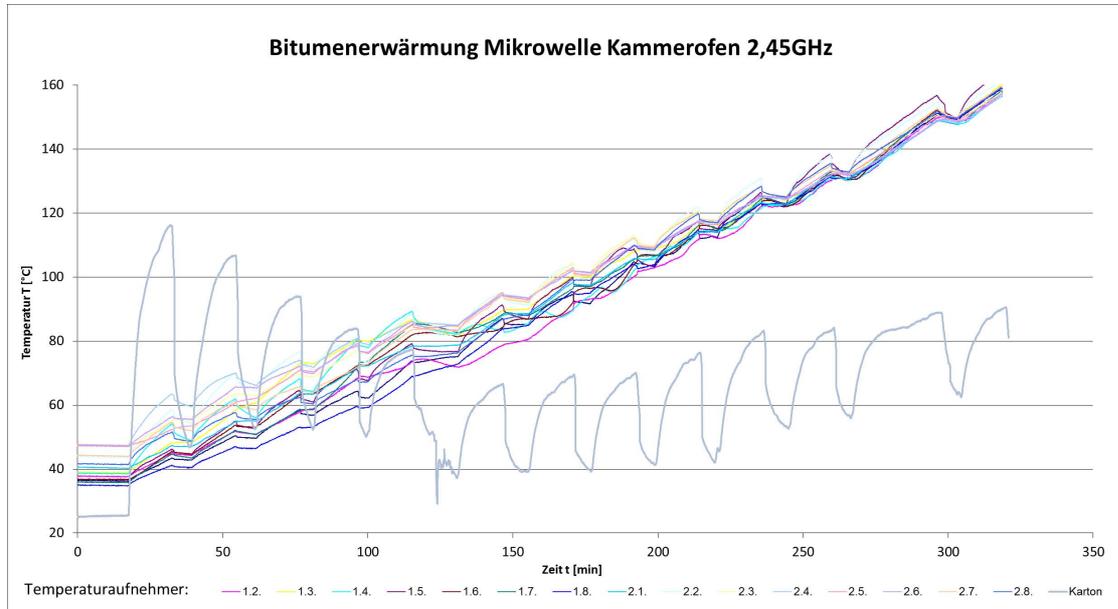


Abbildung 93: Temperaturverläufe im Bitumen und der Kartonage während der Erwärmung von 110 Liter Bitumen mit einer Frequenz von 2,45 GHz im Kammerofen und einer Magnetronleistung von 6 kW

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

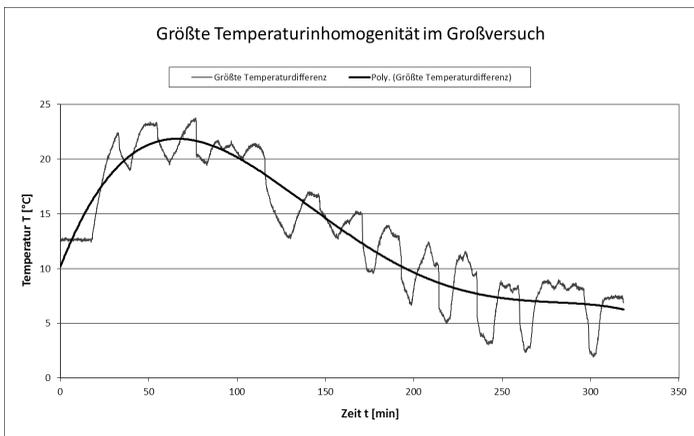


Abbildung 94: Maximale Temperaturdifferenzen innerhalb des Bitumenprobekörpers während des Versuchs. Die größte Temperaturdifferenz im Probekörper beträgt hierbei 23,8 °C

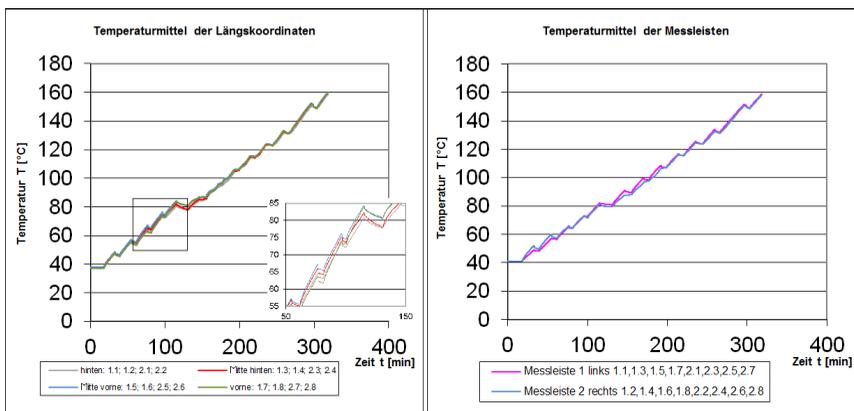


Abbildung 95: Mittlere Temperaturverläufe in weiteren Messflächen des Kammerofenversuchs mit 6 kW unter 2,45 GHz (MW3)

Eine genauere Betrachtung der Temperaturen einzelner oder gruppiertier Messwertaufnehmer (Abbildung 95) offenbart einen insgesamt homogenen Erwärmungsprozess sowohl über den Bitumenkörper als auch über der Zeit. Bereinigt man zudem – wie in Abbildung 96 dargestellt – die mittlere Gesamttemperaturentwicklung um die kartonbedingten Abkühlpau-

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

sen, zeigt sich entgegen der in den Vorversuchen formulierten These zur temperaturabhängigen Absorptionsfähigkeit (Selektivität) des Baustoffs ein annähernd linearer Verlauf der Temperaturzunahme über der Zeit.

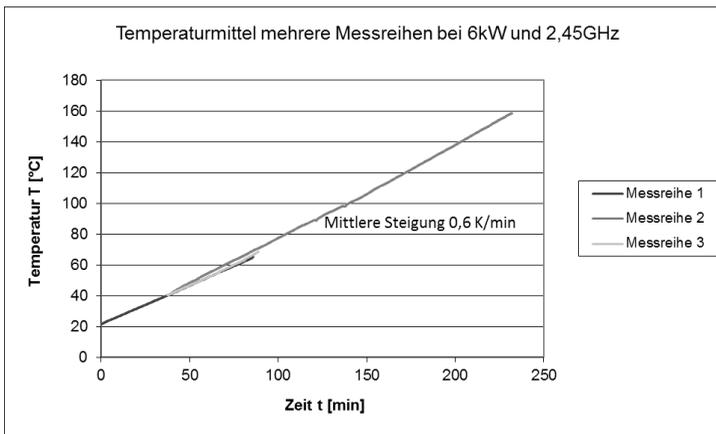


Abbildung 96: Um die Pausen bei der Bestrahlung mit Mikrowellen bereinigte Mittelwerte aller Temperaturverläufe in den drei durchgeführten Versuchen

6.2.2.4 Vergleichserwärmung mittels Antennen bei einer Leistung von 5 kW und 915 MHz

Mit diesem Wissensstand zur zeitlichen und örtlichen Homogenität der Erwärmung kann damit begonnen werden, die Messreihen der zweiten Versuchsanordnung einer 5 kW Magnetronleistung einer Frequenz von 915 MHz vergleichend hinzuzuziehen. Der Versuchsaufbau gleicht dem der Versuchsanordnung 1. Die Temperaturerfassung wird jedoch in der Messebene 3 um sechs Messfühler ergänzt, so dass deren Anzahl in allen Messebenen identisch ist. Die Anordnung ist Außerdem diesmal so beschaffen, dass mittels einer zentral über dem Probekörper angeordneten Magnetronhohleitermündung das Elektromagnetische Feld in die Heizkammer gelenkt wird (Abbildung 97). Während in der bisherigen Versuchsanordnung 1 mit Heiztakten von 15 Minuten oder deren Vielfachen gearbeitet wurde, werden – um die bauartbedingt geringere Magnetronleistung von 5 kW zu kompensieren – in den Versuchen der zweiten Versuchsanordnung 18 Minuten-Takte gefahren. So sollen die gleichen Energiezufuhren in den Heizintervallen wie in der ersten Versuchsanordnung gewährleistet werden ($18 \text{ min} * 60 \text{ s/min} * 5 \text{ kW} = 15 \text{ min} * 60 \text{ s/min} * 6 \text{ kW} = 5.400 \text{ kJ}$). Es stellte sich jedoch sehr schnell heraus, dass Abkühlpausen in diesen Versuchen für den Karton überflüssig sind, da dieser die Mikrowellenfrequenz von 915 MHz kaum absorbiert.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

Dieses Verhalten der Kartonage ist auch der Grund dafür, dass der Kartonkragen diesmal nicht entfernt werden musste und sich eine andere Versuchsgebindegeometrie ergab. Bereits im Vorfeld der zweiten Versuchsreihe werden zwei Unterschiede zu den Ergebnissen der Versuchsanordnung 1 erwartet:

- 1) Die Eindringtiefe des 915 MHz Mikrowellenfeldes wird größer sein.
- 2) Aufgrund des vergleichsweise unaufwendigen Einkopplungssystems wird die Homogenität der Wärme im Baustoff geringer ausfallen.

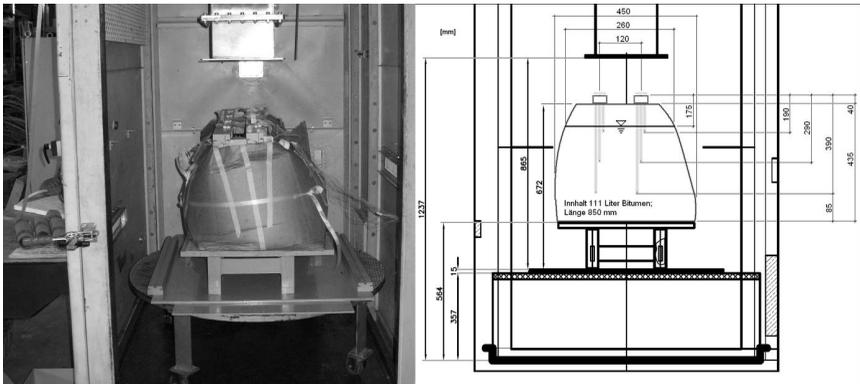


Abbildung 97: Vorderansicht Versuchsaufbau 2; 5 kW 915 MHz

Ziel der mit dieser zweiten Versuchsanordnung durchgeführten Versuche ist es also, die Unterschiede zwischen der Bitmenerwärmung mittels der Frequenzen 2,45 GHz und 915 MHz abzugrenzen, um daraus technische Erkenntnisse für den Bau der Mikrowellenverflüssigungsanlage zu erlangen.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

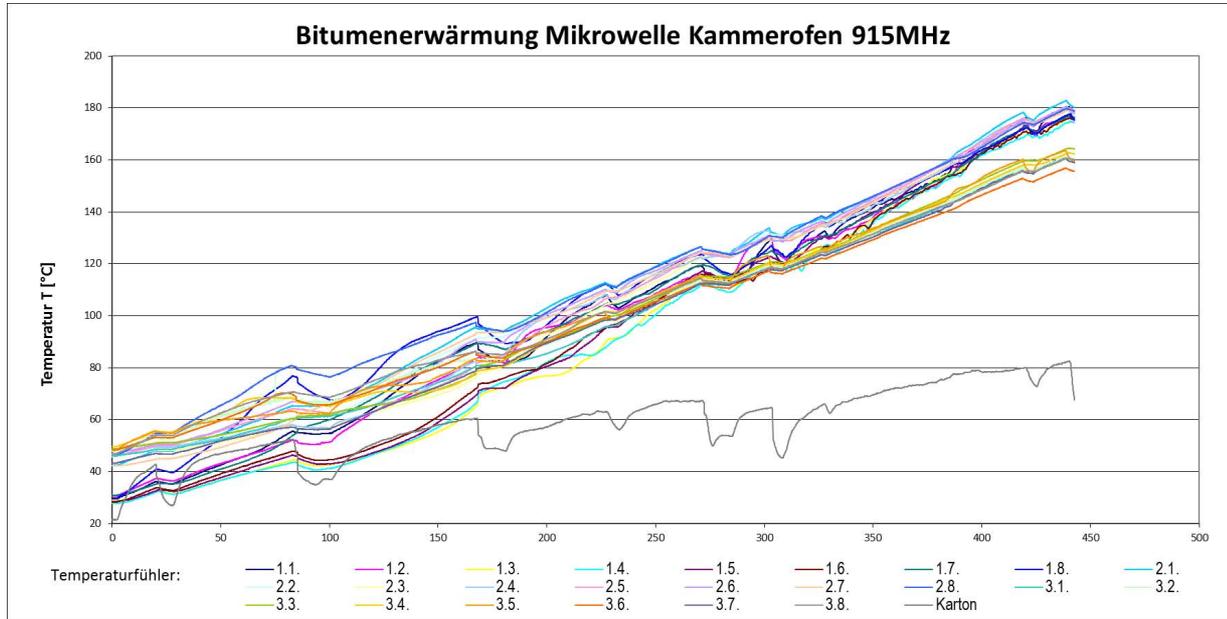


Abbildung 98: Temperaturgraphen der 25 Messpunkte im Großversuch MW6 mittels Versuchsanordnung 2 (915 MHz, 5 kW)

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

Interessanterweise zeigen gemäß Abbildung 98 die acht Temperaturfühler der Messebene 3 – also der am tiefsten liegenden Erfassungsebene – zum Beginn der Messung zwar die höchste Temperatur, allerdings erfährt sie während der Einwirkung der Mikrowellenstrahlen die geringste Erwärmung gegenüber den übrigen Messebenen (Abbildung 99). Dieses Ergebnis entspricht nicht der im Voraus erwarteten höheren Eindringtiefe von Mikrowellen unter der vergleichsweise geringen Frequenz von 915 MHz.

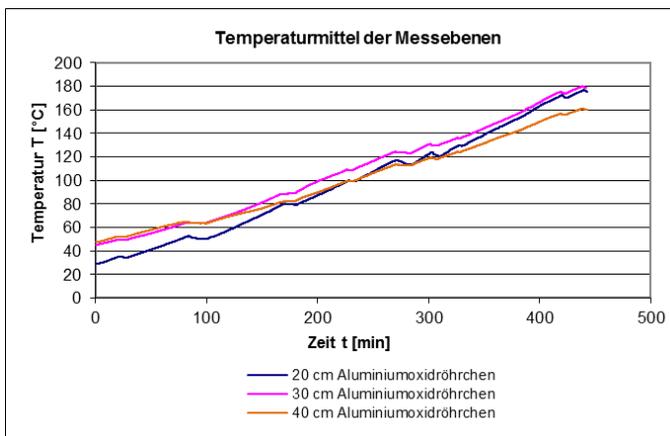


Abbildung 99: Temperaturentwicklung in den drei Messebenen; je größer die Röhrchenlängen, desto tiefer die Messebene (915 MHz, 5 kW)

Vergleicht man die mittleren Temperaturen der anderen Messebenen in Abbildung 100, lässt sich feststellen, dass die Erwärmung im Großen und Ganzen homogen und gleichmäßig verläuft.

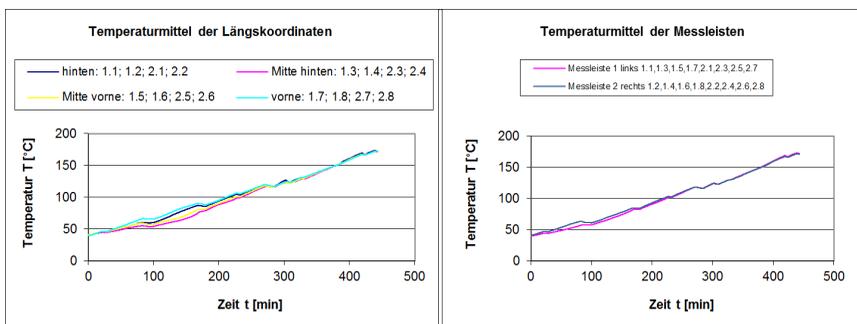


Abbildung 100: Wertevergleich weiterer Messflächen (915 MHz, 5 kW)

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

Besonders am Verlauf der Kartontemperatur wird offensichtlich, dass die Temperatur während des Versuchs mehrfach abfällt, obwohl wie beschrieben keine Erwärmungspausen vorgesehen waren. Dass trotzdem Pausen bei der Mikrowellenbestrahlung auftraten, ist darauf zurückzuführen, dass das Kühlwasser mehrfach die vorgeschriebene Maximaltemperatur von 35 °C erreichte. Die Anlage wurde daraufhin jeweils abgeschaltet und das Kühlwasser ausgewechselt.

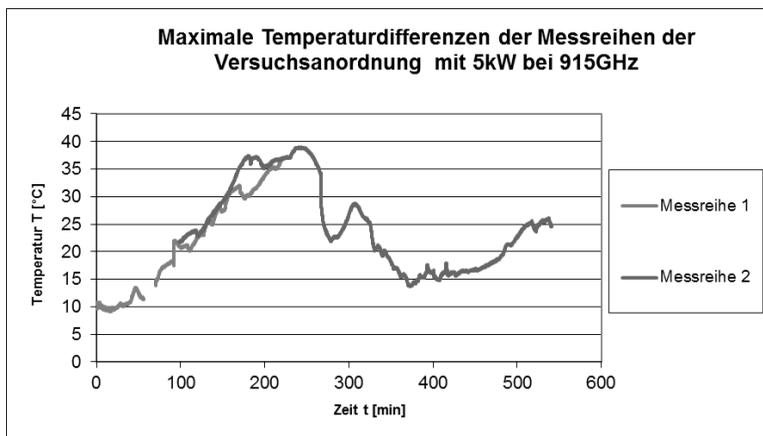


Abbildung 101: Maximale Temperaturdifferenz im Bitumenprobekörper bei einer Mikrowellenbestrahlung mit einer Leistung von 5 kW und bei einer Frequenz von 915 Hz (Maximum: 39,0 °C)

Wie Abbildung 101 offenbart, führen die Versuche mit der niedrigeren Leistung und Frequenz der Mikrowelle erwartungsgemäß zu einer erhöhten Temperaturinhomogenität. Es zeigt sich aber auch, dass die auftretenden Temperaturdifferenzen wie auch in Versuchsanordnung 1 beobachtet über den Erwärmungsprozess abnehmen. Dieser Prozess wird zumindest teilweise dadurch bedingt, dass die tiefer gelegenen Bereiche des Bitumenkörpers wie beschrieben langsamer erwärmt werden, anfänglich aber die höchsten Temperaturen aufwiesen. Dadurch überschneiden sich die Graphen im mittleren Temperaturbereich bei etwa 100 °C. Innerhalb der Messebene liegt auch bei den Versuchen mit geringerer Leistung und Frequenz eine noch gute Homogenität und Stetigkeit der Erwärmung vor.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

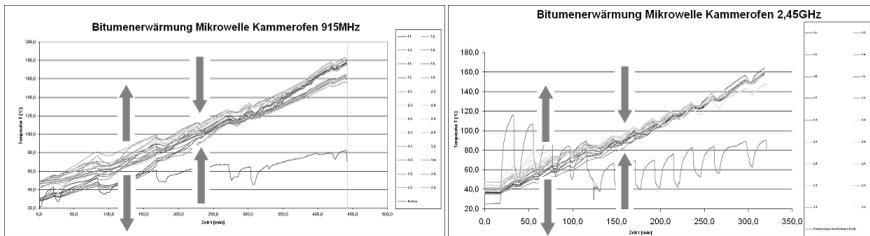


Abbildung 102: Alle Temperaturverläufe von zwei charakteristischen Mikrowellenversuchen der Versuchsanordnungen 1 (rechts) und 2 (links) wobei die roten Pfeile Tendenzen der Homogenität verdeutlichen sollen

Eine weitere Ursache für die über die Erwärmungsphase steigende Homogenität der Temperatur im Bitumenkörper wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt in der These zur Existenz einer konvektiven Phase bei der Mikrowellenerwärmung formuliert. Hierfür spricht die in Abbildung 103 dargestellte, um die Pausen bereinigte Gesamterwärmungskurve, die eine leichte Tendenz zur stärkeren Absorption der Mikrowellenstrahlung bei höheren Temperaturen erkennen lässt. Zugleich widerspricht dies einer der mittels der Vorversuche aufgestellten Thesen, die ein genau entgegengesetztes Verhalten proklamierte.

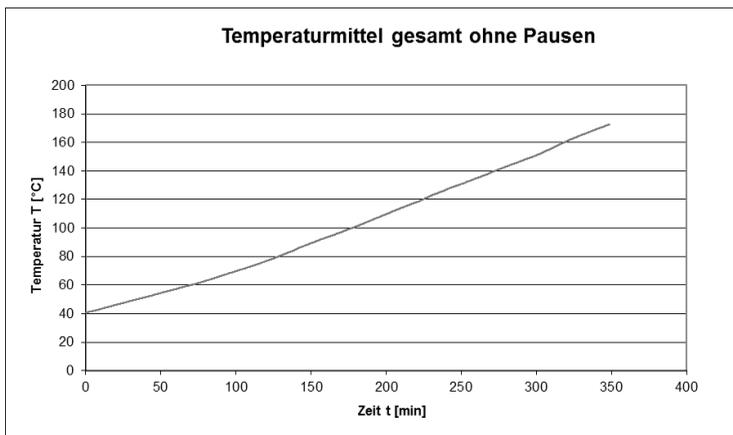


Abbildung 103: Mittlerer, um die Pausen bereinigter Temperaturverlauf bei der Mikrowellenbestrahlung in Versuchsanordnung 2 (915 MHz, 5 kW); mittlere Steigung: 0,39 K/min

Auf den Prozess der Konvektion soll deshalb im nächsten Abschnitt in einer dritten Versuchsanordnung eingegangen werden.

6.2.3 Untersuchung der Selektivität im Durchlaufofen

Nachdem in Versuchsreihe 1 primär die Möglichkeit, eine hohe Homogenität zu erreichen und in Versuchsreihe 2 der Einfluss einer anderen Anregungsfrequenz untersucht wurden, soll nun abschließend geprüft werden, ob Selektivität (stärkere Erwärmung bereits wärmerer Bereiche; siehe Einleitung 0) bei der Bitumenerwärmung in der Mikrowelle auftritt. Der Durchlaufofen (Abbildung 104) kommt hier zum Einsatz, da bei geometrisch veränderlichen Probekörpern eine ausreichende Homogenität vor allem durch Bewegen des Wärmeguts erreicht werden kann (vgl. Haushaltsmikrowelle). Die anderen Versuchsanordnungen sind hierfür nicht geeignet, da sie auf die spezielle Geometrie der Strabox zugeschnitten sind.



Abbildung 104: Eingang des Durchlaufofens der Versuchsanordnung 3
(Maße des Kartons: 40 cm × 20 cm × 20 cm)

In den Versuchen dieser Anordnung werden dem Bitumenkörper 11 kW über einen Zeitraum von 5,15 Minuten zugeführt, womit hier eine annähernd gleiche Energiezufuhr (5.400 kJ, siehe Abschnitt 6.2.2.4) wie in den anderen beiden Versuchsanordnungen gewährleistet ist. Die Temperaturen werden berührungslos an fünf Stellen der Oberfläche gemessen. Während 2,26 kg des Baustoffs bei einer Ausgangstemperatur von 50,7 °C eine Erwärmung um zirka 7,3 K aufweisen, was einem Absorptionsgrad von ca. 14.520 kJ/m³ entspricht, erwärmt sich ein daneben angeordneter mit 12,9 kg größerer Bitumenkörper um etwa 18. Dies entspricht einem Absorptionsgrad von 36.000 kJ/m³. Dies kann als Erklärung für die schildvulkanartigen Bitumenausflüsse und die Konvektionsströme dienen, die bereits in den Vorversuchen festgestellt und als günstig für das hier entwickelte Verfahren der Wiederverflüssigung des Baustoffs Bitumen betrachtet wurden.

Es werden mittels Versuchsanordnung 3 noch weitere Untersuchungen mit Bitumenprobekörpern unterschiedlicher Größe unter sonst gleichen Randbedingungen durchgeführt. Es wird vorgewärmtes Bitumenwärmgut neben kaltem Bitumenwärmgut angeordnet und dann unter sonst gleichen Bedingungen durch den Mikrowellen-Durchlaufofen gefahren. Diese Anordnungen dienen dem Erkenntnisgewinn im Bereich der Anlagenwirkungsgrade und der

Temperaturabhängigkeit des Absorptionsverhaltens. Sie sind im Rahmen der Anlagenleistungsanalyse im nächsten Abschnitt aufgeführt.

6.2.4 Verflüssigungsleistung pro installierter Leistung als Anlagenwirkungsgrad

Während der Untersuchungen aller ausgeführten Versuchsanordnungen der letzten Abschnitte wurde der Stromverbrauch der Anlagen in den Prüfungsprotokollen dokumentiert, um für die zu konzipierende Anlage einen Schätzwert für den Wirkungsgrad ermitteln zu können. Dieser ergibt sich, indem die tatsächliche kalorimetrische Heizleistung durch die Summe des dokumentierten Verbrauchs geteilt wird. Es muss an dieser Stelle verdeutlicht werden, dass diese Anlagenkennzahl einer Versuchsanlage eine weitaus schlechtere Bewertung als die späteren Gesamtanlagenwirkungsgrade einer anwendungsoptimierten Großanlage ergibt. Trotzdem können die hier berechneten Optima zukünftig als Berechnungsgrundlage kaufmännischer Betrachtungen auf der sicheren Seite dienen.

Der Gesamtenergieverbrauch einer Mikrowellenanlage setzt sich aus dem für die Magnetrons und die für die Kühlung der zugehörigen Heizelemente zusammen. Die Magnetrons der Kammerofenversuchsanordnungen 1 und 2 sind wassergekühlt, die Kühlung der zwölf (später elf) 1 kW-Magnetrons erfolgt durch Luft. Die Durchlaufanlage der Versuchsanordnung 3 verfügte über überdimensionierte Absorber, hierdurch wird jeder an dieser Konfiguration bestimmte Wirkungsgrad stark negativ verfälscht. Da die Probekörper in den kartonbedingten Abkühlpausen ebenfalls leicht abkühlten, werden die Anlagenwirkungsgrade pro Heizintervall bestimmt. Hierfür werden die am Anfang und Ende jedes Heizintervalls genutzt. In der hier folgenden Auswertung sollen lediglich die Summen des Energieverbrauchs aus beiden Zählerständen (Heizung und Rückkühlung) herangezogen werden. Als spezifische Wärmekapazität des Baustoffs sei hier die in Vorversuchen generierte Funktion

$$c_{\text{Bitumen}}(\vartheta) = 1,71811e^{0,001185 \cdot \vartheta} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$\text{für } 0 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 200 \text{ °C}$$

Formel 6-17

angenommen. Für die Kartontemperaturen, welche auch in Versuchsanordnung 3 aufgenommen werden und die hier der Übersichtlichkeit halber weggelassen werden, wird vorausgesetzt, dass sie das im vorhergehenden Abschnitt beschriebene charakteristische Verhalten aufweisen. Die Formel zur Berechnung des Wirkungsgrads lautet:

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

$$\Omega_{\text{Heizintervall/Versuch}} = \frac{(\bar{T}_{\text{nachher}} - \bar{T}_{\text{vorher}}) \cdot c_{\text{Bitumen}}(\bar{T}_{\text{ges.}}) \cdot m_{\text{Probekörper}}}{W_{\text{nachher}} - W_{\text{vorher}}}$$

Formel 6-18

$\bar{T}_{\text{ges.}}$ räumliches und zeitliches Mittel der gemessenen Temperatur im Probekörper $\bar{T}_{\text{ges}} = \left(\frac{\bar{T}_{\text{nachher}} + \bar{T}_{\text{vorher}}}{2} \right)$ [°C]

\bar{T} räumliches Mittel aller 24 gemessenen Temperaturen [°C]

$c_{\text{Bitumen}}(\bar{T}_{\text{ges.}})$ temperaturspezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]

m Masse des Probekörpers

W_t Summe beider Zählerstände zum Zeitpunkt t

Mit Hilfe dieser Formel lässt sich der mittlere Wirkungsgrad aus den Werten aller Heizintervalle generieren. Die Ergebnisse der Berechnungen können der letzten Spalte der Tabelle 6-2 entnommen werden.

Versuchs-anordnung	Bitumenmasse	\bar{T}_{vorher}	\bar{T}_{nachher}	Verflüssigungs-leistung	Anlagen-verbrauch	mittlerer Wirkungsgrad
	kg	°C	°C	kWh	kWh	%
1	115,44	40,8	158,6	6,97	31,00	26,9
2	115,44	27,9	62,6	1,95	27,10	7,2
	115,44	40,7	172,7	7,87	61,36	12,8
3	12,437	16,4	91,6	0,47	22,05	2,1
	25,311	22,05	113,35	1,16	35,75	3,3
	2,255	18,4	57,3	0,04	4,50	1,0

Tabelle 6-2: Ermittlung der Wirkungsgrade aller Versuchsdurchgänge ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste durch die Verpackung und die Abkühlpausen

Die Darstellung der Wirkungsgrade der Heizintervalle verschiedener oder gleicher Versuchskonfigurationen in Abbildung 105 zeigt zum einen, wie stark die Wirkungsgrade selbst innerhalb eines geschlossenen Systems schwanken und zum anderen, dass sich keine temperaturabhängige Tendenz ausmachen lässt.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

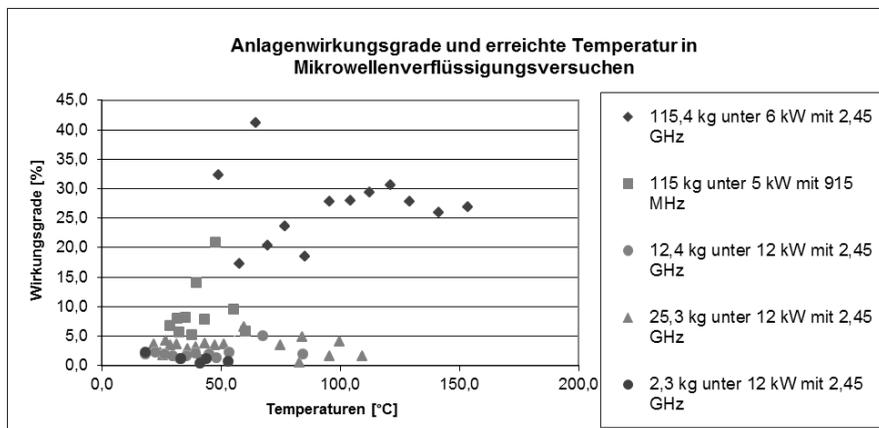


Abbildung 105: Darstellung der Wirkungsgrade bei der Erwärmung von unterschiedlichen Massen von Bitumen mittels Mikrowellenstrahlen verschiedener Leistung und Frequenz

Trotz der groben Herangehensweise zur Bestimmung der erforderlichen Leistung für die Erwärmung über das Ablesen von Zählerständen ist aus dem Relativvergleich jedoch recht klar ersichtlich, dass die Konstellation aus einer Magnetronleistung von 6 kW und einer Frequenz von 2,45 GHz bei der Erwärmung einer großen Bitumenmasse von hier rund 115 kg mit Wirkungsgraden von etwa 20 bis über 30 % (im Mittel 26,9 %) am wirtschaftlichsten zu sein scheint. Insgesamt ist sogar davon auszugehen, dass der mittlere Wirkungsgrad höchstwahrscheinlich bei einer exakten Bestimmung noch übertroffen wird, denn die Energieverluste in den Pausen, die Energiezufuhr im Karton und die über das Gesamtmittel hinausgehende Abkühlung der Außenbereiche des Baustoffs sind hier noch nicht berücksichtigt. Das Ermitteln dieser Größen ist allerdings wiederum mit diversen Annahmen verknüpft, die die Aussagekraft der Ergebnisse mindern. So ergaben Proberechnungen mittels eines iterativen Ansatzes eine zusätzliche Verbesserung von 1,9 bis 3,1 %. Aus diesem Grund wird hier auf eine exakte Berechnung des optimalen Anlagenwirkungsgrad verzichtet.

6.2.5 Fazit der Mikrowellenversuche und Diskussion der Konfiguration

Aufbauend auf den Vorüberlegungen und -versuchen im Abschnitt 6.2.1 konnten zwei Versuchsanordnungen konzipiert werden, mit denen in Abschnitt 6.2.2 ein Machbarkeitsnachweis (hinsichtlich der Homogenität) der Mikrowellenerwärmung von Bitumen geführt wurde. Es zeigte sich in den mittleren Steigungen der bereinigten Erwärmungskurven der beiden Frequenzbereiche, dass die Erwärmung unter einer Frequenz von 2,45 GHz schneller vonstattengeht als bei der Frequenz von 915 MHz. Hier war mit einer Magnetronleistung von für

6 kW für einen Bitumenkörper mit einem Gewicht von 115,4 kg eine kontinuierliche Erwärmung von 0,6 K/min möglich. Damit war die zu Anfang aufgestellte Vermutung, dass der Baustoff bei 915 MHz die Mikrowellen stärker absorbiert, widerlegt. Darüber hinaus zeigte sich im zweiten Großversuch, dass das Bitumen in einer Kartonverpackung erwärmt werden kann. Voraussetzung hierfür ist, dass der Karton bei der Erwärmung mittels einer Mikrowelle nicht ankoppelt. In den in Abschnitt 6.2.4 durchgeführten Abschätzungen zeigte sich, dass nicht nur Homogenität und Geschwindigkeit, sondern auch der Wirkungsgrad in einer geometrisch optimierten Großanlage besser ist als in den Versuchsöfen. Hierbei ist insbesondere die Konfiguration der Rückkühlung entscheidend für den Gesamtenergiebedarf, von dem ca. 10 % der elektrischen Leistung für die Wärmeträgerpumpe aufgewendet werden müssen.

Nicht beantwortet bleibt die Frage, ob die Eindringtiefe bei Mikrowellenfrequenzen von 915 MHz höher ist. Hierzu lässt sich aus den Temperaturdaten keine endgültige Aussage treffen. Doch für die in fast allen Industrieanlagen entscheidende Größe der Durchsatzmenge können die Temperaturkurven der Versuchsanordnungen der Großversuche als Machbarkeitsbeweis der Technologie der Bitumenmikrowellenverflüssigungsanlage gelten. Zusammenfassend kann deshalb festgehalten werden, dass auf der Grundlage der durchgeführten Versuche die Konzeption einer Mikrowellenverflüssigungsanlage als sinnvoll und machbar angesehen werden kann.

6.3 Simulation der Schnellverflüssigung im Mikrowellenofen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode

6.3.1 Grundlegendes zur Vorgehensweise

Grundlegend für das Assemblieren repräsentativer numerischer Modelle von physikalischen Vorgängen in Bitumenmikrowellenverflüssigungsanlagen ist es, ein Modell bekannter Versuchsanordnungen zu erschaffen. Dieses kann dann hinsichtlich unbekannter Materialparameter im Rahmen einer Validierung angepasst werden. Die Erkenntnisse aus der Validierung und aus der Modellerstellung bilden anschließend ein Fundament für die Simulation geplanter Großanlagen der Asphaltindustrie. Dadurch, dass ausreichend genaue Berechnungen durchgeführt werden können, ist es möglich, durch einen numerisch unterstützten Planungsprozess die Entwicklungskosten zu verringern. Allerdings sind diesen Variationen sowohl durch die EDV-Praxis als auch durch mathematische Divergenzen Grenzen gesetzt. In diesem Abschnitt sollen neben der Modellgenerierung auch dessen Grenzen aufgezeigt werden. Darüber hinaus wird als wesentlicher Steuerungsparameter der Validierung der unbekannte Imaginärteil der relativen Permittivität des Baustoffs ermittelt. Anschließend werden die Ergebnisse verschiedener Leistungsstufen unter Variation des Einkopplungssystems der Baustoffverflüssigung mittels Hochfrequenztechnik zusammengefasst. Hierzu ist

es nicht nötig, Aufbaupläne der Versuchsanlage beziehungsweise -konfiguration zu modellieren. Die Genauigkeit in der Geometrie würde nicht nur die nötige Rechnerkapazität stark erhöhen, sondern auch die Aussagekraft der Ergebnisse hinsichtlich ihrer Allgemeingültigkeit in Frage stellen. Deshalb wird ein Mittelweg in der Digitalisierung der geometrischen Rohdaten gewählt. Schließlich sollen die Ergebnisse der genannten Untersuchungen und Arbeitsschritte als Grundlage für die Entwicklungsphase einer Großapplikation dienen.

6.3.2 Mikrowellenaufschmelzsimulation mit COMSOL

Für die Simulation der Mikrowellenerwärmung des Baustoffs Bitumen auf Grundlage der Praxisversuche wird die Software COMSOL Multiphysics (Version 3.5a) verwendet. Das Programm ist eine interaktive Umgebung zur Modellierung und Lösung wissenschaftlicher und technischer Aufgaben auf Grundlage von partiellen Differentialgleichungen. Dabei können auch zwei- bis dreidimensionale Modelle erstellt und gelöst werden. Mittels des RF-Moduls von COMSOL können unter anderem Probleme aus der Hochfrequenztechnik simuliert werden. Hier ist es möglich, die Veränderungen thermophysikalischer Größen wie Temperatur, Absorption der Mikrowellen, Reflexion usw. auch teilweise instationär darzustellen. Bei der Lösung von Problemen der Hochfrequenztechnik arbeitet das Programm auf der Grundlage verschiedenster physikalischer Gesetzmäßigkeiten und mathematischer Konvergenzkriterien. An dieser Stelle soll lediglich die für Mikrowellensimulationen im Allgemeinen zur Anwendung kommende Differentialgleichung und der für die Bitumenverflüssigungssimulation gewählte Anregungsmodus dargestellt werden. Die geometrischen Ränder eines jeden Modells der Versuchsanordnung in COMSOL entsprechen den Systemgrenzen des Einkopplungssystems. Für alle diese Ränder müssen im Programm Randbedingungen definiert werden, wobei mindestens eine Randfläche des simulierten Bereichs als Eingangsschnittstelle dienen muss. Im vorliegenden Fall des Bitumenkörpers wird also eine der Randflächen als Eingangsschnittstelle definiert und dieser ein so genannter Anwendungsmodus zugeordnet. COMSOL bietet zahlreiche Anwendungsmodi und die Auswahl des für die zu behandelnde Fragestellung richtigen Modus ist entsprechend schwierig. Von Seiten des Softwareentwicklers wurde für die Simulation der hier verwendeten Versuchsanordnungen eine transversale elektrische Welle vorgeschlagen, das heißt, dass sie keine elektrische Feldkomponente in Ausbreitungsrichtung besitzt. Mittels spezieller Abbruchkriterien hinsichtlich der resultierenden Wellen wird der Aufwand für die Berechnung der vielen Reflexionen vermieden, die im unteren Frequenzbereich auftreten und die keinen Einfluss auf die Temperatur im Bindemittel haben.

Für rechteckige Eingangsschnittstellen, wie sie bei der Simulation von Anwendungen mit gängigen Hohlleiterprofilen üblich sind, wird der für die Erwärmungsleistung nutzbare elektrische Feldvektor E entsprechend der folgenden Gleichung berechnet:

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0$$

Formel 6-19

$\nabla \times$	Skalarprodukt mit dem Richtungsvektor
μ_r	relative Permeabilität (bei nicht magnetisierbaren Stoffen gilt zumeist $\mu_r \approx 1$)
k_0^2	Ausbreitungskonstante
j	Imaginärteil der komplexen Permittivität
σ	Leitfähigkeit
ω	Frequenz
ϵ_r	relative Permittivität (bei als nicht absorbierend bezeichneten Stoffen gilt zumeist $\epsilon_r \approx 1$)
ϵ_0	Permittivitätskonstante des Vakuums

Abbildung 106 stellt eine der symmetrischen Hälften, des Ofenmodells dar. Es ergeben sich Flächen, die unterschiedliche Eigenschaften besitzen können. Gemäß den in Abschnitt 6.1 dargestellten drei Kategorien von Stoffen im Kontext der Mikrowellenerwärmung müssen die Oberflächeneigenschaften im Modell definiert werden. Unter Einbeziehung der Eingangsschnittstellen, an der die Mikrowellen im Modell erzeugt werden, ergeben sich daraus vier mögliche Definitionen für Oberflächen im Modell:

Die Metallwände der Kammer (rot umrandet in linker oberer Darstellung der Abbildung 106) einschließlich der Hohlleiter sind auch in der Realität annähernd perfekte elektrische Leiter, die die Mikrowellen zurückreflektieren. Die Symmetriegrenzen (rot umrandet in rechter oberer Darstellung der Abbildung 106) sind hingegen perfekte magnetische Leiter, durch die die Mikrowellen aus dem Modellrahmen entweichen können. Die Wände des Versuchskörpers, durch die die Mikrowellen in einen Raum anderer Stoffeigenschaften als Luft eindringen, und der Ausgang die Hohlleitermündung (beide rot umrandet in linker unterer Darstellung der Abbildung 106) sollen keinen Einfluss auf die Ausbreitung der Mikrowellen ausüben und werden daher als Kontinuum definiert. Zuletzt wird die genannte Eingangsschnittstelle (rot umrandet in rechter unterer Darstellung der Abbildung 106) definiert.

Mit diesen Angaben ist es möglich, die hier gezeigten Modelle nachzubilden. Sie können auch als Hilfe dienen, neue Applikationen modellhaft zu testen. Lediglich hinsichtlich der nötigen Maschenweite und der zu implementierenden Permittivität sind in nachfolgenden Abschnitten noch Untersuchungen und Angaben erforderlich.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

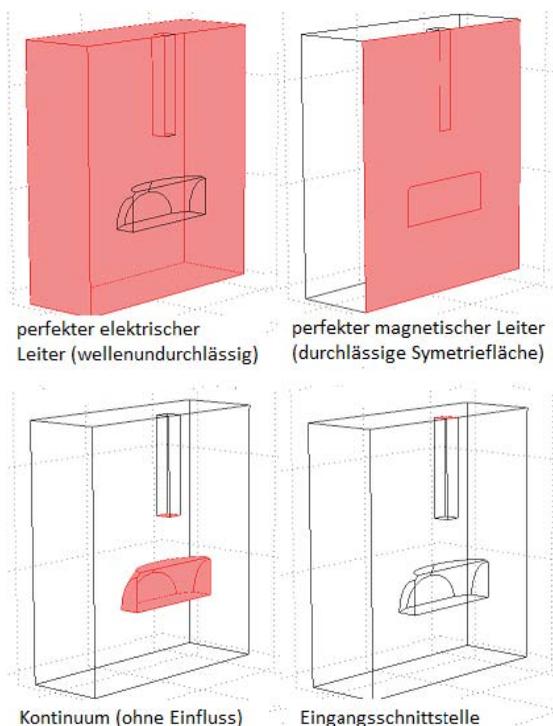


Abbildung 106: Darstellung der Zuordnung der Ränder in der Modellierung eines Mikrowellenofens für Bitumenerwärmung gemäß Versuchsanordnung 2

6.3.3 Einschränkungen bei der Modellfindung

In COMSOL wird jedes physikalische Problem mittels der Methode der finiten Elemente gelöst. Hierzu ist ein Netz unterschiedlicher Maschenweiten nötig, das über das Modell gelegt wird und dieses in finite Elemente unterteilt (Abbildung 107). Als Voraussetzung für eine adäquate Darstellung der tatsächlichen thermophysikalischen Vorgänge in einem Hochfrequenzfeld eines Computermodells wird vom Softwarehersteller eine Maschenweite l_{\min}^{Ofen} von einem Fünftel bis zu einem Viertel der Wellenlänge angegeben. Die Wellenlänge der Mikrowellen in den zur Modellvalidierung herangezogenen Versuchsaufbauten liegt bei 12 bis 12,5 cm (bei 2.45 GHz). Es zeigt sich, dass hiermit auch Mindestdimensionen für die Systemmatrix vorgeschrieben sind. In gleicher Art und Weise wird die Ausdehnung dieser zu lösenden Matrix von zwei weiteren im Folgenden dargestellten Faktoren bestimmt. Zunächst ist für Modelle von Anlagenbauteilen von filigraner Geometrie die oben genannte Mindestmaschenweite zumeist nicht ausreichend. Dies

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

wird gelöst, indem auf die Modellierung fast aller individueller Systemdetails verzichtet wird.

Außerdem gilt im absorbierenden Medium für die Mindestlänge l_{min}^{Last} der finiten Elemente die Faustformel:

$$l_{min}^{Last} = \frac{l_{min}^{Ofen}}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Formel 6-20

ϵ_r

Realteil der komplexen Permittivität

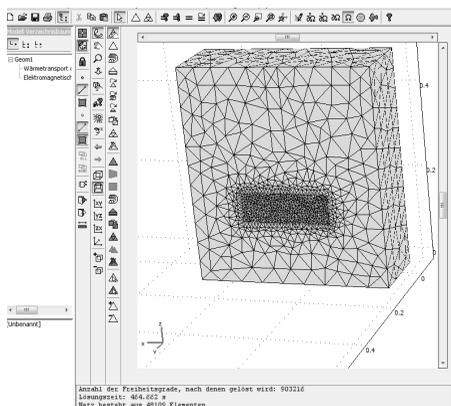


Abbildung 107: Netz der Mikrowellensimulation mit verringerter Mindestmaschenweite im Baustoff

Für die Darstellung der Absorption im Mikrowellenofen der Modellversuche bedingen die genannten Vorschriften eine 3D-Berechnung mit mehr als neun Millionen Freiheitsgraden. Derartige Berechnungen übersteigen die Rechnerkapazität des zur Verfügung stehenden Personalcomputers. Es wird also nach Möglichkeiten gesucht, die Systemmatrix zu verkleinern. Hierfür gibt es drei Möglichkeiten.

- 1) Das Ausnutzen von Symmetrieeigenschaften. Insbesondere die Versuchsanordnungen der im Rahmen des Projekts durchgeführten Großversuche verfügen über mindestens eine Symmetrieachse. Wie in den Abbildungen dieses Abschnitts ersichtlich ist, wird diese Eigenschaft genutzt. Hier liegt der Vorteil der Vereinfachung vor allem in einer Verringerung der Simulationszeit.
- 2) Die Wahl einer geeigneten Berechnungsmethode (Solver). Oft wird vom Hersteller bei nicht konvergenten oder zu komplexen Berechnungen diese Variante empfohlen. COMSOL verfügt über eine Auswahl an Lösungsmethoden. So kann insbesondere auch auf eine stationäre Modelllösung umgestiegen werden.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

- 3) Die Verkleinerung des Modells. Als letztes zu wählendes Mittel besteht die Möglichkeit, das Modell maßstabsgetreu zu verkleinern. Unter Fachleuten ist gerade diese Variante, einem Modell eine Lösung zuzuführen, stark umstritten. Zudem sind für die hier anzugehenden Betrachtungen dann nur noch qualitative Aussagen zum Beispiel zur Homogenität möglich. Diese Methode soll hier deshalb nicht zur Anwendung kommen.

Für das Modell werden die ersten beiden der genannten Hilfsmittel (Ausnutzung der Symmetrie und Wahl eines geeigneten Solvers) umgesetzt. Als Solver für die Mikrowellenerwärmung wird PARDISO vom Softwarehersteller vorgeschlagen und als Solver für den Wärmestrom wird SPOOLES verwendet. Näheres zu den Methoden ist dem Onlinehandbuch (vgl. [Co09]) des Softwareproduzenten COMSOL zu entnehmen. Mit den Ergebnissen dieser Solver ist es möglich, Geometrie und Leistungsvariationen zu vergleichen. Auch die Modellvalidierung ist möglich, was im Folgenden dargestellt wird.

6.3.4 Modellvalidierung

Die Berechnungen erfolgen mit Hilfe der Gleichung 6-20. Dabei werden die Werte aus Tabelle 6-3 verwendet.

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit
relative komplexe Permittivität	ϵ_r	2,55 - 0,05i	-
relative Permeabilität	μ_r	1	-
Wärmeleitfähigkeit	λ	0,16	$\frac{W}{m \cdot K}$
Wärmekapazität	c	2200	$\frac{J}{kg \cdot K}$
Rohdichte	ρ	1040	$\frac{kg}{m^3}$

Tabelle 6-3: Materialeigenschaften des Bitumens in der Simulation

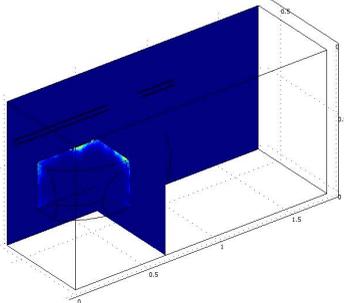
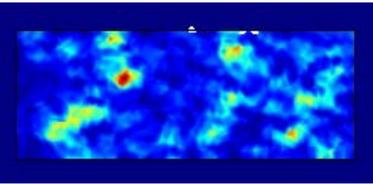
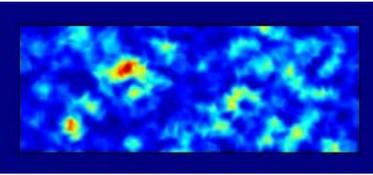
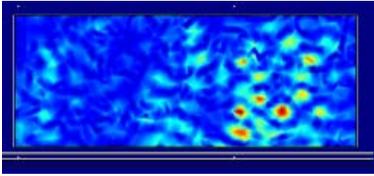
Versuchsanordnung 1 2,45 GHz, 6 kW (siehe Abschnitt 6.2)		
Permittivität	qualitative Darstellung der Absorption	Bemerkung zum Simulationsergebnis
$\epsilon_r = \epsilon_r' - \epsilon_r''i$	Schnitt durch die Mitte der langen Seite des im Versuch verwendeten Bitumenkörpers	
$\epsilon_r = 2,55 - 20i$		Bei dieser Permittivität wird nur der äußere Rand des Probekörpers erwärmt. Der größte Temperaturunterschied innerhalb des Probekörpers beträgt 50 K. Gemäß Abbildung 94 beträgt dieser in der Realität maximal 24 K. Der Imaginärteil $\epsilon_r'' = 20$ der Permittivität ist damit nicht zutreffend. ϵ_r'' wird weiter variiert.
$\epsilon_r = 2,55 - 0,1i$		Gemäß der Grafik treten die Erwärmungen im gesamten Probekörper auf. Die größte Temperaturdifferenz beträgt 26 K. In diesen Kriterien entspricht das Berechnungsergebnis näherungsweise den Messergebnissen der Versuchsreihe 1.
$\epsilon_r = 2,55 - 0,01i$		Gemäß der Grafik treten die Erwärmungen im gesamten Probekörper auf. Die größte Temperaturdifferenz beträgt 25 K. In diesen Kriterien entspricht das Berechnungsergebnis näherungsweise den Messergebnissen der Versuchsreihe 1.
$\epsilon_r = 2,55 - 0,05i$		Gemäß der Grafik treten die Erwärmungen im gesamten Probekörper auf. Die größte Temperaturdifferenz beträgt 24 K. In diesen Kriterien entspricht das Berechnungsergebnis am genauesten den Messergebnissen der Versuchsreihe 1.

Tabelle 6-4: Qualitative Darstellung einiger Berechnungsergebnisse bei Variation der komplexen relativen Permittivität im Modell der Versuchsanordnung 1

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

Als einzige systemimmanente Unbekannte und zugleich geeigneter Dämpfungsparameter stellte sich der Imaginärteil der komplexen Permittivität ε_r'' dar. Er gibt an, wie hoch die Verluste aus der mit der Umpolarisierung einhergehenden Reibung sind. Der Einfluss der realen und der imaginären relativen Permittivität auf das Absorptionsverhalten und damit auch auf die Modellierungsergebnisse ist groß. Unter anderem von Walthers [Wa42] ist bekannt, dass der Realteil der relativen Permittivität von Bitumen bei ca. 2,55 liegt. Der Imaginärteil hingegen soll durch eine schrittweise Annäherung der Berechnungsergebnisse an die Ergebnisse der Großversuche erfolgen. Der Imaginärteil der komplexen Permittivität ε_r'' wird hierzu in den Modellen der Versuchsanordnungen 1 (Tabelle 6-4) und Versuchsanordnung 2 (Tabelle 6-5) variiert. Die resultierenden Ergebnisse werden zum einen qualitativ anhand der Erwärmungsbilder und quantitativ anhand der größten auftretenden Temperaturdifferenz im Probekörper mit den Versuchsergebnissen (vgl. Abbildung 94; Abbildung 101) verglichen.

Hier erweist sich die für den Imaginärteil häufig getroffene Annahme

$$\varepsilon_r'' \approx \varepsilon_r'$$

Formel 6-12

zur Erstellung des numerischen Modells als nicht zutreffend. Stattdessen zeigt sich, dass der Imaginärteil ε_r'' in folgendem Spektrum liegt:

$$0,01 \leq \varepsilon_r'' \leq 0,1$$

Formel 6-21

Es wurde daher beschlossen, die Versuchsanordnungen 1 und 2 der Großversuche mit $\varepsilon_r = 2,55 - 0,05i$ zu simulieren. Ausschlaggebend war vor allem die sich dadurch einstellende in den nachfolgenden Tabellen dargestellte praxisnahe Homogenität.

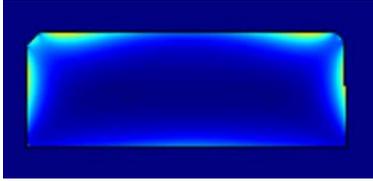
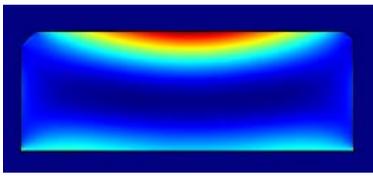
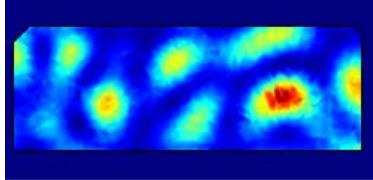
Versuchsanordnung 2 915 MHz, 5 kW (siehe Abschnitt 6.2)		
Permittivität	qualitative Darstellung der Absorption	Bemerkung zum Simulationsergebnis
$\epsilon_r = 2,55 - 20i$	<p>Schnitt durch die Mitte der langen Seite des im Versuch verwendeten Bitumenkörpers</p> 	<p>Gemäß der Grafik treten die Erwärmungen nur an der Oberfläche des Probekörpers auf. Die größte Temperaturdifferenz beträgt 17 K. Gemäß Abbildung 101 beträgt diese in der Realität maximal 39 K. In diesen Kriterien entspricht das Berechnungsergebnis damit nicht den Messergebnissen der Versuchsreihe 2.</p>
$\epsilon_r = 2,55 - 2,55i$		<p>Gemäß der Grafik treten die Erwärmungen nur an der Oberfläche des Probekörpers auf. Die größte Temperaturdifferenz beträgt 35 K. In diesen Kriterien entspricht das Berechnungsergebnis damit nicht den Messergebnissen der Versuchsreihe 2.</p>
$\epsilon_r = 2,55 - 0,05i$		<p>Gemäß der Grafik treten die Erwärmungen im Probekörper relativ inhomogen auf. Die größte Temperaturdifferenz beträgt 39,5 K. In diesen Kriterien entspricht das Berechnungsergebnis damit am genauesten den Messergebnissen der Versuchsreihe 2.</p>

Tabelle 6-5: Qualitative Darstellung einiger Berechnungsergebnisse bei Variation der komplexen relativen Permittivität im Modell der Versuchsanordnung 2

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

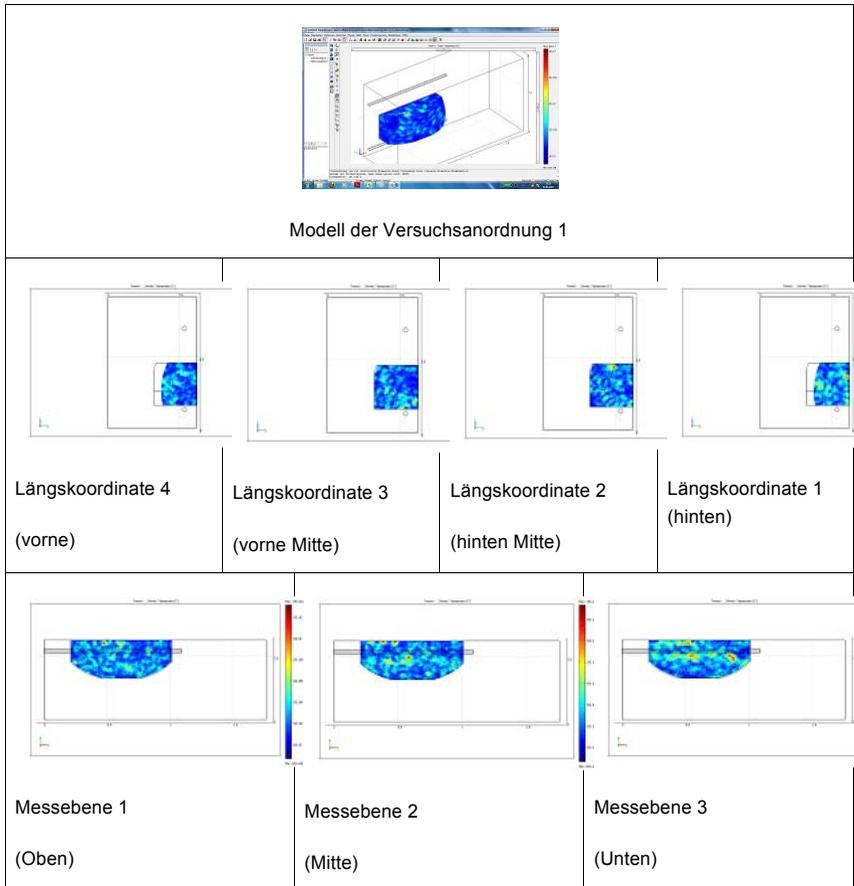


Tabelle 6-6: Temperaturverteilung in den Schnittflächen (Messebenen nach Abbildung 16) in Versuchsanordnung 1 mit 2,45 GHz und 6 KW Magnetronleistung

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

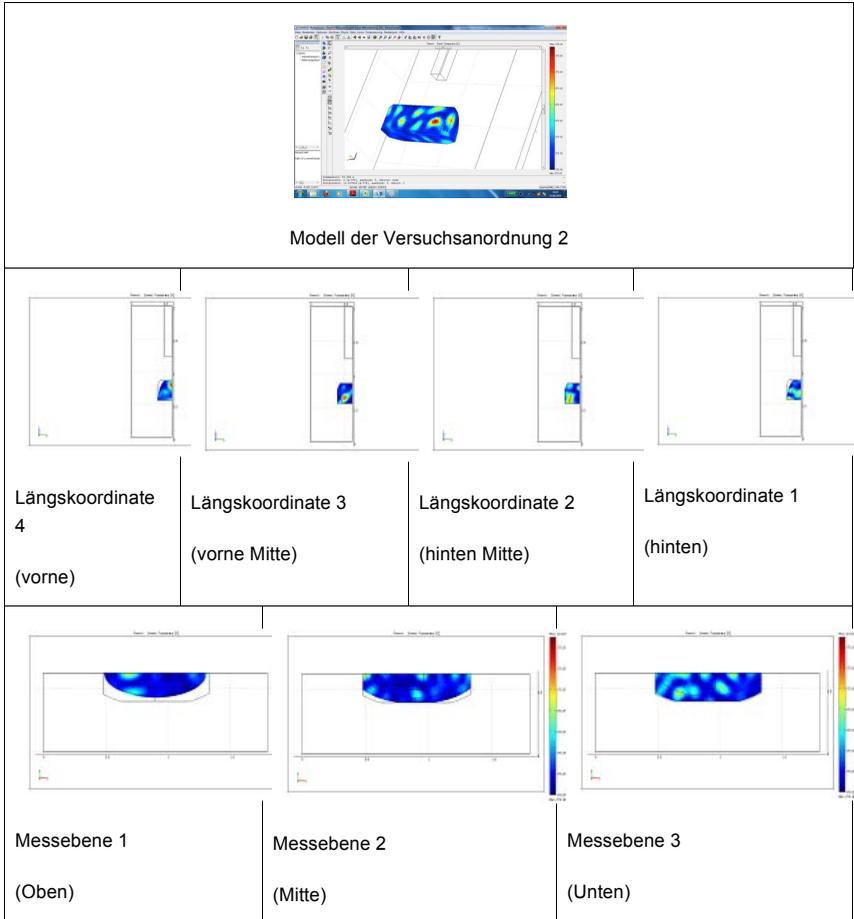


Tabelle 6-7: Temperaturverteilung in den Schnittflächen (Messebenen nach Abbildung 91) in Versuchsanordnung 2 mit 915 MHz und 5 KW Magnetronleistung

6.3.5 Variation der Anlagenleistung

Die Versuche haben gezeigt, dass sich durch eine Erhöhung der Magnetronleistung auch die absorbierte Energie erhöht. Dieser Zusammenhang stellt sich insofern linear dar, als beispielsweise eine Verdoppelung der Magnetronleistung zur Folge hat, dass nur noch etwa die Hälfte der Zeit benötigt wird, um das Bitumen auf eine bestimmte Temperatur zu erwärmen.

In den durchgeführten Simulationen lässt sich dieser aus den Versuchen bekannte lineare Zusammenhang ebenfalls ohne Einschränkung beobachten. Bei Verdoppelung der Leistung an der Eingangsschnittstelle wird somit die zweifache Wärmeenergieaufnahme im Baustoff berechnet. Die in Tabelle 6-4 und Tabelle 6-5 präsentierten Thermobilder bleiben dabei qualitativ unverändert. Lediglich anhand der absoluten Werte der Temperaturerhöhung und Absorption lassen sich die Leistungsänderungen erkennen. Sowohl der praktische als auch der theoretische Beweis dieses Zusammenhangs zwischen Anlagen- und Verflüssigungsleistung stellen eine zentrale Voraussetzung für die Planung von Mikrowellengroßanlagen zu Bitumenverflüssigung auf Grundlage des erarbeiteten numerischen Modells dar.

6.3.6 Variation des Einkopplungssystems

In diesem Abschnitt wird anhand von Berechnungsergebnissen des Simulationsmodells die Grundlage für eine Optimierung des Einkopplungssystems geschaffen. Berechnet und dargestellt werden hierzu die thermischen Veränderungen, die im Bitumen innerhalb einer Sekunde in der jeweiligen simulierten Anordnung auftreten. Der gewählte Zeitraum ist letztendlich beliebig, da die für die Simulation gewählten in Tabelle 6-3 dargestellten Materialparameter hier temperaturunabhängig sind. Dieser Simulationszeitraum wird in zehn Zeitschritten zu je 0,1 Sekunden mit oben genannten Solvern dargestellt. Das Absorptionsverhalten in den Simulationsmodellen der Versuchsanordnung 2 mit Hohlleiter und bei einer Frequenz von 915 MHz erweist sich (Tabelle 6-7) als derart inhomogen gegenüber dem Modell der Versuchsanordnung 1 (Tabelle 6-6), dass die Variation der zweiten Versuchsanordnung verworfen wird. Hinzu kommt, dass in der Praxis eine Frequenz von 915 MHz unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten mit hohem Aufwand verbunden ist und deshalb selten angewendet wird. Stattdessen wird das geometrische Modell der Versuchsanordnung 2 hier mit einer Frequenz von 2,45 GHz und 6 kW erwärmt. Dies ermöglicht die Vergleichbarkeit mit dem Einkopplungssystem der Versuchsanordnung 1 vor allem hinsichtlich der Homogenität. Unabhängig von der Zahl der Antennen und der Hohlleiter wird also jedes der nachfolgend dargestellten Modelle mit 6 kW beschickt. Als *mittlere Absorptionskennzahl* wird das Volumenintegral über die im Simulationszeitraum absorbierte Energie $[J/s = W]$ definiert. Um das Absorptionsverhalten noch genauer zu beschreiben, wird die maximal in einem Element des FE-Modells absorbierte Energie als zweite *maximale Absorptionskennzahl* definiert. COMSOL bestimmt diesen Wert bezogen auf einen Kubikmeter des Wärmeguts.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

6.3.6.1 Variation der Antennenanordnung

Wie Abbildung 108 zeigt, gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Antennen um den Baustoff zu gruppieren. Es gilt, durch geschickte Anordnung der Antennen die mittlere Absorptionskennzahl (Gesamterwärmung) zu maximieren und dabei die an Stellen größter Inhomogenität auftretende maximale Absorption zu minimieren. Damit wird gezeigt, wie bei der Planung von Großanlagen vorgegangen werden muss.

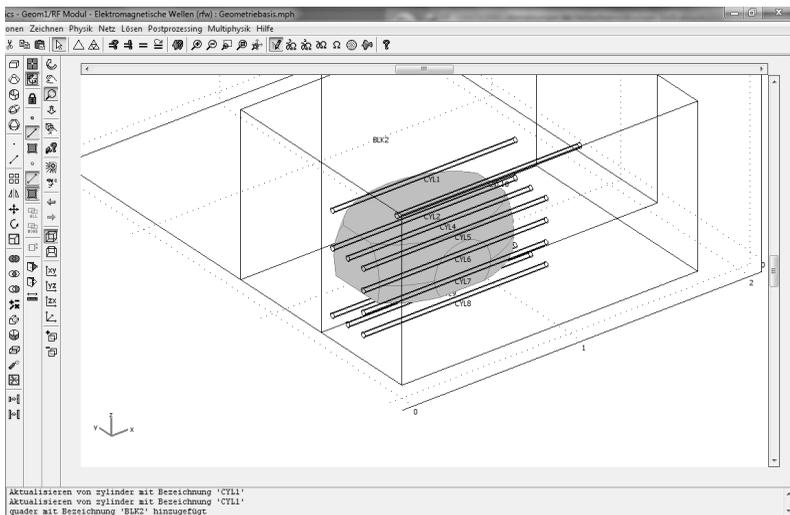


Abbildung 108: Mögliche Antennenanordnungen im symmetrischen Modell

Die beiden Kennzahlen können der Einfachheit halber den jeweiligen Bildbeschriftungen entnommen werden. Zunächst sei das Berechnungsergebnis der im vorherigen Abschnitt validierten Konfiguration der Großversuche dargestellt.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

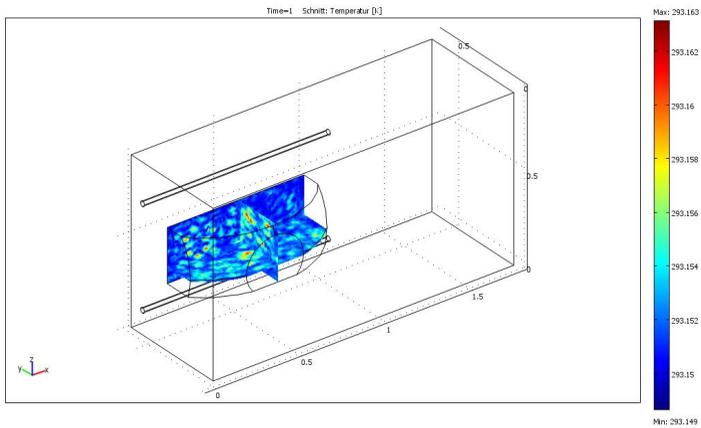


Abbildung 109: Ausgangsvariante 0; identisch zu Versuchsanordnung 1; 2 Antennen oben und 2 Antennen unten angeordnet

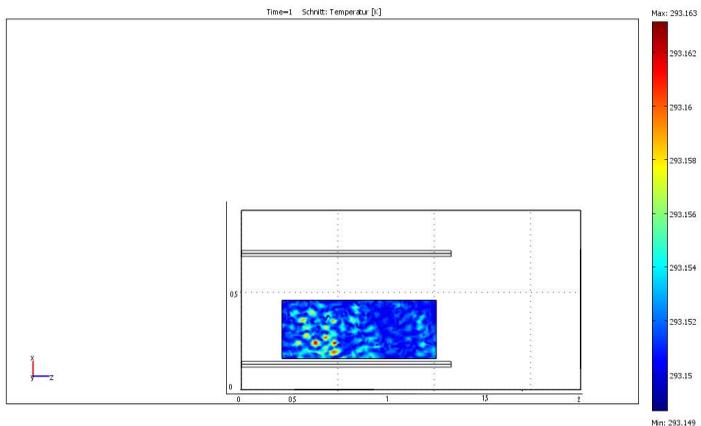


Abbildung 110: Ausgangsvariante 0; identisch zu Versuchsanordnung 1: mittlere Absorption $387,3 \text{ J/s}$; maximale Absorption 29.380 W/m^3

Um abschätzen zu können, ob ein Zusammenhang zwischen dem Abstand der Antennen zum Probekörper und dessen Erwärmung auch im Modell vorhanden ist, wird das Modell mit zwei entfernten Antennen simuliert.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

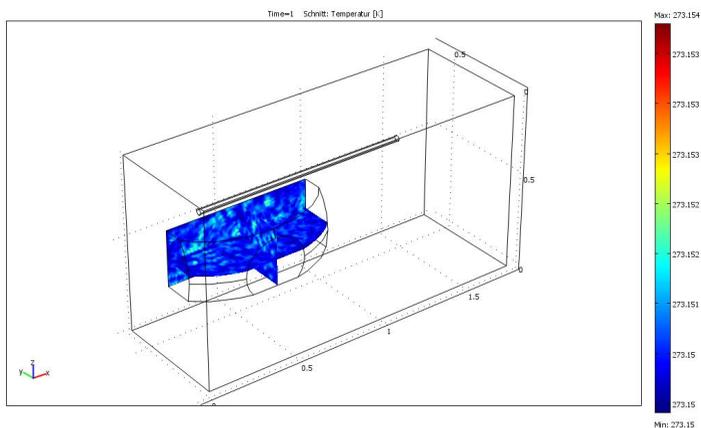


Abbildung 111: Variante 1; 1 Antenne oben exzentrisch

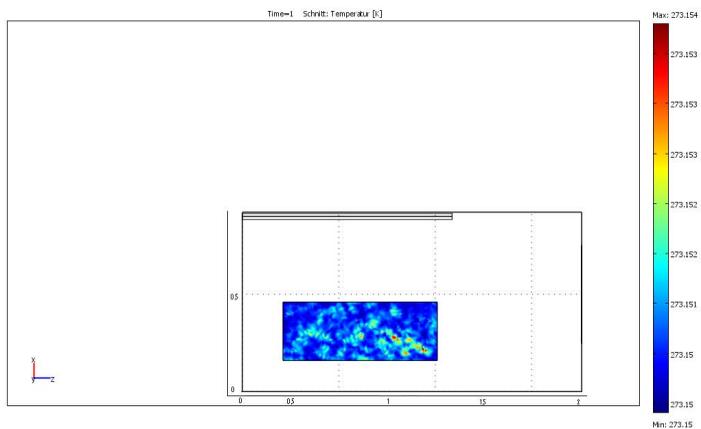


Abbildung 112: Variante 1; mittlere Absorption 66,9 J/s; maximale Absorption 8.129 W/m³

Es zeigt sich, dass die Erwärmung dadurch zwar leicht homogener, aber auch viel geringer wird. Deshalb werden die zwei Antennen aus Variante 0 (Abbildung 112) jetzt direkt am Baustoff angeordnet.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

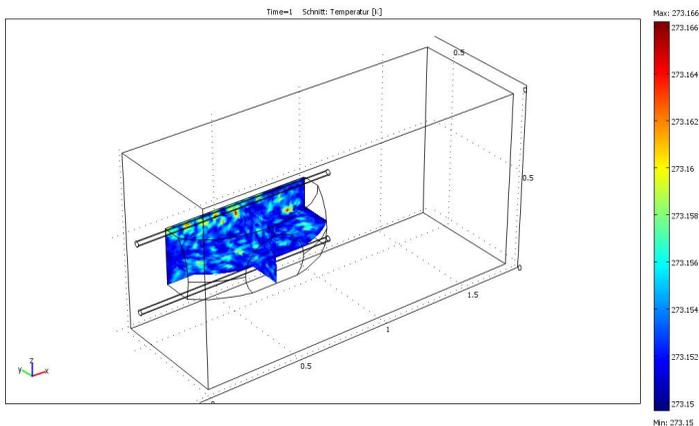


Abbildung 113: Variante 2; 1 Antenne nah über und 1 Antenne nah unter dem Probekörper

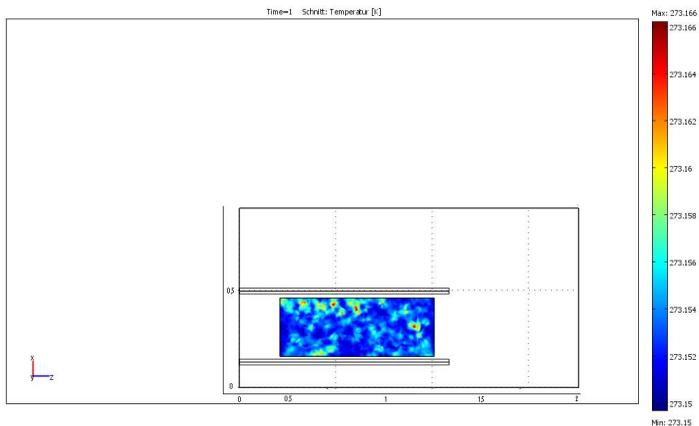


Abbildung 114: Variante 2; mittlere Absorption 385,9 J/s; maximale Absorption 34.120 W/m³

Die maximale Absorption im Verhältnis zu dessen Mittel in Abbildung 114 zeigt, dass die Homogenität im Vergleich zu den Varianten 0 und 1 schlechter wird, während die absorbierte Energie gegenüber Variante 0 annähernd gleich bleibt. Nun wird versucht, dieses Verhältnis durch die Anordnung zusätzlicher Antennen zu verbessern.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

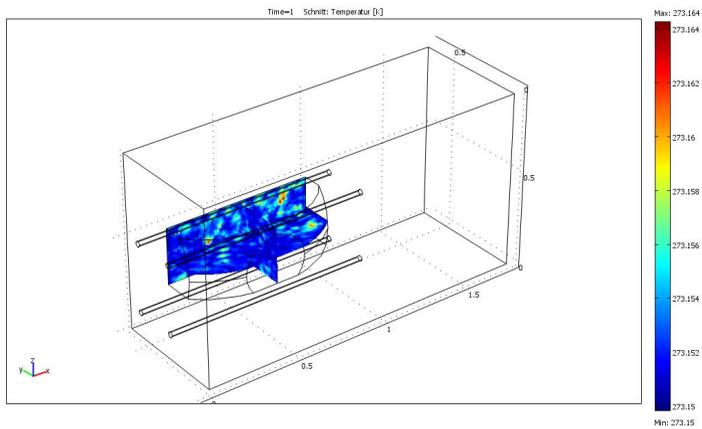


Abbildung 115: Variante 3; 2 Antennen nah über und 2 Antennen nah unter dem Probekörper

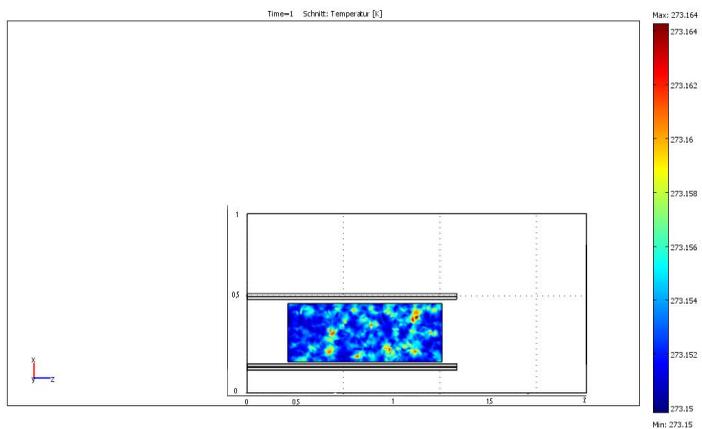


Abbildung 116: Variante 3; mittlere Absorption 300,4 J/s; maximale Absorption 28.740 W/m³

Der erreichte niedrigere Maximalwert wirkt sich sehr nachteilig auf den Mittelwert der Absorption aus. Es wird deshalb versucht, die vier Antennen anders anzuordnen (Abbildung 117).

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

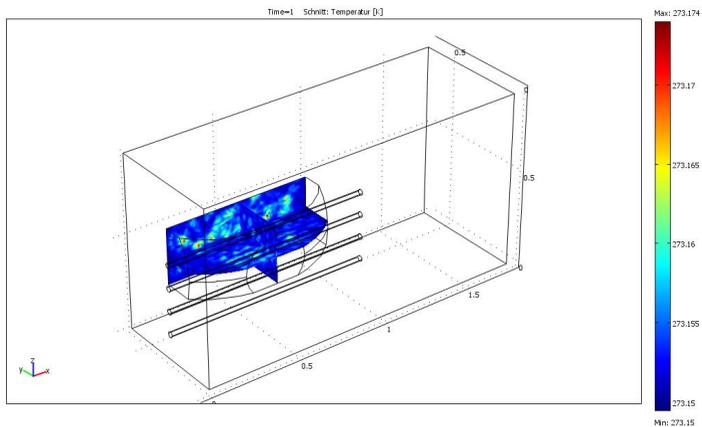


Abbildung 117: Variante 4; 4 Antennen neben dem Probekörper

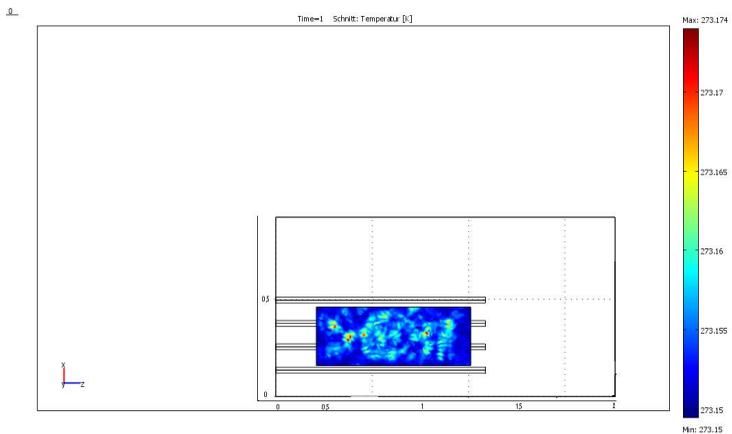


Abbildung 118: Variante 4; mittlere Absorption 309,3 J/s; maximale Absorption 4.478 W/m²

Diese Anordnung bewirkt gegenüber Variante 3 (Abbildung 115) eine große Verbesserung der Homogenität durch das Absenken der Maximalwerte. Im Weiteren wird überprüft, ob in Variante 5 durch eine größere Anzahl von Antennen beide Kennzahlen verbessert werden können.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

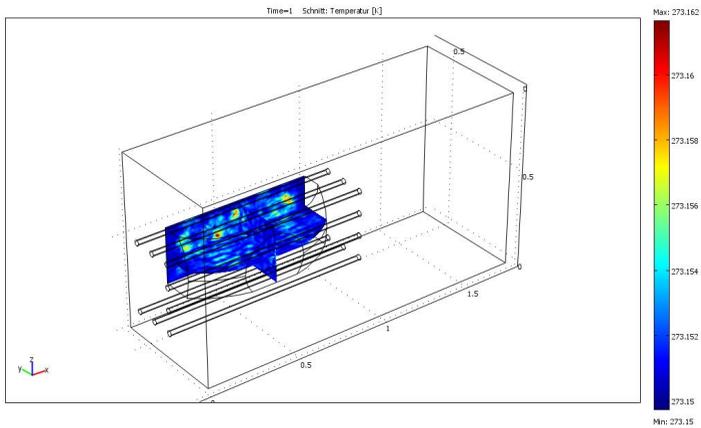


Abbildung 119: Variante 5; 8 Antennen, rund um den Probekörper angeordnet

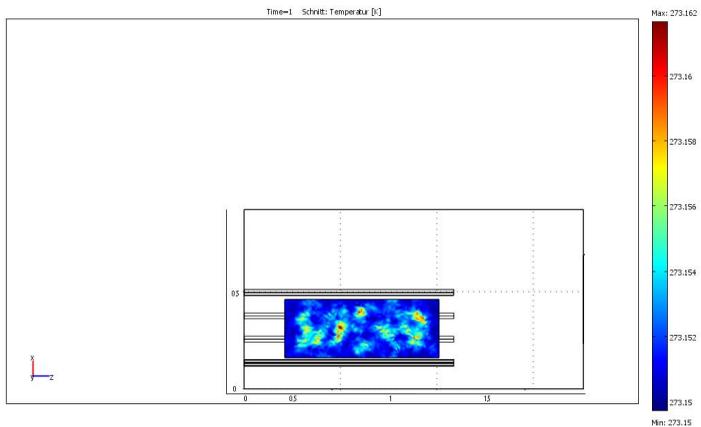


Abbildung 120: Variante 5; mittlere Absorption 192,1 J/s; maximale Absorption 24.900 W/m²

Abbildung 120 und die zugehörigen Absorptionskennzahlen zeigen, dass sich durch die Anordnung von einer größeren Anzahl von Antennen bei gleicher Leistung nicht immer ein homogeneres Temperaturbild erzeugen lässt. Es soll nun der Quotient aus mittlerer und maximaler Absorptionskennzahl als Homogenitätskennzahl H definiert und dafür herangezogen werden, um alle Varianten zu vergleichen.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

$$H_i = \frac{\text{mittlere Absorptionskennzahl}}{\text{maximale Absorptionskennzahl}} [-]$$

Formel 6-22

i Variantennummer

Es gilt die Variante als optimal, bei der die oben definierte Homogenitätszahl (blauer Balken in Abbildung 121) maximal ist.

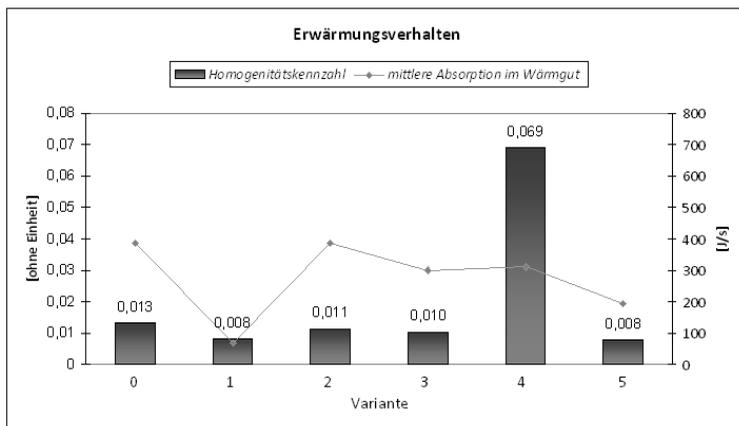


Abbildung 121: Vergleich von Homogenität und mittlerer Absorption in verschiedenen Modellvariationen des Modells der Versuchsanordnung 1

Abbildung 121 zeigt, dass das Einkopplungssystem in Variante 4 (mit vier Antennen auf jeder Seite des zu erwärmenden Bindemittels) die am besten geeignete der simulierten Anlagenkonfigurationen ist.

6.3.6.2 Variation der Magnetronhohlleiter

Wie im vorherigen Abschnitt wird zunächst das Simulationsergebnis der Versuchsanordnung (Abbildung 123) gezeigt. Entgegen der Versuchspraxis wird ein Magnetron mit 6 kW und 2,45 GHz implementiert, um die Temperaturbilder und Kennzahlen besser mit denen des vorherigen Abschnitts vergleichen zu können. Auch hier zeigt Abbildung 122 die Variationsmöglichkeiten am Modell, dessen Symmetrie genutzt wurde, um die Varianten schneller zu berechnen.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

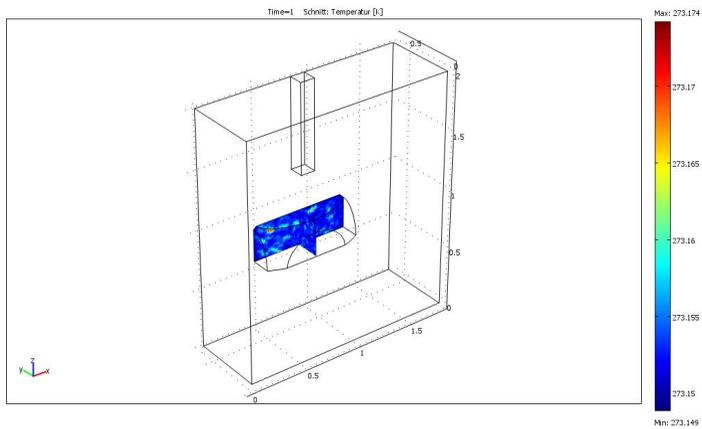


Abbildung 123: Ausgangsvariante 0; identisch zu Versuchsanordnung 1; 1 Hohlleiter zentral über dem Wärmgut angeordnet

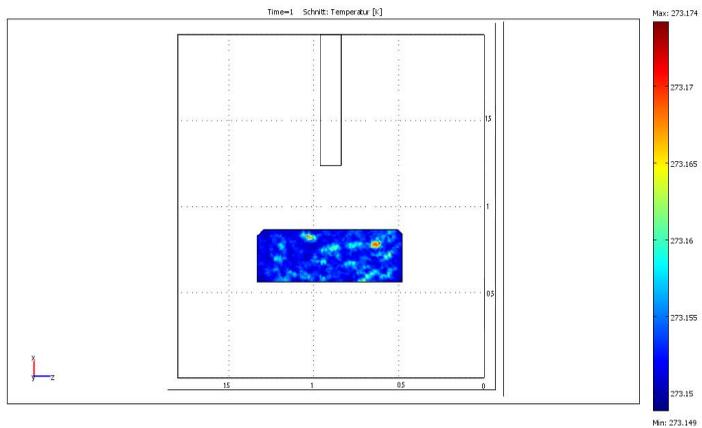


Abbildung 124: Ausgangsvariante 0; identisch zu Versuchsanordnung 1; mittlere Absorption 236,6 J/s; maximale Absorption 45.900 W/m³

Es gilt festzustellen, ob auch hier durch die Anordnung von mehreren Hohlleitern auf der Wärmgutseite die mittlere Absorptionskennzahl gesteigert und ihr Maximalwert minimiert werden kann.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

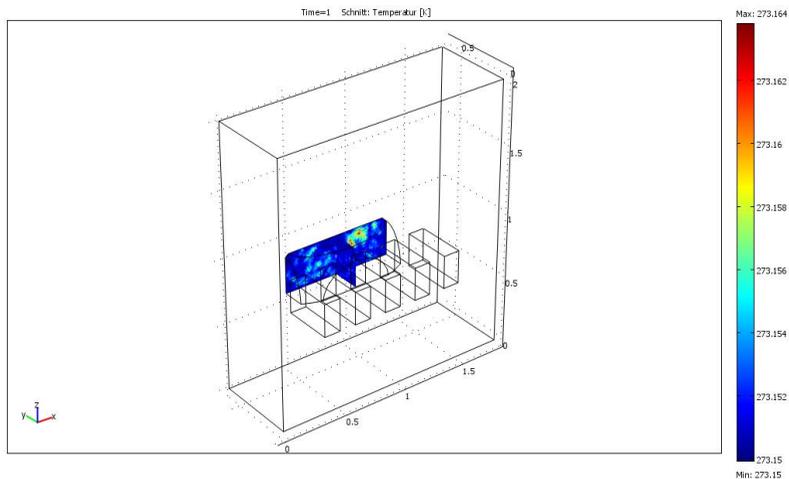


Abbildung 125: Variante 1; 5 Hohlleiter neben dem Wärmgut angeordnet

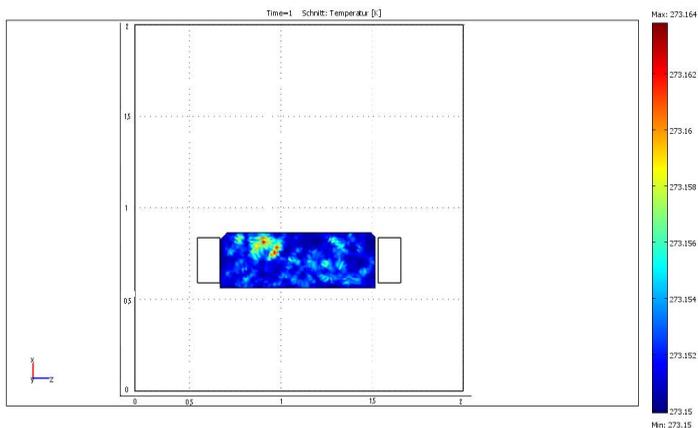


Abbildung 126: Variante 1; mittlere Absorption 140,0 J/s; maximale Absorption 29.340 W/m²

Bildet man die Homogenitätskennzahlen mit der im letzten Abschnitt vorgestellten Formel 6-23 (Variante 0: $H_0 = 0,0052$; Variante 1: $H_1 = 0,0048$), wird deutlich, dass sich vor allem aufgrund der geringeren mittleren Absorptionskennzahl die Ergebnisqualität der Variante 1 gegenüber der Variante 0 verschlechtert hat. Die Vermutung liegt nahe, dass Verluste durch die Magnetronhohlleiter verursacht werden, die nicht auf den Baustoff gerichtet sind. Des-

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

halb wird der Baustoff in der nächsten Modellvariante von vier Seiten direkt im Volumenschwerpunkt beschickt.

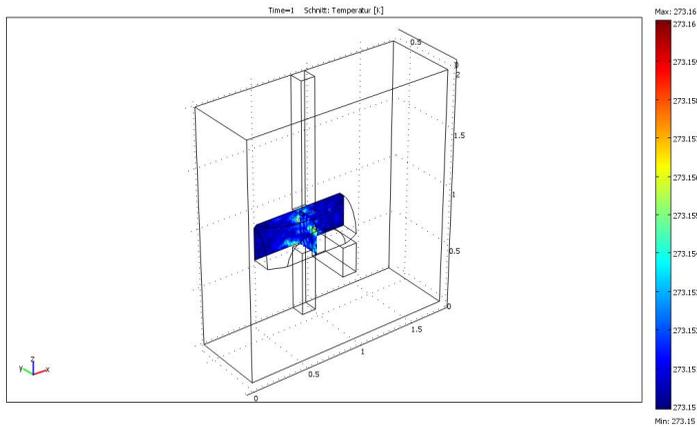


Abbildung 127: Variante 2; 4 Hohlleiter vierseitig (Symmetrie) um das Wärmegut zentral angeordnet

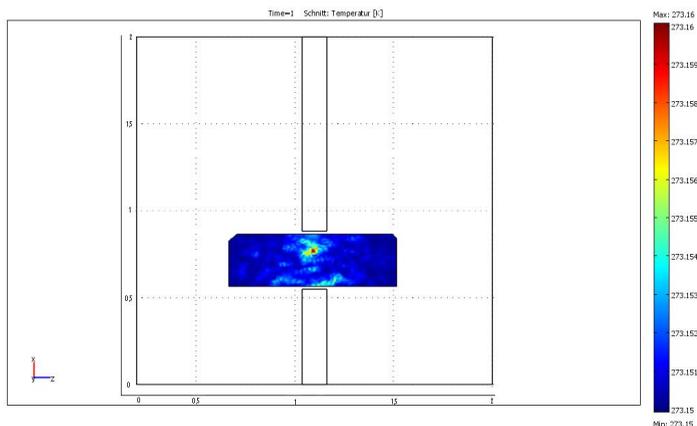


Abbildung 128: Variante 2; mittlere Absorption 67,0 J/s; maximale Absorption 20.690 W/m³

Es stellt sich das bisher schlechteste Simulationsergebnis ein. Die mittlere Absorptionskennzahl von 67,0 J/s unter der Abbildung 128 verdeutlicht, wie wenig der aufgewendeten Energie vom Bitumen absorbiert wird. Deshalb wird als nächstes versucht, die bisher in dieser Versuchssimulation sehr schlechte Homogenität durch das Anordnen aller denkbar sinnvollen Hohlleiter zu erhöhen.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

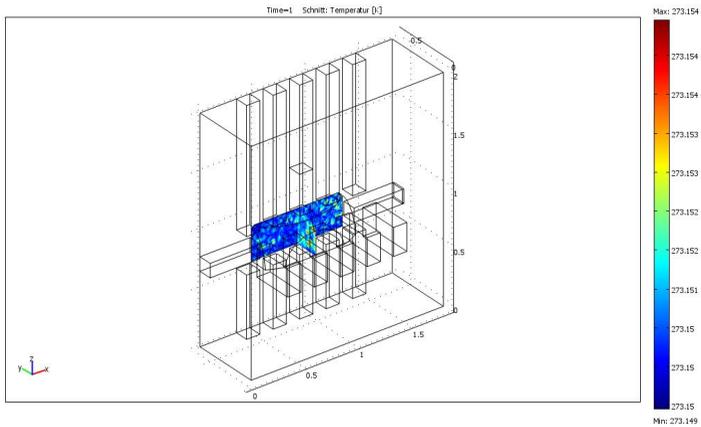


Abbildung 129: Variante 3; 22 Hohlleiter vierseitig (Symmetrie) um das Wärmgut angeordnet

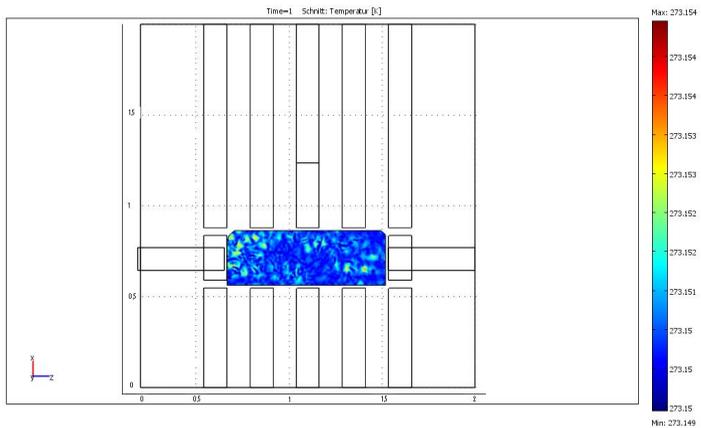


Abbildung 130: Variante 3; mittlere Absorption 117 J/s; maximale Absorption 10.070 W/m²

Die berechneten Kennzahlen dieser Simulation sind besser ($H_3 = 0,017$), aber noch nicht überzeugend. Als nächster Versuch, eine Absorptionskennzahl wie in der Antennenapplikation zu erzielen, soll der Baustoff durch die beiden Hohlleiter mit Mikrowellen beschickt werden, die an den Enden des Probekörpers angeordnet sind.

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

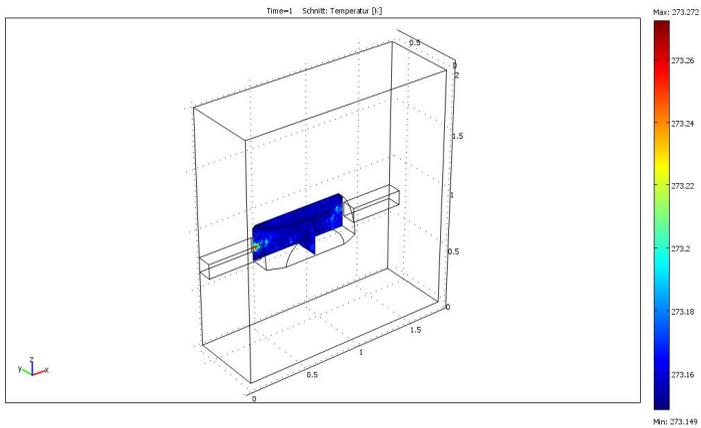


Abbildung 131: Variante 4; 2 Hohlleiter an den kleinen Seiten des Probekörpers

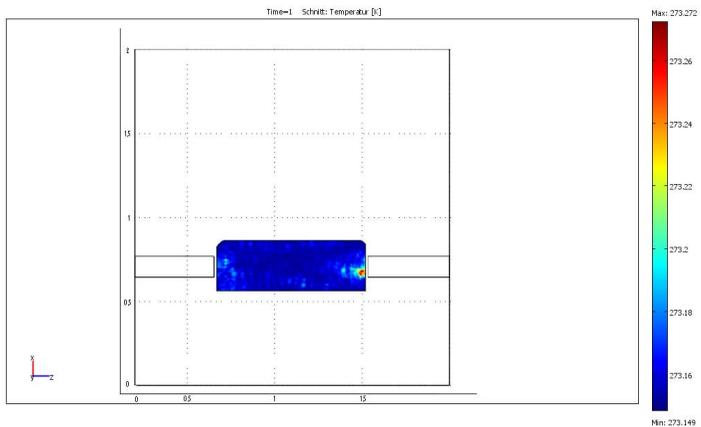


Abbildung 132: Variante 4; mittlere Absorption 681 J/s; maximale Absorption 264.500 W/m³

Einer bisher unübertroffenen mittleren Absorptionskennzahl von 681 J/s tritt mit einem vergleichsweise großer Maximalwert der Absorption von 264.500 W/m³ auf, der direkt hinter einem der Hohlleitermündungen an der Oberfläche des Wärmeguts auftritt (Abbildung 132) und sich in einer schlechten Homogenitätszahl für diese Variante 4 wiederfindet (Abbildung 133).

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

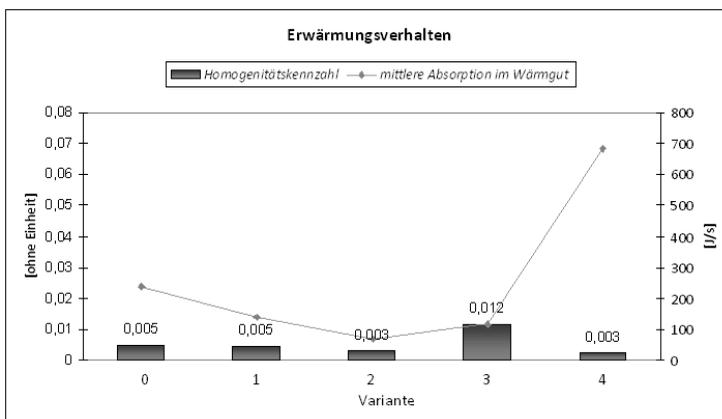


Abbildung 133: Vergleich von Homogenität und mittlerer Absorption in verschiedenen Modellvariationen des Modells der Versuchsanordnung 1

Die Ursache für die gute (aber inhomogene) Absorption im Baustoff in Variante 4 könnte an der Eindringtiefe der Mikrowellen in den Baustoff liegen. Diese Größe ist allerdings, wie Abschnitt 0 zeigt, stark von dem Imaginärteil der relativen komplexen Permittivität, die hier aus der Mitte eines relativ breiten verwendbaren Spektrums ($0,01 \leq \epsilon_r'' \leq 0,1$) gewählt wurde, abhängig. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass auch bei der Wahl einer imaginären Permittivität von 0,1 die Variationen dieses Abschnitts verdeutlicht hätten, dass sich die Erwärmung des Baustoffs Bitumen durch das geschickte Anordnen der Hohlleiter nicht so leicht homogenisieren lässt wie mittels Antennen.

6.3.7 Erkenntnisse aus der Simulation für die Anlagenplanung

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass es möglich ist, die Erwärmung des Baustoffs Bitumen in COMSOL zu simulieren. Die relative Permittivität war dabei unbekannt und wurde als Variable zur Modellvalidierung herangezogen. Diese wiederum erfolgte, indem die mit Simulationen erzeugten Thermobilder mit den Datenreihen der Praxisversuche verglichen wurden.

Bei der Simulation der gesamten Anlage wurde das Ziel verfolgt, ein Optimum für die zuzuführende mittlere Energie und der homogenen Erwärmung des Baustoffs zu erreichen. Dies ist am leichtesten möglich, indem Antennen – statt Hohlleiter – verwendet werden, um das elektromagnetische Feld zu homogenisieren. Es lässt sich hinzufügen, dass hier bei der Mikrowellenerwärmung im Vergleich zur konventionellen Erwärmung durch Konduktion selbst im ungünstigsten Fall der Wärmeeintrag in den Baustoff schneller erfolgt. Dies hatten bereits die ersten Vorversuche gezeigt, die letztlich zum Verfahrensschwerpunkt „Mikrowellenerwärmung von Bitumen“ in dieser Arbeit geführt haben. Dessen Eignung konnte hier belegt werden.

6.4 Versuche zur Eigenschaftsveränderung bei Wiederverflüssigung

Abschließend ist noch zu klären, inwieweit die gezeigten Verflüssigungsverfahren die Baustoffqualität beeinflussen. Hier werden entsprechende Versuchsanordnungen herangezogen. Diese Versuchsanordnungen dienen dazu, die Eigenschaftsveränderungen des Baustoffs durch die konventionellen und modernen Varianten der Wiederverflüssigung des Baustoffs in der Praxis zu simulieren. Grundsätzlich ist hier als Störgröße für die Baustoffqualität die sogenannte Bitumenalterung zu nennen. Durch chemische und physikalische Veränderung des Stoffes kommt es zu einer Zunahme der Bitumenhärte. Hierdurch ändert sich das Viskositäts- und Relaxationsverhalten, welches zu einer Versprödung und Rissbildung führen kann [ScSc94]. Die Bitumenalterung kann somit anhand einer Erhöhung des Erweichungspunkts Ring und Kugel, einer Absenkung der Penetration und einer Erhöhung der Viskosität detektiert werden [AmDaBeJa05].

Auf dieser Grundlage soll ein Unterschied zwischen der konventionellen Wiederverflüssigung mittels konduktiven Wärmeeintrags und moderner Wiederverflüssigung in einer Mikrowellenverflüssigungsanlage im Einfluss auf die Bitumeneigenschaften untersucht werden. Es wird hierfür die vergleichende Messung der Nadelpenetration (DIN EN 1426 (2007)) und des Erweichungspunkts nach Ring und Kugel (DIN EN 1427 (2007)) herangezogen. Erst nach der Analyse der hieraus erlangten Messergebnisse soll eventuell über den Einsatz weiterer Materialprüfverfahren befunden werden.

6.4.1 Versuchsaufbau Verflüssigungssimulation

In den Versuchsreihen soll herausgefunden werden, ob durch das Wiederverflüssigen von Bitumen Qualitätseinbußen zu befürchten sind. Darauf aufbauend sollen die Wiederverflüssigung des Baustoffs Bitumen durch konventionelle Verflüssigungsverfahren mittels Schmelztopf und dem modernen Verfahren der Mikrowellenverflüssigung hinsichtlich Qualitätseinbußen miteinander verglichen werden. Hierzu wird 1 kg Bitumen 50/70 fünfmal im Ofen (1000 W; 3 Stunden Wärmzeit) und in einer Mikrowelle (800 W, 20 Minuten Wärmzeit) von 20 °C Kaltlagertemperatur auf 160 °C Heißlagertemperatur erwärmt. Das Bitumen befindet sich dabei in offenen Keramikschalen und wird nicht umgerührt. Nach jeder Wiederverflüssigung wird ein Teil der heißen Probe in jeweils fünf Tiegel zur Bestimmung der Nadelpenetration (DIN EN 1426 (2007)) und jeweils drei Ringe zur Bestimmung des Erweichungspunkts nach Ring und Kugel (DIN EN 1427 (2007)) abgefüllt. Nachfolgend werden die jeweiligen Mittelwerte der Proben aufgezeigt.

6.4.2 Eigenschaft Veränderungen des Baustoffs im Versuch

Abbildung 134 und Abbildung 135 zeigen, dass die Wiederverflüssigung keinen mit den gewählten Prüfverfahren messbaren Einfluss auf die Baustoffeigenschaften hat.

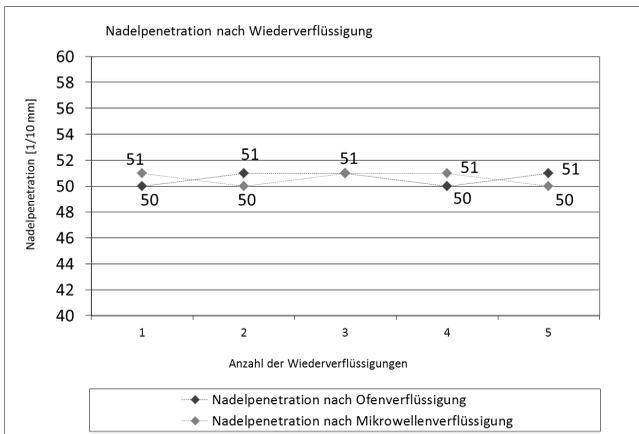


Abbildung 134: Mittlere Nadelpenetration eines Bitumens nach mehrmaliger Ofen- und Mikrowellenverflüssigung

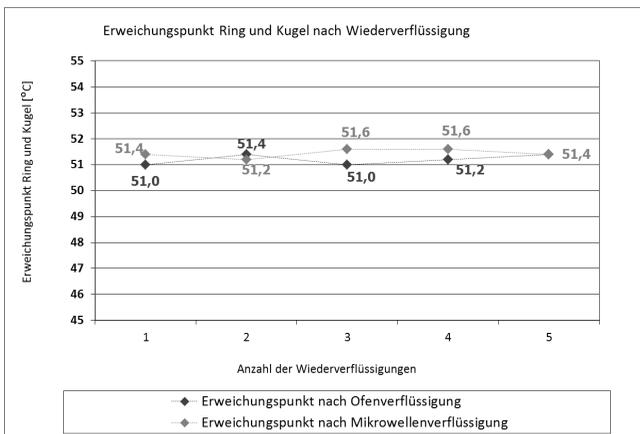


Abbildung 135: Mittlere Erweichungspunkte eines Bitumens mit einem (Anfangs-) Erweichungspunkt (RuK) von 51,4 nach mehrmaliger Ofen- und Mikrowellenverflüssigung

Weder die kürzere Verflüssigungszeit noch die anders geartete Wärmeeinbringung verursachen einen nennenswerten Unterschied zwischen den Ergebnisreihen. Die geringen Schwankungen lassen sich möglicherweise auf Messungenauigkeiten zurückführen und liegen in dem von den jeweiligen Normen hierfür erlaubten Rahmen.

6.4.3 Auswertung der Simulationsversuche

Da die beiden gewählten Standardmessverfahren zumeist keine große Beeinträchtigung der Baustoffqualität durch Alterung ergeben, wird es als unnötig angesehen, weitere Messverfahren der Bitumeneigenschaften heranzuziehen. Dennoch stehen diese Ergebnisse auf den ersten Blick im Widerspruch zu den Ergebnissen anderer Untersuchungen an Bitumen im Asphalt. So finden Arand und Renken (vgl. [ArRe96]) in ihren Versuchsreihen einen Beleg für die in der Asphaltproduktion auftretende Verschiebung des Erweichungspunktes Ring und Kugel im Mittel um 2,6 K [ArRe96]. Arand und Renken weisen darauf hin, dass sich diese Eigenschaftsveränderung des Baustoffs bei der Mikrowellenerwärmung des Asphalts zur Extraktion des Bindemittels im Mittel auf 0,7 K reduzieren lässt [ArRe96], oder gar nicht auftritt [Re94]. Vermutlich sind die teilweise vorhandenen Unterschiede zu den hier erfolgten Messergebnissen darauf zurückzuführen, dass das Bitumen im Asphalt ein Vielfaches an Oberfläche hat als in der, im Rahmen dieser Arbeit, simulierten Bitumenkaltlogistik mit Verflüssigung. Die hier erhobenen Daten weisen deutlich darauf hin, dass die Wiederverflüssigung des Baustoffs unbedenklich ist. Dies gilt in gleichem Maße für beide Verflüssigungsmethoden.

6.5 Abschließendes Fazit zur Mikrowellenverflüssigung von Asphaltbindemitteln

Auf Grundlage der Untersuchung konventioneller Verflüssigungsanlagen wurden in diesem Abschnitt herausgearbeitet, dass die Weiterentwicklung der Verflüssigungstechniken mittels Hochfrequenztechnik für die Wiedererwärmung von Bitumen sowohl aus technischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen als zielführend angesehen wird. Die theoretischen Betrachtungen haben gezeigt, dass Bitumen zwar über ein hervorragendes Absorptionsverhalten gegenüber den Mikrowellenstrahlen besitzt, dass jedoch hinsichtlich der Eindringtiefe der Mikrowellenstrahlen in den Baustoff als auch zur Sicherstellung einer Homogenität der Erwärmung sowie dem Wirkungsgrad einer Mikrowellenverflüssigungsanlage erhebliche Entwicklungsarbeit investiert werden muss. Hierfür sind verschiedene Versuchskonfigurationen und eine aufwendige Messtechnik unumgänglich.

Die Ergebnisse dieser Großversuche belegen die Einsetzbarkeit der Mikrowellenöfen und machen es möglich, zwischen Ankopplungssystemen und Magnetronkonfigurationen zu differenzieren. Die Daten dienen im Weiteren als Grundlage für eine Verfahrenssimulation

6. Der Einsatz von Hochfrequenztechnik zur Bitumenverflüssigung

mittels der Finiten-Elemente-Methode. Hier wurde es erstmals möglich, eine Bitumenverflüssigungsanlage modellhaft hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Abschließend wurden weitere Versuche zur Baustoffqualität nach Durchlaufen dieses Verfahren durchgeführt. Als Vergleich dient die physische Simulation einer konventionellen Verflüssigung. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Bitumenkalthandhabung kein Verlust an Bindemittelqualität zu befürchten ist. Die Ergebnisse dieses Abschnitts belegen, dass der großindustrielle Einsatz von Mikrowellen zur Bitumenerwärmung unter technischen Gesichtspunkten möglich ist und unter ökonomischen Gesichtspunkten sinnvoll sein könnte.

7 Abschließender Technologievergleich mit Diskussion unter Einbeziehung ökonomischer Kriterien

Dieser Abschnitt soll aufbauend auf den durchgeführten Versuchen und den entwickelten Konzepten nochmals verstärkt und systematisch auf monetäre Aspekte eingehen. Wenn die Techniken der Bitumenkaltlogistik zur Anwendung kommen, ist mit Einsparungen beispielsweise bei den Lager- und Transportkosten sowie mit zusätzlichen Aufwendungen wie z.B. bei den Verpackungskosten zu rechnen. Hier soll der Versuch unternommen werden, diese Größen zu lokalisieren und jeweils näherungsweise zu quantifizieren und gegenüberzustellen (Abschnitt 7.1). Anschließend sollen unter Einbeziehung dieser ökonomischen Aspekte die verschiedenen Techniken in der Bitumenkalthandhabung diskutiert werden (Abschnitt 7.2) und eine abschließende Kombinationsempfehlung von Verpackungs- und Verflüssigungsvariante (Abschnitt 7.3) ausgesprochen werden.

Eine Vielzahl die Bitumenkaltlogistik betreffenden möglichen ökonomischen Untersuchungen ist damit nicht inbegriffen. Hierzu zählen eine mathematisch basierte Standortplanung auf der Grundlage mehrerer Standortkriterien, eine vor allem bedarfs- und angebotsorientierte Planung von Lagermengen, eine Analyse der Bitumenmarktpreise, neben der die „Forecasting“-Thematik herausgearbeitet werden kann, und die Wahl und der Vergleich mit anderen Versorgungssicherungsinstrumenten auf dem Bitumenmarkt. Diese Forschungsthemen darzulegen, bleibt wirtschaftswissenschaftlich orientierten Untersuchungen überlassen.

7.1 Ökonomische Bewertung der Vorteile der Bitumenkaltlogistik

Mit der Umstellung der Bitumenlagerung von der Vorhaltung in beheizten Tanks auf eine Kaltlagerung in Kartonagen und anschließender Wiederverflüssigung lassen sich unter Einsatz nicht unerheblicher Aufwendungen zu deren Verwirklichung, unabhängig von der gewählten Lager- oder Wiederverflüssigungsvariante, eine Vielzahl wirtschaftlicher Vorteile erzielen. Im Folgenden sollen eine Reihe dieser Einzelfaktoren, die als wirtschaftlicher Nutzen angesetzt werden können, erläutert werden. Dabei sollen einige dieser Faktoren in monetären Größen quantifiziert werden, wobei diese dann auf die Bitumentonne (€/t) bezogen werden. Andere wiederum werden hier nur angeführt, sollen aber aufgrund unterschiedlicher Argumente nicht monetarisiert werden.

Als wesentlicher Nutzen der Kalt- gegenüber der Heißlagerung von Bitumen müssen die Energiekosten für die Bevorratung angesehen werden. Zur Berechnung der **Energiekosten bei der Lagerung** von kaltem Bitumen wird hier ein Ansatz auf Grundlage bekannter Daten herangezogen. Abbildung 136 zeigt den Primärenergiebedarf für das Warmhalten des Bi-

tumens in Abhängigkeit vom maximalen Tanklagerinhalt. Die Lagerkosten können, wie im Folgenden dargestellt, abhängig von der geplanten Lagermenge und den mittleren Kosten für den Primärenergieträger (zumeist Heizöl) von 7,6 Ct/kWh berechnet werden.

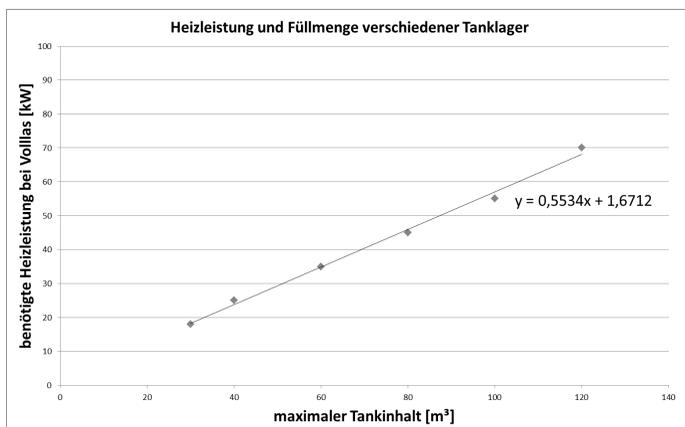


Abbildung 136: Maximale Heizleistung und Tankinhalt, ermittelt aus Produzentendaten

Erfahrungsgemäß muss hierfür von größeren Lagermengen des Baustoffs als in Abbildung 136 dargestellt – beispielsweise von jährlich bis zu 10.000 m³ – ausgegangen werden. Mittels einer Trendfunktion wird hier die Extrapolation des Heizenergiebedarfs auf höhere Tankvolumina durchgeführt. Mit diesem Ansatz ergeben sich für 10.000 m³ Heißlagerenergiebedarf von ca. 5.500 kW.

Bei einer angenommenen Lagerzeit von 100 Tagen, also etwa der Hälfte der jährlichen Gesamtproduktionstage, verursacht dies spezifische Primärenergiekosten in der Lagerung von rund

$$\{[(5.500 \text{ kW}/10.000 \text{ m}^3) * 24 \text{ h/d} * 100 \text{ d}] / 1,04 \text{ t/m}^3\} * 0,076 \text{ €/kWh} \approx 104 \text{ €/t.}$$

Dies kann als Näherung der jährlichen Lagerkosten in einer dezentralen Lagerung des Baustoffs in den Asphaltmischanlagen gelten. Es gibt auch beispielsweise in Worms (Deutschland) und Zgorzelec (Polen) große Heißbitumenlager, die – auf Grundlage großer vertraglich vereinbarter Pauschalbeträge – nur ca. 25 bzw. 16 €/t für die Heißlagerung unabhängig von der Lagerdauer berechnen. Dem gegenüber stehen bei der Kaltlagerung nur Lagerkosten von rund 6 €/t (hundert Tage bewachte Kaltlagerung ohne Überdachung in Brandenburg). Es kann hieraus eine grob geschätzte Ersparnis von rund 15,- €/t angenommen werden.

Bei der kalten Handhabung von Bitumen im Transport und in den Anlagen besteht ein geringeres Schadenspotential bei Unfällen sowie eine geringere Gefährdung des Personals hinsichtlich

Verbrennungen oder Dämpfen. Im Falle eines Verkehrsunfalls mit den transportierenden Kraftfahrzeugen besteht nicht die Gefahr, dass das heißflüssige Bindemittel ausläuft. Die sich hieraus ergebenden Kosteneinsparungen beispielsweise für Versicherungen sind schwer zu bewerten, weshalb hier darauf verzichtet werden muss. Diese Aufwendungen für den Versicherungsschutz gegen Unfälle in der Heißbitumenlogistik finden sich lediglich bei den Kosten der Lieferanten außerhalb des hier untersuchten Betrachtungsrahmens der Bitumenlogistik. Hieraus kann allerdings ein Anreizargument geschaffen werden, um Raffineriebetreiber zu einer Umstellung der Produktionsschnittstelle zu bewegen. Dies ist insbesondere in Anbetracht der oben angeführten Mindestfrachtsätze von großem Interesse.

Auch die *Kosten für die Umsetzung von Unfallverhütungsvorschriften* entfallen aufgrund der geringeren Gefährdungspotentiale für diverse Schutzmaßnahmen. Bei ihrer Bewertung sind auf Produzentenseite vor allem zwei Größen zu berücksichtigen: die Kosten für Schutzkleidung sowie die für die Sicherheitsschulungen des Personals. Die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG-Bau) bietet im Rahmen von Schulungen zur Sicherheit im Straßenbau, die für Genossenschaftsmitglieder kostenlos sind, auch Einweisungen in den Umgang mit dem heißflüssigen Baustoff an.

Um den Aufwand für Schutzkleidung wie Sicherheitsschuhe und Schutzhelm zu bestimmen, werden nur die Positionen berücksichtigt, die nicht auch bei der Handhabung des kalten Bitumens anfallen. Hieraus ergeben sich die Kosten aus den in Tabelle 7-1 genannten Katalogpreisen.

Schutzkleidung	Preisrichtlinie €	Einheit
wattierte Schweißhandschuhe	15,-	Paar
Klappvisier/Gesichtsschutz	36,-	Stück

Tabelle 7-1: Kosten für Schutzkleidung

Das resultierende Einsparungspotential erweist sich aufgrund der niedrigen Beträge als vernachlässigbar.

Die Transportkosteneinsparung ergibt sich aus dem Umstand, dass konventionelle Lastkraftwagen zu niedrigeren Kosten liefern können als Tankkraftwagen. Die Transportkostendifferenz zwischen dem Kaltransport und dem heißflüssigen Transport in Tankkraftwagen bestimmt sich außerdem aus den Möglichkeiten des jeweiligen Logistikers. Während beim TKW-Transport in den allermeisten Fällen eine Leerfahrt anfällt, ist es dem Transportunternehmen möglich, einen Standardtransporter nach der Bitumentladung anderweitig einzusetzen. Die mittleren Frachtsätze im Heißtransport des Baustoffs betragen aus Kostenvorschlägen von Logistikdienstleistern ca. 10,3 Ct/(km*t), die mittleren Standardtransportkosten betragen 7,7 Ct/(km*t). Bei einer angenommenen Anlieferung über eine Distanz von 300 km entspräche das einer Einsparung von ca. 8 €/t. Wenn die Abfüllung nicht direkt in oder an der Raffinerie, sondern in de-

ren Umland stattfindet, müssen andere Frachtsätze angesetzt werden, da zumeist eine fixe sogenannte „Mindestfracht“ von ca. 5 €/t den Anteil der kilometerbezogenen variablen Kosten der Frachtsatzkalkulation bei Kurzstreckentransporten überwiegt.

Auch größere *Transportstrecken*, die oft nicht nur mit Tankkraftwagen sondern auch mit Schiffs- oder Bahntransporten erfolgen müssen, werden durch den Kalttransport weniger kostenintensiv. Da im Rahmen dieser Arbeit die Bitumenkaltlogistik für den nationalen Markt untersucht wird, wird dieser Aspekt der Vollständigkeit halber hier erwähnt, die damit verbundenen Kostenminderungspotentiale werden allerdings nicht untersucht.

Die *Lieferanten- und Preisunabhängigkeit* bezieht sich darauf, dass eine räumliche und zeitliche Inhomogenität im Bitumenpreis durch weite Bitumenkalttransporte und Kaltlagerung ausgeglichen werden kann. Die Unabhängigkeit von Baustofflieferanten ist monetär schwer zu bewerten, weshalb ein einkaufspreisorientierter Ansatz gewählt wird. Die Preise aller nichtmodifizierter Bitumen steigen mit den Preisen des Bitumens 70/100 annähernd linear an, womit die Preisbetrachtung hier auf diese Bindemittelsorte beschränkt sein soll. Darüber hinaus wird hier davon ausgegangen, dass Baumaßnahmen im Schnitt drei Monate nach Angebotsabgabe zur Ausführung kommen. Bei größeren Vorlaufzeiten wird zumeist ein Termingeschäft auf die Straßenbaustoffe getätigt. Abbildung 137 soll die dreimonatigen Preisschwankungen für 70/100 verdeutlichen.

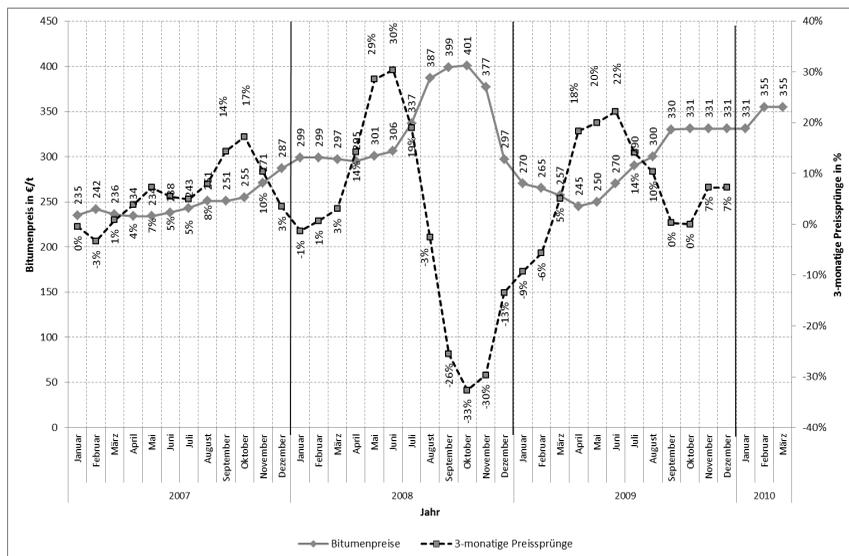


Abbildung 137: Bitumenpreise im Monatsmittel, berechnet nach Bitumenpreisindex des statistischen Bundesamtes und eigenen Daten

Die starken 3-monatigen Preissprünge von im Schnitt 4,2 % können unvorhergesehene Kosten von durchschnittlich 11,- €/t verursachen. Fällt der Bitumenpreis allerdings im Zeitraum zwischen Angebotskalkulation und Baubeginn, besteht die Möglichkeit, den Baustoff zum Tagespreis einzukaufen. Es muss für die Qualität der Daten des Statistischen Bundesamtes, die hier Verwendung fanden, kritisch angemerkt werden, dass sie stark von unbekanntem Faktoren wie den zur Erhebung herangezogenen Regionen beziehungsweise Unternehmen und deren Kommunikationsinteresse abhängig sind.

Die Möglichkeit, Bitumen auch über längere Zeitspannen hinweg kalt lagern zu können, kann durchaus auch zu einem Vorteil durch eine *gestärkte Verhandlungsposition* asphaltproduzierender Betriebe gegenüber Bitumenlieferanten beitragen, wenngleich dieser schwer monetär bewertbar ist. Das kalte Bitumen kann, falls keine zufriedenstellenden Preisvereinbarungen zustande kommen, verflüssigt werden, wobei allein diese Option einen gewissen Verhandlungsdruck von Seiten der Einkäufer bewirkt, der letztlich zu niedrigeren Preisen führen kann.

Der Bitumenpreis unterliegt saisonal bedingten Schwankungen. Abbildung 137 zeigt die Bitumenpreisentwicklung der Jahre 2007 bis 2009. Aus ihr lässt sich ermitteln, dass die mittlere saisonbedingte Preisdifferenz der Marktpreise für Bitumen zwischen April und Oktober 71 €/t betrug. Kritisch muss hier angemerkt werden, dass der Bitumenpreis in der Praxis stark regional und von Raffineriekapazitäten abhängig ist, so dass eine räumliche und zeitliche Mittelwertbildung, wie sie hier erfolgt, nur als grobe Näherung der tatsächlichen Potentiale gelten darf. In der Praxis des Bitumenhandels stellt sich zumeist zusätzlich die Frage, welche Mengen des Baustoffs zum angegebenen Preis verfügbar sind. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass das hier ausgewiesene Preispotential durch die Bevorratung mit kaltem Bitumen und somit der dadurch geschaffenen Möglichkeit, Zeiten hoher Bitumenpreise durch deren Verwendung zu überbrücken, zum großen Teil wirtschaftlich genutzt werden kann.

In sehr ähnlicher Weise sind die im Rahmen dieses Projekts untersuchten und weiterentwickelten Technologien der Bitumenkalthandhabung auch geeignet, langfristige, über ein halbes Jahr hinausgehende Spekulationsmöglichkeiten auf dem Bitumenmarkt zu schaffen und damit erwartete *Preissteigerungen* zumindest teilweise zu *kompensieren*. Eine monetäre Beurteilung solcher spekulativer Potentiale soll hier aufgrund der Prognoseunsicherheit jedoch nicht angestrebt werden.

Auch ohne an dieser Stelle den Versuch zu unternehmen, die beiden zuletzt genannten stark situationsbedingten Vorteile der Bitumenkaltlogistik einer Bewertung zuzuführen, wird deutlich, welche Einsparungspotentiale die Bitumenkaltlogistik bietet. Würde man die Summe aller hier als bewertbar angenommenen, teils auf Annahmen basierenden monetären Vorteile bilden, ergäbe sich ein Kostenvorteil von ca. 105,- €/t. Diese Zahl soll als Berechnungshilfe für das Kapital dienen, das zur Deckung der zusätzlichen Kosten aus Kalthandhabung, wie die in den nächsten Abschnitten dargestellten Verpackungs- und Anlagenkosten, zur Verfügung steht.

Reduzierung Lagerkosten	15 €/t
Minderung Auswirkung von Unfällen in der Logistikkette	–
Kosteneinsparung bei der Umsetzung von Unfallverhütungsvorschriften	–
Einsparung bei Transportkosten	8 €/t
Unabhängigkeit der Asphaltproduzenten und Straßenbauunternehmen von Baustofflieferanten und Preisschwankungen;	11 €/t
Monetärer Vorteil im Bindemittelheißverkauf	–
Ausnutzung von saisonbedingten Marktpreisunterschieden	71 €/t
Kompensation von mittel- bis langfristigen Preissteigerungen	–
Summe der Nutzen	105 €/t

Tabelle 7-2: Überblick über alle Einsparpotentiale

7.2 Diskussion der Varianten der Bitumenkalthandhabung

Die ökonomische Bewertung von Techniken der Bitumenkalthandhabung muss hier auf Grundlage von Kostenvoranschlägen und gemittelten Marktpreisen erfolgen. Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Untersuchungen haben vorab gezeigt, in welcher Weise und unter welchen Randbedingungen die Verpackungssysteme technisch einsetzbar sind. Nun soll eine Diskussion unter Einbeziehung ökonomischer und technischer Aspekte erfolgen. Ziel ist es, eine Entscheidungsunterstützung zur Bitumenkalthandhabung und hinsichtlich der Ausprägungsvarianten von Verpackungen (Gebinden) und Erwärmungsanlagen (Verflüssigungsanlagen) herauszuarbeiten. Hierzu werden zunächst in Unterabschnitt 7.2.1 nacheinander die Metall-, Kunststoff-, und Kartonverpackungen unter technoökonomischen Gesichtspunkten diskutiert. In Unterabschnitt 7.2.2 erfolgt darauf aufbauend eine Diskussion der konventionellen und der modernen (HF-Technik) Bitumenverflüssigung.

7.2.1 Gebindevarianten

Ein Bitumenkaltgebilde, also eine gefüllte Bitumenverpackung kann eine Vielzahl von Ausprägungsformen annehmen. Der Einfachheit halber wurde in dieser Arbeit eine Kategorisierung in Metall-, Kunststoff-, und Kartonverpackungen durchgeführt. Diese Kategorien sollen einander im Folgenden als Ganzes gegenübergestellt werden. Naturgemäß wird dabei nur auf Aspekte eingegangen, die alle Ausprägungsformen einer Kategorie betreffen. Dadurch wird ein Gesamtüberblick über die Anwendbarkeit und letztlich die Entscheidungsfindung erleichtert. Eine allgemeine qualitative Darstellung einiger Entscheidungsmerkmale von Bitumenverpackungen bieten Abbildung 138 und Abbildung 139.

7 Abschließender Technologievergleich mit Diskussion unter Einbeziehung ökonomischer Kriterien

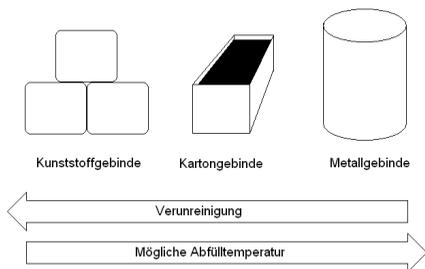


Abbildung 138: Qualitative Übersicht über die Eigenschaften der Gebindevarianten

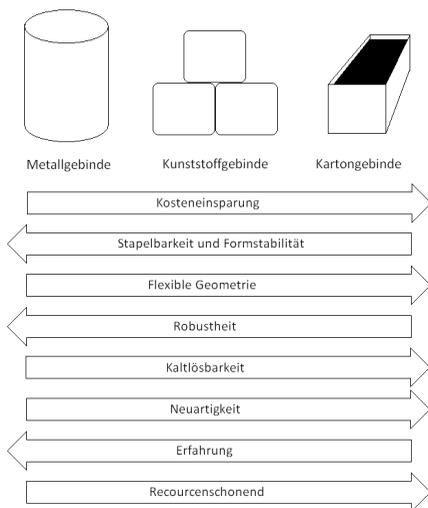


Abbildung 139: Qualitative Übersicht über die Eigenschaften der Gebindevarianten

Auf die einzelnen Aspekte dieser Unterscheidungskriterien wird im Folgenden etwas detaillierter eingegangen.

7.2.1.1 Diskussion von Metallverpackungen für Bitumen

In einem derzeit gängigen Verfahren des Bitumenkaltransports zu Auslandsbaustellen mittels Metallgebilden (Fässer oder Stahltanks) liegen trotz der hohen Materialkosten auch Vorteile. Die Gebinde sind gut stapelbar und benötigen daher nur wenig Lagerfläche. die

Gebinde sind so robust, dass es sogar möglich ist, den Baustoff in seiner Verpackung ohne nennenswerte Beeinträchtigung der Verpackungseigenschaften direkt zu erhitzen. Allerdings ist das Herauslösen des Bindemittels kalt nur schwer und unter dem vorherigen Einbringen bestimmter Trennmittel möglich. Die Stückkosten bei der Fasshandhabung hängen stark von der Fassqualität (beispielsweise hinsichtlich Korrosionsschutz) und davon ab, ob sie mehrmals verwendet werden.

Bei den oben angeführten Auslandsbaumaßnahmen kommt es aus Transportkostengründen zumeist zu keiner Wiederverwendung von Fässern zum Zweck des Bitumenkaltransports. Transporttanks oder Transportcontainer werden allerdings wiederverwendet. Als Preisbeispiel aus der Baupraxis wurden Kosten für kaltes Bitumen in Größenordnungen von bis zu 900,- €/t (inkl. Metallverpackung, Transportkosten und Zölle) genannt. Hieran ist aber bereits ersichtlich, dass der letztlich entschiedenste Nachteil der Metallverpackungen die hohen Kosten sind.

7.2.1.2 Diskussion von Kunststoffverpackungen für Bitumen

Einer der wesentlichen Gründe für die Entwicklung von Kunststoffverpackungen, waren die hohen Kosten von Metallverpackungen. Die Idee für das Abpacken des Straßenbaubindemittels in Kunststoffgebilde stammte ursprünglich aus dem Markt für bituminöse Verguss- und Dichtungsmassen. Auf dieser Grundlage wurden im Wesentlichen zwei Konzepte unter unterschiedlicher Schwerpunktsetzung entwickelt. Eine relativ hohe Gebinderobustheit wurde durch das Abpacken in zweilagige Gebinde (PP-Gewebesack und zumeist PE-Inliner) erzielt. Eine hinsichtlich des Abpackens und Wiederverflüssigens verfahrenstechnisch zeitsparende Variante ist die Produktion von Bitumenfüllschläuchen. Die Preisunterschiede zwischen verschiedenen Kunststoffverpackungen sind unter anderem deshalb groß und schwer fassbar. Auch innerhalb der beiden Ausführungsvarianten schwanken die Preise stark. So können die Kosten von zweilagigen Kunststoffgebinden je nach Entwicklungsstand und gewünschter Ausführungsvariante zwischen 10,- €/t und 30,- €/t liegen. Die oftmals von den Herstellern als kostensparend angepriesene Wiederverwendbarkeit der Polypropylen-Gewebesäcke ist kritisch zu sehen. Wie durchgeführte UV-Untersuchungen unter anderem zeigen, versprechen die PP-Gewebesäcke, selbst mit UV-Schutzbeschichtung unter Sonnenlicht und sollten deshalb aus Gründen der Arbeitssicherheit nach der Lagerung nicht mehr belastet werden. Die Qualitätsuntersuchungen haben auch offenbart, dass Kunststoffverpackungen keinen wesentlichen Beitrag zu dessen eigener volumenbedingter beziehungsweise lichtdurchlässigkeitsbedingter UV-Unempfindlichkeit leisten. Der größte Nachteil des Systems liegt darin, dass der Inliner nach der auf die Abfüllung folgenden Abkühlung für immer untrennbar mit dem Baustoff verbunden ist. Im besten Fall kann die (nach Wiederverflüssigung geschmolzene) Trennfolie eine suspensionsartige Masse mit dem Bindemittel bilden. Beim Füllen aller Kunststoffverpackungen bedarf es zusätzlich einer speziellen Abfüllanlage, um das Bitumen schnell auf kunststoffverträgliche Temperaturen abzukühlen.

7.2.1.3 Diskussion von Kartonverpackungen für Bitumen

Kartonverpackungen entstanden aus dem Bedürfnis, die Verpackung verfahrenstechnisch einfacher als Kunststoffe und Metallgebinde vom Bindemittel lösen zu können. Auch bei der Entwicklung der Kartongebinde für den Straßenbau wurden die Ideen aus dem Hochbau entlehnt. Der größte Vorteil von silikonierten Kartons liegt in ihrer mechanisch einfachen, schnellen und restlosen Lösbarkeit vom Bindemittel im kalten und heißen Zustand. Es findet somit keine nennenswerte Verunreinigung des Baustoffs statt. Die gelösten Kartonreste stellen Abfall dar, der mehr Volumen als das der Kunststoffgebinde, aber erheblich weniger als die leeren Metallgebinde einnimmt und vor allem aber kostengünstiger verwertbar ist als die anderen beiden Verpackungsvarianten. Das Verpackungsmaterial, das teilweise aus Altpapier besteht, lässt sich unter geringem Aufwand recyceln. Kartongebinde sind dank Paletten und Umreifungsbänder ebenso leicht zu handhaben wie Kunststoffgebinde. Größter Nutzen des Systems ist der günstige Preis. Er entspricht für die hier entwickelte Konfiguration der Strabox für einer Füllmenge von 10.000 Tonnen ca. 35,- €/t. Der allgemeine Aufwand für die Wiederverflüssigung ist hier am geringsten einzustufen, da weder Energieverluste bei der Fassentnahme noch für hochleistungsstarke Homogenisierungsvorrichtungen (beispielsweise Hochschermischer) anfallen. Weiter wird in der Verfahrenskette statt einer aufwendigen Abfüllanlage lediglich ein in verschiedenen Logistikkonfigurationen ohnehin vorhandener Tankwagen mit seinem Entleerungszubehör benötigt. Versuche haben gezeigt, dass das Bitumen nicht heruntergekühlt werden muss, um in die Strabox abgefüllt werden zu können. Eine Befüllung mit Baustoff bei bis zu 200 °C ist laut Kartonhersteller möglich und wurde bei bis zu 185 °C getestet. Die Nachteile des Systems liegen zunächst in den geringen Erfahrungen, die damit bisher gemacht werden konnten. Die bekannten Kartonsysteme sind ohne Hilfskonstruktionen nur begrenzt stapelbar, weshalb verhältnismäßig viel, gegebenenfalls zum Witterungsschutz benötigte überdachte Lagerfläche erforderlich wird.

7.2.1.4 Fazit zum Vergleich von Bitumenverpackungssystemen

In den vorangehenden Abschnitten wurde dargelegt, welche technischen und ökonomischen Vorteile und Mängel verschiedene Gebindevarianten im Allgemeinen aufweisen. Dabei wurde auch verdeutlicht, wie die Probleme, die bei einzelnen Verpackungssystemen auftraten, zur Entwicklung neuerer Verpackungslösungen geführt haben.

Es lässt sich abschließend feststellen, dass aus Gründen der Wirtschaftlichkeit moderne Bitumengebinde die konventionelle Fass- und Tank-Logistik im Bitumenkalthandling in weiteren Logistiksegmenten ablösen werden. Die zunehmende Präsenz und Ausrichtung der Kunststoffverpackungshersteller auf dem Markt belegt die starke Eignung dieser Systeme für Baustellen in Ländern, die sich noch in ihrer infrastrukturellen Entwicklung befinden. Die hohe Robustheit der PP-Gewebe kommt der Einsatzmöglichkeit dieser Verpackungsform

unter solchen robusten Umgebungsbedingungen zugute. Der Schwerpunkt dieses Projekts liegt allerdings auf den Möglichkeiten der Einführung der Bitumenkalthandhabung auf dem deutschen Markt. Hierfür bieten sich aufgrund ihrer unkomplizierten Abfüllung und niedrigen Produktionskosten silikonierete Kartons an. Sie lassen sich mit beiden der im Folgenden diskutierten Verflüssigungsmethoden kombinieren.

7.2.2 Verflüssigungsvarianten

Die konventionelle Bitumenverflüssigung erfolgt in Fassschmelzern oder mittels Thermalölleitungen, die durch die Bitumenkaltliefertanks verlegt sind und oft als Flammrohre „missbraucht“ werden. Die Verflüssigung von modernen Abfülleinheiten im Schmelztopf wurde in Anbetracht der Neuartigkeit der Mikrowellenverflüssigung im Rahmen dieser Arbeit auch zu konventionellen Verflüssigungsvarianten gezählt. Je nachdem, ob herkömmliche Metallgebinde (Fässer) oder moderne Gebinde (Kunststoff, Karton) verflüssigt werden, unterscheiden sich die Preise für die Wiederaufschmelzanlage stark. Kostenvoranschläge zeigen, dass die Verflüssigungstechnologien der innovativen Gebinde wirtschaftlich ähnlich aufwändig sind wie die Fassschmelzer. Die Unterschiede zwischen Schmelztopfanlagen zur Verflüssigung des Baustoffs aus Kartongebinden und Kunststoffgebinden bestehen lediglich in den Details der Zugabe-Vorrichtung und der homogenisierenden Einheiten wie Rührwerke und Umwälzpumpen, die bei unlöslichen Inlinern benötigt werden. Diese sollen hier aufgrund ihrer geringen Auswirkung als ein vergleichsweise geringer Fixkostenanteil eines Massenprodukts unberücksichtigt bleiben. Die Investition für eine der genannten Schmelztopfanlagen beträgt ca. 60.000,- € bis 70.000,- €, je nach Brennerausstattung. Die Vorteile dieser Technologien liegen in dem Erfahrungsschatz, der zu diesen Anwendungen vorliegt. Sie benötigen nicht zwangsläufig elektrische Energie sondern der Wärmeträger kann mittels der Verbrennung verschiedenster Energieträger erfolgen. Die Technologie ist problemlos auf dem Anlagenmarkt verfügbar.

Alle bisher in diesem Abschnitt erläuterten konventionellen Verflüssigungsmethoden haben gemein, dass in der Praxis über den hohen benötigten Zeitaufwand geklagt wird. Keine noch so optimale Konfiguration dieser Technologien kann die niedrige Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs Bitumen umgehen. Dies gelingt nur durch eine Erwärmung mittels Mikrowelle. Die Versuche haben gezeigt, dass Bitumen gut in HF-Öfen erwärmbar ist. Darüber hinaus konnte in aufwendigen Versuchsaufbauten bewiesen werden, dass die Erwärmung homogen ist. Die Kosten für eine solche Anlage anzugeben ist problematisch, da noch keine derartige Anlage jemals für den Straßenbau gebaut wurde. Trotzdem war der Projektpartner vorab bereit, eine grobe Kostenspanne von 1,0 bis 1,5 Millionen Euro anzugeben. Die aus den Versuchserkenntnissen entwickelte Anlagenkonfiguration lässt allerdings eher darauf schließen, dass sich der Preis im unteren Bereich dieser Spanne befinden wird. Im Folgenden seien deshalb maximale Kosten von 1,25 Millionen Euro angenommen. Diese verhältnismäßig große Investitionssumme, unter den Annahmen von 10 Jahren Anlagenlebensdauer mit jeweils 10.000 t Jahresdurchsatz und 5 % Kapitalzins, ergibt Abschreibungen in Höhe von ca. 8 €/t, Kapitalverzinsung von ca. 4 €/t und

Reparaturkosten von ca. 8 €/t, also insgesamt ca. 20 €/t. Die resultierende Reinheit des Baustoffs (ohne in der Praxis bisher auftretende gekrackte Bestandteile) würde sich voraussichtlich günstig auf die Lebensdauer der erstellten Verkehrsstrecken auswirken.

7.3 Kombinationsempfehlungen

Dieser Abschnitt hat gezeigt, dass die Technologien rund um das Abfüllen, Lagern, Transportieren und Wiederverflüssigen des Baustoffs unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten betrachtet werden müssen. Viele der genannten Vorteile wie die Verhandlungsfreiheit und die Lebensdauer der Straßenbauwerke können im Rahmen einer oberflächlichen Betrachtung nicht erfasst werden. Trotzdem soll hier nur auf Grundlage der erfassbaren Zahlen eine Argumentationsgrundlage für Investitionsentscheidungen erarbeitet werden.

Wir sehen, dass beim Einsatz der neuen Technologien für kaltes Bitumen rund 105,- €/t (siehe oben) Einsparung erzielt werden kann. Dem gegenüber stehen hier zunächst die Kosten für die Wiederverflüssigung und die Verpackung in der Bitumenkalthandhabung. Die Versuche zum Mikrowellenwirkungsgrad und die Daten zu den Wirkungsgraden anderer Anlagentypen haben gezeigt, dass von Wirkungsgraden von bis zu 30 % bei der Verflüssigung ausgegangen werden kann. Das bedeutet bei Zugrundelegen der oben genannten Energieeinkaufspreise variable Verflüssigungskosten von zirka:

$$K_{\text{Verflüssigungenergie}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{t}} * 2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 140 \text{K} * 0,1355 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * \frac{100}{30} \approx \underline{\underline{35,50 \text{ €/t}}}$$

Zuzüglich Kartonverpackung (35,- €/t s.o.) und fixen Kosten für die Mikrowellenverflüssigungsanlage (20 €/t s.o.) ergibt dies ca. 90 €/t. Nachdem damit eine Empfehlung zum parallelen Bitumenkalthandling in der Logistikkette formuliert ist, das ca. 15,- €/t Ersparnis bringen kann, werden nun noch Begründungen für die Wahl der technischen Anwendungen aufgeführt.

Eine Mikrowellenanlage wird hier zur Lösung der vorgegebenen Problemstellung (mitteleuropäischer Markt, Verflüssigung für die Asphaltproduktion der Referenzunternehmens an lediglich einem Standort) empfohlen, da sich nur mit ihr die benötigten Bitumenmengen mittels einer einzigen Anlage schnell genug verflüssigen lassen. Diese Empfehlung muss für den Fall eingeschränkt werden, dass kleinere Verflüssigungsmengen an dezentralen Verflüssigungsstandorten produziert werden sollen. In einem solchen Fall genügen konventionelle Schmelztöpfe.

Die Empfehlung für Kartongebinde erfolgt aufgrund der Tatsache, dass sie sich anders als derzeitige Kunststoffgebilde restlos vom Baustoff trennen lassen und die Befüllung bei höchsten Temperaturen möglich ist. Ansonsten wäre noch das Abpacken in die hier entwickelte Folie möglich, die sich zumindest größtenteils im Baustoff verflüssigt. Diese letzte Verpackungsvariante wird in jedem Fall auch für den Kalttransport des Bindemittels zu Auslandsproduktionsstätten empfohlen.

8 Zusammenfassung und Empfehlung für die Logistik- und Anlagenplanung

Zu Anfang wurde dargelegt, welche große Bedeutung das Bindemittel Bitumen in der Bautechnik insbesondere im Straßenbau hat. Das Projekt hat gezeigt, dass Problemlösungen bei der Handhabung des Baustoffs nicht nur Bautechnikern überlassen sind. Zunächst sind grundlegende Kenntnisse der Thermodynamik nötig, um ein umfassendes Bild der entscheidenden werkstoffspezifischen und verfahrenstechnischen Einflussgrößen für die Wiederverflüssigung zu erhalten. So kann unter anderem die niedrige Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs und zugleich seine Instabilität im höchsten Temperaturbereich als Ursache für das in der Praxis oft langsame „Schmelzen“ ausgemacht werden. Dies hat zum einen zur Folge, dass Kenntnisse aus dem Bereich der Finiten-Element-Simulation nötig sind, um den operativen Einheiten des Referenzunternehmens ein handliches Software-Werkzeug an die Hand zu geben, mit dem sie diesen Prozess abschätzen und steuern können. Der entwickelte Strabasimulator ermöglicht es, die Verflüssigungsdauer in der konventionellen Verflüssigung mittels Konduktion zu planen. Wenn keine EDV-Unterstützung zur Hand ist, kann die mit Hilfe des Programms entwickelte Faustformel herangezogen werden. Zum anderen wird die Mikrowellenverflüssigung als Alternative ausgemacht, den Baustoff schnell zu erwärmen. An dieser Schnittstelle der Bitumenlogistik zur Hochfrequenztechnik zeigen umfangreiche Versuche die Machbarkeit dieser Verfahrensvariante und verdeutlichen grundlegende Varianten das Ankopplungssystem einer Mikrowellenverflüssigungsanlage zu dimensionieren. Mit den Datenreihen der aufwendigen Großversuche werden numerische Modelle in COMSOL validiert. Nun kann ein Anlagenplaner nach Belieben auf Grundlage der Versuchserkenntnisse Produktionssimulationen durchführen und Homogenität, Absorption und Prozessgeschwindigkeit einer geplanten Anlage auf einer verlässlichen Modellgrundlage maximieren. Es ist so ohne Aufwand und Risiko möglich, hinsichtlich eines hohen Wirkungsgrads auf die spätere Anlagenkonfiguration einzuwirken. Denn entscheidend sind stets monetäre Aspekte, die nicht vernachlässigt werden. So werden an anderer Stelle unwirtschaftliche Verfahren der Baustoffzerkleinerung in der Verfahrenskette verworfen, obwohl sie sich als technisch leicht realisierbar und innovativ darstellen.

Auch die Entwicklung neuer Verpackungssysteme zielt auf wirtschaftlichere Alternativen zur Fass- und Containerlagerung des Bindemittels ab. An dieser Schnittstelle der Bitumenlogistik zur Verpackungstechnik werden zwei wichtige Entwicklungen gemacht und vorgestellt. Eine Inlinerfolie für Kunststoffgebinde, die nicht nur als Trennmittel zum tragenden Polypropylensack wirkt, sondern auch im Gegensatz zu allen gängigen Konkurrenzsystemen in der Lage ist, sich im heißen Bindemittel größtenteils zu verflüssigen. Bei Bitumenabfülltemperatur ist sie beständig. Als weiteres Verpackungssystem, das allerdings bei jeder gängigen Heißbitumentemperatur problemlos befüllt werden kann, entsteht die Strabox. Mittels zahlreicher Füll- und Stapelversuche wird sie so dimensioniert, dass sie die Anforderungen ei-

8 Zusammenfassung und Empfehlung für die Logistik- und Anlagenplanung

ner modernen Baustofflogistik und Lagerung erfüllt. Neben der unkomplizierten Befüllung liegen ihre Vorteile in der leichten Wiederverwertbarkeit und darin, dass sie in wenigen Sekunden vom kalten Baustoff entfernt werden kann. Gerade diese silikonierete Kartonverpackung in Kombination mit der zeitsparenden Mikrowellentechnik stellt eine neue Nischentechnologie dar, deren wirtschaftliche Bedeutung es zukünftig weiter zu untersuchen gilt. Zwar wird in dieser Arbeit eine grobe Abschätzung monetärer Aspekte durchgeführt, doch bietet sich in diesem Bereich großes Potential für produktionswirtschaftlich orientierte Forschungsarbeit. Es gilt neben der sogenannten „Just-in-time-Lieferung“ und der zentralen Tanklagerung des heißflüssigen Baustoffs ein drittes Logistiksystem nicht nur zu generieren, sondern in das Gesamtsystem eines Unternehmens zu integrieren. Mit Hilfe dieser Untersuchung kann es nicht nur, wie hier dargestellt, technisch möglich, sondern auch unter ökonomischen Gesichtspunkten sinnvoll sein, in infrastrukturell hochentwickelten Ländern Bitumenkalthandling zu etablieren. Die bekannten Zahlen weisen darauf hin, dass sich hier mittelfristig für Unternehmen ausreichender Größe Möglichkeiten eröffnen, räumliche und zeitliche Preisunterschiede zu nutzen. Dabei würden in erster Linie Energie- und Materialkosten eingespart. Die hierdurch geschonten Ressourcen kämen nicht nur dem Unternehmen zu Gute, das sich in die neuen Bereiche der Logistik, Produktionstechnik und Forschung wagt, für die in dieser Arbeit die Grundlage geschaffen wurde.

9 Physikalische Größen

Größe	Beschreibung	Einheit
lateinische Buchstaben		
A	Oberfläche	m ²
a	Temperaturleitfähigkeit	m ² /s
B	Breite der Schmelzoberfläche	m
\vec{B}	magnetische Induktion	T
b	Wärmeeindringkoeffizient	(W \sqrt{s})/(m ² K)
c	spezifische Wärmekapazität auch Wärmespeicherfähigkeit	J/kgK
c_0	Vakuum Lichtgeschwindigkeit	m/s
\vec{D}	Verschiebungsdichte	(A s)/m ²
d	Schichtdicke in der Behälterwand	m
d	Erwärmungszahl	–
E	Erweichungspunkt	[°C]
E	Wärmemenge, Energie oder Arbeit	J=Ws oder kWh
\vec{E}	elektrische Feldstärke	V/m
\vec{F}	Kraft	N
f	Frequenz	Hz
H	Homogenitätskennzahl	H
\vec{H}	magnetische Feldstärke	A/m
h_E	Enthalpie	J/kg
K	Kosten	€
L	Länge der Schmelzoberfläche	m
l	Streckeninkrement im Magnetfeld	m
l	Länge eines kalten Bitumenquaders bzw. Bitumenkaltgebände	m
l_{\min}	kürzeste Seitenlänge einer kalten Bitumeneinheit	m oder cm
l_{\max}	längste Seitenlänge einer kalten Bitumeneinheit	m oder cm

9 Physikalische Größen

Größe	Beschreibung	Einheit
M	Modul M	–
m	Masse	kg
n	Nutzungsdauer	a
$O(\Delta x^2)$	Fehler durch Diskretisierung des Orts	K/m ²
$O(\Delta t)$	Fehler durch Diskretisierung der Zeit	K/s
p	Kapitalkostensatz	–
$Q(t)$	Bitumenqualität in RuK. oder Pen.	
\bar{Q}	Wärmestrom	W
q	Ladung	As
\bar{q}	Wärmestromdichte	W/m ²
Q	Penetrationsindex	mm
$\Delta Q(t)$	Qualitätsverlust in Penetration über die Zeit	mm
R	allgemeine Gaskonstante	–
RBF	Rentenbarwertfaktor	–
r	Radius	m
r	interner Zinsfluss	–
s	Ortskoordinate	cm
S	Fläche	m ²
S_{3D}	verschärfte Stabilitätsschranke für dreidimensionale numerische Simulation.	s
T	Volumen der Schmelze im Schmelzbehälter	m ³
T	Absoluttemperatur	K
ΔT	Temperaturdifferenz	K
t	Zeit	s, min, h oder d
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/m ² K
V	Volumen	m ³
$\nabla \vec{V}$	Rotor eines Vektors \vec{V}	–
v	Viskosität	m ² /s

9 Physikalische Größen

Größe	Beschreibung	Einheit
W	Wärmemenge	$J=Ws=Nm$
$W_{schmelz}$	Wärmeenergie, welche benötigt wird, das Festbitumen um ΔT zu erwärmen.	J
$W_{Maschinen}(t)$	Wärmeenergie zum Betrieb der Anlage	J
$W_{Dämmverlust}(t)$	Wärmeenergie, welche über die Oberflächen der Schmelze an die Umgebung abgegeben wird.	J
\dot{w}	Leistungsdichte	W/m^3
x	Ortskoordinate	m oder cm
y	Ortskoordinate	m oder cm
z	Ortskoordinate	
Kennzahlen/ Konstanten		
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
Nu	Nußelt-Zahl	–
Ph	Phasenübergangszahl	–
St	Stefan-Zahl	–
ϵ_o	Dielektrizitätskonstante	$(A s)/(V m)$
λ_0	Wellenlänge	cm
μ_O	Permeabilitätskonstante	$(A s)/(V m)$
μ_R	relative Permeabilität	[–]
griechische Buchstaben		
α	Wärmeübergangskoeffizienten	W/m^2K
α	Näherung nach Näherungsformel für freie Konvektion	$\sqrt{m/s}$
α	thermischer Ausdehnungskoeffizient	K^{-1}
β	Verhältnis der Wärmeeindringkoeffizienten von flüssiger und fester Phase	–
γ	Hilfsgröße hier: Argument des Fehlerintegrals hier, $\gamma = \frac{s}{2\sqrt{at}}$	–
γ	Dichteverhältnis	–
δ	Verlustwinkel	–

9 Physikalische Größen

Größe	Beschreibung	Einheit
δ	Hilfsgröße	–
ε	Hilfsgröße	–
ε	komplexe Permittivität	C/(V m)
ε_r	relative Permittivität	C/(V m)
ε''	Imaginärteil der Permittivität	C/(V m)
ε'	Realteil der Permittivität	C/(V m)
Θ	Verhältnis der Temperaturdifferenzen	–
ϑ	Temperatur	°C
ϑ_o	Temperatur Bitumenschmelze	°C
ϑ_E	Temperatur kalten Bitumen	°C
ϑ_s	Temperatur Phasengrenze	°C
ϑ_l	Temperatur feste Phase	°C
ϑ_{fl}	Temperatur flüssige Phase	°C
κ	Kompressibilitätskoeffizient	Pa
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
v	Luftgeschwindigkeit	m/s
\vec{v}	Geschwindigkeit eines Teilchens	m/s
ω	Kreisfrequenz	1/s
ρ	Rohdichte	kg/m ³
ρ	Eindringtiefe der Mikrowelle	m
φ	Wärmebrückenverluste	- oder %
Ω	Wirkungsgrad	-

10 Anhänge

Anhang 1:

Ein Bitumenquader der Quaderklasse 1 (4 cm*4 cm*16 cm) wird bei einer Lagertemperatur von 20 °C verflüssigt. Es wird unter Verwendung der Gleichungen nach Stefan und den Gleichungen nach Neumann die Zeit berechnet, die laut diesen Theorien benötigt wird, um den Baustoffkern (2 cm Tiefe) auf 70 °C zu erhitzen. Als mittlere Rohdichte des Baustoffs seien bei Stefan 1040 kg/m³ angenommen. Die Phasenüberganszahl Ph bestimmt sich für beide Berechnungen gleich mittels:

$$Ph = \frac{h_E}{c(\vartheta_{s/E} - \vartheta_{l/o})} = \frac{200.000 \text{ J/kg}}{2000 \text{ J/kgK}(50\text{K})} = 2,0$$

Hier zunächst eine Beispiellösung nach Stefan.

$$\begin{aligned} t &= \frac{h_E \cdot \rho \cdot s^2}{2\lambda(\vartheta_E - \vartheta_o)} \cdot \left(1 + \frac{1}{3}Ph^{-1} - \frac{2}{45}Ph^{-2} + \frac{16}{949}Ph^{-3} - \dots\right) \\ &= \frac{200 \text{ kJ/kg} \cdot 1040 \text{ kg/m}^3 \cdot (0,02 \text{ m})^2}{2 \cdot 0,16 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot (50\text{K})} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 2^{-1} + \frac{2}{45} \cdot 2^{-2} + \frac{16}{949} \cdot 2^{-3} - \dots\right) \\ &\approx 5200 \text{ s} \cdot (1 + 0,167 + 0,011 + 0,002) \\ &\approx 5200 \text{ s} \cdot 1,18 \\ &\approx 6135 \text{ s} \\ &\approx \underline{\underline{102 \text{ min}}} \end{aligned}$$

Mittels der durch Neumann entwickelten Formel wird versucht die Messergebnisse der oben genannten Versuchskonfiguration nachzurechnen. Die Rohdichte verändert sich von 1050 kg/m³ (bei 20 °C) auf 1035 kg/m³ (bei 70 °C), die spezifische Wärmekapazität ändert sich von 1800 J/kgK (bei 20 °C) auf 2200 J/kgK (bei 70 °C), die Wärmeleitfähigkeit bleibt annähernd konstant bei 0,16 W/mK.

$$\delta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1035}{1050} = 0,986$$

$$\Theta = \frac{\vartheta_n - \vartheta_s}{\vartheta_s - \vartheta_l} = \frac{160 - 70}{70 - 20} = \frac{90}{50} = 1,8$$

$$\beta = \frac{\sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2}}{\sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1}} = \frac{\sqrt{0,16 \cdot 2200 \cdot 1035}}{\sqrt{0,16 \cdot 1800 \cdot 1050}} \approx 1,098$$

10 Anhänge

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1} = \frac{\lambda_2 \cdot c_{p,1} \cdot \rho_1}{\lambda_1 \cdot c_{p,2} \cdot \rho_2} = \frac{1,8}{2} = 0,83$$

$$\varepsilon = Ph + 1/3 + \frac{2 \cdot \beta \cdot \Theta}{\pi \cdot \delta \cdot \sqrt{\alpha}} = 2 + 1/3 + \frac{2 \cdot 1,098 \cdot 1,8}{\pi \cdot 0,986 \cdot \sqrt{0,83}} \approx 3,73$$

$$\gamma \approx \frac{1}{2\varepsilon\sqrt{\pi}} \left(\sqrt{\beta^2 \cdot \Theta^2 + 2\pi\varepsilon} - \beta \cdot \Theta \right) = \frac{1}{2 \cdot 3,73 \cdot \sqrt{\pi}} \left(\sqrt{1,098^2 \cdot 1,8^2 + 2\pi \cdot 3,73} - 1,098 \cdot 1,8 \right) = 0,27$$

$$t = \left(\frac{s_2 \rho_2}{\gamma \cdot \rho_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{4a_1} \approx \left(\frac{0,02 \cdot 1035}{0,27 \cdot 1050} \right)^2 \cdot \frac{1800 \cdot 1035}{4 \cdot 0,16} \approx 0,005328 \cdot 2953125,0 \approx \underline{\underline{15735,86 [s]}}$$

$$\approx \underline{\underline{262 [min]}}$$

Wie bereits erwähnt zeigt es sich, dass weder eine Übereinstimmung der Werte untereinander, noch mit den Messergebnissen aus den Versuchen vorhanden ist.

Anhang 2: Geometrischer Beweis des Fehlers < 5 % bei Vereinfachung des Realteils der komplexen Permittivität

Es sei angenommen der Verlustwert eines Materials sei kleiner gleich 0,32.

$$\tan \delta \leq 0,32$$

Damit ergibt sich ein Verlustwinkel von.

$$\delta \leq 17,7^\circ$$

Damit gilt im Zeigerdiagramm

$$\varepsilon_r \leq \varepsilon_r' \cdot \frac{1}{\cos 17,7^\circ} \approx 1,049 \varepsilon_r'$$

Der Fehler $\frac{\varepsilon_r'}{\varepsilon_r}$ ist damit < 5 %

Anhang 3: Beispielrechnung der Verflüssigungsdauer von kaltem Bitumen, direkt berechnet nach Neumann und nach Stefan

Ein Kubikmeter kaltes Bitumen wird aus einer Lagertemperatur von 20 °C verflüssigt. Es wird die Zeit berechnet, die benötigt wird, um den Baustoffkern auf 70 °C zu erhitzen. Als mittlere Rohdichte des Baustoffs seien 1040 kg/m³ angenommen.

1) Lösung nach Neumann

$$\gamma = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{m}{V_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta V}{V_1}} = \frac{1}{1 - \frac{l \cdot b \cdot h \cdot (\alpha_T \cdot 140^\circ C)^3}{l \cdot b \cdot h}} = \frac{1}{1 - (6,1 \cdot 10^{-4} \cdot 140^\circ C)^3} \approx 1,00062 \approx 1$$

$$\Theta = \frac{\vartheta_{II} - \vartheta_s}{\vartheta_s - \vartheta_I} = \frac{160 - 70}{70 - 20} = \frac{90}{50} = 1,8$$

$$\beta = \frac{\sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2}}{\sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1}} = \frac{\sqrt{0,16 \cdot 2}}{\sqrt{0,16 \cdot 1,8}} \cdot \sqrt{1,00062} = \sqrt{\frac{0,32 \cdot 1,00062}{0,288}} = \sqrt{1,1118} \approx 1,054$$

$$Ph = \frac{h_E}{c(\vartheta_s - \vartheta_I)} = \frac{200.000 J / kg}{1814,5 J / kgK(50K)} = 2,2$$

10 Anhänge

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1} = \frac{\lambda_2 \cdot c_{p,1} \cdot \rho_1}{\lambda_1 \cdot c_{p,2} \cdot \rho_2} = \frac{1,8}{2} = 0,9$$

$$\varepsilon = Ph + 1/3 + \frac{2 \cdot \beta \cdot \Theta}{\pi \cdot \gamma \cdot \sqrt{\alpha}} = 2,2 + 1/3 + \frac{2 \cdot 1,054 \cdot 1,8}{\pi \cdot 1,0 \cdot \sqrt{0,9}} = 2,2 + \frac{3,7944}{2,98} \approx 3,473$$

$$\delta \approx \frac{1}{2\varepsilon\sqrt{\pi}} \left(\sqrt{\beta^2 \cdot \Theta^2 + 2\pi\varepsilon - \beta \cdot \Theta} \right) = \frac{1}{2 \cdot 3,473 \cdot \sqrt{\pi}} \left(\sqrt{1,054^2 \cdot 1,8^2 + 2\pi \cdot 3,473 - 1,054 \cdot 1,8} \right)$$

$$= 0,081 \cdot \left(\sqrt{3,599 + 21,822 - 1,8972} \right) = 0,255$$

$$t^* = \left(\frac{s_2 \rho_2}{\delta \cdot \rho_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{4a_1} = \left(\frac{0,5m}{0,255} \right)^2 \cdot \frac{1,9 \text{Ws/kg} \cdot 1040 \text{kg/m}^3}{4 \cdot 0,16 \frac{W}{m \cdot K}} = 3,855 \cdot 3087,5 \approx 11870,4s = 3,3h$$

2) Lösung nach Stefan:

$$t = \frac{h_E \cdot \rho \cdot s^2}{2\lambda - (g_E - g_o)} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} Ph^{-1} - \frac{2}{45} Ph^{-2} + \frac{16}{949} Ph^{-3} - \dots \right)$$

$$= \frac{200 \text{kJ/kg} \cdot 1040 \text{kg/m}^3 \cdot (0,5m)^2}{2 \cdot 0,16 \frac{W}{m \cdot K} \cdot (70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} 2,2^{-1} - \frac{2}{45} 2,2^{-2} + \frac{16}{949} 2,2^{-3} \dots \right)$$

$$\approx 3250000s \cdot (1 + 0,152 - 0,009 + 0,002)$$

$$\approx 3250000s \cdot 1,145$$

$$\approx 3721250s \approx \underline{\underline{43,1d}}$$

Anhang 4:

Es folgt die Herleitung der Differenzgleichung für numerische Konduktionssimulationen im

Raum mit drei Richtungsvariablen, ohne interne Wärmegewinne $\frac{\dot{W}(x, y, z, t, \vartheta)}{c \cdot \rho}$ und unter

der Annahme, dass die Diskretisierungsfehler $O(\Delta x^2)$; $O(\Delta y^2)$; $O(\Delta z^2)$ und vor allem auch der hierbei kritische Diskretisierungsfehler $O(\Delta t)$ mit voranschreitender Simulation gegen Null streben.

10 Anhänge

$$(I) \quad \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \right)_{i,j,k}^k = \frac{1}{\Delta x^2} (\vartheta_{i-1,j,k}^k - 2\vartheta_{i,j,k}^k + \vartheta_{i+1,j,k}^k) + O(\Delta x^2)$$

$$(II) \quad \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right)_{i,j,k}^k = \frac{1}{\Delta y^2} (\vartheta_{i,j-1,k}^k - 2\vartheta_{i,j,k}^k + \vartheta_{i,j+1,k}^k) + O(\Delta y^2)$$

$$(III) \quad \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right)_{i,j,k}^k = \frac{1}{\Delta z^2} (\vartheta_{i,j,k-1}^k - 2\vartheta_{i,j,k}^k + \vartheta_{i,j,k+1}^k) + O(\Delta z^2)$$

$$(IV) \quad \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \right)_{i,j,k}^k = \frac{\vartheta_i^{k+1} - \vartheta_i^k}{\Delta t}$$

Setzt man diese Differenzenquotienten in die Formel 2.8 ein, so erhält man

$$\frac{1}{\Delta t} (\vartheta_i^{k+1} - \vartheta_i^k) = a \left[\begin{array}{l} \frac{1}{\Delta x^2} (\vartheta_{i-1,j,k}^k - 2\vartheta_{i,j,k}^k + \vartheta_{i+1,j,k}^k) + \\ \frac{1}{\Delta y^2} (\vartheta_{i,j-1,k}^k - 2\vartheta_{i,j,k}^k + \vartheta_{i,j+1,k}^k) + \\ \frac{1}{\Delta z^2} (\vartheta_{i,j,k-1}^k - 2\vartheta_{i,j,k}^k + \vartheta_{i,j,k+1}^k) \end{array} \right]$$

$$\vartheta_{i,j,k}^{k+1} = \vartheta_{i,j,k}^k + \left(\begin{array}{l} M_x \cdot (\vartheta_{i-1,j,k}^k - 2\vartheta_{i,j,k}^k + \vartheta_{i+1,j,k}^k) \\ + M_y \cdot (\vartheta_{i,j-1,k}^k - 2\vartheta_{i,j,k}^k + \vartheta_{i,j+1,k}^k) \\ + M_z \cdot (\vartheta_{i,j,k-1}^k - 2\vartheta_{i,j,k}^k + \vartheta_{i,j,k+1}^k) \end{array} \right)$$

und für $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ gilt:

$$\vartheta_{i,j,k}^{k+1} = \vartheta_{i,j,k}^k + M\vartheta_{i-1,j,k}^k - 6M\vartheta_{i,j,k}^k + M\vartheta_{i+1,j,k}^k + M\vartheta_{i,j-1,k}^k + M\vartheta_{i,j+1,k}^k + M\vartheta_{i,j,k-1}^k + M\vartheta_{i,j,k+1}^k$$

$$\vartheta_{i,j,k}^{k+1} = (1-6)M\vartheta_{i,j,k}^k + M(\vartheta_{i-1,j,k}^k + \vartheta_{i+1,j,k}^k + \vartheta_{i,j-1,k}^k + \vartheta_{i,j+1,k}^k + \vartheta_{i,j,k-1}^k + \vartheta_{i,j,k+1}^k)$$

11 Literaturverzeichnis

- [AmDaBeJa05] Ammand, M.; Damm, K.-W.; Beer, F.M.; Jakubik D. (2005): Einfluss von Kurzzeit- sowie Langzeitalterung im Labor auf die Struktur von Polymeren und Praxisrelevanten Eigenschaften modifizierter Bindemittel. In: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bonn: Typo-Druck- & Verlagsgesellschaft mbH, Heft 910, S. 17-88
- [ArRe96] Arand, W; Renken, P (2006): Einfluß des Verfahrens zur Wiedererwärmung von Asphalten im Laboratorium auf die Eigenschaften des Bindemittels, AiF Forschungsbericht Nr. 9974. Bonn: Deutsches Asphaltinstitut
- [AsMaFrSi91] Asmussen, J.; Manring, B.; Fritz, R.; Siegel, M. (1991): Experimental Examination of Material Loaded Cylindrical Applicators and Comparison with Theoretical Models. In: Ceramic Transactions (Microwaves I). Vol. 21.
- [BaKrSch07] Bannwarth, H; Kremer, B. P.; Schulz, A. (2007): Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie. Berlin: Springer
- [BaSt06] Baehr, H., D.; Stephan, K. (2006): Wärme und Stoffübertragung, 5. Auflage. Heidelberg: Springer.
- [Bi11] Bitubale: Firmenwebseite; <http://www.bitubale.com/>
- [BöWe11] Von Böckh, P; Wenzel, T. (2011): Wärmeübertragung, Grundlagen und Praxis. Berlin und Heidelberg: Springer
- [Bu04] Buryan, M. (2004): Entwicklung von Auslegungsprinzipien für mikrowellen- und gasbeheizte Hybrid- Sinteröfen, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Dissertation.
- [Co09] Comsol Multiphysics (2008): Modeling Guide, Version 3.5a.
- [Co73] Collin, R. E. (1973): Grundlagen der Mikrowellentechnik. Bearbeitet und Übersetzt durch Kummer, M. Originalausgabe: Foundations for microwave engineering. McGraw-Hill Book Company, New York, St Louis, San Francisco, Toronto, London, Sydney, 1966. VEB, Berlin, 1973

11 Literaturverzeichnis

- [Do62] Douglas, J. (1962): Alternating direction methods for three space variables. Numer. Math. 4, S. 41-63.
- [DoRa56] Douglas, J; Rachford, H. H. (1956): On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables. Trans. Amer. Math. Soc. 82, S. 421-439.
- [Eb90] Eberling, C. W. (1990): Integrated Packing Systems for Transportation and Distribution. Logistics Support Systems. Harold A. Hughes, Packing and Converting Technology. New York and Basel: Marcel Decker, Inc.
- [EnIn05] The Energy Institute (2005): Bitumen safety code, Model code of Safe practice, Part 11, 4th Edition, London: The Energy Institute.
- [Eu11] Eurobitume (2011): The Bitumen Industry - A Global Perspective. The European Bitumen Association, Belgium.
- [FrSt06] Frick, A.; Stern, C. (2006): DSC-Prüfung und Anwendung, München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- [GrSa90] Grigull, Ulrich; Sander, Heinrich (1990): Wärmeleitung, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [GrMü09] Groth, C.; Müller, G.: FEM für Praktiker, Band 3: Temperaturfelder, Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen der Temperaturfeldberechnung-Lösungen mit dem FE-Programm ANSYS. 5te neu bearbeitete Auflage. Expert, 2009
- [GwKaSc93] Geißler, Rainer; Werner, Kammerloher; Schneider, Hans Werner (1993): Berechnungs- und Entwurfsverfahren der Hochfrequenztechnik, 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg.
- [He09] Heuermann, Holger (2009): Hochfrequenztechnik, Komponenten für High-Speed- und Hochfrequenzschaltungen, 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg, Teubner.
- [Hi06] Hillemeier, Bernd (2006): Baustoffkunde Script. Fachgebiet Baustoffkunde und Baustoffprüfung, Institut für Bauingenieurwesen, Fakultät VI Planen Bauen Umwelt, Technische Universität Berlin, Berlin.
- [Li08] Lipski, V. (2008): Technology and Installation for Bitumen Packing. Polotsk State University. Novopolotsk.

11 Literaturverzeichnis

- [Me98] Meredith, R. (1998): Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating Cavities. The Institution of Electrical Engineers, Exter: Short Run Press Ltd.
- [Öj06] Öjmertz, C. (2006): A Guide to Waterjet Cutting, Water Jet Sweden AB, Mölnlycke: Elander Infologistics Väst AB.
- [Pi01] Pichert, H. (2001): Haushalttechnik: Verfahren und Geräte, 2. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- [Re94] Renken, P (1994): Erwärmung von Asphalt mittels Mikrowellen. Bitumen 3/94, S 108-111
- [ReWh03] Read, J.; Whiteoak, D. (2003): The Shell Bitumen Handbook, 5. Auflage. London: Thomas Telford Publishing.
- [ScSc94] Schmidt, H.; Schmidtke, M. (1994): Veränderung des Bitumens durch Oxidation und Erhitzung. In: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Typo-Druck- & Verlagsgesellschaft mbH, Bonn, Heft 685 Neuauflage 2002.
- [Sm96] Smith, G.D. (1996): Numerical solution of partial differential equations. Finite difference methods, 3. Auflage. Oxford: Clarendon Press.
- [St1891] Stefan, J. (1891): Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeer. Wiedemann Annalen der Physik und Chemie. 42, S. 269-286.
- [SuWiKaKo91] Sun, M. H.; Wickersheim, K.A.; Kamal, A.; Kolbeck, W.R. (1991): Fiberoptic Sensor for Minimally-Perturbing Measurement of Electric Fields in High Power Microwave Environments. In: Material Research Society Symposium Proceedings. Vol. 189.
- [Wa42] Walther, H. (1942): Dielektrische Messungen an Bitumen und verwandten Stoffen. I. In: Colloid and Polymer Science. Official Journal of the Kolloid-Gesellschaft. Kolloid-Zeitschrift & Zeitschrift für Polymere, Band 99, Heft 1, S. 98-107.
- [Wi00] Widmann, J. (2000): DCS-Kurven interpretieren. Teil 2: Isotherme Messungen. In: UserCom 2/2000, 12, S. 1-4
- [Zw03] Zwaahr, Anette; Pauli, Stefan und Redaktion (2003): Meyers großes Taschenlexikon, Band 24. Mannheim: Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus