

Im Auftrag des
Bundesministeriums für Wirtschaft

AiF-Forschungsbericht Nr. 9974

**Einfluß des Verfahrens
zur Wiedererwärmung von Asphalten im Laboratorium
auf die Eigenschaften des Bindemittels**

bearbeitet von

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Arand
Dr.-Ing. Peter Renken

Forschungsnehmer:

Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. W. Arand
Institut für Straßenwesen
Technische Universität Braunschweig

Mai 1996



Deutsches Asphaltinstitut e. V.
Schieffelingsweg 6
D-53123 Bonn
Tel.: (02 28) 9 79 65-0
Fax: (02 28) 9 79 65-11

Einfluß des Verfahrens zur Wiedererwärmung von Asphalten im Laboratorium auf die Eigenschaften des Bindemittels

	Seite	
0.	Abstrakt	1
1.	Aufgabenstellung	2
1.1	Begründung des Forschungsvorhabens	2
1.2	Ziel des Forschungsvorhabens	6
1.3	Allgemeine Angaben	7
2.	Untersuchungsmethodik	8
2.1	Asphaltmischgut	8
2.1.1	Auswahl der Baustoffe	8
2.1.2	Eignungsprüfungen und Festlegung der Zusammensetzung der Mischgutvarianten	10
2.1.3	Herstellen des Asphaltmischguts und Bereitstellen der Meßproben	12
2.2	Verfahren der Wiedererwärmung	15
2.2.1	Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank	15
2.2.1.1	Beschreibung der Art der Wiedererwärmung	15
2.2.1.2	Temperaturregelung und Temperaturmessung	16
2.2.1.3	Variationen der Wiedererwärmung	17
2.2.2	Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik	18
2.2.2.1	Beschreibung der Art der Wiedererwärmung	18
2.2.2.2	Temperaturregelung und Temperaturmessung	21
2.2.2.3	Variationen der Wiedererwärmung	23
2.3	Prüfverfahren	24
2.3.1	Wiedergewinnung des Bindemittels	24
2.3.2	Bestimmung der Korngrößenverteilung	
2.3.3	Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel, der Penetration und der elastischen Rückstellung	24
2.4	Mathematisch-statistische Verfahren zur Auswertung der Untersuchungsergebnisse	25
2.4.1	Ausreißerprüfung	25
2.4.2	Einfache Varianzanalyse und modifizierter LSD-Test	27
2.4.3	Varianzanalysen der mehrfachen Klassifikation	30
2.4.3.1	Varianzanalysen der vierfachen Klassifikation	31
2.4.3.2	Varianzanalysen der fünffachen Klassifikation	37

3.	Untersuchungsergebnisse	38
3.1	Beschreibung der Darstellungsweise	38
3.2	Ergebnisse der Untersuchungen zur Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank	39
3.2.1	Bindemittelgehalt	39
3.2.2	Korngrößenverteilung	41
3.2.3	Erweichungspunkt Ring und Kugel	45
3.2.4	Penetration	61
3.2.5	Elastische Rückstellung	75
3.2.6	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	77
3.3	Ergebnisse der Untersuchungen zur Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik	78
3.3.1	Bindemittelgehalt	78
3.3.2	Korngrößenverteilung	80
3.3.3	Erweichungspunkt Ring und Kugel	83
3.3.4	Penetration	92
3.3.5	Elastische Rückstellung	100
3.3.6	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	101
3.4	Vergleich der Untersuchungsergebnisse nach Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und mittels Hochfrequenztechnik	101
4.	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	105
4.1	Direkt mögliche Schlußfolgerungen für die Praxis	105
4.2	Offen gebliebene Probleme und Anregungen für weitere Forschungsarbeiten	107
5.	Literatur	109

Anlage I:	Eignungsprüfungen
Anlage II.1:	Ergebnisblätter der Mischgutanalysen nach Wiedererwärmung des Asphalts im konventionellen Wärmeschrank
Anlage II.2:	Ergebnisblätter der Mischgutanalysen nach Wiedererwärmung des Asphalts mittels Hochfrequenztechnik
Anlage III.1:	Protokolle der statistischen Analysen der Untersuchungsergebnisse nach Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank
Anlage III.2:	Protokolle der statistischen Analysen der Untersuchungsergebnisse nach Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik

0. Abstrakt

Asphaltmischgut für Verkehrsflächenbefestigungen von Straßen und Flugplätzen wird üblicherweise heiß eingebaut. Dabei werden Mischgutproben zur Untersuchung des Asphalts auf vertragskonforme Beschaffenheit gezogen. Beim Transport dieser Mischgutproben in das Laboratorium kühlen sie ab; zum Zwecke der Probeteilung, der Probenvorbereitung und der Probekörperherstellung müssen sie wiedererwärmt werden. Dieses geschieht üblicherweise im Wärmeschrank.

Beobachtungen der Praxis haben gezeigt, daß das im Asphalt enthaltene Bitumen bei der Wiedererwärmung im Wärmeschrank mit zunehmender Wiedererwärmungstemperatur und zunehmender Expositionsdauer stärker thermisch geschädigt werden kann und verhärtet. Aus diesem Grunde wurde untersucht, ob Asphaltmischgut mittels Hochfrequenztechnik wiedererwärmt werden kann, ohne daß die Viskosität des Bitumens nachteilig verändert wird. Gegenstand der Untersuchungen waren je ein Asphaltbeton, ein Asphaltbinder und ein Splittmastixasphalt mit je zwei unterschiedlichen Mineralstoffarten, Bitumensorten und Bindemittelgehalten. Diese unterschiedlich zusammengesetzten Asphalte wurden alternativ im konventionellen Wärmeschrank beziehungsweise mittels Hochfrequenztechnik wiedererwärmt. Dabei wurden die Wiedererwärmungstemperaturen sowie die Expositionsdauern im Wärmeschrank beziehungsweise die Prüfgutmengen im Mikrowellenofen systematisch variiert. Die Untersuchungsergebnisse wurden unter Anwendung multivariater Verfahren der mathematischen Statistik ausgewertet.

Danach läßt sich sagen, daß die Viskosität des Bindemittels bei Wiedererwärmung des Asphalts im konventionellen Wärmeschrank mit zunehmender Wiedererwärmungstemperatur und zunehmender Expositionsdauer in nicht hinnehmbarem Ausmaß ansteigt, während sie bei kontrollierter Wiedererwärmung im Mikrowellenofen praktisch nicht beeinflußt wird. Beim Einsatz von Mikrowellenöfen zur Wiedererwärmung von Asphalt können vielmehr Verhärtungen des Bitumens zuverlässig vermieden werden, womit die Voraussetzungen für verhaltensorientierte Prüfungen zur Feststellung der mechanischen Eigenschaften von Asphalt bei Wärme, bei Kälte und unter wiederholten Beanspruchungen zum Zwecke des Qualitätsmanagements und zur Vermeidung von Regreßforderungen des Auftraggebers wegen mangelbehafteter Leistungen des Auftragnehmers geschaffen worden sind.

1. Aufgabenstellung

1.1 Begründung des Forschungsvorhabens

Asphaltmischgut für Verkehrsflächenbefestigungen von Straßen und Flugplätzen wird üblicherweise im Heißeinbau eingebaut und verdichtet. Je nach Mischgutart und verwendeter Bitumensorte werden dabei im Anlieferungszustand Temperaturen bis zu 200 °C, bei Gußasphalt sogar bis zu 250 °C erreicht. Für die Qualitätskontrolle werden im heißen Zustand Durchschnittsproben gezogen, in Blecheimer abgefüllt und in das die Eigenüberwachungsprüfungen beziehungsweise die Kontrollprüfungen durchführende Laboratorium transportiert. Während dieser Zeitspanne kühlt das Mischgut auf Umgebungstemperatur ab, wird fest und ist praktisch nicht mehr verarbeitbar.

Um ordnungsgemäße Eigenüberwachungs- beziehungsweise Kontrollprüfungen durchführen zu können, müssen die Mischgutproben aus Asphalt zur Probeteilung, zur Probenvorbereitung für die einzelnen Analysengänge und zur Probekörperherstellung im Laboratorium wiedererwärmt werden. Hierfür werden üblicherweise Wärmeschränke eingesetzt.

Nicht selten werden an Bindemittelproben aus in Wärmeschränken wiedererwärmten Asphaltten konventionelle Viskositätsmerkmale festgestellt, die auf eine Verhärtung des Bindemittels während der Wiedererwärmung hindeuten. Erfahrungen der Praxis haben gezeigt, daß je nach Mischgutart, Mineralstoffart, Hohlraumgehalt, Bindemittelsorte, Temperierdauer, Temperaturhöhe und Möglichkeit des Sauerstoffzutritts der durch diese Verhärtung des Bindemittels bedingte Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel bis zu 10 K und mehr betragen kann. Dieses ist im Interesse einer ordnungsgemäßen Qualitätskontrolle nicht hinnehmbar.

Als Alternative zur Wiedererwärmung von Asphaltmischgut im Wärmeschrank bietet sich eine Wiedererwärmung unter Verwendung eines Hochfrequenzverfahrens an. Von diesem Verfahren darf angenommen werden, daß es schon wegen der wesentlich kürzeren Expositionsdauern der Proben und der völlig anderen Expositionsart

erheblich schonender ist als die Wiedererwärmung der Asphaltproben durch heiße Luft im konventionellen Wärmeschrank.

Wenn nachgewiesen werden kann, daß die Wiedererwärmung von Asphalt im Mikrowellenofen keine oder keine nennenswerte Verhärtung des Bindemittels bewirkt, so könnte Asphaltmischgut im Laboratorium mehrfach schonend wiedererwärmt werden, ohne daß sich seine mechanischen Eigenschaften verändern. Das ist besonders deswegen aktuell und von großer Bedeutung, weil europaweit erhebliche Anstrengungen unternommen werden, im Rahmen von Kontrollprüfungen statt der Zusammensetzung des Asphalts und der Viskositätsmerkmale des wiedergewonnenen Bindemittels verstärkt mechanische Eigenschaften des fertigen Produkts zu prüfen und aus den Prüfergebnissen Schlußfolgerungen über dessen Gebrauchstauglichkeit abzuleiten.

In der Vergangenheit mußte sich die Straßenbaupraxis immer wieder mit der Alterung von Bindemitteln in Asphalten auseinandersetzen, weil dieses Phänomen eine der Hauptursachen der Rißbildung in Straßenbefestigungen aus Asphalt ist. Wegen der immensen wirtschaftlichen Bedeutung haben sich Fachleute mit dem Problem der Bindemittelalterung sowohl experimentell als auch theoretisch auseinandergesetzt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden regelmäßig auf internationalen Tagungen wie Eurasphalt- und Eurobitume-Kongressen sowie RILEM-Symposien diskutiert. Diese Diskussionen haben gezeigt, daß grundsätzlich zwischen der Alterung während der Asphaltherstellung, der Lagerung und des Transportes - hier spricht man zur besseren Unterscheidung von Kurzzeitalterung - und der Alterung während der Nutzungsdauer einer Straßenbefestigung - der Langzeitalterung - unterschieden werden muß.

Die Mechanismen der Nachhärtung während des Mischprozesses und der Silierung sind grundsätzlich bekannt und gelten prinzipiell auch für die Verhärtung des Bindemittels während der Lagerung im Laboratorium und der Wiedererwärmung zum Zwecke der Probeteilung, der Probenvorbereitung und der Probekörperherstellung. Bei der Bitumenverhärtung ist grundsätzlich zwischen physikalischen und chemischen Vorgängen zu unterscheiden [5]. Während die physikalische Verhärtung mit

dem Verdunsten leichter Kohlenwasserstoffe aus der Maltenphase im wesentlichen auf thermisch-destillative Vorgänge zurückzuführen ist (destillative Alterung), beruht die chemische Verhärtung im wesentlichen auf Reaktionen des Bindemittels mit dem Luftsauerstoff (oxidative Alterung) [7]. Bei der heißen Aufbereitung des Asphaltmischgutes im Laboratorium hängen der Umfang beziehungsweise die Geschwindigkeit der Prozesse beziehungsweise Reaktionen unter anderem von der angebotenen Bitumenoberfläche, der Mörtelfilmdicke, der Verweilzeit beziehungsweise der Expositionsdauer im Wärmeofen und der Temperatur ab.

Richter [9] führte umfangreiche Versuche durch und wies zunächst nach, daß das Bitumen aus hohlraumreichen Gemischen - wie beispielsweise Asphaltbindermischgut - erheblich stärker nachhärtet als Bitumen aus dichteren Gemischen, wie Asphaltbeton; aus anderen Untersuchungen [6] weiß man, daß das Bitumen des praktisch hohlraumreichen Gußasphalts gar nicht zur Nachhärtung neigt. Die Begründung dafür ist darin zu suchen, daß in sperrigen Asphaltgemischen mit größerem Hohlraumgehalt während der Erhitzung eine Kaminwirkung vorhanden sein kann, welche den Luftzutritt und damit oxidative Reaktionen des Bindemittels mit Sauerstoff begünstigt, bei dichteren Gemischen aber der Zutritt von Luftsauerstoff durch den geringen Hohlraumgehalt deutlich vermindert wird.

An im Laboratorium bei 150 °C im verschlossenen Mischguteimer gelagerten Asphaltproben wurden Anstiege des Erweichungspunktes Ring und Kugel des wiedergewonnenen Bindemittels bis zu 10 K beobachtet. Derartig große Anstiege des Erweichungspunktes Ring und Kugel werden bei der Mischgutherstellung selber und der Silierung im großtechnischen Maßstab üblicherweise nicht festgestellt. Daraus wird die Forderung abgeleitet, Asphaltproben im Laboratorium äußerst sorgfältig und schonend zu behandeln und bei der Bestimmung der Eigenschaften von Bitumen aus Mischgut- oder Ausbauproben auf eine längere Wiedererwärmung bei gleichzeitiger Sauerstoffeinwirkung möglichst vollständig zu verzichten.

Grundsätzlich werden diese Forderungen durch die Ergebnisse von Untersuchungen bestätigt, die am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt worden sind [10]. Um die mechanischen Eigenschaften von im

Laboratorium hergestellten Probepplatten mit denen von im Feld entnommenen Ausbauproben zu vergleichen, mußte das Mischgut wiedererwärmt werden. Obwohl die Probleme um die Bindemittelverhärtung während der Wiedererwärmung bekannt waren und trotz sorgfältigster Mischgutvorbereitung ist es nicht gelungen, im Laboratorium Probepplatten mit gleichen Viskositätseigenschaften des Bitumens (wie in der Praxis) herzustellen. Auch hier wurden Erweichungspunkt-Anstiege gegenüber dem Bitumen aus Ausbauproben bis zu 10 K gefunden, was natürlich die Interpretation der Versuchsergebnisse zur Überprüfung der mechanischen Eigenschaften erheblich erschwerte.

Ein Ausweg aus diesem Dilemma scheint möglich, wenn für die Wiedererwärmung des Asphaltmischguts im Laboratorium ein Hochfrequenzverfahren angewendet wird. In der Gastronomie werden solche Mikrowellenöfen erfolgreich für die kurzfristige Wiedererwärmung von Speisen verwendet. In einigen Straßenlaboratorien findet man hin und wieder auch Mikrowellenöfen für die Trocknung von Bodenproben und für die gelegentliche Wiedererwärmung von Gußasphaltplatten.

Erste Ergebnisse systematischer Untersuchungen an Baustoffproben nach Erwärmung im Mikrowellenofen wurden in Deutschland von Müller-Rochholz veröffentlicht [8]. Danach erfolgt die Erwärmung von Asphalt durch Hochfrequenzwellen derart, daß der Mineralstoff zu Schwingungen angeregt und somit durch intermolekulare Reibung erwärmt wird und das umhüllende Bitumen nur mittelbar durch das Gestein dieser Erwärmung folgt und nicht umgekehrt, wie bei der Temperierung im konventionellen Wärmeschrank. Hinzu kommt, daß die Hochfrequenz-Erwärmung einer Asphaltprobe in Abhängigkeit von Mineralstoffart, Zusammensetzung, Wassergehalt, Mischgutmenge und Leistung der Hochfrequenzquelle im Sekunden- beziehungsweise Minutenbereich vollzogen wird. Aus den genannten Gründen ist davon auszugehen, daß die Erwärmung im Hochfrequenzverfahren eine technisch ideale, schnelle und schonende Prozedur darstellt, deren technische Möglichkeiten erschöpfend erforscht und bei erwiesener Eignung im Sinne der Qualitätssicherung konsequent angewendet werden sollten.

Dieses ist allerdings nur dann möglich, wenn zuverlässig nachgewiesen werden kann, daß die Erwärmung von Asphaltmischgut im Mikrowellenofen nicht zu Veränderungen der Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemischs führt, was von manchen Fachleuten vermutet wird und zu unerwünschten Änderungen der Asphalteigenschaften führen könnte.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Das Ziel des geplanten Forschungsvorhabens ist es, vergleichende Untersuchungen über die Veränderung von Bitumen und möglicherweise auch der Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemischs bei der Wiedererwärmung von Asphaltmischgutproben im Wärmeschrank und im Hochfrequenzverfahren durchzuführen, um aus den Ergebnissen ableiten zu können, ob und gegebenenfalls unter welchen Bedingungen die Wiedererwärmung von Asphalt im Hochfrequenzverfahren für die normale Laborpraxis empfohlen werden kann. Entscheidungskriterium ist eine möglichst geringe Nachhärtung des Bindemittels während der Wiedererwärmung und der Wärmelagerung, verbunden mit einer möglichst geringen Veränderung der Asphalteigenschaften gegenüber den Eigenschaften der angelieferten Probe.

Zur Lösung der Frage, ob die Wiedererwärmung im Hochfrequenzverfahren vorteilhafter als die konventionelle Erwärmung im Wärmeschrank ist, werden vergleichende Untersuchungen bei systematischer Variation

- der Mischgutart,
- der Bitumensorte,
- der Mineralstoffart

sowie

- der Temperatur,
- der Expositionsdauer und
- der Probenmenge

durchgeführt.

Als Indikatoren für die Vorteilhaftigkeit eines der beiden Erwärmungsverfahren sollen insbesondere die Größen Erweichungspunkt Ring und Kugel, Penetration und gegebenenfalls elastische Rückstellung (bei der Verwendung von polymermodifizierten Bitumenvarianten) als Viskositätsmerkmale des Bitumens sowie die Größen Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung als kompositionelle Merkmalsgrößen des Asphaltes gelten.

Das umfangreiche Datenmaterial wird unter Anwendung multivariater Verfahren der mathematischen Statistik ausgewertet.

1.3 Allgemeine Angaben

Der im Detail ausgearbeitete Forschungsantrag zum Thema „Einfluß des Verfahrens zur Wiedererwärmung von Asphalten im Laboratorium auf die Eigenschaften des Bindemittels“ wurde vom Deutschen Asphaltinstitut (DAI) in Bonn über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) in Köln zur Förderung im Rahmen der Gemeinschaftsforschung durch den Bundesminister für Wirtschaft (BMW) eingereicht. Als ausführende Forschungsstelle wurde das Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig, vertreten durch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Arand, vorgeschlagen. Auf Empfehlung des Gutachterausschusses der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) wurde der Antrag am 16. März 1994 vom Bewilligungsausschuß befürwortet und schließlich am 22. August 1994 der Auftrag zur Durchführung der Forschungsarbeit über das DAI an das Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig vergeben.

2. Untersuchungsmethodik

Zur Überprüfung des Einflusses der Art der Wiedererwärmung von Asphalt im konventionellen Wärmeschrank oder mittels Hochfrequenztechnik auf die Zusammensetzung der Asphalte und die Viskosität des in den Asphalten enthaltenen Bitumens wurden vergleichende Untersuchungen bei systematischer Variation der Mischgutart in drei Stufen - nämlich Asphaltbeton 0/8, Asphaltbinder 0/16 und Splittmastix-asphalt 0/11 - der Bitumensorte in vier Stufen - B 45, B 65, B 80 und PmB 65 - sowie der Mineralstoffart in zwei Stufen - Diabas und Oolith - vorgenommen.

Bei den äußeren Bedingungen der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank wurden die Temperatur in zwei Stufen - 105 °C und 145 °C - und die Expositionsdauer ebenfalls in zwei Stufen - 4 Stunden und 16 Stunden - systematisch variiert; bei der Wiedererwärmung im Mikrowellenverfahren wurde statt der Expositionsdauer alternativ die Probemenge systematisch in zwei Stufen - 1000 g und 2000 g - verändert. Die Veränderung der Probemenge geschah deswegen, weil es für die Lagerung im Mikrowellenverfahren wegen der Art der Wärmeübertragung keine praktikable Möglichkeit gibt, die Temperatur auf einem konstanten Niveau zu halten.

2.1 Asphaltmischgut

2.1.1 Auswahl der Baustoffe

Die für das Untersuchungsprogramm vorgesehenen Baustoffe wurden insbesondere unter dem Gesichtspunkt der regionalen Verfügbarkeit ausgewählt. So wurden als Mineralstoffarten ein saurer Diabas-Splitt und der zugehörige Brechsand aus dem Steinbruch Hohneberg/Harz, ein basischer Kalkstein und der zugehörige Brechsand aus dem Oolith-Steinbruch Steinbergen/Weserbergland, ein Natursand aus der Sandgrube Bortfeld bei Peine und ein im Werk Hehlen produziertes Kalksteinmehl eingesetzt.

Tabelle 1: Kenndaten der eingesetzten Bitumen

Anlieferungszustand	Merkmal	Dimension	B 80	B 65	B 45	PmB 65
	Erweichungspunkt	°C	47,8	51,5	57,3	50,5
	Penetration	1/10 mm	82	52	36	86
	Brechpunkt	°C	- 13,5	- 12,5	- 8,0	- 18,5
	Dichte bei 25 °C	g/cm ³	1,025	1,026	1,029	1,027
	Duktilität	cm	79 T = + 7 °C	40 T = + 13 °C	> 100 T = + 25 °C	> 100 T = + 13 °C
	elastische Rückstellung bei 25 °C	%	-	-	-	76
	kinematische Viskosität bei 90 °C 110 °C 130 °C	mm ² /s	8998 1721 662	13444 2716 767	30760 4440 1485	17488 3042 1141
	Gewichtsänderung	Gew.-%	- 0,03	+ 0,02	0	- 0,02
nach thermischer Alterung	Erweichungspunkt	°C	50,5	56,0	60,5	55,5
	Penetration	1/10 mm	60	37	28	57
	Duktilität	cm	7 T = + 7 °C	12 T = + 13 °C	> 100 T = + 25 °C	> 100 T = + 13 °C
	elastische Rückstellung bei 25 °C	%	-	-	-	64
	kinematische Viskosität bei 90 °C 110 °C 130 °C	mm ² /s	13718 2780 1043	39392 4557 1525	55065 7863 2543	25370 3948 1388

Das Straßenbaubitumen der Sorte B 80 wurde freundlicherweise von der ELF Bitumen Deutschland, Brunsbüttel, und die unterschiedlichen Sorten an Straßenbaubitumen B 45 sowie B 65 sowie das polymermodifizierte Bindemittel PmB 65 wurden freundlicherweise von der Raffinerie Hamburg-Harburg der Deutschen Shell AG zur Verfügung gestellt. Als Bindemittelträger für das Bitumen der Splittmastixasphaltvarianten wurden organische Faserstoffe in Form von Arbocel mit Bitumen als Granulat, das sogenannte Viatop 50, der Firma Rettenmaier & Söhne in Ellwangen einge-

mischt. Allen genannten Firmen sei an dieser Stelle nochmals für die kostenlose Bereitstellung der Baustoffe aufrichtig gedankt.

Die Baustoffkomponenten wurden entweder direkt an den Steinbrüchen oder an den Lagerplätzen entnommen und entstammen somit alle einer Lieferung.

In Tabelle 1 sind für alle verwendeten Bindemittel die maßgebenden Analysenwerte im Anlieferungszustand und nach thermischer Beanspruchung im rotierenden Kolben nach DIN 52016 zusammengestellt.

2.1.2 Eignungsprüfungen und Festlegung der Zusammensetzung der Mischgutvarianten

Die für die Untersuchung vorgesehenen Mischgutarten Asphaltbeton 0/8, Asphaltbinder 0/16 und Splittmastixasphalt 0/11 sollten sowohl mit der Mineralstoffart Diabas als auch mit dem Kalkstein Oolith hergestellt werden. Darüber hinaus sollte jede dieser sechs Varianten mit zwei unterschiedlichen Bindemittelsorten hergestellt werden. Ziel der Eignungsprüfung war es, bei Vorgabe einer Korngrößenverteilung denjenigen Bindemittelgehalt zu finden, der unabhängig von der verwendeten Mineralstoffart bei den Asphaltbetonen 0/8 zu einem Hohlraumgehalt von etwa 2,0 V-%, bei den Asphaltbindern auf einen Hohlraumgehalt von etwa 6,0 V-% und bei den Splittmastixasphalten auf einen solchen von ungefähr 3,5 V-% führt.

Die Korngrößenverteilungen wurden unter Berücksichtigung der Grenzwerte der ZTV-Asphalt StB 94 und der vorliegenden Erfahrungen mit den verwendeten Baustoffen vorgegeben. Die Korngrößenverteilungen innerhalb des Sandbereiches wurden in enger Anlehnung an die natürlichen Sieblinien des Brechsandes beziehungsweise des Gemischs aus Brechsand und Natursand festgelegt.

Mit den so zusammengesetzten Mineralstoffgemischen wurden in mindestens drei Stufen systematisch variiertes Bindemittelgehalte Asphaltgemische hergestellt, Marshall-Probekörper geformt und Hohlraumgehalte ermittelt. Daneben wurden zur

weiteren Beschreibung der Asphaltvarianten der fiktive Hohlraumgehalt H_{Mbit} , der Ausfüllungsgrad mit Bitumen HFB sowie die Werte für Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert festgestellt. Der Vollständigkeit halber wurden auch die Verdichtungswiderstände D und die Steifigkeiten S_{mix} im einaxialen Kriechtest gemessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Tabellen 1 bis 6 der Anlage I übersichtlich dargestellt.

Für die Feststellung des Bindemittelgehaltes galt als alleiniges Optimierungskriterium die Größe für den Hohlraumgehalt H_{bit} im normengemäß hergestellten Probekörper. Es hat sich gezeigt, daß für die jeweilige Mischgutvariante mit Oolith als Mineralstoff zur Erzielung eines vergleichbaren Hohlraumgehaltes ein deutlich höherer Bindemittelgehalt eingesetzt werden mußte. Zur Erzielung vergleichbarer Hohlraumgehalte mußten für die Asphaltvarianten mit Oolith die Bindemittelgehalte beim Asphaltbeton um rund 1,0 Gew.-%, beim Asphaltbinder um etwa 0,8 Gew.-% und beim Splittmastixasphalt um 0,9 Gew.-% angehoben werden.

Die Eignungsprüfungen für die Mischgutvarianten wurden bewußt nur für eine Bindemittelsorte durchgeführt. Theoretisch ändert sich zwar beim Wechsel der Bitumensorte auch der Hohlraumgehalt des Marshall-Probekörpers. Diese Unterschiede sind aber erfahrungsgemäß so gering, daß sie für das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens abzuwickelnde Untersuchungsprogramm ohne Bedeutung sind. Außerdem ist es für die Systematik der Auswertung von Vorteil, wenn die Variation der Bitumensorte bei ansonsten konstanten Werten für die Mischgutzusammensetzung vorgenommen werden kann.

Die Bezeichnungen der einzelnen Mischgutvarianten und die verwendete Mineralstoffart beziehungsweise Bindemittelsorte sowie die aufgrund der Eignungsprüfungen festgestellten Bindemittelgehalte und Hohlraumgehalte im Marshall-Probekörper sind in der Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Bezeichnung und Zusammensetzung der Mischgutvarianten

Varianten	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Bindemittel-gehalt Gew.-%	Hohlraumgehalt Vol.-%
1	AB 0/8	Oolith	B 80	6,9	2,2
2		Oolith	B 65	6,9	-
3		Diabas	B 80	5,9	1,9
4		Diabas	B 65	5,9	-
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	5,5	5,8
6		Oolith	B 45	5,5	-
7		Diabas	B 65	4,75	6,0
8		Diabas	B 45	4,75	-
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	7,4	-
10		Oolith	PmB 65	7,4	3,6
11		Diabas	B 65	6,5	-
12		Diabas	PmB 65	6,5	3,6

2.1.3 Herstellen des Asphaltmischguts und Bereitstellen der Meßproben

Für das vollständige Untersuchungsprogramm zur Überprüfung des Einflusses der Art der Wiedererwärmung von Asphalt auf die Bindemittleigenschaften waren insgesamt zwölf verschiedene Asphaltgemische herzustellen, zu portionieren und mit den beiden Wiedererwärmungsverfahren auf Soll-Temperatur zu erhitzen und gegebenenfalls zu halten. Da das Mischgut anschließend zum Zwecke der Feststellung von Bindemittelgehalt, Korngrößenverteilung und Bindemittleigenschaften zu analysieren war, um möglichst auch geringe Veränderungen durch die Exposition erkennen zu können, mußte Asphaltmischgut mit höchster Präzision hergestellt werden.

Dazu wurden zunächst die in den Steinbrüchen entnommenen Lieferkörnungen gesiebt, gewaschen, getrocknet und im trockenen Zustand nochmals präparativ ge-

siebt. So war sichergestellt, daß alle Kornklassen vom Über- und Unterkorn befreit waren und exakt gestufte Einzelkörnungen für die Herstellung der Mineralstoffgemische bereitgestellt werden konnten. Beim Gesteinsmehl wurde auf eine Absiebung des Überkorns verzichtet. Dieses wurde mit 10,8 Gew.-% nur in der Kornklasse 0,09/0,25 mm gefunden und bei der Bestimmung der Soll-Zusammensetzung der Mineralstoffgemische rechnerisch nicht weiter berücksichtigt. Aufgrund einer Vielzahl von Mischgutanalysen ist nämlich festgestellt worden, daß durch Mischgutherstellung und -bearbeitung eine Füllernachbildung in Größenordnung des Überkornanteils verursacht wird und somit eine Kompensation von Überkorn und nachgebildetem Diabas- beziehungsweise Oolith-Füller stattfindet. Mit dem so gewählten Herstellungsverfahren konnte die gewünschte Korngrößenverteilung der Mineralstoffgemische sehr genau eingehalten werden.

Zur Herstellung der Asphaltgemische wurde für jede Mischgutcharge eine Mineralstoffmenge von 8,5 kg - mit dem Sand der Körnung 0,09/0,25 mm beginnend und aufsteigend bis zur größten Kornklasse - in bereitgestellte Blecheimer eingewogen. Die Füllerkomponente wurde vor der Kornklasse 2/5 mm zugefügt, um Staubentwicklung bei der späteren Verarbeitung zu vermeiden. Dann wurden die Eimer über Nacht in einem Wärmeschrank bei einer Temperatur von $T = 155\text{ °C}$ gelagert. Nach erfolgter Temperierung des Mineralstoffgemisches wurde dieses in den Mischbehälter geschüttet und etwa 15 Sekunden lang vorgemischt. Während dieser Vormischphase wurden für die Splittmastixasphalte die stabilisierenden Zusätze in Form von Bitumengranulat langsam und gleichmäßig zugegeben. Zwischenzeitlich wurde bereits die erforderliche Bitumenmenge - beim Splittmastixasphalt reduziert um den Anteil, der bereits mit dem Bitumengranulat zugegeben worden ist - gezielt in eine Kasserole eingewogen, ebenfalls auf 155 °C erwärmt und anschließend über die heißen, vorgewärmten und vorgemischten Mineralstoffe verteilt. Nach Zugabe des Bindemittels wurde bei konstanter Temperatur von $T = 155\text{ °C}$ drei Minuten lang in einem Labormischer, Typ Rego SM 2, mit sechsschlaufigem Mischbesen bei Vertikalhub gemischt.

Wegen der konstant gehaltenen Menge je Mischgutcharge und der genau vorgegebenen Temperatur vor und während der Mischgutherstellung war auch davon aus-

zugehen, daß eine etwaige Verhärtung des Bitumens durch die Herstellung nicht dem Zufall überlassen blieb.

Die erforderlichen Mischgutmengen für jede der zwölf Mischgutvarianten wurden in jeweils zwei Chargen von ungefähr 9 kg hergestellt. Sodann wurden im warmen Zustand die erforderlichen Teilmengen für die weiteren Untersuchungsgänge bereitgestellt. Zunächst wurden aus jeder Charge Proben für die Herstellung von zwei Marshall-Probekörpern und für eine Mischgutanalyse einschließlich Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel eingewogen. Die für die Exposition im Wärmeschrank und im Mikrowellenofen vorgesehene Mischgutmenge von 1000 g beziehungsweise 2000 g wurde in flache Ausführungen von Abdampfschalen aus Hartporzellan in Anlehnung an DIN 12903 mit einem Durchmesser von 245 mm und einer Höhe von 65 mm eingewogen und die Mischgutoberfläche glattgestrichen.

Die Teilmenge für die Mischgutanalyse wurde unmittelbar nach der Beurteilung untersucht. Diese Probe gilt als Null-Probe, mit deren Analysenwerten die entsprechenden Analysenwerte der wiedererwärmten Teilproben zu vergleichen sind.

Die in die Hartporzellanschalen abgefüllten Teilmengen wurden vor Staub geschützt auf Raumtemperatur abgekühlt, gelagert und nach spätestens 24 bis 48 Stunden unter den vorgesehenen Expositionsbedingungen wiedererwärmt.

Zur Unterscheidung der einzelnen Mischgutvarianten und der Expositionsbedingungen wurden die folgenden Bezeichnungen gewählt:

Die Mischgutvarianten wurden mit den arabischen Ziffern fortlaufend numeriert. Die Null-Probe wurde mit einer römischen Zahl - je nach Charge I oder II - gekennzeichnet, und für die unterschiedlichen Arten der Wiedererwärmung wurden zur Unterscheidung die Kleinbuchstaben a bis h gewählt.

Da für das gesamte geschilderte Untersuchungsprogramm zweifache Belegung vorgesehen war, wurde den Bezeichnungen der Teilproben der Wiederholungsprüfungen ein D vorangestellt.

Beispielsweise bedeutet:

D 2 d

Wiedererwärmung der Mischgutvariante 2 bei einer Temperatur von $T = 145\text{ °C}$ und einer Expositionsdauer von 16 Stunden im Wiederholungsfall und

2 I

nicht wiedererwärmte Probe der Mischgutvariante 2 aus Charge I. Aus der Mischgutcharge I wurden grundsätzlich die Teilproben für die Wiedererwärmungsarten a, c, e und g sowie aus der Mischgutcharge II die Teilproben für die Wiedererwärmungsarten b, d, f und h bereitgestellt.

2.2 Verfahren der Wiedererwärmung

Die Bestimmung des Einflusses und der beabsichtigte Vergleich der beiden unterschiedlichen Wiedererwärmungsverfahren auf die Bindemittleigenschaften setzten zwangsläufig voraus, daß für beide Arten der Wiedererwärmung gleichartig präparierte, in Porzellanschalen abgefüllte Mischgutproben verwendet wurden.

2.2.1 Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank

2.2.1.1 Beschreibung der Art der Wiedererwärmung

Für die Wiedererwärmung der in der Porzellanschale befindlichen Mischgutmenge wurde ein Memmert-Universalschrank, Modell UE 400, eingesetzt. Bewußt wurde ein relativ kleiner Wärmeschrank mit einem Innenraum von 53 Liter ohne Luftumwälzung gewählt, so daß ein Luftaustausch, der die oxidative Alterung des Bitumens beschleunigen könnte, praktisch ausgeschlossen war.

Das Prinzip der Wiedererwärmung im Wärmeschrank funktioniert derart, daß der Luftraum erhitzt wird und die Wärme von diesem Luftraum aus über den Mörtelfilm auf das Gestein übergeht und es schließlich erhitzt. Es wird damit erklärt, daß die Temperatur im Kern des Asphaltmischgutes der Temperatur des Luftraumes nachläuft. Das Maß dieses Nachlaufes ist insbesondere von der Mischgutmenge, aber auch vom gewählten Temperaturniveau im Luftraum abhängig. Erfahrungen der Wiedererwärmung von Asphalt in 20-Liter-Eimern belegen, daß es praktisch nicht gelingt, bei einem auf eine Temperatur von 135 °C geregelten Luftraum das Asphaltmischgut auf die gewünschte Verdichtungstemperatur von $T = 135 \text{ °C}$ gleichmäßig „durchzuwärmen“. In diesem Zusammenhang kommt noch erschwerend hinzu, daß gewollt ohne Luftumwälzung gearbeitet wird und so ein kontinuierlicher Luftaustausch im Bereich der kälteren Außenwand des Mischguteimers nicht gefördert wird. Das ist wohl auch der Grund dafür, daß der Laborpraktiker bei Routinearbeiten entweder die Lufttemperatur im Wärmeschrank erhöht oder die vorgesehene Wiedererwärmungszeit verlängert.

2.2.1.2 Temperaturregelung und Temperaturmessung

Durch die digitale Mikroprozessor-PID-Regelung mit kontaktlosem Schaltglied war eine gradgenaue Temperatur-Regelung entsprechend der digitalen Soll-Wertvorgabe im Schrankinnenraum gewährleistet. Vor der eigentlichen Untersuchung wurde die Luft im Wärmeschrank für mindestens 4 Stunden auf die Soll-Temperatur, 105 °C oder 145 °C, gebracht. Dann wurden die bei Raumtemperatur gelagerte Porzellschale mit dem Mischgut auf das mittlere gelochte Einschubblech gestellt und drei Temperaturmeßfühler PT 100 an gleichmäßig verteilten Stellen bis in die Schichtmitte der Asphaltprobe gesteckt. Die Temperaturfühler waren an einen Mehrkanal-Temperaturwächter und -Monitor Typ minco Modell CT 124 angeschlossen, mit dem die Mischguttemperatur in den drei Zonen exakt überwacht werden konnte.

Bei den im Rahmen der Untersuchungen durchgeführten Wiedererwärmungen konnte wegen der geringen Mischgutmenge die gewünschte Mischguttemperatur in aller Regel nach einer Lagerzeit von etwa 90 Minuten erreicht werden.

2.2.1.3 Variationen der Wiedererwärmung

Bei der Festlegung der Variationen für die Wiedererwärmung wurde versucht, Regelfälle der täglichen Laborpraxis zu simulieren.

In Anlehnung an DIN 1996 Teil 3 wird üblicherweise eine Temperatur von $T = 105\text{ °C}$ gewählt, um ein Mischgut im Wärmeschrank zum Zwecke der Probeteilung in einen lockeren Zustand zu versetzen; eine Temperatur von 145 °C wird dagegen üblicherweise angewendet, um das Asphaltmischgut für die Probekörperherstellung nach DIN 1996 Teil 4 auf die Verdichtungstemperatur zu bringen. Für die Herstellung von Asphaltprobeplatten im Labor-Lamellenverdichtungsgerät oder im Laborverdichtungsgerät mittels Laborwalzen werden sogar Lagertemperaturen von 160 °C beziehungsweise 180 °C angewendet. Die letztgenannten Temperaturen sind aber nicht Gegenstand des Untersuchungsprogrammes.

Eine Expositionsdauer von 4 Stunden ist der in den Regelwerken üblicherweise genannte Richtwert. Wie bereits ausgeführt, reicht diese Zeitdauer vielfach nicht aus, um das Mischgut auf die gewünschten Verdichtungstemperaturen zu bringen. Folglich ist nicht auszuschließen, daß abweichend von den Vorgaben der Regelwerke die Wiedererwärmungsdauer auf einen Zeitraum über Nacht - beispielsweise für 16 Stunden - ausgedehnt wird, um bei Arbeitsbeginn am Morgen sofort ein gut verarbeitungsfähiges oder auf Verdichtungstemperatur erwärmtes Mischgut zur Verfügung zu haben.

Aus den genannten Gründen wurden für die Expositionsbedingungen des Mischguts im konventionellen Wärmeschrank die beiden Temperaturen von $T = 105\text{ °C}$ und $T = 145\text{ °C}$ sowie die Expositionsdauern von 4 Stunden und 16 Stunden gewählt.

Die Variationen und deren Kennzeichnung sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3 : Variationen der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank

Kennzeichnung	Prüfgutmenge	Expositionsdauer	Temperatur
	g	h	°C
a	1000	4	105
b	1000	4	145
c	1000	16	105
d	1000	16	145

2.2.2 Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik

2.2.2.1 Beschreibung der Art der Wiedererwärmung

Hochfrequente oder auch Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen zwischen 100 mm und 1 mm sowie Frequenzgängen zwischen 3 GHz und 100 GHz. Sie bilden innerhalb des Gesamtspektrums der elektromagnetischen Wellen den Bereich zwischen den Radiowellen und der Infrarotstrahlung. Die Wellen werden mit einem Hochfrequenzgenerator erzeugt; das zu erwärmende Prüfgut wird unmittelbar dem Strahlungsfeld des Mikrowellengenerators ausgesetzt; die einzelnen Teile, unter anderem die Wassermoleküle, werden zum Schwingen angeregt. Durch intermolekulare Reibung zwischen den Bindungen der Molekülverbindungen wird Wärme erzeugt, die in das Prüfgut übergeht. Die Geschwindigkeit der Temperaturerhöhung ist von den Absorptionseigenschaften des zu erwärmenden Stoffes abhängig. So konnte in umfangreichen Voruntersuchungen festgestellt werden, daß sich beispielsweise ein grobkörniger Splitt schneller erwärmt als ein feinkörniger, ein Diabas schneller als ein Oolith, ein Diabas-Brechsand schneller als ein Natursand; dagegen erwärmt sich ein Bitumen erheblich langsamer als alle überprüften Mineralstoffe (vergleiche Abbildung 1).

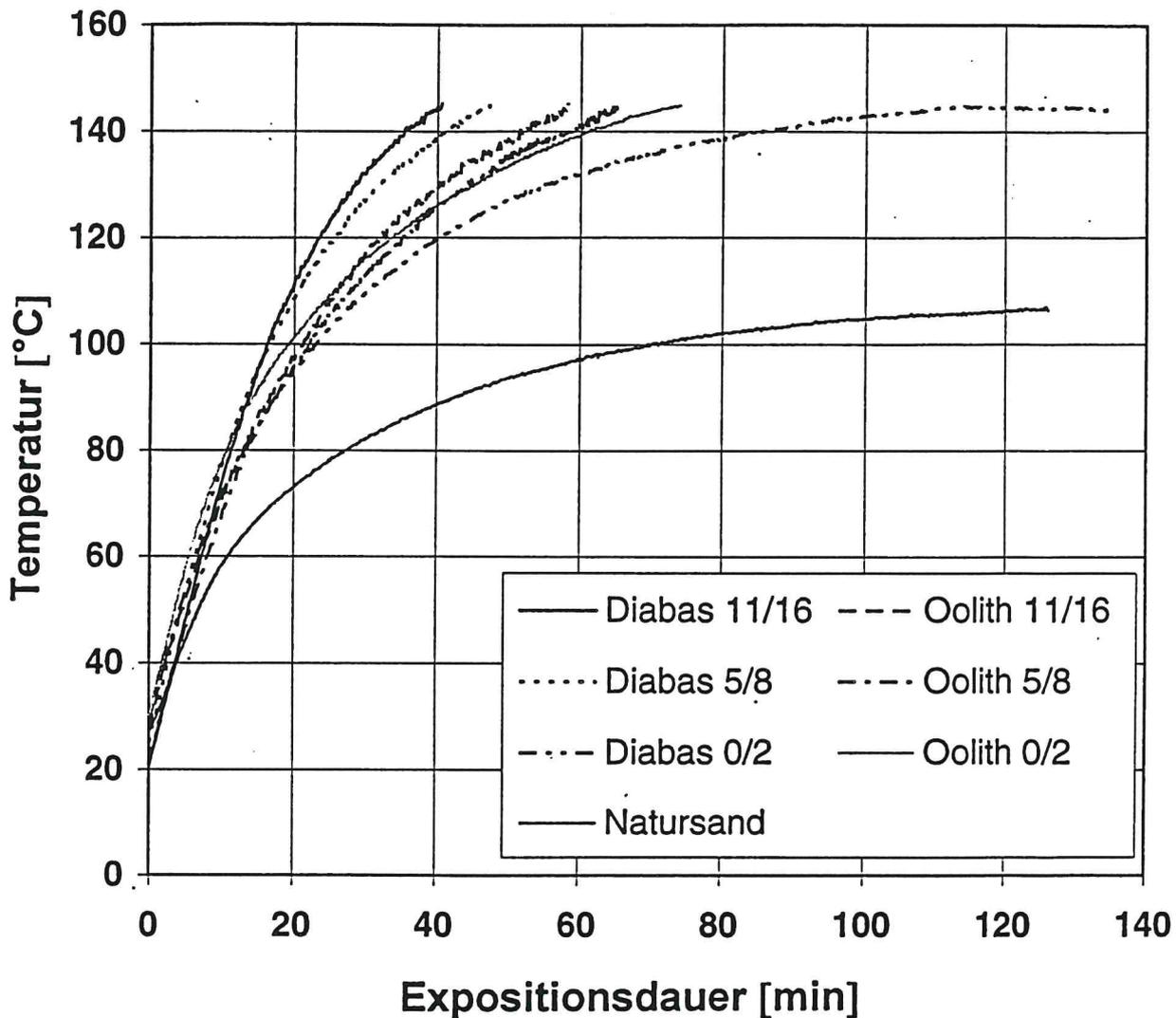


Abb. 1: Temperatur unterschiedlicher Mineralstoffe in Abhängigkeit von der Expositionsdauer im Hochfrequenzmodus - Impulsdauer : 6 s;Pause 10 s

Der Abbildung 1 kann entnommen werden, daß bei den gewählten Einstellungen am Mikrowellenofen nach einer Zeit von 20 Minuten der Diabas 11/16 auf eine Temperatur von 110 °C und der Natursand auf 73 °C erwärmt werden konnte; das Bitumen erreicht nach 20minütiger Expositionsdauer lediglich eine Temperatur von 35 °C.

Bei der Erwärmung von Lebensmitteln werden ebenfalls seit Jahren Mikrowellenöfen eingesetzt. Auch dort handelt es sich üblicherweise um einen nicht homogenen Stoff, bei dem das Phänomen unterschiedlicher Erwärmungsgeschwindigkeiten der einzelnen Inhaltsstoffe der Lebensmittel ebenfalls auftritt. Einleuchtend sind die Erfahrungen mit dem aufzutauenden Kirschkuchen, bei welchem der Kirschkern äußerst heiß, die Kuchenkruste aber noch kalt sein kann.

Die unterschiedlichen Absorptionseigenschaften der Asphaltkomponenten, insbesondere die des Bitumens, kommen dem speziellen Anwendungsfall, nämlich der schonenden Wiedererwärmung des Asphalts, sehr zugute, da bei der Wiedererwärmung die Wärme vom Inneren der Mineralstoffe nach außen transportiert wird und die Erwärmung des Bitumens der Erwärmung der Mineralstoffe lediglich folgt.

Um eine Schädigung des Bitumens im Asphaltmischgut zu vermeiden, muß aber auch die Wiedererwärmung mittels Mikrowelleneinsatz sorgfältig optimiert werden. In umfangreichen Vorversuchen wurden die Impulszeiten und Pausenzeiten für die Wärmebehandlung des Mischguts im Mikrowellenofen optimiert. Danach wurde festgestellt, daß bei ungehinderter Einwirkung der hochfrequenten Wellen die Asphaltproben innerhalb kürzester Zeit so heiß werden können, daß das umhüllende Bitumen raucht und bei Splittmastixasphalt etwa die organischen Faserstoffe verkohlen können. Gleichzeitig wurden erhebliche Temperaturunterschiede von mehreren zehn Graden wegen der unterschiedlichen Erwärmungseigenschaften des Splittes, des Natursandes und des Füllers innerhalb der Asphaltprobe gefunden.

Hieraus wurde die Forderung abgeleitet, die Wiedererwärmung durch Einführung von Pausenzeiten möglichst langsam durchzuführen, damit den einzelnen Baustoffkomponenten genügend Zeit verbleibt, ihre Temperatur durch Austausch anzugleichen. Bei dem für die Untersuchungen eingesetzten Mikrowellenherd wurde eine Impulsdauer von 6 Sekunden und eine Pausenzeit von 10 Sekunden als Optimum gefunden.

2.2.2.2 Temperaturregelung und Temperaturmessung

Für die Wiedererwärmung der Asphaltvarianten wurde ein Mikrowellen-Analysator Typ Ultra X 3505 der Firma Gronert, Lage, eingesetzt. Die Frequenz der Mikrowellen beträgt 2450 MHz, die Leistung 850 Watt, die Größe des Garraumes etwa 33 l. Das Gerät ist mit Regelementen zur stufenlosen Vorgabe der Impuls- und Pausenzeiten ausgerüstet. Darüber hinaus besitzt der Mikrowellen-Analysator einen Drehteller, so daß die zu erwärmende Probe horizontal mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 5 U/min horizontal bewegt werden kann. Da davon auszugehen ist, daß der Hochfrequenzgenerator in dem Garraum keine gleichmäßige Leistung erzeugt, ist die Bewegung der Probe erwünscht und begünstigt die Gleichmäßigkeit der Erwärmung.

Bedingt durch die Art der Wärmeerzeugung und durch die Bewegung der Probe haben konventionelle Methoden der Temperaturmessung versagt. Im Luftraum dicht oberhalb der Probe installierte Temperaturmeßfühler vom Typ PT 100 wurden durch die Einwirkung der Mikrowellen zerstört. Ebenso versagte die Messung mittels Temperaturmeßfehler PT 100 bei einer nicht bewegten Asphaltprobe, da die Meßfühler zerfielen.

Es mußte also nach berührungslosen Meßsystemen gesucht werden, deren Meßwertaufnehmer außerhalb des Strahlungsfeldes angeordnet werden können, ohne die Sicherheit der Laboranten bei der Versuchsdurchführung wegen möglicherweise austretender Strahlung zu gefährden. Die Einarbeitung in die Meßprobleme und die Diskussion mit Fachleuten der Herstellerindustrie für Mikrowellengeräte führte auf ein Strahlungspyrometer mit speziellen spektralen und optischen Eigenschaften.

Eingebaut wurde schließlich ein Strahlungspyrometer Typ KT 15 D der Firma Heymann Optro Electronics GmbH. Hierbei handelt es sich um ein frei programmierbares Meßgerät, welches die von dem zu messenden Objekt emittierte Infrarotstrahlung mißt und die so ermittelte Objekttemperatur angibt. Für die Installation des KT 15 D wurde aus der Gehäuseoberseite des Mikrowellenofens ein kreisförmiges Stück herausgebohrt und hier das Strahlungspyrometer eingesetzt. In bezug zur Drehachse des Probendrehtellers wurde der KT 15 D um 50 mm versetzt und damit

exzentrisch so angeordnet, daß durch das eingesetzte Fokusobjektiv auf der Prüfgutoberfläche eine Meßringfläche von ungefähr 35 mm Breite bestrichen wurde.

Das berührungslose Temperaturmeßgerät wurde so programmiert, daß jede Sekunde eine Temperaturmessung, mithin zwölf Messungen innerhalb einer ganzen Umdrehung der Probe, durchgeführt wurden. Aus den bereits angeführten Gründen streuen die Temperaturmeßwerte innerhalb einer Umdrehung zu Beginn der Wiedererwärmung, also bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen, relativ wenig und bei höheren Temperaturen - beispielsweise bei einer Temperatur oberhalb von 100 °C - stärker. Hier wurden Unterschiede bis zu einer Größenordnung von 10 K gefunden. Auffällig ist, daß während der vollständigen Wiedererwärmung die jeweils niedrigsten und höchsten Temperaturwerte immer an derselben Stelle der Probenoberfläche gefunden wurden, woraus ersehen werden kann, daß sich die einzelnen Baustoffkomponenten tatsächlich durch unterschiedliches Absorptionsvermögen unterscheiden und daß diese Eigenschaften während der Wiedererwärmung des Mischguts nicht verändert werden.

Die zwölf Meßwerte aus einer Umdrehungsphase werden zu einem arithmetischen Mittelwert zusammengefaßt und während der Wiedererwärmung in Abhängigkeit von der Zeit graphisch dargestellt. Danach war festzustellen, daß der Temperaturanstieg stetig ohne Temperatursprung erfolgte.

Bedingt durch die Art der Wiedererwärmung der Asphaltproben von innen heraus ist es einleuchtend, daß die an der Oberfläche der Asphaltproben - also an der Grenzfläche zur kalten Luft des Garraumes - gemessenen Temperaturen der Temperatur im Inneren der Probe um etwa 10 K nachlaufen. Dieser Temperaturnachlauf wurde in einer Reihe von Vorversuchen festgestellt und später bei der Versuchsdurchführung durch Messungen im Asphaltmischgut immer wieder bestätigt. Aus diesem Grunde wurde die Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik konsequent beendet, sobald an der Oberfläche der Probe eine Temperatur von 10 K unterhalb der Soll-Temperatur erreicht worden ist.

2.2.2.3 Variationen der Wiedererwärmung

Es wurde umfassend dargelegt, daß es bei der Wiedererwärmung von Asphalt mittels Hochfrequenztechnik im Gegensatz zur Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank nicht möglich ist, die Probe auf einer gewünschten Temperatur zu halten, da die Strahlungsintensität der Mikrowelle nicht zu regeln ist. Aus diesem Grunde wurde die Hochfrequenzstrahlung unterbrochen, sobald die Soll-Temperatur von 105 °C beziehungsweise 145 °C erreicht war. Die Variation der Expositionsdauer wurde durch die Variation der Prüfgutmenge - 1000 g beziehungsweise 2000 g - ersetzt, da es sich gezeigt hatte, daß bei Wiedererwärmung einer größeren Prüfgutmenge auch eine größere Wiedererwärmungszeit erforderlich war.

Die Variationen und deren Kennzeichnung sowie die erforderlichen durchschnittlichen Wiedererwärmungszeiten können der Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Variationen der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank

Kennzeichnung	Prüfgutmenge	Endtemperatur	Durchschnittliche Wiedererwärmungszeit
	g	°C	min
e	1000	105	14
f	1000	145	29
g	2000	105	22
h	2000	145	46

2.3. Prüfverfahren

2.3.1 Wiedergewinnung des Bindemittels

Nach vollzogener Wiedererwärmung wurde das Asphaltmischgut aus dem Wärmeschrank herausgenommen, im warmen Zustand aus der Porzellanschale in eine Mensur übergeführt und bei Raumtemperatur vor Staub geschützt höchstens 2 Tage gelagert. Sodann wurde diese gesamte Prüfgutmenge - 1000 g beziehungsweise 2000 g - einer Kaltextraktion gemäß Abschnitt 7.2.2 der DIN 1996 Teil 6 mit anschließender vollständiger Bindemittelrückgewinnung unterworfen. Das Bitumen wurde grundsätzlich mit dem Lösemittel Trichlorethen extrahiert.

Als maßgebender Bindemittelgehalt wurde der im Wiedergewinnungsverfahren ermittelte lösliche Bindemittelanteil zuzüglich dem berechneten Zuschlag für das Unlösliche angegeben.

2.3.2 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Die bei der Bestimmung des Bindemittelgehaltes angefallenen Mineralstoffe wurden nach DIN 1996 Teil 14 einer Korngrößenanalyse unterworfen.

2.3.3 Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel, der Penetration und der elastischen Rückstellung

Zentrale Aufgabe der Forschungsarbeit war der Nachweis des Einflusses des Wiedererwärmungsverfahrens des Asphaltmischguts auf das Ausmaß der Nachhärtung des im Asphalt enthaltenen Bitumens. Daher mußten auch ausgewählte Eigenschaften des zurückgewonnenen Bitumens bestimmt werden, der Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN 52011, die Penetration nach DIN 52010 und bei der Variation mit polymermodifizierten Bindemitteln die elastische Rückstellung nach der Halfadenmethode bei einer Prüftemperatur von 25 °C nach den „Technischen Lie-

ferbedingungen für polymermodifizierte Bitumen in Asphaltsschichten im Heißeinbau, TL Pmb Teil 1: Gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen“.

2.4 Mathematisch-statistische Verfahren zur Auswertung der Untersuchungsergebnisse

2.4.1 Ausreißerprüfung

Die Identifizierung ausreißerverdächtiger Einzelwerte innerhalb der Meßreihen erfolgt in Anlehnung an das "Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: Behandlung von abweichenden Meßwerten (Ausreißern)" [Sachs, 1984]. Sämtliche Ausreißerverfahren setzen Normalverteilung der Meßwerte voraus.

Die drei nachfolgend beschriebenen, varianzabhängigen Ausreißerverfahren berücksichtigen bei der Berechnung der Prüfgröße Mittelwert und Standardabweichung der Meßwerte und verwerten somit die Gesamtinformation, die in der Meßreihe enthalten ist. Die n Meßwerte einer Meßreihe werden zunächst der Größe nach zunehmend geordnet:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{n-1} \leq x_n.$$

Bei der Suche nach Ausreißern innerhalb der Stichprobe sind dann, dem Merkblatt entsprechend, der Reihe nach folgende Fälle zu unterscheiden:

Fall 1: Der größte oder der kleinste Meßwert ist ausreißerverdächtig (T-Test).

Die Prüfgröße lautet dann für den größten Meßwert x_n :

$$\hat{T}_{\max} = \hat{T}_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s}$$

beziehungsweise für den kleinsten Meßwert x_1 :

$$\hat{T}_{\min} = \hat{T}_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s} ,$$

mit \bar{x} = arithmetisches Mittel der Meßreihe und
 s = Standardabweichung der Meßreihe.

Überschreitet die Prüfgröße den im Merkblatt angegebenen Schwellenwert T (zum Beispiel $T_{6;0,05} = 1,82$ für $n = 6$ und $\alpha = 0,05$), so wird der geprüfte Meßwert als echter Ausreißer ausgeschaltet.

Fall 2: Sowohl der größte als auch der kleinste Meßwert einer Meßreihe sind ausreißerverdächtig (David-Test).

Die Prüfgröße berechnet sich in diesem Fall zu:

$$\frac{a}{s} = \hat{T}_{1,n} = \frac{x_n - x_1}{s} .$$

Überschreitet die Prüfgröße $\hat{T}_{1,n}$ den tabellierten Schwellenwert T des Merkblattes (zum Beispiel $T_{5;0,05} = 2,75$ für $n = 5$ und $\alpha = 0,05$), so muß zunächst geprüft werden, ob sowohl der kleinste als auch der größte Meßwert um etwa gleich große Beträge vom Mittelwert abweichen. Ist die Differenz zwischen den beiden Unterschiedsbeträgen kleiner als 5 % des gemeinsamen Mittels, so sind beide Meßwerte als echte Ausreißer zu verwerfen. Ist die Differenz zwischen den beiden Unterschiedsbeträgen größer als 5 %, so ist der am weitesten vom Mittelwert entfernt liegende Meßwert als Ausreißer identifiziert.

Fall 3: Entweder die beiden größten oder die beiden kleinsten Meßwerte einer Meßreihe sind ausreißerverdächtig (Grubbs-Test).

Für diesen Test lautet die Prüfgröße für die beiden größten Meßwerte:

$$\hat{T}_{n,n-1} = \frac{s_{n,n-1}^2}{s^2}$$

beziehungsweise für die beiden kleinsten Meßwerte:

$$\hat{T}_{1,2} = \frac{s_{1,2}^2}{s^2} .$$

Die Berechnung der Quotienten ist dem Merkblatt zu entnehmen. Unterschreitet die Prüfgröße den Schwellenwert T der Testverteilung des Merkblattes (zum Beispiel $T_{6,0,05} = 0,0564$ für $n = 6$ und $\alpha = 0,05$), so sind die geprüften Meßwerte als echte Ausreißer eingestuft und zu verwerfen.

Ein aufgrund der Fälle 1 bis 3 als Ausreißer ausgewiesener Meßwert wird in Klammern gesetzt und bei der weiteren Auswertung nicht mehr berücksichtigt. Die um den abweichenden Meßwert reduzierte Meßreihe wird sodann erneut mit den vorgenannten Prüfverfahren auf weitere ausreißerverdächtige Werte untersucht.

2.4.2 Einfache Varianzanalyse und modifizierter LSD-Test

Mit Hilfe einer einfachen Varianzanalyse läßt sich die Gleichheit der Mittelwerte mehrerer Stichprobengruppen überprüfen [Sachs, 1984]. Die k Gruppen mit je n_i Stichprobenelementen und insgesamt n Elementen müssen normalverteilt sein und gleiche Varianzen aufweisen.

Für die einfache Varianzanalyse wird die Summe der Abweichungsquadrate der Stichprobenwerte um das Gesamtmittel (Q_{gesamt}) in zwei Anteile, die Summe der Abweichungsquadrate aller Einzelwerte x_{ij} um die Gruppenmittelwerte \bar{x}_i ($Q_{\text{innerhalb}}$)

und die Summe der Abweichungsquadrate der Gruppenmittelwerte \bar{x}_i um das Gesamtmittel \bar{x} (Q_{zwischen}), zerlegt.

Die zugehörigen Varianzen oder mittleren Quadrate (MQ) werden als Quotienten aus der Summe der Abweichungsquadrate und dem zugehörigen Freiheitsgrad ν berechnet:

$$- MQ_{\text{zwischen}} = s_{\text{zw}}^2 = \frac{1}{\nu_1} \sum_i n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2 ,$$

$$- MQ_{\text{innerhalb}} = s_{\text{in}}^2 = \frac{1}{\nu_2} \sum_{ij} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 ,$$

mit $\nu_1 = k - 1$, $\nu_2 = n - k$.

MQ_{zwischen} wird als Stichprobenfehler und $MQ_{\text{innerhalb}}$ als Versuchsfehler bezeichnet.

Entstammen alle Gruppen einer Grundgesamtheit, dann sollten die Varianzen MQ_{zwischen} und $MQ_{\text{innerhalb}}$ etwa gleich groß sein. Ist aber der Quotient aus MQ_{zwischen} und $MQ_{\text{innerhalb}}$ größer als der kritische Wert der F-Verteilung, so befinden sich unter den Gruppen solche mit unterschiedlichen Mittelwerten μ_i . Die Null-Hypothese, alle Mittelwerte seien gleich:

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i = \dots = \mu_k = \mu ,$$

wird somit anhand der Prüfgröße

$$\hat{F} = \frac{MQ_{\text{zwischen}}}{MQ_{\text{innerhalb}}} ,$$

$$\hat{F} = \frac{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}$$

abgelehnt, wenn bei vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$

$$\hat{F} > F(v_1; v_2; \alpha)$$

ist.

In diesem Fall sind mindestens zwei Mittelwerte μ_i voneinander verschieden und die Alternativhypothese $\mu_i \neq \mu$ wird für bestimmte i akzeptiert. Die Ablehnung der Null-Hypothese läßt jedoch nicht den Schluß zu, daß alle Mittelwerte signifikant voneinander verschieden sind. Es ist also herauszufinden, welche Mittelwerte oder welche Gruppen von Mittelwerten sich unterscheiden.

Ein multipler Mittelwertvergleich mit Hilfe des modifizierten LSD-Tests gibt darüber Auskunft, welche Mittelwerte zu homogenen Gruppen zusammengefaßt werden können, das heißt, der gleichen Grundgesamtheit entstammen [Sachs, 1984].

Dazu werden die k Mittelwerte der Größe nach absteigend geordnet und es wird geprüft, ob benachbarte Mittelwerte eine größere Differenz Δ aufweisen als die kleinste signifikante Differenz (Least Significant Difference = LSD).

Die kleinste signifikante Differenz berechnet sich bei gleichen Stichprobenumfängen einer Meßreihe zu:

$$\text{LSD} = t_{n-k, \alpha} \cdot \sqrt{\frac{2}{n_i}} \cdot \text{Mq}_{\text{innerhalb}}$$

- mit t = Schwellenwert der t-Verteilung bei der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$,
- n_i = Stichprobenumfang einer Meßreihe,
- $\text{Mq}_{\text{innerhalb}}$ = Varianz der Einzelwerte um die Gruppenmittelwerte.

Bei ungleichen Stichprobenumfängen gilt für die kleinste signifikante Differenz benachbarter Mittelwerte:

$$\text{LSD}_{(a,b)} = t_{n-k,\alpha} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_a + n_b}{n_a \cdot n_b}\right) \cdot \text{MQ}_{\text{innerhalb}}}$$

mit $n_a, n_b =$ Stichprobenumfang der benachbarten Mittelwerte.

Wenn $\Delta \leq \text{LSD}$ ist, läßt sich die Hypothese der Gleichheit benachbarter Mittelwerte nicht ablehnen. Die Grenzen homogener Gruppen von Mittelwerten werden in den entsprechenden Anlagen kenntlich gemacht.

2.4.3 Varianzanalysen der mehrfachen Klassifikation

Mit Hilfe multipler Varianzanalysen können die Einflüsse von zwei und mehr Faktoren auf die Gesamtvariabilität einer Merkmalsgröße und gleichzeitig die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren erkannt und quantitativ ermittelt werden. Das Berechnungsprinzip besteht darin, die Faktoren so einzusetzen, daß sich ihre Effekte und Wechselwirkungen sowie die Variabilität dieser Effekte messen, untereinander vergleichen und gegen die zufällige Variabilität abgrenzen lassen.

Gemäß der Klassifikation von [Eisenhart, 1951] können zur Lösung von Problemen mit varianzanalytischen Methoden grundsätzlich drei Modelle unterschieden werden:

- Modell I mit festen Effekten, wobei die Stufen der Einflußfaktoren gezielt ausgewählt und festgelegt werden,
- Modell II mit zufälligen Effekten, wobei die Stufen der Einflußfaktoren auf Zufallsstichproben aus einer Grundgesamtheit beruhen sowie
- Modell III mit gemischten Effekten, wobei sich die Einflußfaktoren sowohl aus dem Modell I als auch aus dem Modell II ergeben.

Ferner unterscheidet man bei multiplen Varianzanalysen zwischen einer Kreuzklassifikation und einer hierarchischen Klassifikation. Bei der Kreuzklassifikation treten alle Stufen des einen Einflußfaktors in allen Stufen aller anderen Einflußfaktoren auf. Bei der hierarchischen Klassifikation hingegen treten alle Stufen einer Einflußgröße immer nur mit einer Stufe einer anderen Einflußgröße gemeinsam auf.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche sind so angelegt, daß stets eine Varianzanalyse mit Kreuzklassifikation nach dem Modell I (mit festen Effekten) auf das vorliegende Datenmaterial angewendet werden kann.

2.4.3.1 Varianzanalyse der vierfachen Klassifikation

Bei dem erhobenen Datenmaterial für Viskositätsmerkmale des aus Asphalt wiedergewonnenen Bitumens liegt in einer Reihe von Fällen eine Vier-Variablen-Klassifikation mit Wiederholungen vor - beispielsweise für die Variationsursachen Temperatur, Mischgutart, Mineralstoffart und Expositionsdauer - mit systematisch ausgewählten Stufen der vier Faktoren. Da die Variabilitätsanteile der einzelnen Einflüsse und ihre Wechselwirkungen an der Gesamtvarianz interessieren, werden die zu prüfenden Daten einer Merkmalsgröße zunächst in folgende Gruppen unterteilt:

Faktor A (Temperatur)	mit den Stufen $i = 1$ bis $i = a$, wobei a Stufen in der Grundgesamtheit auftreten,
Faktor B (Mischgutart)	mit den Stufen $j = 1$ bis $j = b$, wobei b Stufen in der Grundgesamtheit auftreten,-
Faktor C (Mineralstoffart)	mit den Stufen $k = 1$ bis $k = c$, wobei c Stufen in der Grundgesamtheit auftreten,-
Faktor D (Expositionsdauer)	mit den Stufen $l = 1$ bis $l = d$, wobei d Stufen in der Grundgesamtheit auftreten auf.

Da angenommen werden darf, daß durch die systematische Auswahl der Stufen a, b, c und d jeweils der ganze relevante Bereich der Faktoren A, B, C und D erfaßt wird, kann das Modell I für alle betrachteten Faktoren zugrunde gelegt werden.

Die Anzahl der Stufen beträgt a = 2, b = 3, c = 2 und d = 2. Total sind a · b · c · d = 36 Stufen vorhanden. Jede Stufe - beispielsweise für den Erweichungspunkt Ring und Kugel - umfaßt n = 4 Werte ("Beobachtungen").

Die Gesamtzahl der Meßwerte ist dann gleich $N = a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot n = 144$.

Für das Untersuchungsmaterial wurde ein varianzanalytisches lineares Modell gewählt mit der Modellgleichung:

$$x_{ijklm} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + (\alpha\beta\delta)_{ijl} + (\alpha\gamma\delta)_{ikl} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl} + \epsilon_{ijklm} .$$

Hierbei bezeichnet der Index i stets die Nummer der Stufe des Faktors A, der Index j die des Faktors B, der Index k die des Faktors C, der Index l die des Faktors D, während der Index m die Nummer der Beobachtung m= 1 bis n angibt.

Dabei bedeuten:

x_{ijklm}	einen Beobachtungswert, der in der i-ten Stufe des Faktors A, j-ten Stufe des Faktors B, k-ten Stufe des Faktors C, l-ten Stufe des Faktors D und m-ten Beobachtung liegt,
μ	Gesamtmittel,
α_i bis δ_l	Stufeneffekt der Faktoren A bis D; die Abweichung der Stufenmittel vom Gesamtmittel,
$(\alpha\beta)_{ij}$ bis $(\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl}$	Wechselwirkungseffekt zwischen den im Index angegebenen Stufen der betreffenden Faktoren; so bezeichnet zum Beispiel $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$, den Wechselwirkungseffekt zwischen der i-ten Stufe des Faktors A, der j-ten Stufe des Faktors B und der k-ten Stufe des Faktors C,
ϵ_{ijklm}	Effekt der zufälligen Einflüsse.

In diesem Modell wird vorausgesetzt, daß die Stichproben zufällig aus den $a \cdot b \cdot c \cdot d$ Grundgesamtheiten entnommen worden sind und daß jede dieser Grundgesamtheiten normalverteilt ist mit statistisch gleicher Varianz σ^2 ; das heißt, die x_{ijklm} sollen unabhängig und normalverteilt mit der Varianz σ^2 sein. Für die notwendigen Berechnungen der SQ (Summen der quadratischen Abweichungen) wird folgender Weg gewählt.

Zunächst wird die Hilfsgröße K bestimmt:

$$K = \frac{\sum x_{ijklm}^2}{N},$$

wobei x die durch Indizierung gekennzeichneten Meßwerte darstellt. Mit der Hilfsgröße K ergeben sich die Einzeleffekte der Faktoren zu:

$$- \text{SQ(A)} = \sum_i \frac{x_{i\dots\dots}^2}{n \cdot b \cdot c \cdot d} - K; \quad \text{FG} = a - 1,$$

$$- \text{SQ(B)} = \sum_j \frac{x_{\dots j \dots}^2}{n \cdot a \cdot c \cdot d} - K; \quad \text{FG} = b - 1,$$

$$- \text{SQ(C)} = \sum_k \frac{x_{\dots \dots k \dots}^2}{n \cdot a \cdot b \cdot d} - K; \quad \text{FG} = c - 1,$$

$$- \text{SQ(D)} = \sum_l \frac{x_{\dots \dots \dots l}^2}{n \cdot a \cdot b \cdot c} - K; \quad \text{FG} = d - 1,$$

sowie die Wechselwirkungseffekte zwischen zwei Faktoren zu:

$$- \text{SQ(AB)} = \sum_i \sum_j \frac{x_{ij\dots\dots}^2}{n \cdot c \cdot d} - K - \text{SQ(A)} - \text{SQ(B)}; \quad \text{FG} = (a-1)(b-1),$$

$$- \text{SQ(AC)} = \sum_i \sum_k \frac{x_{i\dots k \dots}^2}{n \cdot b \cdot d} - K - \text{SQ(A)} - \text{SQ(C)}; \quad \text{FG} = (a-1)(c-1).$$

Die übrigen Summen SQ(AD), SQ(BC), SQ(BD) und SQ(CD) sowie deren Freiheitsgrade FG werden durch entsprechenden Umtausch der Indices und der jeweiligen Anzahl der Stufen analog berechnet. Für die Wechselwirkungseffekte zwischen drei Faktoren gilt:

$$\begin{aligned}
 - \text{SQ}(ABC) &= \sum_i \sum_j \sum_k \frac{x_{ijk\cdot}^2}{n \cdot d} - K - \text{SQ}(A) - \text{SQ}(B) - \text{SQ}(C) - \text{SQ}(AB) - \text{SQ}(AC) \\
 &- \text{SQ}(BC); \quad \text{FG} = (a-1)(b-1)(c-1),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 - \text{SQ}(ABD) &= \sum_i \sum_j \sum_l \frac{x_{ij\cdot l}^2}{n \cdot c} - K - \text{SQ}(A) - \text{SQ}(B) - \text{SQ}(D) - \text{SQ}(AB) - \\
 \text{SQ}(AD) &- \text{SQ}(BD); \quad \text{FG} = (a-1)(b-1)(d-1).
 \end{aligned}$$

Die Summen SQ(ACD) und SC(BCD) und deren Freiheitsgrade FG werden wieder analog ermittelt.

Schließlich müssen der Wechselwirkungseffekt aller Faktoren:

$$\begin{aligned}
 - \text{SQ}(ABCD) &= \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \frac{x_{ijkl}^2}{n} - K - \text{SQ}(A) - \text{SQ}(B) - \text{SQ}(C) - \text{SQ}(D) - \\
 &\text{SQ}(AB) - \text{SQ}(AC) - \text{SQ}(AD) - \text{SQ}(BC) - \text{SQ}(BD) - \\
 \text{SQ}(CD) &- \text{SQ}(ABC) - \text{SQ}(ABD) - \text{SQ}(ACD) - \text{SQ}(BCD); \\
 &\text{FG} = (a-1)(b-1)(c-1)(d-1)
 \end{aligned}$$

und die Gesamtabweichungsquadratsumme (Total):

$$- \text{SQ}(T_o) = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m x_{ijklm}^2 - K; \quad \text{FG} = (a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot n) - 1 = N - 1$$

bestimmt werden.

Die Rest- oder Fehlerquadratsumme wird wie folgt festgestellt:

$$\begin{aligned}
 \text{SQ(R)} = & \text{SQ (To)} - \text{SQ (A)} - \text{SQ (B)} - \text{SQ (C)} - \text{SQ (D)} - \text{SQ (AB)} - \\
 & \text{SQ (AC)} - \text{SQ (AD)} - \text{SQ (BC)} - \text{SQ (BD)} - \text{SQ (CD)} - \\
 & \text{SQ (ABC)} - \text{SQ (ABD)} - \text{SQ (ACD)} - \text{SQ (BCD)} - \text{SQ (ABCD)}; \\
 \text{FG} = & a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot (n-1).
 \end{aligned}$$

Die Mittleren Quadrate MQ lassen sich durch Teilung der Summen der Abweichungsquadrate SQ durch die zugehörigen Freiheitsgrade ermitteln.

Mit Hilfe des F-Tests ist dann zu untersuchen, ob die Effekte der Einflußfaktoren und der Wechselwirkungen signifikante Änderungen der Merkmalsgröße bewirken. Gemäß der gestellten Aufgabe sind folgende Null-Hypothesen zu prüfen: Die Einflußfaktoren und deren Wechselwirkungen bewirken in allen Stufen jeweils keinen Effekt. Wird die Null-Hypothese angenommen, so besteht kein Unterschied zwischen den Mittelwerten der Stufen des zu prüfenden Effekts, was bedeutet, daß die Unterschiede zwischen den Stufen dieses Effekts keinen Einfluß auf die Merkmalsänderungen ausüben.

Die Prüfung der Null-Hypothesen erfolgt jeweils durch Vergleich eines rechnerischen \hat{F} -Werts, gebildet aus dem Quotienten des jeweiligen Mittleren Quadrats MQ und dem Mittleren Quadrat des Resteinflusses, mit einem theoretischen F-Wert. Ist die Prüfgröße \hat{F} größer als der tabellierte F-Wert der Fisher-Verteilung, so wird die entsprechende Null-Hypothese nicht akzeptiert, das heißt, die der geprüften Variationsursache zugeordnete Varianz ist nicht zufällig, sondern signifikant unterschiedlich von der Fehlervarianz.

Die rechnerischen \hat{F} -Werte und die zugehörigen Freiheitsgrade lassen sich für das gewählte varianzanalytische Modell mit festen Effekten aus folgenden Beziehungen ermitteln:

$$\hat{F}(A) = \frac{\text{MQ(A)}}{\text{MQ(R)}} ; \quad \text{FG}_1 = (a - 1), \text{FG}_2 = a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot (n - 1).$$

$\hat{F}(B)$; $\hat{F}(C)$, $\hat{F}(D)$ und deren zugehörigen Freiheitsgrade werden analog ermittelt.

$$\hat{F}(AB) = \frac{MQ(AB)}{MQ(R)} ; \quad FG_1 = (a - 1) \cdot (b - 1), \quad FG_2 = a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot (n - 1).$$

$\hat{F}(AC)$, $\hat{F}(AD)$, $\hat{F}(BC)$, $\hat{F}(BD)$, $\hat{F}(CD)$ und deren zugehörigen Freiheitsgrade werden analog ermittelt.

$$\hat{F}(ABC) = \frac{MQ(ABC)}{MQ(R)} ; \quad FG_1 = (a - 1) \cdot (b - 1) \cdot (c - 1),$$

$$FG_2 = a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot (n - 1).$$

$\hat{F}(ABD)$, $\hat{F}(ACD)$, $\hat{F}(BCD)$ und deren zugehörigen Freiheitsgrade werden analog ermittelt.

$$\hat{F}(ABCD) = \frac{MQ(ABCD)}{MQ(R)} ; \quad FG_1 = (a - 1) \cdot (b - 1) \cdot (c - 1) \cdot (d - 1),$$

$$FG_2 = a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot (n - 1).$$

Die theoretischen F-Werte werden jeweils für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ für die zugehörigen Freiheitsgrade FG_1 und FG_2 ermittelt.

Weiterhin werden die Varianzkomponenten der Haupt- und Wechselwirkungen ermittelt, um die Effekte dieser Wirkungen abschätzen zu können. In Anlehnung an [Weber, 1986] erweisen sich die Mittleren Quadrate MQ als Summen von Varianzkomponenten, die die Wirkungen und Wechselwirkungen der verschiedenen Einflußfaktoren charakterisieren. Für das gewählte Modell mit festen Effekten lassen sich nach Weber die Varianzkomponenten s^2 aus folgenden Gleichungen bestimmen:

$$\begin{aligned} MQ &= E(MQ), \\ MQ(A) &= s_R^2 + b \cdot c \cdot d \cdot n \cdot s_A^2, \\ MQ(B) &= s_R^2 + a \cdot c \cdot d \cdot n \cdot s_B^2, \\ MQ(C) &= s_R^2 + a \cdot b \cdot d \cdot n \cdot s_C^2, \\ MQ(D) &= s_R^2 + a \cdot b \cdot c \cdot n \cdot s_D^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
MQ(AB) &= s_R^2 + c \cdot d \cdot n \cdot s_{AB}^2, \\
MQ(AC) &= s_R^2 + b \cdot d \cdot n \cdot s_{AC}^2, \\
MQ(AD) &= s_R^2 + b \cdot c \cdot n \cdot s_{AD}^2, \\
MQ(BC) &= s_R^2 + a \cdot d \cdot n \cdot s_{BC}^2, \\
MQ(BD) &= s_R^2 + a \cdot c \cdot n \cdot s_{BD}^2, \\
MQ(CD) &= s_R^2 + a \cdot b \cdot n \cdot s_{CD}^2, \\
MQ(ABC) &= s_R^2 + d \cdot n \cdot s_{ABC}^2, \\
MQ(ABD) &= s_R^2 + c \cdot n \cdot s_{ABD}^2, \\
MQ(ACD) &= s_R^2 + b \cdot n \cdot s_{ACD}^2, \\
MQ(BCD) &= s_R^2 + a \cdot n \cdot s_{BCD}^2, \\
MQ(ABCD) &= s_R^2 + n \cdot s_{ABCD}^2, \\
MQ(R) &= s_R^2.
\end{aligned}$$

Die dadurch ermittelten s^2 können als prozentuale Anteile an der Gesamtvarianz angegeben werden:

$$\begin{aligned}
&s_A^2 + s_B^2 + s_C^2 + s_D^2 + s_{AB}^2 + s_{AC}^2 + s_{AD}^2 + s_{BC}^2 + s_{BD}^2 + s_{CD}^2 + s_{ABC}^2 + s_{ABD}^2 + \\
&s_{ACD}^2 + s_{BCD}^2 + s_{ABCD}^2 + s_R^2,
\end{aligned}$$

mit der Bedingung: $s_{(To)}^2 \hat{=} 100 \%$.

2.4.3.2 Varianzanalyse der fünffachen Klassifikation

Die Gleichungen für die Varianzanalyse der fünffachen Klassifikation ergeben sich aus den Gleichungen für die Varianzanalyse der vierfachen Klassifikation durch Schluß von n auf $(n + 1)$.

3. Untersuchungsergebnisse

3.1. Beschreibung der Darstellungsweise

Alle Ergebnisse der Mischgutanalysen sind für jede Mischgutprobe getrennt vollständig in den Anlagen II dokumentiert. In der Kopfleiste eines jeden Analysenblattes steht die Kennnummer der Mischgutprobe mit Datum, die Art der Wiedererwärmung - das Kürzel kW wird hierbei für die Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und das Kürzel M wird für die Wiedererwärmung im Mikrowellenofen verwendet - und die Expositionsdauer beziehungsweise die Prüfgutmenge sowie die Temperatur und die Mischgutart. Darüber hinaus enthält die Soll-Wert-Spalte die aus der Eignungsprüfung übernommenen Vorgaben für die Mischgutzusammensetzung. Diese sind gegebenenfalls um die aus der ZTV-Asphalt 94 entnommenen Toleranzen erweitert. Die letzte Spalte der Tabelle gibt dann etwaige, nicht tolerierbare Abweichungen von den Werten der Soll-Rezeptur an. In diesen Ergebnisblättern ist der Erweichungspunkt Ring und Kugel als Mittelwert aus den beiden Ringen einer Bestimmung angegeben.

Darüber hinaus wurden aus den Asphaltgemischen der sogenannten Null-Proben - das sind diejenigen Proben, die nach Mischgutherstellung nicht wiedererwärmt sondern unmittelbar analysiert wurden - zur Identifizierung auch Marshall-Probekörper hergestellt und der Hohlraumgehalt festgestellt. Auch diese Ergebnisse sind in den Tabellen niedergeschrieben.

Es wird darauf hingewiesen, daß die Erweichungspunkte Ring und Kugel immer das arithmetische Mittel zweier Einzelwerte an den beiden Ringproben darstellen. Die Werte für die Penetration fehlen in dieser Tabelle. Sie sind in gesonderten Tabellen dokumentiert und werden den entsprechenden Abschnitten des Forschungsberichtes beigelegt.

Sofern erforderlich, wurden zur Verbesserung der Übersichtlichkeit aus den Tabellen ausgewählte Meßwerte in kompakte Formblätter geschrieben, um die Interpretation und die graphische Darstellung der Versuchsergebnisse zu erleichtern.

3.2 Ergebnisse der Untersuchungen zur Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank

3.2.1 Bindemittelgehalt

Nach Herstellung und Abkühlung der Mischgutproben auf Raumtemperatur wurden diese im konventionellen Wärmeschrank bei einer Temperatur von 105 °C beziehungsweise 145 °C und einer Expositionsdauer von 4 Stunden beziehungsweise 16 Stunden wiedererwärmt und anschließend aus allen Proben das Bitumen wiedergewonnen.

Aus den Analysenblättern der Anlage II.1 wurden die festgestellten Bindemittelgehalte in die Tabelle 5 übertragen.

Von Interesse ist die Beantwortung der Frage, ob die Art der Wiedererwärmung mit den unterschiedlichen Temperaturen und den unterschiedlichen Expositionsdauern einen Einfluß auf die Größe des Bindemittelgehaltes besitzt. Bei aufmerksamer Betrachtung der in der Tabelle 5 mitgeteilten Ergebnisse für den Bindemittelgehalt ist weder für die Temperatur noch für die Expositionsdauer ein systematischer Einfluß auf die Größe des Bindemittelgehaltes zu erkennen.

Sehr einfach läßt sich diese Beobachtung überprüfen, indem die Hypothese aufgestellt wird, alle Bindemittelgehalte einer Mischgutprobe mit einer Mineralstoffart seien gleich und gehörten einer Grundgesamtheit an. Die im Abschnitt 2.4.1 beschriebenen varianzabhängigen Prüfverfahren werden zur Überprüfung dieser Hypothese angewendet, da mit diesem Verfahren die Homogenität eines Datenmaterials getestet werden kann. Die Ergebnisse dieser Tests auf Normalverteilung sind in Anlage III.1 dokumentiert.

In der überwiegenden Anzahl der Fälle liegt demnach normalverteiltes Datenmaterial vor. Bei den wenigen Fällen, bei denen der obere Grenzwert der kritischen Schranke überschritten wird und die Normalverteilung des Datenmaterials abgelehnt werden müßte, wird davon ausgegangen, daß hier der Fehler im experimentellen Bereich gesucht werden muß.

Tabelle 5 : Festgestellter Bindemittelgehalt in Gew.-% nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im Wärmeschrank und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittelsorte	Bindemittelgehalt nach Eignungsprüfung	konventioneller Wärmeschrank					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1	AB 0/8	Oolith	B 80	6,90	6,97	7,33	7,01	6,97	7,07	6,90
2		Oolith	B 65	6,90	6,79	7,00	6,84	6,79	6,91	6,80
					6,98	6,85	6,82	6,98	7,06	6,94
					6,84	6,88	6,93	6,84	6,90	6,95
3		Diabas	B 80	5,90	5,98	6,04	5,99	5,98	6,06	5,99
4		Diabas	B 65	5,90	5,93	5,92	6,05	5,93	6,00	6,10
				5,96	6,10	5,99	5,96	6,04	6,05	
				5,93	6,04	6,03	5,93	5,99	6,11	
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	5,50	5,25	5,11	5,38	5,25	5,32	5,27
6		Oolith	B 45	5,50	4,95	5,28	5,22	4,95	4,74	5,50
					5,18	5,18	5,48	5,18	5,25	5,38
					5,07	5,59	5,74	5,07	5,21	5,26
7		Diabas	B 65	4,75	4,83	4,91	4,82	4,83	4,81	4,77
8		Diabas	B 45	4,75	4,56	4,50	4,76	4,56	4,65	4,80
				4,58	4,62	5,00	4,58	4,77	4,94	
				4,67	4,85	4,43	4,67	4,70	4,96	
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	7,40	7,04	7,10	7,04	7,04	7,07	7,01
10		Oolith	PmB 65	7,40	7,17	7,15	7,35	7,17	7,07	7,11
					7,26	7,27	7,25	7,26	7,38	7,23
					7,01	7,01	7,42	7,01	7,10	7,09
11		Diabas	B 65	6,50	6,45	6,97	6,31	6,45	6,36	6,25
12		Diabas	PmB 65	6,50	6,48	6,40	6,34	6,48	6,66	6,60
				6,20	6,30	6,71	6,20	6,23	6,34	
				6,50	6,67	6,40	6,50	6,24	6,69	

3.2.2 Korngrößenverteilung

Die Einzelwerte für den Füllergehalt, den Sandgehalt und den Splittgehalt sind für alle Mischgutvarianten in den Tabellen 6, 7 und 8 aufgelistet. Diese Kennwerte gelten als wesentliche Größen zur Beschreibung der Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches in einem Asphaltmischgut. Der Einfluß des Verfahrens der Wiedererwärmung auf die Korngrößenverteilung wird mit Hilfe der Tests auf Normalverteilung der Prüfwerte vorgenommen.

Unter Verwendung des Zahlenmaterials der Tabellen 6, 7 und 8 werden für die sechs Mischgutsorten gleicher Mineralstoffarten die Tests auf Normalverteilung durchgeführt. Der Vollständigkeit halber sei nochmals erwähnt, daß die Zahlenwerte der Null-Proben aus Gründen der Übersichtlichkeit in allen drei Tabellen in der Spalte mit der Temperatur $T = 145 \text{ °C}$ ein zweites Mal angegeben werden. In den statistischen Rechenverfahren wird die Null-Probe selbstverständlich nur einmal berücksichtigt, so daß für jeden Ausreißertest zwanzig Meßwerte - je zwei Einzelwerte für die beiden Temperaturen $T = 105 \text{ °C}$ und $T = 145 \text{ °C}$ - für zwei Expositionsdauern - 4 Stunden und 16 Stunden - und für die nicht wiedererwärmte Mischgutprobe verarbeitet werden. Die Ergebnisse dieser Tests sind in den Tabellen 2, 3 und 4 der Anlage III. 1 vollständig dokumentiert.

Da in keinem Fall der Quotient Spannweite a / Standardabweichung s die kritische Grenze unter- beziehungsweise überschreitet, ist von einer Normalverteilung, also Homogenität des Datenmaterials, auszugehen. Das heißt, unabhängig von der Mischgutart, der Art der verwendeten Mineralstoffe und der Bindemittelsorte können Einflüsse aus der Wiedererwärmung des Asphaltmischguts auf die Korngrößenverteilung nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 6 : Festgestellter Füllergehalt in Gew.-% nach Mischgutherstellung,
Wiedererwärmung im Wärmeschrank und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Füller-gehalt nach Eignungs-prüfung	konventioneller Wärmeschrank					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1 2 3 4	AB 0/8	Oolith	B 80	10,0	9,0	10,0	9,1	9,0	8,6	9,4
					9,0	9,6	9,5	9,0	9,3	9,6
		Oolith	B 65	10,0	9,2	9,2	8,9	9,2	9,1	9,3
					9,1	9,0	9,0	9,1	9,3	9,1
Diabas	B 80	10,0	9,3	9,8	9,4	9,3	9,8	9,6		
			9,3	9,5	9,7	9,3	9,8	9,8		
Diabas	B 65	10,0	8,9	9,1	9,3	8,9	9,0	9,0		
			8,7	9,0	9,0	8,7	9,3	9,1		
5 6 7 8	Abi 0/16	Oolith	B 65	5,0	5,1	5,0	5,3	5,1	5,3	5,4
					4,9	5,1	5,3	4,9	4,8	5,5
		Oolith	B 45	5,0	5,1	5,0	5,4	5,1	5,0	5,2
					5,0	5,5	5,5	5,0	5,1	5,3
Diabas	B 65	5,0	5,0	5,3	5,1	5,0	4,9	5,0		
			4,6	4,9	5,2	4,6	5,0	5,0		
Diabas	B 45	5,0	4,7	4,8	5,2	4,7	5,1	5,2		
			4,9	5,1	4,7	4,9	5,0	5,2		
9 10 11 12	SMA 0/11	Oolith	B 65	9,7	9,1	9,4	9,2	9,1	9,7	9,7
					9,7	9,6	9,6	9,7	9,4	9,4
		Oolith	PmB 65	9,7	9,4	9,4	10,1	9,4	10,8	10,4
					9,9	9,7	10,3	9,9	10,1	10,0
Diabas	B 65	9,7	9,1	10,0	9,0	9,1	9,1	9,0		
			9,2	9,3	9,1	9,2	9,5	9,4		
Diabas	PmB 65	9,7	8,9	9,4	9,8	8,9	9,1	8,9		
			9,2	9,7	9,4	9,2	8,6	9,7		

Tabelle 7: Festgestellter Sandgehalt in Gew.-% nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im Wärmeschrank und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittelsorte	Sandgehalt nach Eignungsprüfung	konventioneller Wärmeschrank					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1 2 3 4	AB 0/8	Oolith	B 80	40,0	40,2 39,8	42,4 41,1	40,9 39,4	40,2 39,8	42,0 40,5	39,9 39,3
		Oolith	B 65	40,0	41,9 41,1	40,4 40,4	40,2 40,0	41,9 41,1	42,0 40,6	40,9 40,6
		Diabas	B 80	40,0	40,3 39,5	40,1 39,6	40,2 40,3	40,3 39,5	40,5 39,9	39,2 40,4
		Diabas	B 65	40,0	40,3 40,1	40,5 40,4	40,8 40,6	40,3 40,1	40,2 40,6	40,4 40,5
5 6 7 8	Abi 0/16	Oolith	B 65	20,0	19,1 17,8	18,9 19,3	19,4 18,9	19,1 17,8	19,1 17,1	19,4 19,8
		Oolith	B 45	20,0	18,5 18,8	18,4 20,3	19,8 20,9	18,5 18,8	18,7 19,2	19,0 18,4
		Diabas	B 65	20,0	20,5 18,4	21,1 18,2	20,3 20,7	20,5 18,4	19,2 19,2	19,2 19,9
		Diabas	B 45	20,0	18,8 19,4	19,3 20,2	21,3 18,1	18,8 19,4	19,7 19,5	20,6 20,5
9 10 11 12	SMA 0/11	Oolith	B 65	15,0	15,4 15,2	15,2 15,1	15,2 15,9	15,4 15,2	14,7 15,2	14,6 15,3
		Oolith	PmB 65	15,0	14,3 14,0	14,8 13,5	14,7 15,5	14,3 14,0	15,4 14,5	14,9 14,4
		Diabas	B 65	15,0	15,5 15,5	17,4 15,4	15,1 15,2	15,5 15,5	15,1 16,2	14,7 16,0
		Diabas	PmB 65	15,0	14,7 15,7	14,9 16,3	16,2 15,6	14,7 15,7	15,1 14,8	15,4 16,3

Tabelle 8 : Festgestellter Splittgehalt in Gew.-% nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im Wärmeschrank und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Splitt-gehalt nach Eignungs-prüfung	konventioneller Wärmeschrank					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1 2 3 4	AB 0/8	Oolith	B 80	50,0	50,8 51,2	47,6 49,3	50,0 51,1	50,8 51,2	49,4 50,2	50,7 51,1
		Oolith	B 65	50,0	48,9 49,8	50,4 50,6	50,9 51,0	48,9 49,8	48,9 50,1	49,8 50,3
		Diabas	B 80	50,0	50,4 51,2	50,1 50,9	50,4 50,0	50,4 51,2	49,7 50,3	51,2 49,8
		Diabas	B 65	50,0	50,8 51,2	50,4 50,6	49,9 50,4	50,8 51,2	50,8 50,1	50,6 50,4
5 6 7 8	Abi 0/16	Oolith	B 65	75,0	75,8 77,3	76,1 75,6	75,3 75,8	75,8 77,3	75,6 78,1	75,2 74,7
		Oolith	B 45	75,0	76,4 76,2	76,6 74,2	74,8 73,6	76,4 76,2	76,3 75,7	75,8 76,3
		Diabas	B 65	75,0	74,5 77,0	73,6 76,9	74,6 74,1	74,5 77,0	75,9 75,8	75,8 75,1
		Diabas	B 45	75,0	76,5 75,7	75,9 74,7	73,5 77,2	76,5 75,7	75,2 75,5	74,2 74,3
9 10 11 12	SMA 0/11	Oolith	B 65	75,0	75,5 75,1	75,4 75,3	75,6 74,5	75,5 75,1	75,6 75,4	75,7 75,3
		Oolith	PmB 65	75,0	76,3 76,1	75,8 76,8	75,2 74,2	76,3 76,1	73,7 75,4	74,7 75,6
		Diabas	B 65	75,0	75,4 75,3	72,6 75,3	75,9 75,7	75,4 75,3	75,8 74,3	76,3 74,6
		Diabas	PmB 65	75,0	76,4 75,1	75,7 74,0	74,0 75,0	76,4 75,1	75,8 76,6	75,7 74,0

3.2.3 Erweichungspunkt Ring und Kugel

Bereits bei der wissenschaftlichen Begleitung des abzuwickelnden Untersuchungsprogrammes war abzusehen, daß die Viskosität des im Asphalt enthaltenen Bitumens die wichtigste Eigenschaft sein würde, die durch die Art der Wiedererwärmung im Wärmeschrank beeinflußt werden könnte. Aus diesem Grunde wurden die festgestellten Erweichungspunkte Ring und Kugel unter dem Gesichtspunkt der übersichtlichen Dokumentation und der weiteren Datenverarbeitung umfassend in mehreren Tabellen zusammengestellt.

Die Tabellen 9 und 10 enthalten alle Einzelwerte.

Tabelle 9 : Einzelwerte des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung bei einer Temperatur von T = 105 °C im konventionellen Wärmeschrank und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel		konventioneller Wärmeschrank; T = 105 °C												
			Sorte	EP RuK [°C]	0 h				4 h				16 h				
					1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	
1		Oolith	B 80	47,8	50,0	50,0	49,5	50,5	52,5	53,0	51,0	51,0	54,0	54,0	53,0	53,0	53,0
2	AB 0/8	Oolith	B 65	51,5	54,0	54,5	56,0	56,5	57,5	58,0	56,0	56,0	61,0	61,0	61,5	61,0	61,0
3		Diabas	B 80	47,8	51,0	51,0	51,0	51,0	53,0	53,0	52,0	52,5	54,0	54,0	54,5	55,0	55,0
4		Diabas	B 65	51,5	54,5	55,0	55,5	55,5	54,5	55,0	54,5	55,0	57,5	57,5	57,5	58,5	59,0
5		Oolith	B 65	51,5	50,5	50,5	51,5	52,0	54,0	54,0	53,0	53,5	54,5	54,5	55,0	55,5	55,5
6	Abi 0/16	Oolith	B 45	57,3	58,8	60,0	60,0	60,5	61,5	62,0	61,5	62,0	64,5	64,5	65,0	63,5	63,5
7		Diabas	B 65	51,5	56,0	56,0	54,5	55,0	55,5	55,5	56,0	56,0	59,0	59,0	59,5	59,0	59,5
8		Diabas	B 45	57,3	61,0	61,0	62,0	62,0	63,5	64,0	62,5	63,0	66,0	66,0	66,0	65,5	66,0
9		Oolith	B 65	51,5	54,5	54,5	56,0	56,0	56,0	56,0	56,5	57,0	57,5	57,5	57,5	58,0	58,0
10	SMA 0/11	Oolith	PmB 65	50,5	54,5	54,5	55,0	54,5	55,5	56,0	56,0	56,0	58,5	58,5	59,0	-	-
11		Diabas	B 65	51,5	56,0	56,5	57,0	57,0	56,5	57,0	57,5	58,0	59,5	59,5	59,5	59,0	59,0
12		Diabas	PmB 65	50,5	55,5	56,0	53,0	53,5	56,0	56,5	55,5	56,0	58,0	58,0	58,0	58,5	59,0

Tabelle 10 : Einzelwerte des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung bei einer Temperatur von T = 145 °C im konventionellen Wärmeschrank und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel		konventioneller Wärmeschrank; T = 145 °C												
			Sorte	EP RuK [°C]	0 h				4 h				16 h				
					1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	
1		Oolith	B 80	47,8	50,5	50,5	50,5	50,5	54,5	55,5	56,0	54,5	54,5	64,5	65,0	65,5	64,5
2	AB 0/8	Oolith	B 65	51,5	55,0	56,0	56,5	60,0	60,5	60,0	60,0	60,5	60,5	71,0	71,0	72,0	72,0
3		Diabas	B 80	47,8	49,0	49,5	51,0	51,0	56,5	57,0	56,0	56,5	56,5	69,5	69,5	69,0	69,5
4		Diabas	B 65	51,5	56,0	54,5	55,5	62,5	63,0	62,5	62,5	63,0	63,0	77,5	77,5	74,5	75,5
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	51,5	51,5	53,5	54,0	56,5	56,5	56,5	56,5	55,5	56,0	66,5	66,5	65,5	66,0
6		Oolith	B 45	57,3	61,5	62,0	61,0	64,0	64,0	64,0	64,0	66,0	66,0	78,5	79,0	(86,0)*	(87,0)*
7		Diabas	B 65	51,5	56,5	57,0	54,5	59,2	59,8	59,8	59,2	61,0	61,0	(78,0)*	(78,0)*	70,5	71,0
8		Diabas	B 45	57,3	61,0	61,0	61,5	67,0	67,5	67,5	67,0	66,5	67,0	89,5	89,5	89,5	89,5
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	51,5	55,0	56,0	56,0	58,5	59,0	58,5	59,0	58,5	59,0	68,5	69,0	68,0	68,5
10		Oolith	PmB 65	50,5	53,5	54,5	54,5	58,0	58,5	58,0	58,5	58,0	58,0	64,5	65,0	66,5	67,0
11		Diabas	B 65	51,5	56,5	57,0	56,5	61,0	61,5	61,0	61,0	61,5	61,0	70,5	70,5	70,0	70,2
12		Diabas	PmB 65	50,5	55,5	(59,0) ²	(59,5) ²	58,0	57,5	58,0	58,0	57,5	59,0	70,0	71,0	70,5	70,5

* Meßwerte in Glycerin

² Meßwerte als Ausreißer ersatzlos gestrichen

Die Tabelle 11 enthält das aus den verträglichen Einzelwerten gebildete arithmetische Mittel einer jeden Versuchsvariante.

Tabelle 11: Mittelwerte der Erweichungspunkte Ring und Kugel nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und Bindemittelrückgewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel		konventioneller Wärmeschrank					
			Sorte	EP RuK [°C]	T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1	AB 0/8	Oolith	B 80	47,8	50,0	51,9	53,5	50,5	55,1	64,9
2		Oolith	B 65	51,5	55,2	56,9	61,1	55,6	60,2	71,5
3		Diabas	B 80	47,8	51,0	52,6	54,6	50,1	56,5	69,4
4		Diabas	B 65	51,5	55,1	54,8	58,1	56,0	62,8	76,2
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	51,5	51,1	53,6	55,0	52,6	56,1	66,1
6		Oolith	B 45	57,3	59,8	61,8	64,1	61,4	65,0	78,8
7		Diabas	B 65	51,5	55,4	55,8	59,2	55,8	60,2	70,8
8		Diabas	B 45	57,3	61,5	63,2	65,9	61,2	67,0	89,5
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	51,5	55,2	56,4	57,8	55,5	58,8	68,5
10		Oolith	PmB 65	50,5	54,6	55,9	58,8	54,0	58,1	65,8
11		Diabas	B 65	51,5	56,6	57,2	59,2	56,8	61,1	70,3
12		Diabas	PmB 65	50,5	54,5	56,0	58,4	55,5	58,5	70,5

Tabelle 12: Erweichungspunktanstieg aufgrund der Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und Bindemittelrückgewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel		konventioneller Wärmeschrank					
			Sorte	EP RuK [°C]	T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1	AB 0/8	Oolith	B 80	47,8	2,2	4,1	5,7	2,7	7,3	17,1
2		Oolith	B 65	51,5	3,7	5,4	9,6	4,1	8,7	20,0
3		Diabas	B 80	47,8	3,2	4,8	6,8	2,3	8,7	21,6
4		Diabas	B 65	51,5	3,6	3,3	6,6	4,5	11,3	24,7
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	51,5	-0,4	2,1	3,5	1,1	4,6	14,6
6		Oolith	B 45	57,3	2,5	4,5	6,8	4,1	7,7	21,5
7		Diabas	B 65	51,5	3,9	4,3	7,7	4,3	8,7	19,3
8		Diabas	B 45	57,3	4,2	5,9	8,6	3,9	9,7	32,2
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	51,5	3,7	4,9	6,3	4,0	7,3	17,0
10		Oolith	PmB 65	50,5	4,1	5,4	8,3	3,5	7,6	15,3
11		Diabas	B 65	51,5	5,1	5,7	7,7	5,3	9,6	18,8
12		Diabas	PmB 65	50,5	4,0	5,5	7,9	5,0	8,0	20,0

In Tabelle 12 wird der Erweichungspunktanstieg auf Grund der Mischgutherstellung, der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und der Bindemittelrückgewinnung in bezug auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel des eingesetzten Bitumens aufgelistet. Die Tabelle 13 enthält schließlich den Erweichungspunktanstieg alleine aufgrund der Wiedererwärmung des Mischgutes im konventionellen Wärmeschrank. Diese Werte sind rechnerisch aus der Differenzenbildung der Analysenwerte der bei definierter Temperatur für eine Dauer von 4 Stunden beziehungsweise 16 Stunden beanspruchten Proben gegenüber den entsprechenden Analysenwerten der nicht beanspruchten Mischgutproben entstanden.

Das Phänomen der Nachhärtung des im Asphalt enthaltenen Bindemittels läßt sich anhand der Tabellen 12 beziehungsweise 13 sehr anschaulich erläutern. Für eine varianzanalytische Betrachtung, bei der auch der Einfluß unterschiedlicher Effekte der Wiedererwärmung quantifiziert werden könnte, muß auf die vollständigen Datensätze der Tabellen 9 und 10 zurückgegriffen werden.

Tabelle 13: Erweichungspunktanstieg alleine aufgrund der Wiedererwärmung des Mischguts im konventionellen Wärmeschrank

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel		konventioneller Wärmeschrank					
			Sorte	EP RuK [°C]	T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1	AB 0/8	Oolith	B 80	47,8	-	1,9	3,5	-	4,6	14,4
2		Oolith	B 65	51,5	-	1,7	5,9	-	4,6	15,9
3		Diabas	B 80	47,8	-	1,6	3,6	-	6,4	19,3
4		Diabas	B 65	51,5	-	-0,3	3,0	-	6,8	20,2
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	51,5	-	2,5	3,9	-	3,5	13,5
6		Oolith	B 45	57,3	-	2,0	4,3	-	3,6	17,4
7		Diabas	B 65	51,5	-	0,4	3,8	-	4,4	15,0
8		Diabas	B 45	57,3	-	1,7	4,4	-	5,8	28,3
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	51,5	-	1,2	2,6	-	3,3	13,0
10		Oolith	PmB 65	50,5	-	1,3	4,2	-	4,1	11,8
11		Diabas	B 65	51,5	-	0,6	2,6	-	4,3	13,5
12		Diabas	PmB 65	50,5	-	1,5	3,9	-	3,0	15,0

Graphisch dargestellt sind in den Abbildungen 2, 3 und 4 die Erweichungspunktanstiege aufgrund der Nachhärtung durch die Mischgutherstellung, gegebenenfalls der Wiedererwärmung des Mischguts im konventionellen Wärmeschrank und der Wiedergewinnung des Bitumens für die Mischgutarten Asphaltbeton 0/8, Asphaltbinder 0/16 und Splittmastixasphalt 0/11.

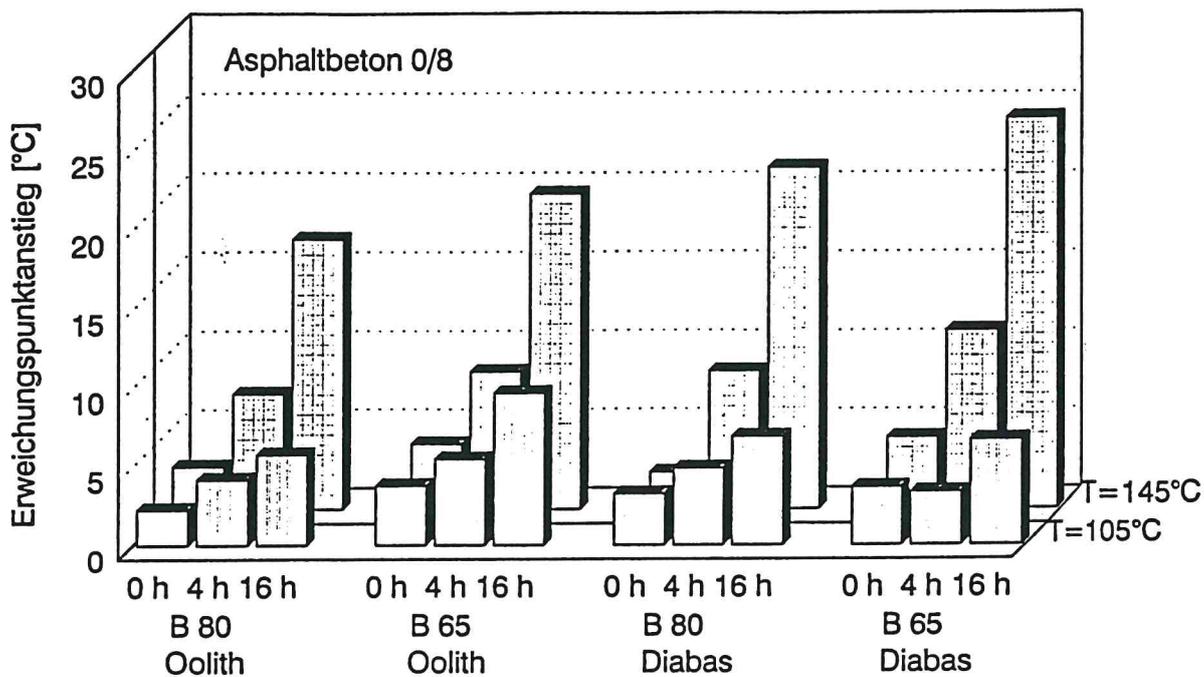


Abb. 2: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Asphaltbetonen 0/8 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

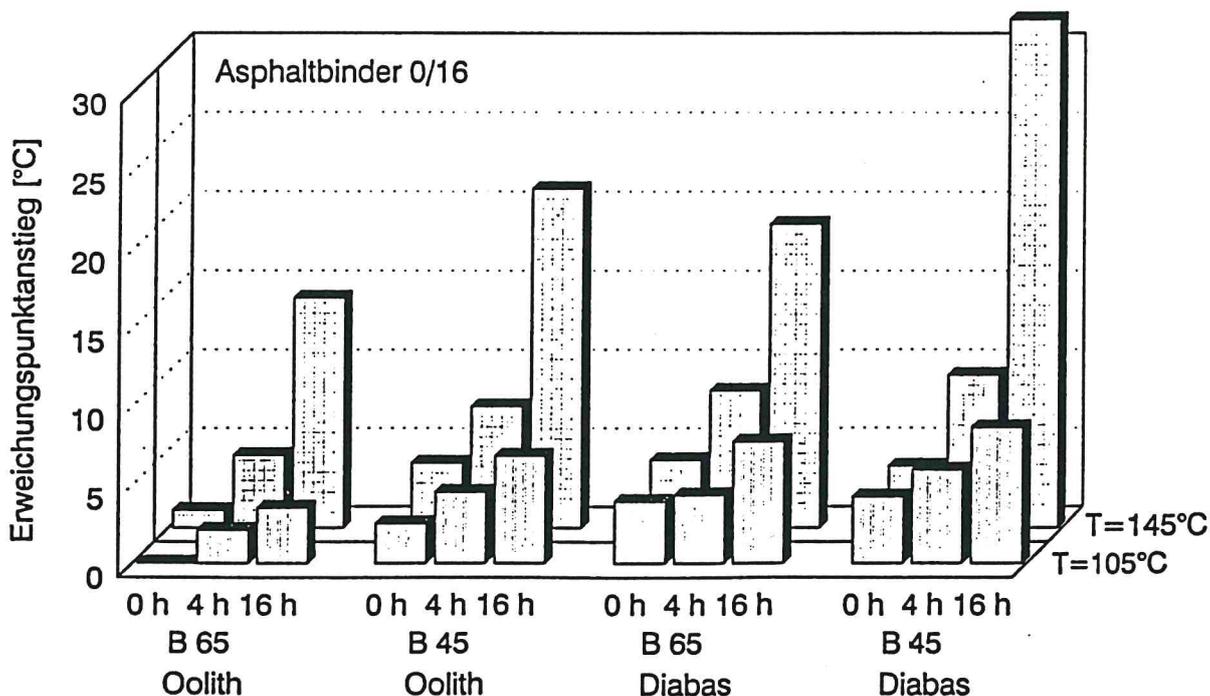


Abb. 3: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Asphaltbindern 0/16 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

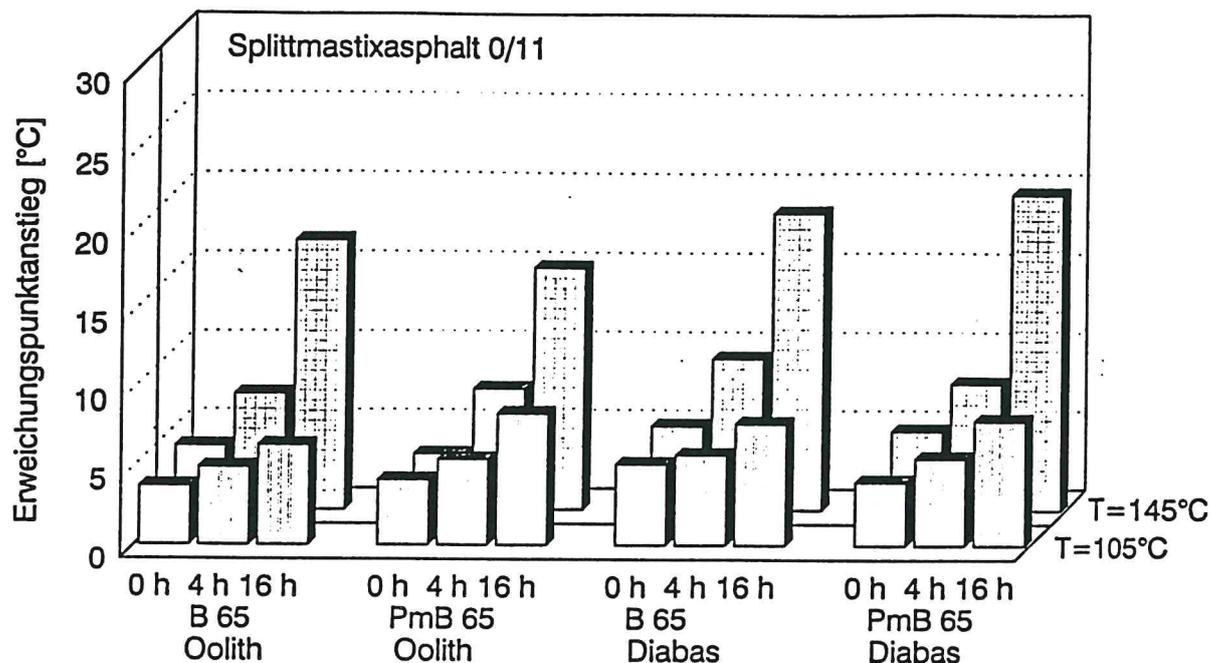


Abb. 4: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Splittmastixasphalten 0/11 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

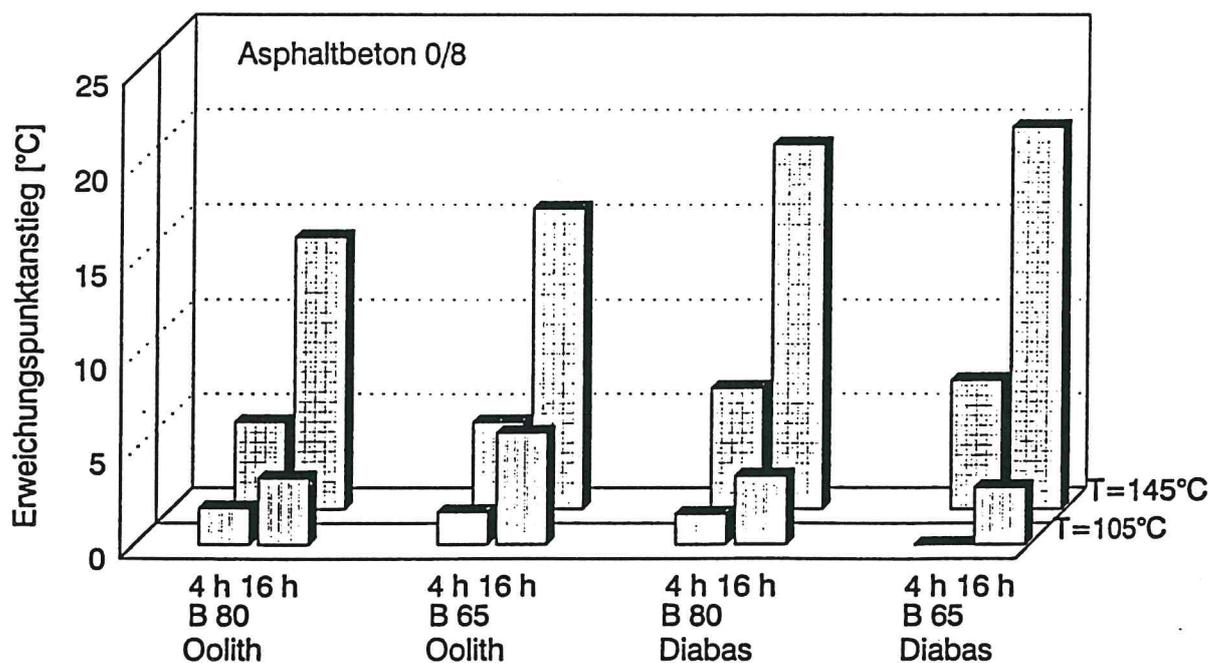


Abb. 5: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Asphaltbetonen 0/8 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

Die jeweils ersten der drei Säulen zeigen den Erweichungspunktanstieg durch die Verarbeitung des Bitumens; Herstellen des Mischguts im Labor: Temperieren des Bitumens auf eine Temperatur von $T = 140\text{ °C}$, Erwärmung der Mineralstoffe auf eine Temperatur von $T = 160\text{ °C}$ und Vermischen der beiden Baustoffkomponenten zu einem homogenen Mischgut für die Zeitdauer von ungefähr 2,5 Minuten. Dabei ereignet sich eine Nachhärtung des Bitumens in der Größenordnung von im Mittel 3,5 K bis zu Werten von maximal 5,3 K. In den genannten Werten ist eine eventuelle Verhärtung durch die Wiedergewinnung des Bitumens mit dem Lösemittel Trichlorethen bereits enthalten.

Die Größe der Verhärtung durch die Herstellung läßt sich nicht sicher beschreiben, da das Versuchsprogramm auf die Beantwortung dieser Fragen nicht abgestimmt war. Aber offensichtlich ist die Nachhärtung abhängig

- von der Bitumensorte, harte Bindemittel reagieren möglicherweise empfindlicher gegenüber thermischen Beanspruchungen als weiche Bindemittel, und
- von der Bindemittelmenge, denn diese wurde über die Mineralstoffart zu Erzielung gleicher Hohlraumgehalte einer Mischgutart verändert.

Die mit Oolith hergestellten Asphaltgemische benötigen zur Erzielung eines gleichen Hohlraumgehaltes im Marshall-Probekörper aufgrund der deutlich geringeren Gesteinsraumdicke einen um 0,8 Gew.-% beziehungsweise 1,0 Gew.-% erhöhten Bindemittelgehalt. Die mit Diabas und folglich mit den niedrigeren Bindemittelgehalten hergestellten Asphaltvarianten sind wegen des dünneren Mörtelfilmes alterungsempfindlicher als der Asphalt aus Oolith mit dem dicken Mörtelfilm. Auch diese Ergebnisse scheinen plausibel.

Ein systematischer Einfluß der Mischgutart konnte nicht festgestellt werden. Für den relativ hohlraumreichen Asphaltbinder wurden wenigstens am wiedergewonnenen Bindemittel keine größeren Anstiege des Erweichungspunktes Ring und Kugel festgestellt als bei dem (im verdichteten Zustand) vergleichsweise dichten Asphaltbeton 0/8. Lediglich das Bitumen aus dem Splittmastixasphalt 0/11 zeigt etwas höhere Erweichungspunkte Ring und Kugel.

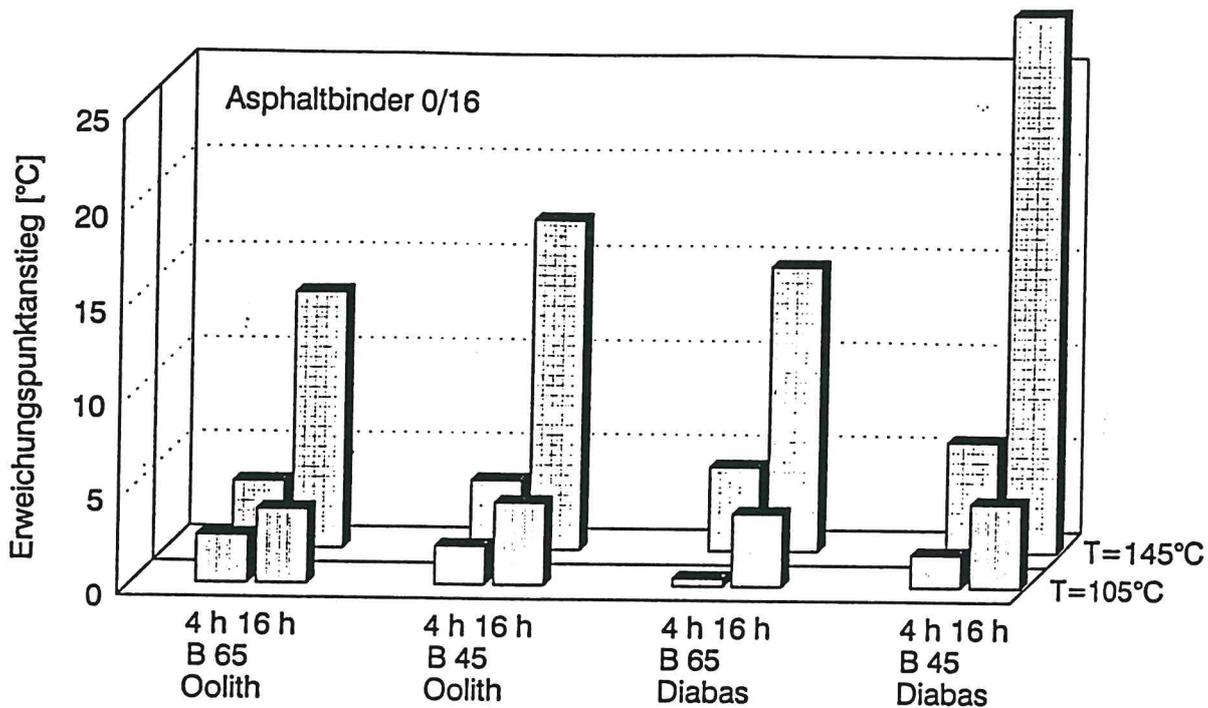


Abb. 6: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Asphaltbindern 0/16 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

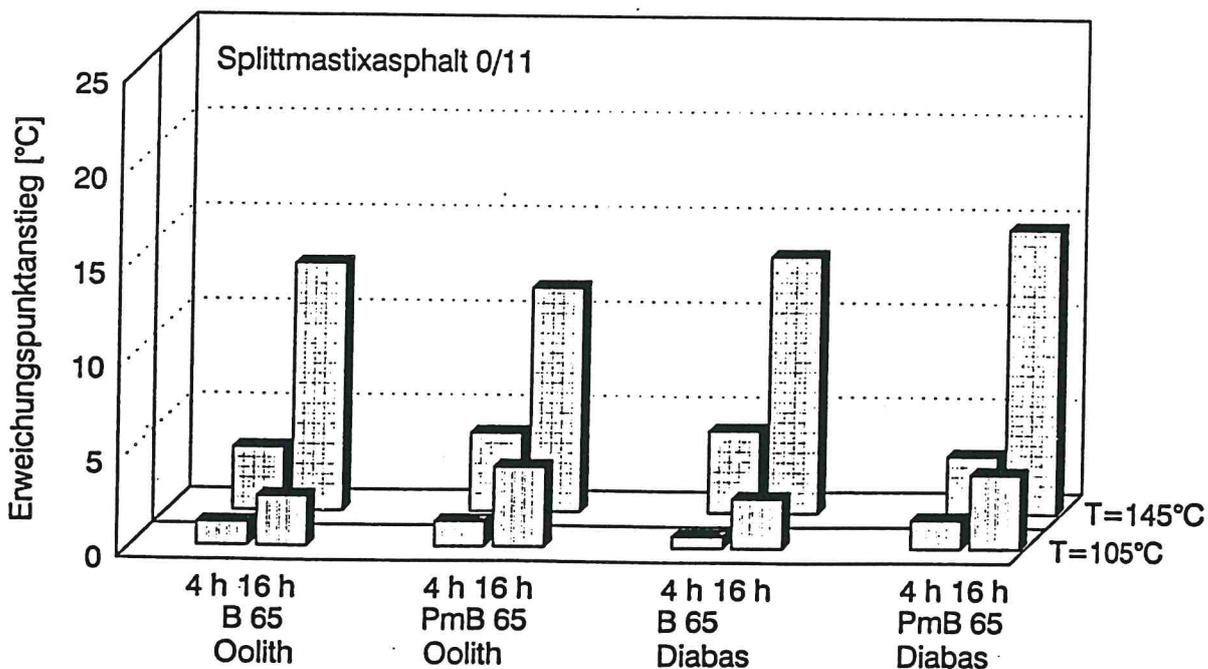


Abb. 7: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Splittmastixasphalten 0/11 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

Im Gegensatz zur Mischgutherstellung bewirkt die Wiedererwärmung der Asphaltgemische im konventionellen Wärmeschrank in Abhängigkeit von der Temperatur und der Expositionsdauer eine nahezu dramatische Verhärtung des Bindemittels.

Histogrammisch dargestellt sind in den Abbildungen 5, 6 und 7 für jede Mischgutsorte getrennt die aus der Tabelle 13 entnommenen Erweichungspunktanstiege aufgrund der reinen Wärmelagerung, also abzüglich der bereits diskutierten Erhöhung infolge der Herstellung des Asphaltes und der Wiedergewinnung des Bitumens.

Unter Zuhilfenahme der Varianzanalysen der mehrfachen Klassifikation gelingt es, die Einflüsse der Wiedererwärmung - Temperatur und Expositionsdauer - in Abhängigkeit von der Mischgutart, der Mineralstoffart und der Bindemittelsorte zu quantifizieren.

Dazu wurden mit den Zahlenwerten der Tabellen 9 und 10 eine Reihe von Varianzanalysen der vierfachen und fünffachen Klassifikation mit unterschiedlichen Fragestellungen durchgeführt.

Eine Varianzanalyse der fünffachen Klassifikation wird mit dem Ziel durchgeführt, die Einflüsse aus der Variation

- der Mischgutart: Asphaltbeton, Asphaltbinder oder Splittmastixasphalt,
- der Mineralstoffart: Oolith oder Diabas,
- der Bitumensorte: härtere oder weichere Sorten,
- der Expositionsdauer: 4 Stunden oder 16 Stunden,
- der Temperatur: 105 °C oder 145 °C sowie
- aus kombinierten Einflüssen mehrerer möglicher Einflußfaktoren gleichzeitig zu identifizieren und zu quantifizieren.

Die Varianzanalysen der vierfachen Klassifikation wurden mit dem Ziel durchgeführt, die aufgrund der Varianzanalyse der fünffachen Klassifikation gefundenen Wechselwirkungen mehrerer Einflußgrößen vertieft interpretieren zu können. Zu diesem Zwecke, wurden drei Varianzanalysen der vierfachen Klassifikation durchgeführt:

- eine Varianzanalyse mit dem Datensatz für den Erweichungspunkt Ring und Kugel, festgestellt an Bitumen aus bei 105 °C erwärmten Proben,
- eine Varianzanalyse mit dem Datensatz für den Erweichungspunkt Ring und Kugel an Bitumen, zurückgewonnen aus bei einer Temperatur von 145 °C erwärmten Proben, sowie
- eine Varianzanalyse mit dem Datensatz für den Erweichungspunkt Ring und Kugel für die Asphaltvarianten mit ausschließlich Bitumen B 65 als Originalbindemittel, weil dieses Bitumen als einziges für alle drei Mischgutarten - Asphaltbeton 0/8, Asphaltbinder 0/16 und Splittmastixasphalt 0/11 - eingesetzt worden ist.

Die Protokolle des Berechnungsschemas der Varianzanalysen sind in Anlage III.1 vollständig beigelegt. Die für die Interpretation der Versuchsergebnisse wichtigsten Ergebnisse sind die Prozentwerte für die Quantifizierung der Stärke des Einflusses einer Einflußgröße auf die Nachhärtung des Bitumens. Daher sind die Prozentanteile einzelner Einflußgrößen an der Gesamtvariation der besseren Anschauung wegen in den Abbildungen 8, 9, 10 und 11 histogrammisch dargestellt.

Die weitestgehende Auswertung, dies ist die Varianzanalyse der fünffachen Klassifikation, benennt als wesentlichste Einflußgröße mit einem Varianzanteil von 20,5 % die Expositionsdauer, gefolgt von der Temperatur mit einem Varianzanteil von 11,6 % und der Bindemittelsorte mit einem Varianzanteil von 6,9 %.

Für die Variation der Mischgutart alleine wird kein Einfluß festgestellt, wohl aber für die Wechselwirkung zwischen Mischgutart und Bindemittelsorte (Varianzanteil 15,3 %). Hierin manifestiert sich offensichtlich der Einfluß der unterschiedlichen Mörtelfilmdicken der Asphaltarten; dünne und harte Mörtelfilme neigen stärker zur Nachhärtung als dicke und weiche Mörtelfilme. Die Wechselwirkung zwischen der Temperatur und der Expositionsdauer besitzt mit 30,5 % den größten Varianzanteil und stellt damit das entscheidende Kriterium für die Nachhärtung des Bitumens im Asphalt dar. Alle weiteren überprüften Wechselwirkungen sind vergleichsweise gering.

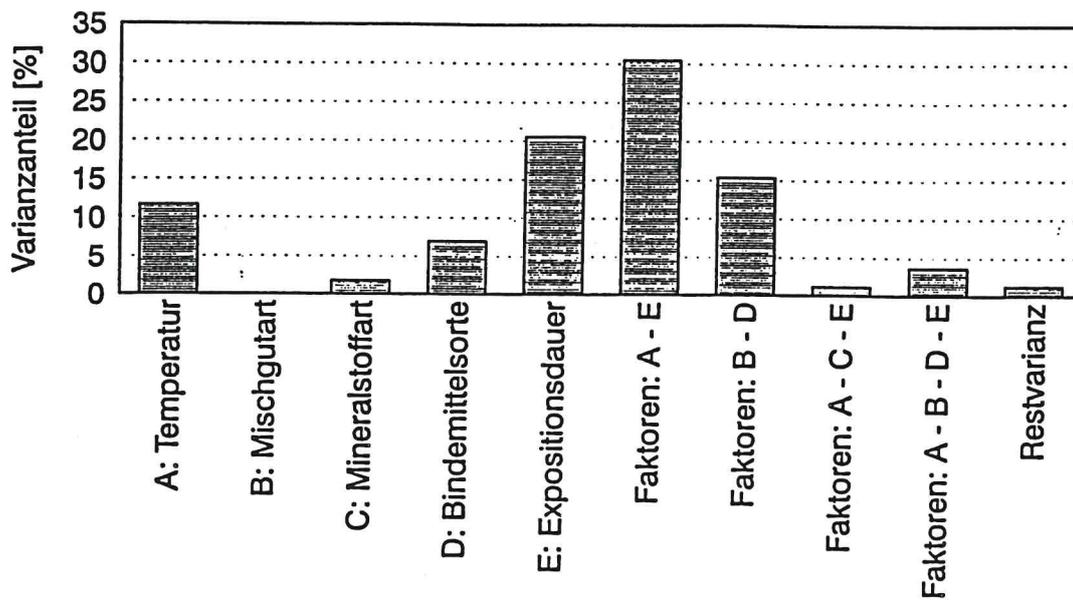


Abb. 8: Einfluß der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel des wiedergewonnenen Bitumens - Varianzanteile der Einflußgrößen und ihrer wichtigsten Wechselwirkungen als Ergebnis einer fünffachen Varianzanalyse

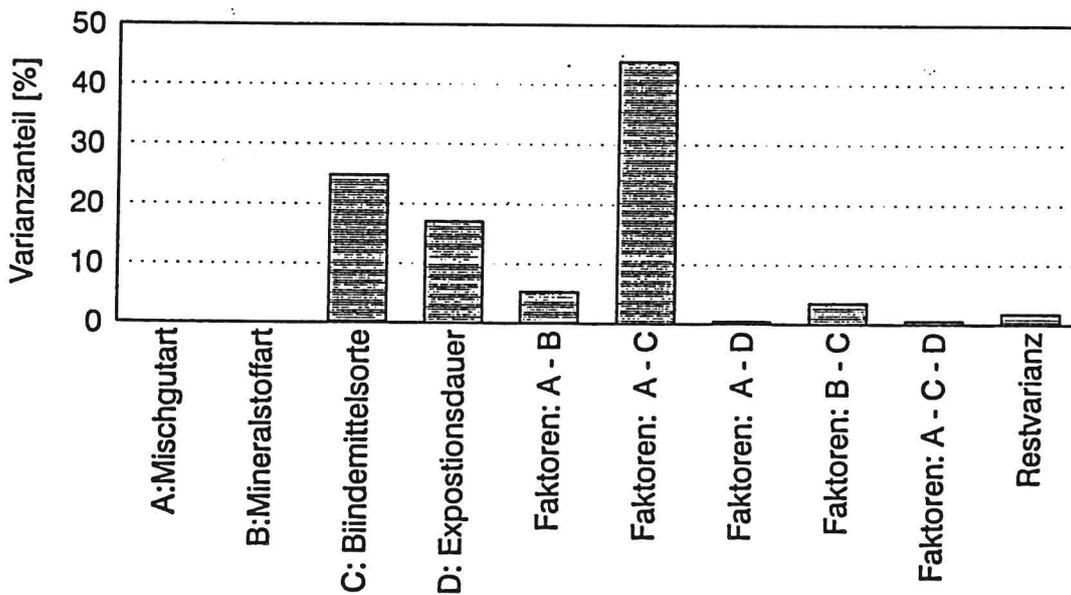


Abb. 9: Einfluß der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel des wiedergewonnenen Bitumens bei einer Temperatur von $T=105\text{ °C}$ - Varianzanteile der Einflußgrößen und ihrer wichtigsten Wechselwirkungen als Ergebnis einer vierfachen Varianzanalyse

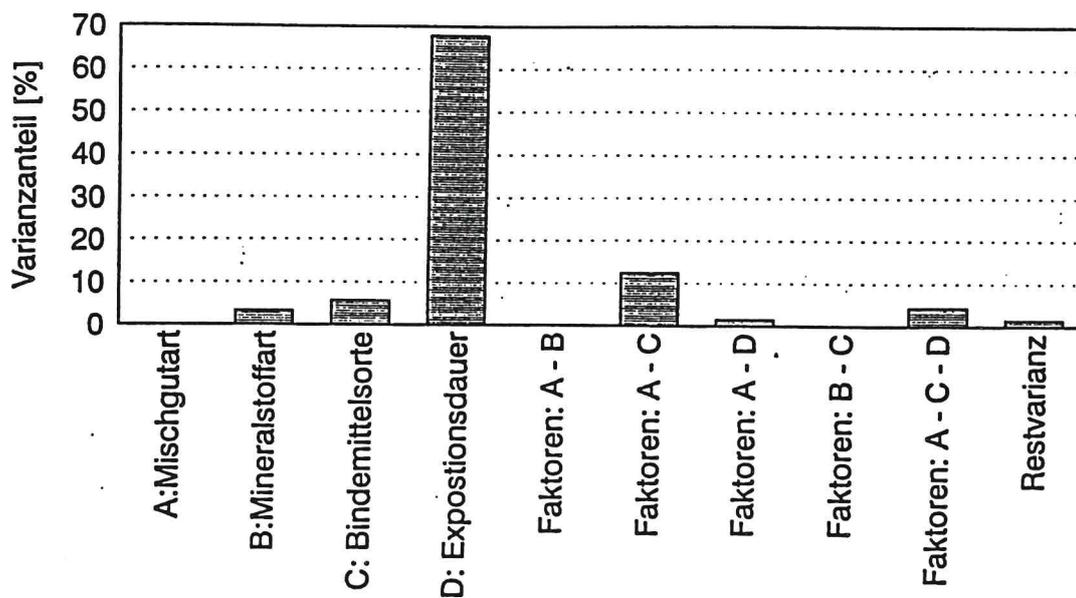


Abb. 10: Einfluß der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel des wiedergewonnenen Bitumens bei einer Temperatur von $T=145\text{ °C}$ - Varianzanteile der Einflußgrößen und ihrer wichtigsten Wechselwirkungen als Ergebnis einer vierfachen Varianzanalyse

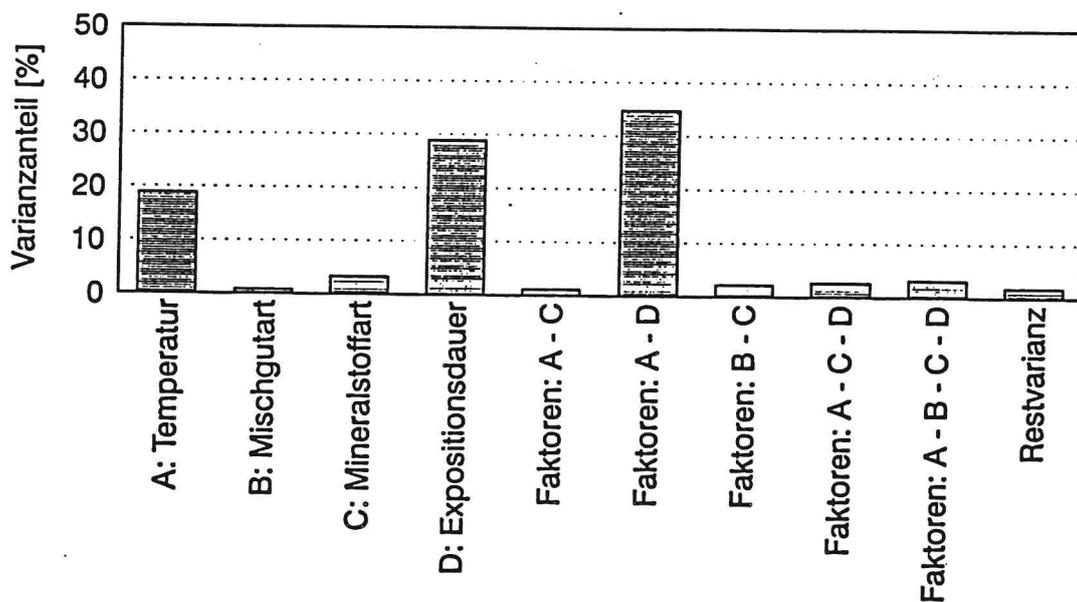


Abb. 11: Einfluß der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel eines Bitumens der Sorte B 65 - Varianzanteile der Einflußgrößen und ihrer wichtigsten Wechselwirkungen als Ergebnis einer vierfachen Varianzanalyse

Erfreulich gering ist auch die Restvarianz ungeklärter Ursache. Sie beträgt nur 1,3 %, so daß davon ausgegangen werden kann, daß alle für die Nachhärtung des Bitumens verantwortlichen Einflußgrößen präzise ohne nennenswerte Versuchsstreuungen erfaßt werden konnten.

Die Wechselwirkung zwischen Expositionsdauer und Temperatur läßt sich mit Hilfe der Ergebnisse der Varianzanalysen der vierfachen Klassifikation (Abbildungen 9 und 10) weiter aufschlüsseln.

Bei einer Temperatur von 105 °C kommt dem Einfluß der Bindemittelsorte mit einem Varianzanteil von 24,8 % die größte Bedeutung zu, gefolgt von dem Einfluß der Expositionsdauer mit einem Varianzanteil von 17,0 %. Mischgutart und Expositionsdauer besitzen bei dieser Temperatur keinen nennenswerten Einfluß auf die Bitumennachhärtung, wohl aber die Wechselwirkungen Mischgutart/Bindemittelsorte mit einem Varianzanteil von 43,8 % und Mischgutart/Mineralstoffart mit einem Varianzanteil von 5,3 %.

Völlig anders stellen sich die Verhältnisse bei der schärferen Temperaturbeanspruchung von $T = 145$ °C dar (Abbildung 10). Bei dieser Temperatur entfällt auf den Einfluß der Expositionsdauer ein Varianzanteil von 67,7 %. Einflüsse aus der Variation der Mischgutsorte existieren in diesem Falle nicht; die Einflüsse aus der Variation der Mineralstoffart und der Bindemittelsorte sind vergleichsweise gering (3,2 % beziehungsweise 5,7 %).

In einer weiteren Varianzanalyse der vierfachen Klassifikation wird für sechs Asphaltvarianten, die mit der Bindemittelsorte B 65 hergestellt worden sind, die Stärke der Einflüsse der variierten Größen auf die Veränderungen des Erweichungspunktes Ring und Kugels überprüft. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 11 graphisch dargestellt. Auch hier wird der dominante Einfluß der Temperatur, der Expositionsdauer und der Wechselwirkung dieser beiden Größen wieder bestätigt. Ein Einfluß der Mineralstoffart wird ebenfalls gefunden, wobei aber letztlich die durch die Wahl der unterschiedlichen Gesteinsarten verursachten unterschiedlichen Mörtelfilmdicken angesprochen werden.

Zusammenfassend ist zur Nachhärtung des Bitumens aufgrund der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank festzustellen:

- Der Einfluß der Wiedererwärmung der Asphaltproben auf die Viskosität des Bindemittels ist bei einer Temperatur von $T = 105 \text{ °C}$ und einer Expositionsdauer von 4 Stunden verhältnismäßig gering; bei einer Verlängerung der Expositionsdauer über Nacht, das heißt für eine Periode von 16 Stunden, ist die Nachhärtung deutlich größer und beträgt mindestens 2,6 K (SMA/Oolith oder Diabas/B65) bis zu 5,9 K (AB/Oolith/B 65).
- Werden die Asphaltproben bei einer Temperatur von 145 °C erwärmt, so können Erweichungspunktanstiege von bis zu 6,8 K (AB 0/8/Diabas/B65) bei einer Expositionsdauer von 4 Stunden bis sogar 28,3 K bei einer Lagerung des Mischguts über Nacht (Abi/Diabas/B45) festgestellt werden.

Ferner kann den Säulendiagrammen folgendes entnommen werden:

- Bei harten Bindemitteln stellen sich bei größeren Expositionsdauern meistens höhere Anstiege ein als bei den weicheren Bindemitteln.
- Bei Asphalten mit Diabas werden aufgrund der geringeren Bindemittelgehalte und der damit dünneren Mörtelfilme bei größeren Expositionsdauern höhere Anstiege festgestellt als bei Asphalten mit Oolith mit dem dickeren Mörtelfilm.
- Der Einfluß der Mischgutart ist vergleichsweise gering. Dennoch ist nicht zu übersehen, daß der durchschnittliche Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel beim Bitumen aus dem Splittmastixasphalt unabhängig von den Expositionsbedingungen stets am geringsten ausgefallen ist, was zweifelsfrei auf die dickeren Mörtelfilme zurückgeführt werden kann. Ein ausgeprägter Einfluß des Hohlraumgehaltes (im verdichteten Zustand) ist nicht erkennbar.

3.2.4 Penetration

Die an den aus den wiedererwärmten Asphaltvarianten zurückgewonnenen Bindemitteln gemessenen Einzelwerte für die Penetration sind in Tabelle 14, die mit diesen beiden Einzelwerten berechneten arithmetischen Mittel sind in Tabelle 15 zusammengestellt. Des weiteren wurden zur Erleichterung der Interpretation der

Tabelle 14: Festgestellte Penetration in 1/10 mm nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und Wiedergewinnung (Einzelwerte)

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittelsorte	Penetration des Originalbitumens	konventioneller Wärmeschrank					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	59	52	45	59	42	17
					62	54	45	62	42	17
					44	35	34	44	29	19
					45	36	34	45	29	19
3	Diabas	B 80	82	67	50	41	67	38	14	
				60	49	41	60	38	14	
4	Diabas	B 65	52	40	37	33	40	27	16	
				41	38	31	41	26	17	
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	53	41	35	53	33	18
					50	41	36	50	33	18
6	Abi 0/16	Oolith	B 45	36	32	25	19	32	24	12
					31	24	19	31	23	12
7	Diabas	B 65	52	38	34	30	38	24	15	
				39	33	29	39	26	15	
8	Diabas	B 45	36	30	23	21	30	22	12	
				28	23	20	28	21	13	
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	39	35	30	39	32	21
					41	33	30	41	33	21
10	SMA 0/11	Oolith	PmB 65	86	64	54	52	64	46	27
					64	54	52	64	46	27
11	Diabas	B 65	52	39	34	29	39	29	17	
				36	34	28	39	29	18	
12	Diabas	PmB 65	86	64	52	47	64	46	26	
				65	52	48	65	45	26	

Ergebnisse Tabellen hergestellt, in denen die Verminderung der Penetration zahlenmäßig dargestellt wird.

Tabelle 15: Festgestellte Penetration in 1/10 mm nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und Wiedererwärmung (arithmetische Mittel)

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Penetration des Originalbitumens	konventioneller Wärmeschrank					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	61	53	45	61	42	17
2		Oolith	B 65	52	45	36	34	45	29	19
3		Diabas	B 80	82	63	50	41	63	38	14
4		Diabas	B 65	52	41	38	32	41	26	16
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	51	41	36	51	33	18
6		Oolith	B 45	36	32	24	19	32	23	12
7		Diabas	B 65	52	39	34	30	39	25	15
8		Diabas	B 45	36	29	23	20	29	22	12
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	40	34	30	40	32	21
10		Oolith	PmB 65	86	64	54	52	64	46	27
11		Diabas	B 65	52	38	34	28	38	29	17
12		Diabas	PmB 65	86	64	52	48	64	45	26

Tabelle 16: Festgestellte Verminderung der Penetration in 1/10 mm nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Pene-tration des Original-bitumens	konventioneller Wärmeschrank					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	21	29	37	21	40	65
2		Oolith	B 65	52	7	16	18	7	23	33
3		Diabas	B 80	82	19	32	41	19	44	68
4		Diabas	B 65	52	11	14	20	11	26	36
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	1	11	16	1	19	34
6		Oolith	B 45	36	4	12	17	4	13	24
7		Diabas	B 65	52	13	18	22	13	27	37
8		Diabas	B 45	36	7	13	16	7	14	24
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	12	18	22	12	20	31
10		Oolith	PmB 65	86	22	32	34	22	40	59
11		Diabas	B 65	52	14	18	24	14	23	35
12		Diabas	PmB 65	86	22	34	38	22	41	60

Die Tabelle 16 gibt die absolute Verminderung der Penetration in 1/10 mm aufgrund der Wiedererwärmung der Asphaltvarianten im konventionellen Wärmeschrank in bezug auf den Penetrationswert des Originalbitumens an und berücksichtigt somit die Einflüsse der Mischgutherstellung, der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und der Wiedergewinnung des Bitumens gemäß DIN 1996 Teil 6 mit Trichlorethen als Lösemittel. Die durch die reine Wiedererwärmung der Asphalte verursachte absolute Verminderung der Penetration in 1/10 mm ist in der Tabelle 17 vermerkt. Angegeben ist in dieser Tabelle die Differenz der festgestellten Penetration

des Bitumens aus dem im Wärmeschrank behandelten Asphalt gegenüber den entsprechenden Penetrationswerten der nicht beanspruchten Asphaltprobe, ausgedrückt in der Dimension 1/10 mm. In Anlehnung an DIN 1995, in der die Änderung der Penetration nach thermischer Beanspruchung relativ - das heißt: in Prozent - limitiert ist, wird auch im Rahmen dieses Berichts die festgestellte Verminderung der Penetration infolge Wiedererwärmung der Asphalte im konventionellen Wärmeschrank in Form von %-Werten angegeben (siehe Tabellen 18 und 19).

Tabelle 17: Festgestellte Verminderung der Penetration in 1/10 mm alleine aufgrund der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittelsorte	Penetration des Originalbitumens	konventioneller Wärmeschrank					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	-	8	16	-	19	44
2		Oolith	B 65	52	-	9	11	-	16	26
3		Diabas	B 80	82	-	13	22	-	25	49
4		Diabas	B 65	52	-	3	9	-	15	25
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	-	10	15	-	18	33
6		Oolith	B 45	36	-	8	13	-	9	20
7		Diabas	B 65	52	-	5	9	-	14	24
8		Diabas	B 45	36	-	4	9	-	7	17
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	-	6	10	-	8	19
10		Oolith	PmB 65	86	-	10	12	-	18	37
11		Diabas	B 65	52	-	4	10	-	9	21
12		Diabas	PmB 65	86	-	12	16	-	19	38

Der besseren Anschauung wegen werden die in den Tabellen 18 und 19 dokumentierten Ergebnisse zusätzlich in den Abbildungen 12, 13 und 14 (Zahlenwerte der Tabelle 18) sowie in den Abbildungen 15, 16 und 17 (Zahlenwerte der Tabelle 19) histogrammisch dargestellt.

Tabelle 18: Festgestellte Verminderung der Penetration in % nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Penetration des Originalbitumens	konventioneller Wärmeschrank					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	26	35	45	26	49	79
2		Oolith	B 65	52	13	31	35	13	44	63
3		Diabas	B 80	82	23	39	50	23	54	83
4		Diabas	B 65	52	21	27	38	21	50	69
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	2	21	31	2	37	65
6		Oolith	B 45	36	11	33	47	11	36	67
7		Diabas	B 65	52	25	35	42	25	52	71
8		Diabas	B 45	36	19	36	44	19	39	67
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	23	35	42	23	38	60
10		Oolith	PmB 65	86	26	37	40	26	47	69
11		Diabas	B 65	52	27	35	46	27	44	67
12		Diabas	PmB 65	86	26	40	44	26	48	70

Tabelle 19: Festgestellte Verminderung der Penetration in % alleine aufgrund der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Penetration des Originalbitumens	konventioneller Wärmeschrank					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					0 h	4 h	16 h	0 h	4 h	16 h
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	-	10	20	-	23	54
2		Oolith	B 65	52	-	17	21	-	31	50
3		Diabas	B 80	82	-	16	27	-	30	60
4		Diabas	B 65	52	-	6	17	-	29	48
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	-	19	29	-	35	63
6		Oolith	B 45	36	-	22	36	-	25	56
7		Diabas	B 65	52	-	10	17	-	27	46
8		Diabas	B 45	36	-	11	25	-	19	47
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	-	12	19	-	15	37
10		Oolith	PmB 65	86	-	12	14	-	21	43
11		Diabas	B 65	52	-	8	19	-	17	40
12		Diabas	PmB 65	86	-	14	19	-	22	44

Die jeweils ersten Säulen der Histogramme in den Abbildungen 12, 13 und 14 veranschaulichen die Verminderung der Penetration aufgrund der Mischgutherstellung und der Wiedergewinnung des Bitumens. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, daß das Bitumen aus dem Asphaltmischgut zur Feststellung dieser Werte unmittelbar nach Mischgutherstellung ohne Zwischenschaltung einer Wiedererwärmung zurückgewonnen worden ist. Festgestellt wurde eine Verminderung der Penetration von durchschnittlich 20 %, wobei der größte Einfluß wohl mehr oder weniger zufällig bei der Splittmastixasphalt-Variante mit Diabas und Bitumen der

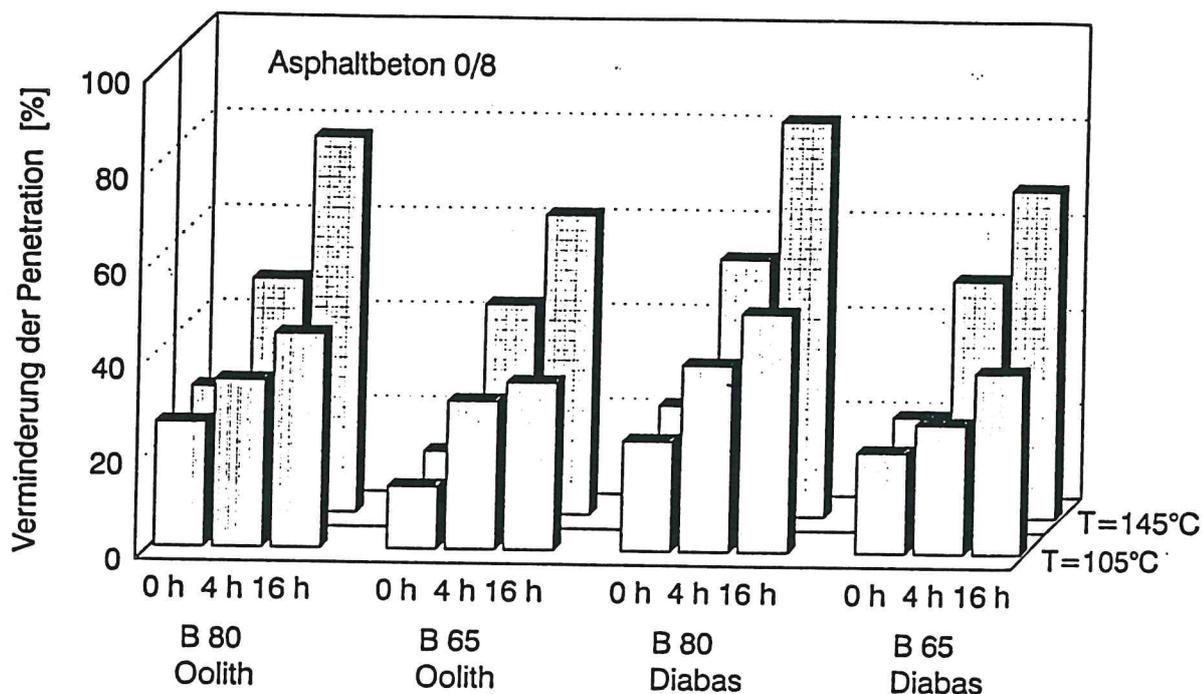


Abb. 12: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Asphaltbetonen 0/8 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

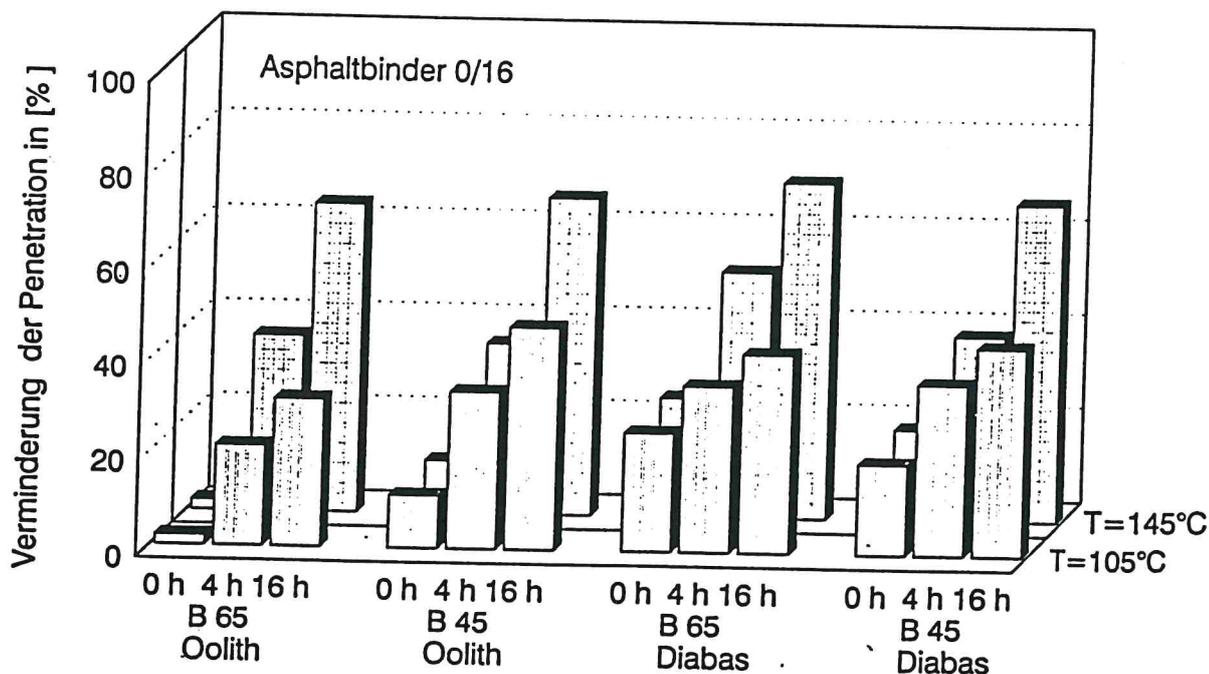


Abb. 13: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Asphaltbindern 0/16 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

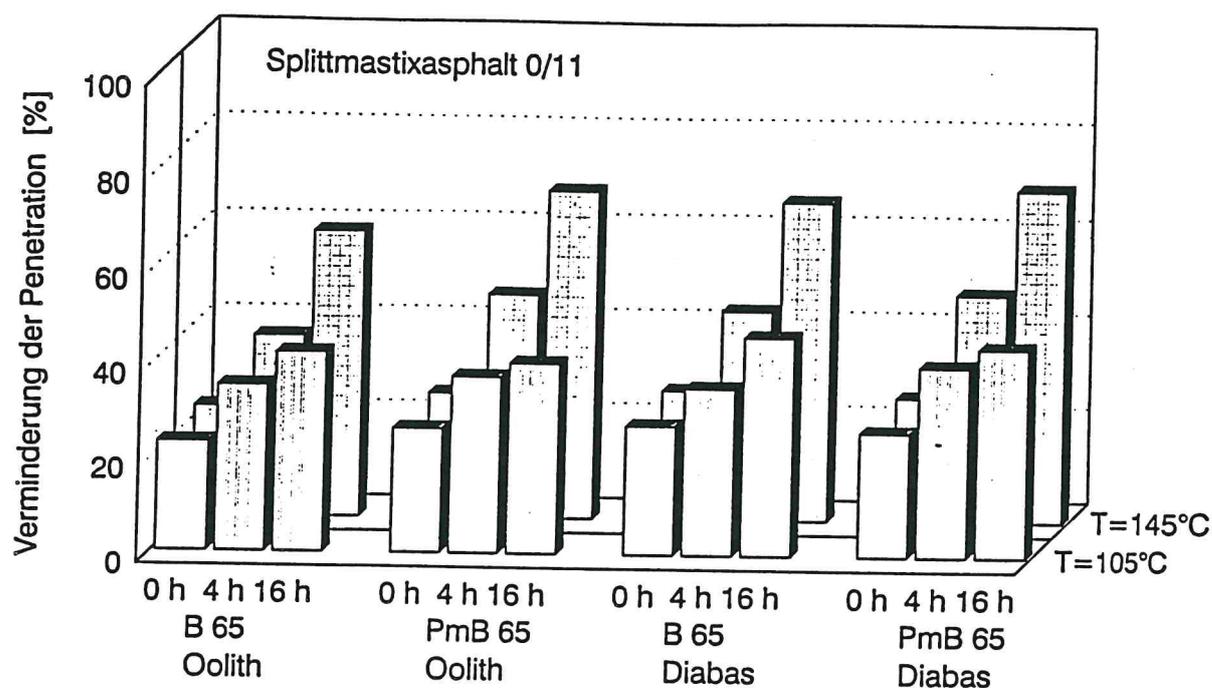


Abb. 14: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Splittmastixasphalten 0/11 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgütherstellung, Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

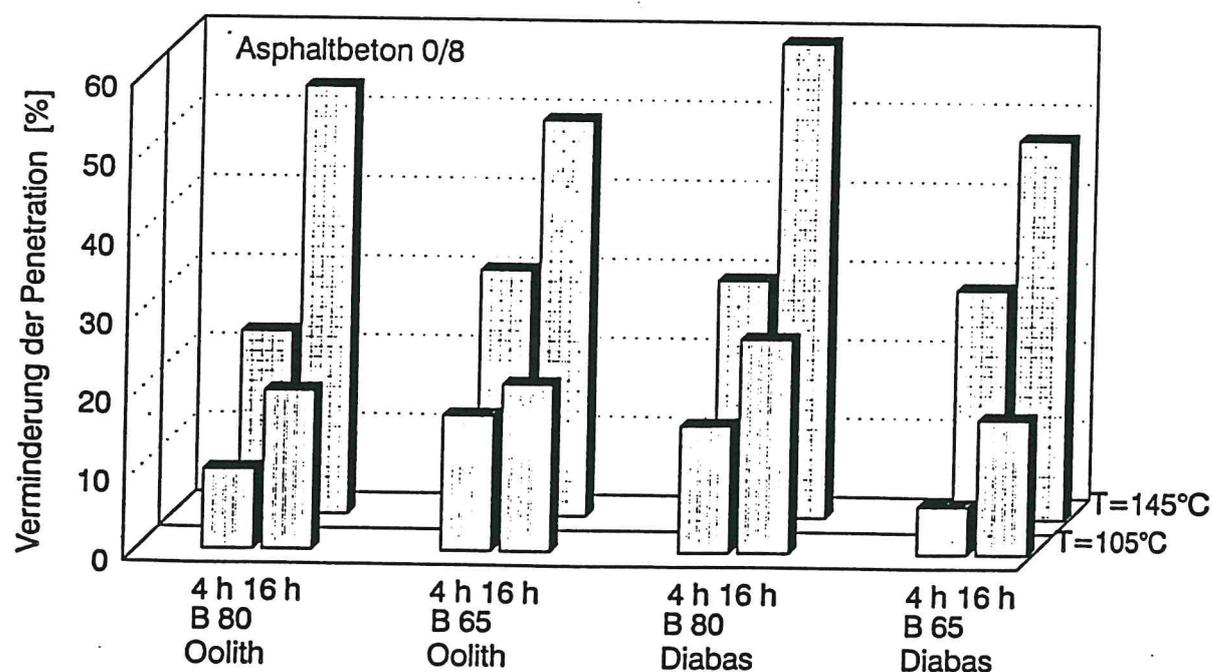


Abb. 15: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Asphaltbetonen 0/8 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

Sorte B 65 (Verminderung 27 %) und der kleinste Einfluß von 2 % bei der Asphaltbinder-Variante mit Oolith und einem Bitumen der Sorte B 65 gefunden worden ist.

Verbindliche Aussagen über die Einflüsse der Mischgutart, der Mineralstoffart und der Bindemittelsorte auf die Verminderung der Penetration können aus dem vorliegenden Zahlenmaterial nicht abgeleitet werden, da das Versuchsprogramm auf die Beantwortung dieser Frage nicht speziell abgestellt worden war. Dennoch sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- Es scheint so, daß die Penetration des Bitumens der Asphaltvarianten mit Diabas durch Mischgutherstellung und Wiedergewinnung in einem stärkeren Maße verändert wird als die Penetration des Bitumens der Asphaltvarianten mit Oolith als Mineralstoff. Hierin manifestiert sich - wie bereits bei der Diskussion über die Ergebnisse der festgestellten Erweichungspunkte Ring und Kugel erwähnt - der Einfluß der unterschiedlichen Bindemittelgehalte und Mörtelfilmdicken. Die mit Diabas hergestellten Asphaltgemische sind wegen des dünneren Mörtelfilms alterungsempfindlicher als die Asphaltvarianten mit Oolith.
- Des weiteren kann mit aller gebotenen Vorsicht aus den Ergebnissen abgeleitet werden, daß das Bitumen der Splittmastixasphalt-Varianten durch eine stärkere Penetrationsverminderung auffällt als das Bitumen der Asphaltbinder-Varianten. An den aus den Asphaltbinder-Varianten wiedergewonnenen Bitumen wird die geringste prozentuale Verminderung der Penetration ermittelt. Dieses Ergebnis ist nicht erklärbar. Da eine statistische Auswertung nicht möglich ist, können experimentelle Unsicherheiten, wie beispielsweise die auffällig geringe Verminderung der Penetration bei den Asphaltbinder-Varianten aus Oolith mit Bitumen der Sorte B 65, nicht hinterfragt werden.
- Ein Einfluß der Bitumensorte beziehungsweise -härte auf die Verminderung der Penetration ist nicht zu erkennen.

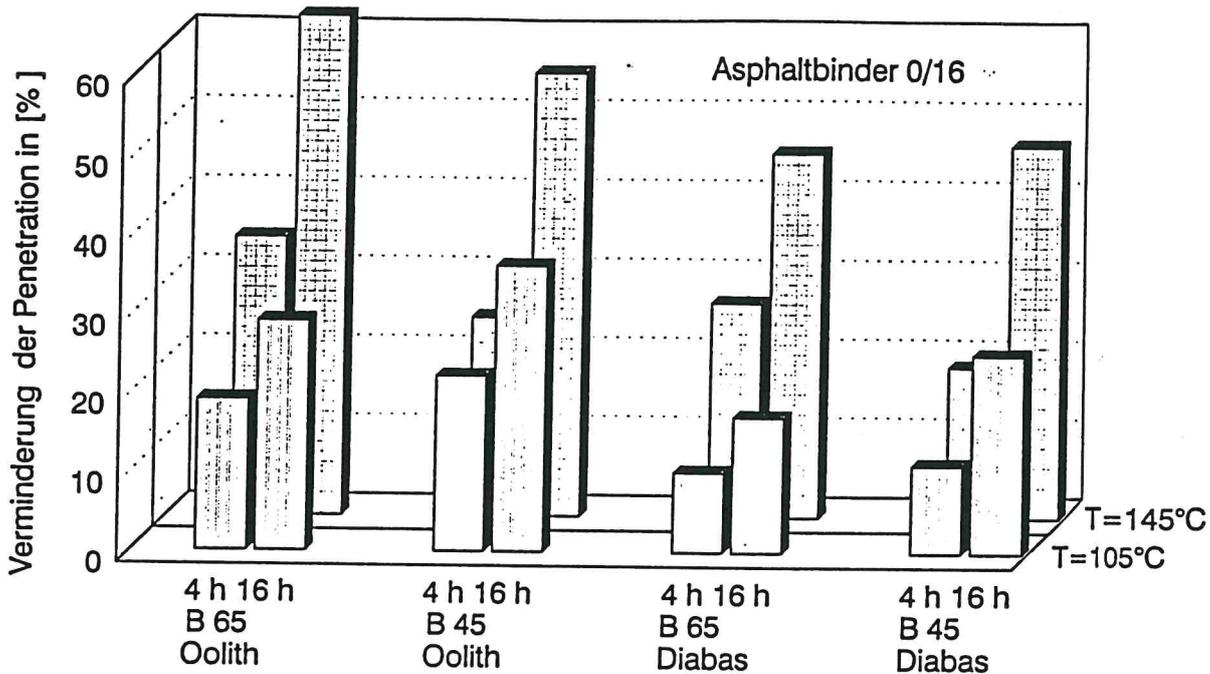


Abb. 16: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Asphaltbindern 0/16 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

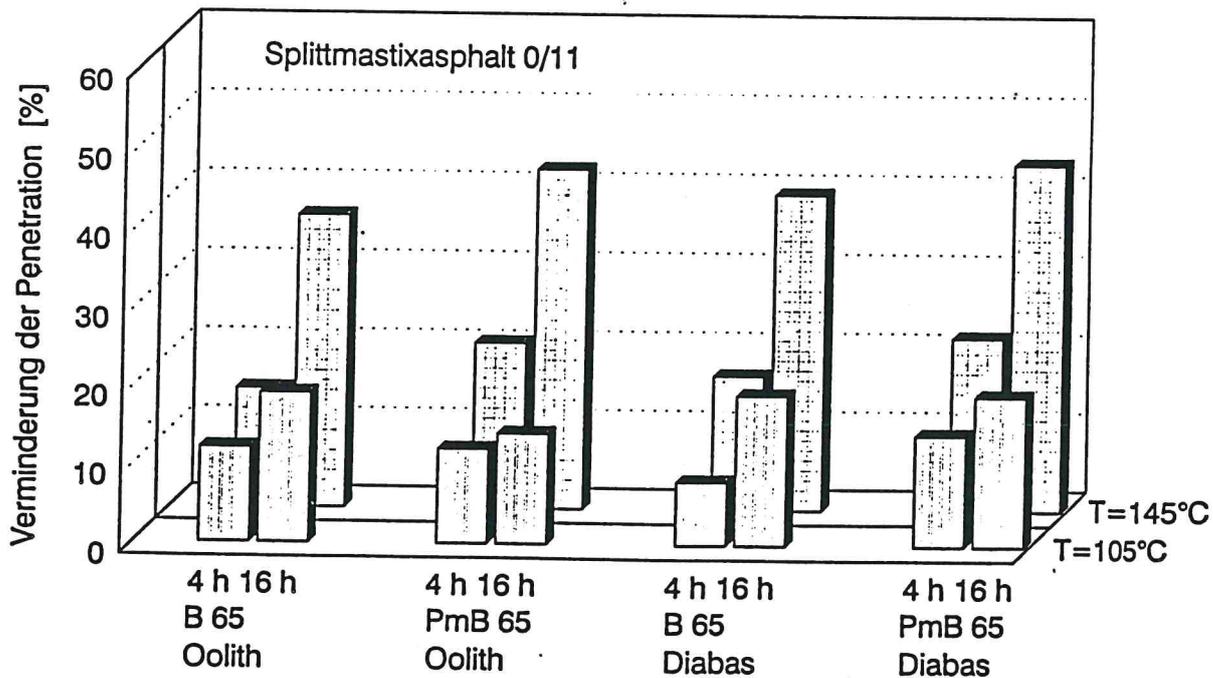


Abb. 17: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Splittmastixasphalten 0/11 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

Die Histogramme der Abbildungen 15, 16 und 17 veranschaulichen die Verminderung der Penetration des Bitumens in den Asphaltvarianten in Abhängigkeit von der Expositionsdauer der Proben und der Temperatur im Wärmeschrank. Der Einfluß der Art der Wiedererwärmung ist erheblich. Selbst eine vergleichsweise schonende Wiedererwärmung bei einer Temperatur von $T = 105 \text{ °C}$ und einer Expositionsdauer von 4 Stunden führt zu einer durchschnittlichen prozentualen Verminderung der Penetration von 13 % bei Werten von mindestens 6 % (AB / Diabas / B65) bis zu 22 % (Abi / Oolith / B45). Bei längeren Expositionsdauern und der Anwendung von höheren Wiedererwärmungstemperaturen steigt der Wert für den prozentualen Penetrationsabfall des wiedergewonnenen Bitumens deutlich, das Bitumen härtet also erheblich nach.

Aus der graphischen Darstellung (Abbildungen 15, 16 und 17) kann in Verbindung mit den in der Tabelle 19 mitgeteilten Zahlenwerten zunächst abgelesen werden, daß der Einfluß der Expositionsdauer auf die Verminderung der Penetration bei höheren Wiedererwärmungstemperaturen größer ist als bei einer kleineren Wiedererwärmungstemperatur. Die größte Veränderung der Penetration allein aufgrund der Wiedererwärmung wurde mit einer prozentualen Verringerung der Penetration um 63 % bei der Asphaltbinder-Variante mit Oolith unter Verwendung eines Bitumens der Sorte B 65 nach Wiedererwärmung bei einer Temperatur von $T = 145 \text{ °C}$ und einer Expositionsdauer von 16 Stunden gefunden.

Hinsichtlich des Einflusses der Mischgutart kann abgelesen werden, daß das Bitumen im Splittmastixasphalt aufgrund der Wiedererwärmung weniger stark nachhärtet als das Bitumen in den Asphaltbinder- beziehungsweise den Asphaltbeton-Varianten.

Zur Identifizierung des Einflusses einzelner Einflußgrößen sowie von Kombinationen mehrerer Einflußgrößen zusammen wurden Varianzanalysen der mehrfachen Klassifikation durchgeführt. Die Varianzanalyse der fünffachen Klassifikation berücksichtigt alle fünf untersuchten Einflußgrößen:

- Faktor A: Temperatur der Wiedererwärmung
Faktor B: Mischgutart
Faktor C: Mineralstoffart
Faktor D: Bindemittelsorte
Faktor E: Expositionsdauer.

Die Varianzanalysen einer vierfachen Klassifikation wurden sowohl für die Datensätze der Penetration für eine Wiedererwärmungstemperatur von $T = 105 \text{ °C}$ als auch für eine Temperatur von $T = 145 \text{ °C}$ durchgeführt. Alle drei Varianzanalysen wurden mit den Werten für die Penetration, festgestellt am wiedergewonnenen Bindemittel, der Tabelle 14 durchgerechnet. Die Berechnungsprotokolle sind in Anlage III.1 beigelegt. Die wichtigsten Ergebnisse hieraus - dies sind die Varianzanteile der einzelnen Einflußgrößen sowie der stärksten Wechselwirkungen mehrerer Einflußgrößen auf die Veränderung der Penetrationswerte - sind in den Histogrammen der Abbildungen 18, 19 und 20 veranschaulicht.

Die Varianzanalyse der fünffachen Klassifikation weist als wesentliche Einzelursachen für die Veränderung der Penetration die Expositionsdauer (Varianzanteil 27,9 %) und die Wiedererwärmungstemperatur (Varianzanteil 5,4 %) aus. Ein schwacher Einfluß der Mineralstoffart wird ebenfalls gefunden (Varianzanteil 1,0 %). Einflüsse aus der Variation von Mischgutart und Bindemittelsorte existieren praktisch nicht, wohl aber bedeutende Wechselwirkungen. Zu nennen ist hier insbesondere die Wechselwirkung A-E zwischen der Wiedererwärmungstemperatur und der Expositionsdauer. Wie bereits ausgeführt, steigt der Einfluß der Expositionsdauer mit der Wiedererwärmungstemperatur an.

Die Ergebnisse der Varianzanalysen der vierfachen Klassifikation gestatten sogar eine Quantifizierung des Einflusses dieser Wechselwirkung. Während bei einer Wiedererwärmungstemperatur von $T = 105 \text{ °C}$ der Einfluß der Expositionsdauer alleine lediglich 15,1 % der Gesamtvarianz ausmacht, steigt dieser Einfluß bei einer Wiedererwärmungstemperatur von $T = 145 \text{ °C}$ auf rund 59,7 %. Gleichzeitig verringert sich der Einfluß aus der Wechselwirkung A-C (Mischgutart / Bitumensorte) von 77,9 % auf 22,9 %.

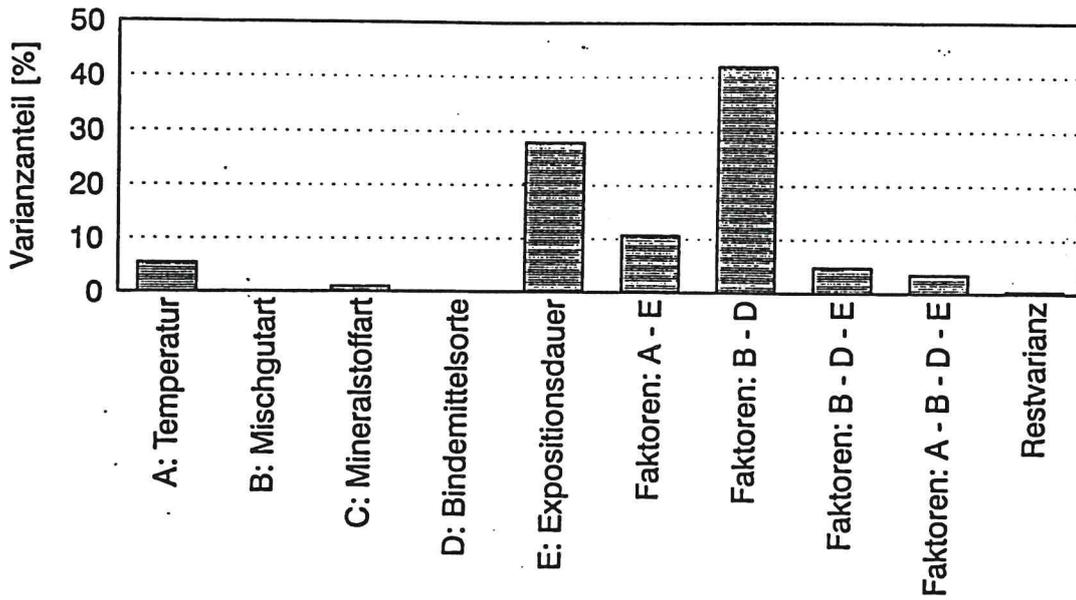


Abb. 18: Einfluß der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf die Penetration des wiedergewonnenen Bitumens - Varianzanteile der Einflußgrößen und ihrer wichtigsten Wechselwirkungen als Ergebnis einer fünffachen Varianzanalyse

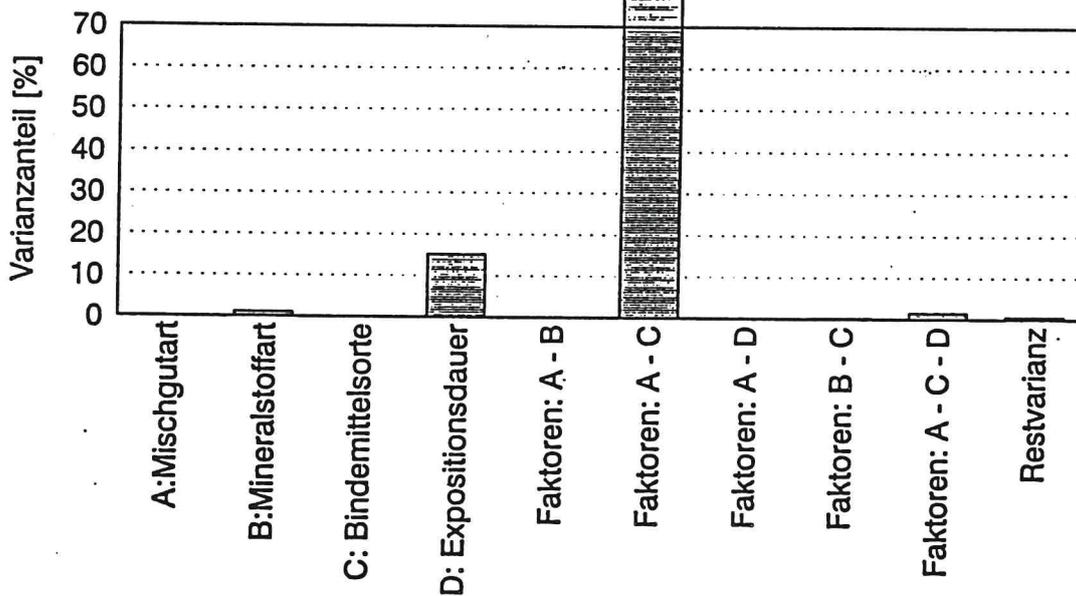


Abb. 19: Einfluß der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf die Penetration des wiedergewonnenen Bitumens bei einer Temperatur von $T=105\text{ °C}$ - Varianzanteile der Einflußgrößen und ihrer wichtigsten Wechselwirkungen als Ergebnis einer vierfachen Varianzanalyse

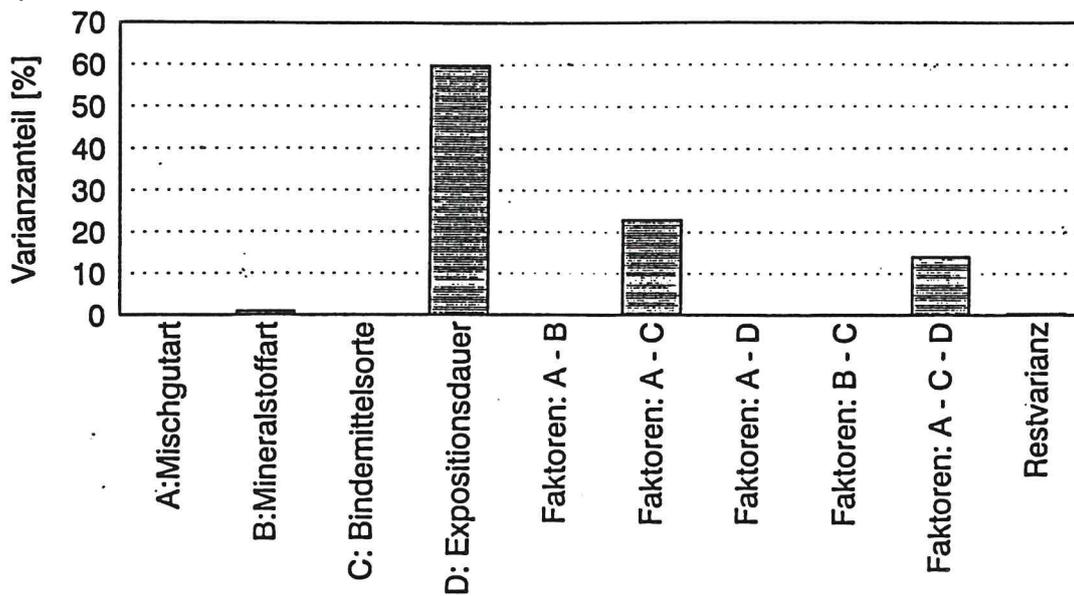


Abb. 20: Einfluß der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf die Penetration des wiedergewonnenen Bitumens bei einer Temperatur von $T=145\text{ °C}$ - Varianzanteile der Einflußgrößen und ihrer wichtigsten Wechselwirkungen als Ergebnis einer vierfachen Varianzanalyse

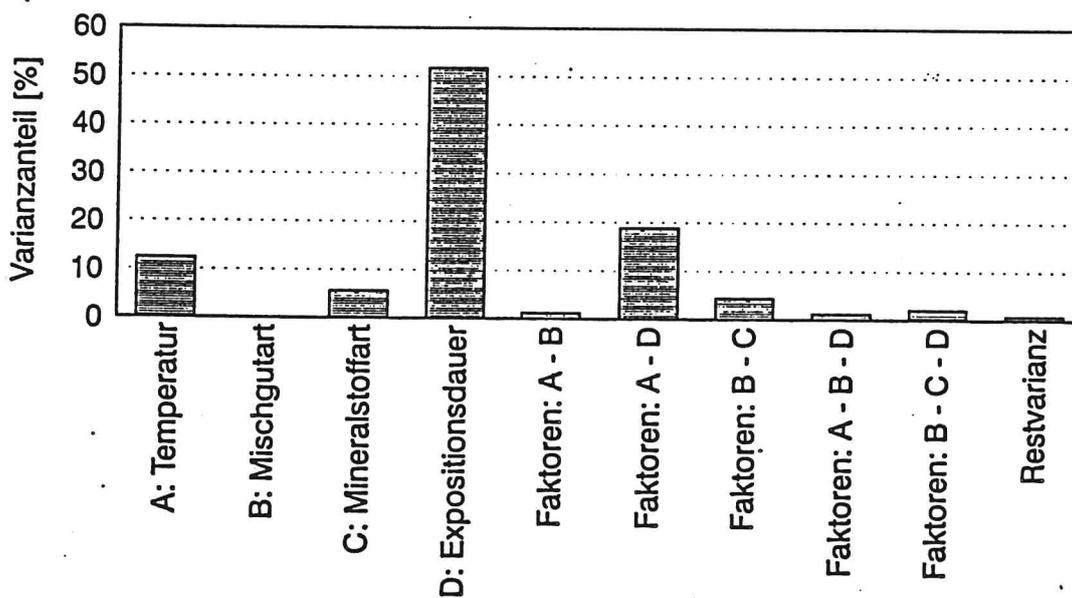


Abb. 21: Einfluß der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank auf die Penetration eines Bitumens der Sorte B 65 - Varianzanteile der Einflußgrößen und ihrer wichtigsten Wechselwirkungen als Ergebnis einer vierfachen Varianzanalyse

Für die Wiedererwärmungstemperatur von 105 °C wird die Wechselwirkung zwischen Mischgutart und Bindemittelsorte als der dominante Einfluß auf die Verminderung der Penetration identifiziert. Diese Feststellung ist einfach damit zu begründen, daß bei den drei unterschiedlichen Asphaltarten jeweils zwei unterschiedlich harte Bindemittelsorten mit unterschiedlichen Penetrationswerten des Originalbitumens eingesetzt worden sind. Somit ist die beobachtete Wechselwirkung auch durch die versuchssystematisch erforderliche Mischgutvariation bedingt und nicht unbedingt nur auf einen Einfluß der Art der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank zurückzuführen.

Bei einer Auswertung auf der Basis des Zahlenmaterials für die Asphaltvarianten mit Bitumen der Sorte B 65 kann ebenfalls kein Einfluß der Mischgutart auf die Veränderung der Penetration mehr festgestellt werden (Abbildung 21).

Es kann zusammengefaßt werden, daß die prozentuale Verminderung der Penetration, festgestellt an dem aus den Asphaltvarianten wiedergewonnenen Bitumen, maßgeblich durch die Expositionsbedingungen der Wiedererwärmung und nur in einem sehr geringen Maß durch die Variation der Mischgutart, der Mineralstoffart und der Bitumensorte verursacht wird.

3.2.5 Elastische Rückstellung

Die elastische Rückstellung wurde nur an wiedergewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten ermittelt, bei denen polymermodifiziertes Bindemittel eingesetzt worden ist. Dies geschah bei den Mischgutvarianten 10 und 12. Des Weiteren konnten keine Wiederholungsprüfungen durchgeführt werden, da die wiedergewonnene Bitumenmenge hierfür nicht ausreichte. Die Einzelwerte für die elastische Rückstellung nach der Halbfadenmethode bei einer Prüftemperatur von 25 °C sind in Tabelle 20 zusammengestellt. Zur Erleichterung einer vergleichenden Beurteilung wurden in diese Tabelle auch die entsprechenden Werte für die elastische Rückstellung des Originalbitumens eingetragen.

Tabelle 20: Elastische Rückstellung des aus den Asphaltvarianten 10 und 12 nach Wiedeerwärmung im konventionellen Wärmeschrank wiedergewonnenen polymermodifizierten Bitumens

Art der Wiedererwärmung		Elastische Rückstellung	
Expositionsdauer	Temperatur	Variante 10	Variante 12
[h]	[°C]	[%]	[%]
Originalbitumen		76	76
ohne Wiedererwärmung		77	60
4	105	72	64
4	145	65	66
16	105	66	58
16	145	57	59

Zunächst ist festzustellen, daß die Werte für die elastische Rückstellung des mit Trichlorethen wiedergewonnenen Bindemittels auf einem relativ hohen Niveau liegen, so daß davon ausgegangen werden kann, daß bei den hier eingesetzten Bitumen PmB 65 eine weitgehende Wiedergewinnung der polymeren Anteile des Bitumens gelungen ist. Des weiteren kann aus der Tabelle herausgelesen werden, daß die elastische Rückstellung des wiedergewonnenen Bindemittels durch eine längere Expositionsdauer geringer wird.

Die festgestellten Unterschiede liegen in einer solchen Größenordnung, daß sie auch der Präzision des Verfahrens zugeordnet werden können. Die Vornorm der DIN 52021, Halbfadenverfahren zur Bestimmung der elastischen Rückstellung, gibt für Prüfungen am Originalbindemittel bereits eine Wiederholgrenze von 10 % (absolut) an. In Analogie zur DIN 52011, Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel, muß bei der Prüfung an aus Asphalt zurückgewonnenem Bindemittel mit einer doppelt so hohen Wiederholgrenze gerechnet werden.

Da in keinem Fall ein Differenzwert von 20 % (absolut) überschritten wird, ist festzustellen, daß eine Veränderung der elastischen Rückstellung des wiedergewonnenen Bitumens aufgrund der Wiedererwärmung des Asphalttes im Wärmeschrank nicht schlüssig nachgewiesen werden konnte.

3.2.6 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Unterschiedliche Asphaltvarianten wurden bei Variation der Mineralstoffart und der Bitumensorte hergestellt und im konventionellen Wärmeschrank bei Variation der Temperatur und der Expositionsdauer wiedererwärmt. Anschließend wurde das Mischgut analysiert, um herauszufinden, ob und gegebenenfalls wie sich welche kompositionellen Merkmalsgrößen der Asphaltvarianten beziehungsweise wie sich welche Bitumen-Kennwerte sich durch die Wiedererwärmung des Asphalttes verändern.

Dabei wurde zunächst festgestellt, daß die Werte für den Bindemittelgehalt und die Korngrößenverteilung (Füllergehalt, Sandgehalt, Splittgehalt) praktisch nicht verändert wurden.

Der Erweichungspunkt Ring und Kugel des wiedergewonnenen Bitumens wird durch die Wärmebeanspruchung dagegen deutlich beeinflusst. Es wurden Anstiege des Erweichungspunktes Ring und Kugel von bis zu 20 K, im Einzelfall sogar bis 28,3 K, festgestellt. Obwohl die Wiedererwärmung bei einer Expositionsdauer von 4 Stunden und einer Temperatur von $T = 105 \text{ }^\circ\text{C}$ für das im Asphalt enthaltene Bitumen un-schädlich zu sein scheint, steigt der Einfluß der Wiedererwärmungsbedingungen bei einer Verlängerung der Expositionsdauer und insbesondere bei einer Erhöhung der Temperatur erheblich an. Des weiteren existieren Einflüsse aus der Mörtelfilmdicke am Gestein - dünne Mörtelfilme verursachen eine größere Nachhärtung des Bitumens als dickere - sowie aus der Bitumensorte - härtere Bitumensorten altern schneller als weiche Bitumensorten.

Die Werte für die Penetration des wiedergewonnenen Bindemittels werden ebenfalls durch die Art der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank verändert. Aufgrund der reinen Wärmebeanspruchung wurden prozentuale Verminderungen der Penetration bis zu 60 % und mehr gefunden. Ein Einfluß von Mischgutart und Bitumensorte konnte dagegen nicht nachgewiesen werden; der Einfluß der Mineralstoffart ist verschwindend gering.

Ein Einfluß der Wiedererwärmung auf das Merkmal elastische Rückstellung ist bei den für die Splittmastixasphalt-Varianten eingesetzten polymermodifizierten Bindemitteln, wenn überhaupt, nur schwach ausgeprägt. Die festgestellten Unterschiede können mit der Präzision des Verfahrens begründet werden.

3.3 Ergebnisse der Untersuchungen zur Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik

3.3.1 Bindemittelgehalt

Die Einzelwerte für den Bindemittelgehalt, festgestellt im Wiedergewinnungsverfahren, der im Mikrowellenofen wiedererwärmten Mischgutproben wurden aus den Analysenblättern der Anlagen II.2 in die Tabelle 21 übertragen. Um festzustellen, ob Einflüsse aus der Art der Wiedererwärmung, dem Temperaturniveau oder der Prüf- gutmenge auf die Größe des Bindemittelgehaltes existieren, wurden die Datensätze der Mischgutvarianten gleicher Mineralstoffarten den bereits mehrfach angewendeten Tests auf Normalverteilung, auch Homogenitätstest genannt, unterworfen. Wird die Hypothese der Normalverteilung akzeptiert, so wird davon ausgegangen, daß die Meßwerte einer Grundgesamtheit zuzuordnen und keine Einflüsse aus der Art der Wiedererwärmung vorhanden sind.

Die Ergebnisse der Homogenitätstests sind in Anlage III.2 beigefügt. Danach beziehungsweise unterschreitet bei keiner Mischgutart und keiner Mineralstoffart die Testgröße a/s die kritischen Schranken, so daß die Hypothese, es liege Normalverteilung vor, nicht abgelehnt werden kann.

Tabelle 21 : Festgestellter Bindemittelgehalt in Gew.-% nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Bindemittelgehalt nach Eignungsprüfung	Hochfrequenztechnik					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1 2 3 4	AB 0/8	Oolith	B 80	6,90	7,29 6,92	7,04 6,88	6,90 6,93	7,29 6,92	6,84 6,90	7,01 7,24
		Oolith	B 65	6,90	6,94 6,94	7,04 6,88	6,93 6,90	6,94 6,94	6,84 6,94	6,89 6,91
		Diabas	B 80	5,90	6,00 6,05	6,36 6,18	6,05 6,03	6,00 6,05	6,06 6,12	6,11 6,02
		Diabas	B 65	5,90	6,01 6,00	6,05 6,06	5,99 6,00	6,01 6,00	6,17 6,05	6,09 6,10
5 6 7 8	Abi 0/16	Oolith	B 65	5,50	5,31 4,79	5,46 5,55	5,63 5,54	5,31 4,79	5,18 5,42	5,64 5,38
		Oolith	B 45	5,50	5,27 5,29	5,58 5,64	5,07 4,99	5,27 5,29	5,30 5,47	5,03 5,37
		Diabas	B 65	4,75	4,46 4,55	4,57 4,72	4,66 4,90	4,46 4,55	4,85 4,83	4,84 4,72
		Diabas	B 45	4,75	4,74 4,53	5,02 4,75	4,63 4,78	4,74 4,53	4,84 4,96	4,69 4,88
9 10 11 12	SMA 0/11	Oolith	B 65	7,40	7,00 7,08	7,11 7,11	7,18 7,22	7,00 7,08	7,18 7,06	7,35 6,98
		Oolith	PmB 65	7,40	7,11 7,09	7,18 7,05	7,52 7,25	7,11 7,09	7,06 7,23	7,03 7,28
		Diabas	B 65	6,50	6,39 6,49	6,48 6,51	6,31 6,54	6,39 6,49	6,60 6,45	6,50 6,52
		Diabas	PmB 65	6,50	6,29 6,34	6,39 6,27	6,65 6,44	6,29 6,34	6,31 6,41	6,48 6,35

Demnach kann festgestellt werden, daß die Wiedererwärmung einer Asphaltprobe mittels Hochfrequenztechnik unabhängig von der Prüfgutmenge - 1000 g oder 2000 g - und unabhängig von dem Temperaturniveau - 105 °C oder 145 °C - sich nicht auf den im Wiedergewinnungsverfahren nach DIN 1996 Teil 6 zu bestimmenden Wert für den Bindemittelgehalt auswirkt.

3.3.2 Korngrößenverteilung

Als maßgebende Kennwerte der Korngrößenverteilung sind die festgestellten Einzelwerte für den Füllergehalt, den Sandgehalt und den Splittgehalt in den Tabellen 22, 23 und 24 aufgelistet.

Tabelle 22 : Festgestellter Füllergehalt in Gew.-% nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Füller-gehalt nach Eignungs-prüfung	Hochfrequenztechnik					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1 2 3 4	AB 0/8	Oolith	B 80	10,0	9,5 9,3	9,6 9,6	9,1 9,5	9,5 9,3	9,0 9,2	9,4 9,9
		Oolith	B 65	10,0	9,1 9,0	9,4 9,1	9,1 9,1	9,1 9,0	8,9 9,3	8,9 8,9
		Diabas	B 80	10,0	9,4 9,5	10,1 9,6	9,5 9,6	9,4 9,5	9,4 9,6	9,8 9,6
		Diabas	B 65	10,0	9,1 8,9	9,1 9,0	9,1 9,1	9,1 8,9	9,1 9,2	9,0 9,0
5 6 7 8	Abi 0/16	Oolith	B 65	5,0	5,0 4,6	5,3 -	5,5 5,1	5,0 4,6	5,2 5,7	5,6 5,4
		Oolith	B 45	5,0	5,1 5,1	5,6 5,6	5,0 4,8	5,1 5,1	5,1 5,3	5,0 5,3
		Diabas	B 65	5,0	4,7 4,6	4,9 5,0	5,0 5,1	4,7 4,6	5,2 5,2	5,2 5,0
		Diabas	B 45	5,0	4,9 4,7	5,2 5,0	4,7 5,1	4,9 4,7	5,2 5,3	4,8 5,0
9 10 11 12	SMA 0/11	Oolith	B 65	9,7	9,1 9,2	9,5 9,4	9,4 9,3	9,1 9,2	9,7 9,3	9,7 9,1
		Oolith	PmB 65	9,7	9,7 9,9	9,8 10,3	9,5 9,9	9,7 9,9	9,9 10,0	10,3 10,3
		Diabas	B 65	9,7	9,0 9,1	9,3 9,4	8,9 9,2	9,0 9,1	9,6 9,2	9,2 9,2
		Diabas	PmB 65	9,7	9,1 8,9	9,5 9,0	9,5 9,2	9,1 8,9	9,2 9,2	9,3 9,1

Tabelle 23: Festgestellter Sandgehalt in Gew.-% nach Mischgutherstellung,
Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Sandgehalt nach Eignungsprüfung	Hochfrequenztechnik					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1 2 3 4	AB 0/8	Oolith	B 80	40,0	42,7	40,4	40,2	42,7	40,1	41,1
					39,4	40,0	39,8	39,4	40,0	41,8
		Oolith	B 65	40,0	41,2	41,1	40,6	41,2	40,5	40,9
					41,4	40,5	40,9	41,4	40,3	41,1
Diabas	B 80	40,0	39,3	41,8	40,6	39,3	40,4	40,6		
			39,4	41,1	40,5	39,4	41,0	40,4		
Diabas	B 65	40,0	40,8	41,2	40,8	40,8	40,7	41,4		
			40,3	40,9	40,5	40,3	40,8	41,7		
5 6 7 8	Abi 0/16	Oolith	B 65	20,0	19,6	20,5	21,0	19,6	18,6	20,4
					17,2	-	19,7	17,2	20,5	19,6
		Oolith	B 45	20,0	19,0	20,5	18,3	19,0	18,6	17,6
					19,5	20,5	17,8	19,5	19,9	19,9
Diabas	B 65	20,0	18,0	18,6	19,5	18,0	20,2	20,1		
			18,7	19,0	20,3	18,7	20,0	19,5		
Diabas	B 45	20,0	19,4	21,3	19,2	19,4	19,9	19,3		
			18,5	19,8	19,7	18,5	20,7	20,3		
9 10 11 12	SMA 0/11	Oolith	B 65	15,0	14,7	15,6	15,7	14,7	14,9	15,7
					15,3	15,0	15,6	15,3	15,7	15,1
		Oolith	PmB 65	15,0	14,8	15,1	15,6	14,8	14,2	14,0
					14,5	14,7	15,5	14,5	15,3	15,4
Diabas	B 65	15,0	15,6	15,6	15,0	15,6	15,8	15,6		
			15,5	15,5	15,6	15,5	15,6	15,6		
Diabas	PmB 65	15,0	15,5	15,2	16,1	15,5	15,1	15,5		
			15,3	15,1	15,4	15,3	15,3	15,2		

Tabelle 24 : Festgestellter Splittgehalt in Gew.-% nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Splitt-gehalt nach Eignungs-prüfung	Hochfrequenztechnik					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1 2 3 4	AB 0/8	Oolith	B 80	50,0	47,8 51,3	50,0 50,4	50,7 50,7	47,8 51,3	50,9 50,8	49,5 48,3
		Oolith	B 65	50,0	49,7 49,6	49,5 50,4	50,3 50,0	49,7 49,6	50,6 50,4	50,2 50,0
		Diabas	B 80	50,0	51,3 51,1	48,1 49,3	49,9 49,9	51,3 51,1	50,2 49,4	49,6 50,0
		Diabas	B 65	50,0	50,1 50,8	49,7 50,1	50,1 50,4	50,1 50,8	50,2 50,0	49,6 49,3
5 6 7 8	Abi 0/16	Oolith	B 65	75,0	75,4 78,2	74,2 -	73,5 75,2	75,4 78,2	76,2 73,8	74,0 75,0
		Oolith	B 45	75,0	75,9 75,4	73,9 73,9	76,7 77,4	75,9 75,4	76,3 74,8	77,4 74,8
		Diabas	B 65	75,0	77,3 76,7	76,5 76,0	75,5 74,6	77,3 76,7	74,6 74,8	74,7 75,5
		Diabas	B 45	75,0	75,7 76,8	73,5 75,2	76,1 75,2	75,7 76,8	74,9 74,0	75,9 74,7
9 10 11 12	SMA 0/11	Oolith	B 65	75,0	76,2 75,5	74,9 75,6	74,9 75,1	76,2 75,5	75,4 75,0	74,6 75,8
		Oolith	PmB 65	75,0	75,5 75,6	75,1 75,0	74,9 74,6	75,5 75,6	75,9 74,7	75,7 74,3
		Diabas	B 65	75,0	75,4 75,4	75,1 75,1	76,1 75,2	75,4 75,4	74,6 75,2	75,2 75,2
		Diabas	PmB 65	75,0	75,4 75,8	75,3 75,9	74,4 75,4	75,4 75,8	75,7 75,5	75,2 75,7

Auch diese Werte werden für jede Mischgutart gleicher Mineralstoffarten auf Normalverteilung beziehungsweise Homogenität überprüft. Wird die Hypothese der Normalverteilung akzeptiert, so kann davon ausgegangen werden, daß durch die Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik die Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches im Asphalt nicht beeinflußt wird. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in den Tabellen 2, 3 und 4 der Anlage III.2 zusammengestellt. Den Tabellen kann entnommen werden, daß - von einer Ausnahme beim Splittgehalt der Asphaltvarianten 3/4 abgesehen - bei allen untersuchten Datensätzen Normalverteilung vorliegt. Ein meßbarer Einfluß der Wiedererwärmung des Asphalts mittels Hochfrequenztechnik auf die Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches ist praktisch nicht nachweisbar.

3.3.3 Erweichungspunkt Ring und Kugel

Die vier Einzelwerte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel des Bitumens aus den mittels Hochfrequenztechnik unterschiedlich wiedererwärmten Asphaltmischgutvarianten sind in den Tabellen 25 und 26 aufgelistet. Die Tabelle 27 enthält darüber hinaus die arithmetischen Mittel dieser Bestimmungen.

Der Erweichungspunktanstieg aufgrund der Mischgutherstellung, der Wiedererwärmung und der Bindemittelrückgewinnung, berechnet als Differenzbetrag zum Erweichungspunkt Ring und Kugel des Bitumens im Anlieferungszustand ist der Tabelle 28 zu entnehmen und wurde darüber hinaus in den Abbildungen 22, 23 und 24 histogrammisch dargestellt. In der Tabelle 29 schließlich sind die Erweichungspunktanstiege aufgrund der reinen Wiedererwärmung des Mischguts mittels Hochfrequenztechnik, also ohne Berücksichtigung der möglichen Bindemittelnachhärtung durch die Mischgutherstellung und Wiedergewinnung des Bitumens nach DIN 1996 Teil 6 angegeben. Auch diese Zahlenwerte sind der besseren Anschauung wegen in den Abbildungen 25, 26 und 27 histogrammisch dargestellt.

Bei sorgfältiger Betrachtung dieser drei Histogramme ist zu erkennen, daß die Unterschiede der festgestellten Erweichungspunkte Ring und Kugel sehr gering sind und ein Einfluß der unterschiedlichen Prüfgutmengen und der unterschiedlichen Wiedererwärmungstemperaturen praktisch nicht vorhanden ist.

Um diese Aussage abzusichern, wurden Varianzanalysen der einfachen Klassifikation für jede der zwölf Mischgutvarianten derart durchgeführt, daß zunächst die Hypothese aufgestellt wurde, die Mittelwerte der fünf Gruppen seien gleich:

- Gruppe 1: nicht wiedererwärmtes Mischgut (Null-Probe)
- Gruppe 2: 1000 g schwere Mischgutprobe, auf $T = 105\text{ °C}$ wiedererwärmt
- Gruppe 3: 2000 g schwere Mischgutprobe, auf $T = 105\text{ °C}$ wiedererwärmt
- Gruppe 4: 1000 g schwere Mischgutprobe, auf $T = 145\text{ °C}$ wiedererwärmt
- Gruppe 5: 2000 g schwere Mischgutprobe, auf $T = 145\text{ °C}$ wiedererwärmt.

Tabelle 25: Einzelwerte des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung bei einer Temperatur von $T = 105\text{ °C}$ mittels Hochfrequenztechnik und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel		Hochfrequenzverfahren $T = 105\text{ °C}$											
			Sorte	EP RuK [°C]	Nullprobe				1000g				2000g			
					1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert
1		Oolith	B 80	47,8	50,0	50,0	49,5	50,5	52,5	52,5	50,5	51,0	53,0	53,0	51,0	51,0
2	AB 0/8	Oolith	B 65	51,5m	54,5	54,5	56,0	56,5	-	-	57,5	57,5	57,0	57,0	56,0	56,0
3		Diabas	B 80	47,8	51,0	51,0	51,0	51,0	49,0	48,5	53,0	53,5	50,0	50,0	51,5	51,5
4		Diabas	B 65	51,5	56,0	56,5	55,5	55,5	54,0	54,5	56,0	56,0	55,0	55,0	54,5	54,5
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	51,5	50,5	50,5	51,5	52,0	52,0	52,5	51,5	52,0	51,5	51,5	52,0	52,5
6		Oolith	B 45	57,3	58,8	60,0	60,0	60,5	59,5	59,5	60,5	60,5	60,0	60,0	59,5	60,0
7		Diabas	B 65	51,5	56,0	56,0	54,5	55,0	55,0	55,0	55,5	56,0	56,5	56,5	57,0	56,0
8		Diabas	B 45	57,3	61,0	61,0	62,0	62,0	63,5	64,0	62,5	63,0	63,0	63,0	62,5	62,0
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	51,5	54,5	54,5	56,0	56,0	57,5	57,5	56,0	56,5	56,5	56,5	56,5	57,0
10		Oolith	PmB 65	50,5	54,5	54,5	55,0	54,5	54,5	55,5	55,0	55,0	54,5	54,5	55,5	55,0
11		Diabas	B 65	51,5	56,0	56,5	57,0	57,0	56,0	56,5	56,5	57,0	58,0	58,0	56,5	56,5
12		Diabas	PmB 65	50,5	55,5	56,0	56,5	57,0	56,5	57,0	57,0	57,2	53,5	54,0	55,5	55,0

Tabelle26: Einzelwerte des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung bei einer Temperatur von T = 145 °C mittels Hochfrequenztechnik und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel		Hochfrequenzverfahren T = 145°C														
			Sorte	EP RuK [°C]	Nullprobe				1000g				2000g						
					1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert	1. Wert	2. Wert	3. Wert	4. Wert			
1		Oolith	B 80	47,8	50,5	50,5	51,5	52,0	51,0	51,5	52,0	52,0	52,0	52,0	52,0	52,5	52,5	52,5	52,5
2	AB 0/8	Oolith	B 65	51,5	55,0	56,0	57,0	57,0	59,0	59,0	57,0	57,0	56,5	57,0	57,0	57,5	57,5	58,0	58,0
3		Diabas	B 80	47,8	49,5	51,0	52,5	53,5	50,5	50,0	52,5	52,5	52,5	50,0	52,5	50,0	50,0	50,0	50,0
4		Diabas	B 65	51,5	56,0	55,5	54,5	55,0	55,5	56,0	54,5	55,0	55,5	55,5	58,0	57,0	57,0	57,0	57,0
5		Oolith	B 65	51,5	51,5	53,5	54,0	52,5	53,0	51,5	51,5	54,0	54,0	51,5	54,0	54,0	54,0	54,0	54,0
6	Abi 0/16	Oolith	B 45	57,3	61,5	61,0	61,5	59,5	60,0	59,5	59,5	61,5	61,5	59,5	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
7		Diabas	B 65	51,5	56,5	54,5	55,0	56,0	56,0	56,0	56,0	55,0	55,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0
8		Diabas	B 45	57,3	61,0	61,5	61,5	62,5	63,0	63,0	62,5	61,5	61,5	63,5	63,0	63,5	63,0	63,0	62,5
9		Oolith	B 65	51,5	55,0	56,0	56,0	57,5	57,5	57,5	58,0	56,0	56,0	57,5	55,0	55,0	54,5	55,0	55,0
10	SMA 0/11	Oolith	PmB 65	50,5	53,5	54,5	54,5	54,0	54,0	56,0	56,0	54,5	54,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	56,0
11		Diabas	B 65	51,5	56,5	56,5	57,0	54,5	55,0	57,0	57,0	57,0	57,0	56,5	56,0	56,5	57,5	57,5	57,5
12		Diabas	PmB 65	50,5	55,5	-	-	58,0	58,0	58,0	58,0	-	-	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,5

Tabelle 27: Mittelwerte der Erweichungspunkte Ring und Kugel nach Mischgütherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik und Bindemittelrückgewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel		Hochfrequenztechnik					
			Sorte	EP RuK [°C]	T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1	AB 0/8	Oolith	B 80	47,8	50,0	51,6	52,1	50,5	51,5	52,2
2		Oolith	B 65	51,5	55,2	57,5	56,5	55,6	58,0	57,2
3		Diabas	B 80	47,8	51,0	51,0	50,8	50,1	51,6	51,2
4		Diabas	B 65	51,5	55,9	55,1	54,8	56,0	55,1	57,5
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	51,5	51,1	52,0	52,1	52,6	52,1	54,0
6		Oolith	B 45	57,3	59,9	60,0	59,9	61,5	59,6	60,0
7		Diabas	B 65	51,5	55,4	55,8	56,4	55,8	56,0	56,0
8		Diabas	B 45	57,3	61,5	63,2	62,6	61,2	63,0	63,0
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	51,5	55,2	56,9	56,6	55,5	57,6	54,9
10		Oolith	PmB 65	50,5	54,6	55,0	54,9	54,0	55,0	55,6
11		Diabas	B 65	51,5	56,6	56,5	57,2	56,8	55,9	56,9
12		Diabas	PmB 65	50,5	56,2	56,9	54,5	55,5	58,0	58,0

Tabelle 28: Erweichungspunktanstieg aufgrund der Mischgütherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik und Bindemittelrückgewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel		Hochfrequenztechnik					
			Sorte	EP RuK [°C]	T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1	AB 0/8	Oolith	B 80	47,8	2,2	3,8	4,3	2,7	3,7	4,4
2		Oolith	B 65	51,5	3,7	6,0	5,0	4,1	6,5	5,7
3		Diabas	B 80	47,8	3,2	3,2	3,0	2,3	3,8	3,4
4		Diabas	B 65	51,5	4,4	3,6	3,3	4,5	3,6	6,0
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	51,5	-0,4	0,5	0,6	1,1	0,6	2,5
6		Oolith	B 45	57,3	2,6	2,7	2,6	4,2	2,3	2,7
7		Diabas	B 65	51,5	3,9	4,3	4,9	4,3	4,5	4,5
8		Diabas	B 45	57,3	4,2	5,9	5,3	3,9	5,7	5,7
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	51,5	3,7	5,4	5,1	4,0	6,1	3,4
10		Oolith	PmB 65	50,5	4,1	4,5	4,4	3,5	4,5	5,1
11		Diabas	B 65	51,5	5,1	5,0	5,7	5,3	4,4	5,4
12		Diabas	PmB 65	50,5	5,7	6,4	4,0	5,0	7,5	7,5

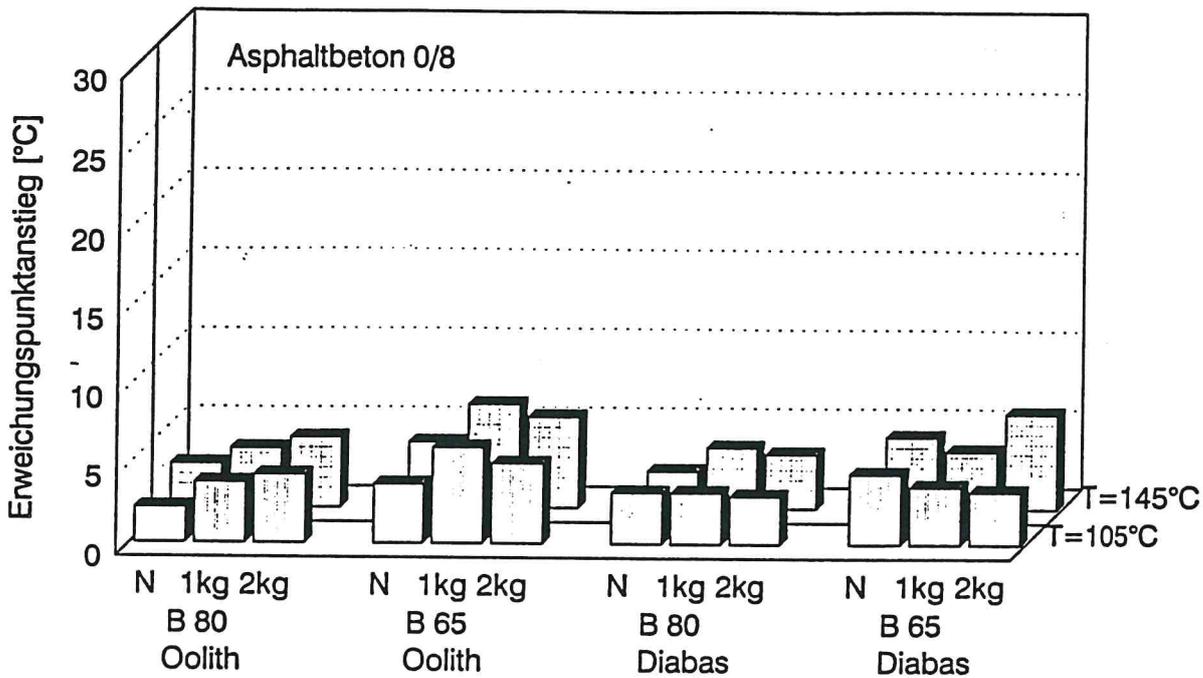


Abb. 22: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Asphaltbetonen 0/8 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

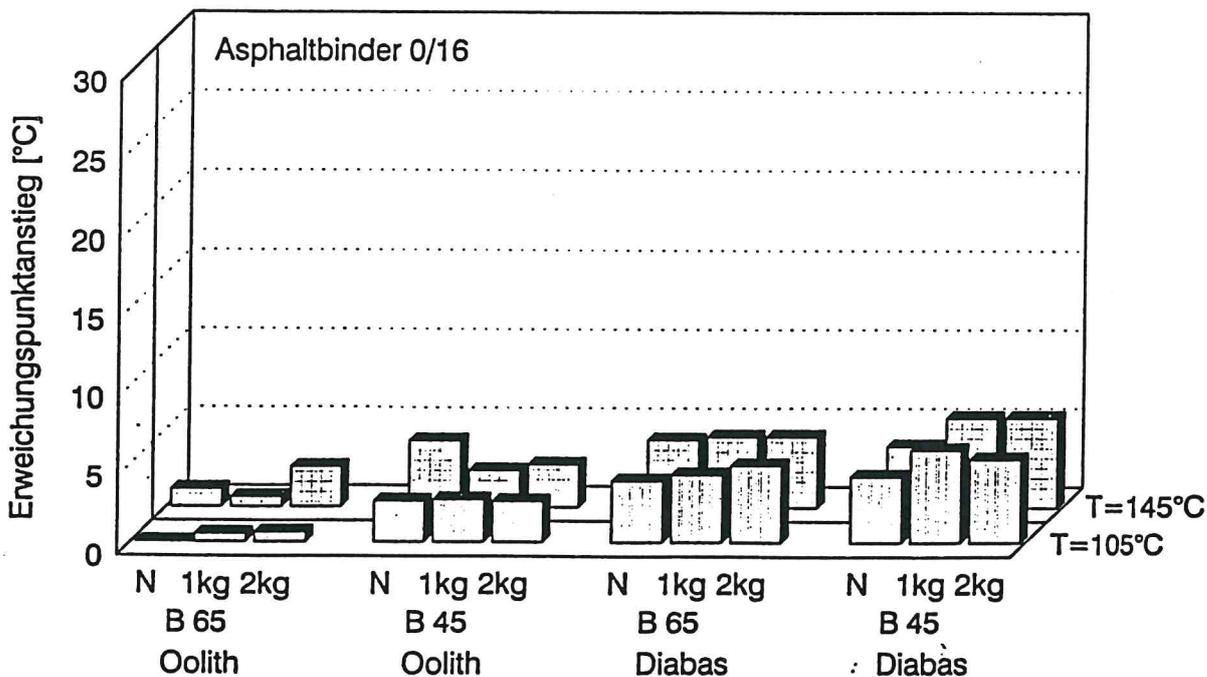


Abb. 23: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Asphaltbindern 0/16 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

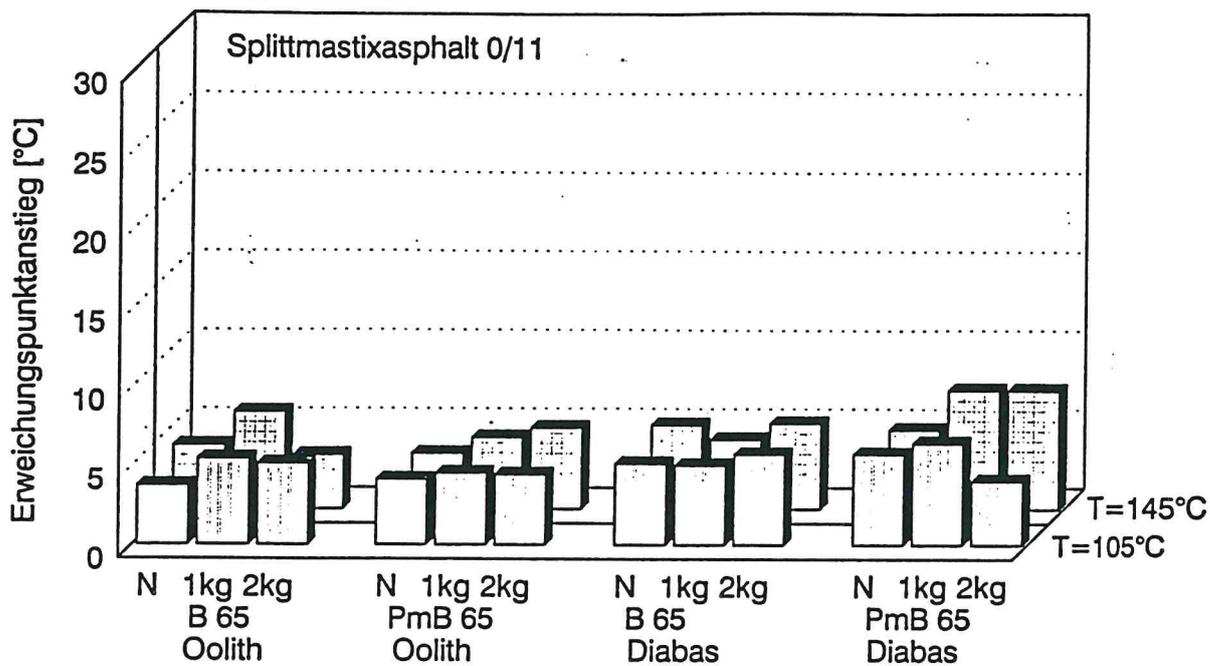


Abb. 24: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Splittmastixasphalten 0/11 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

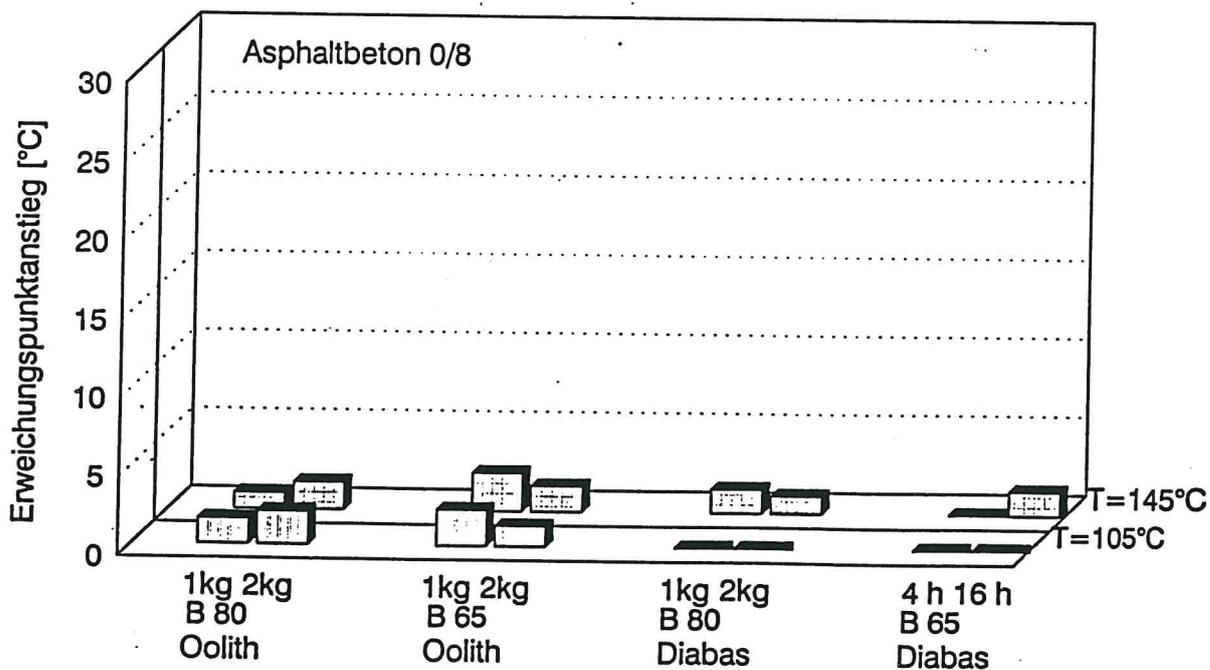


Abb. 25: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Asphaltbetonen 0/8 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

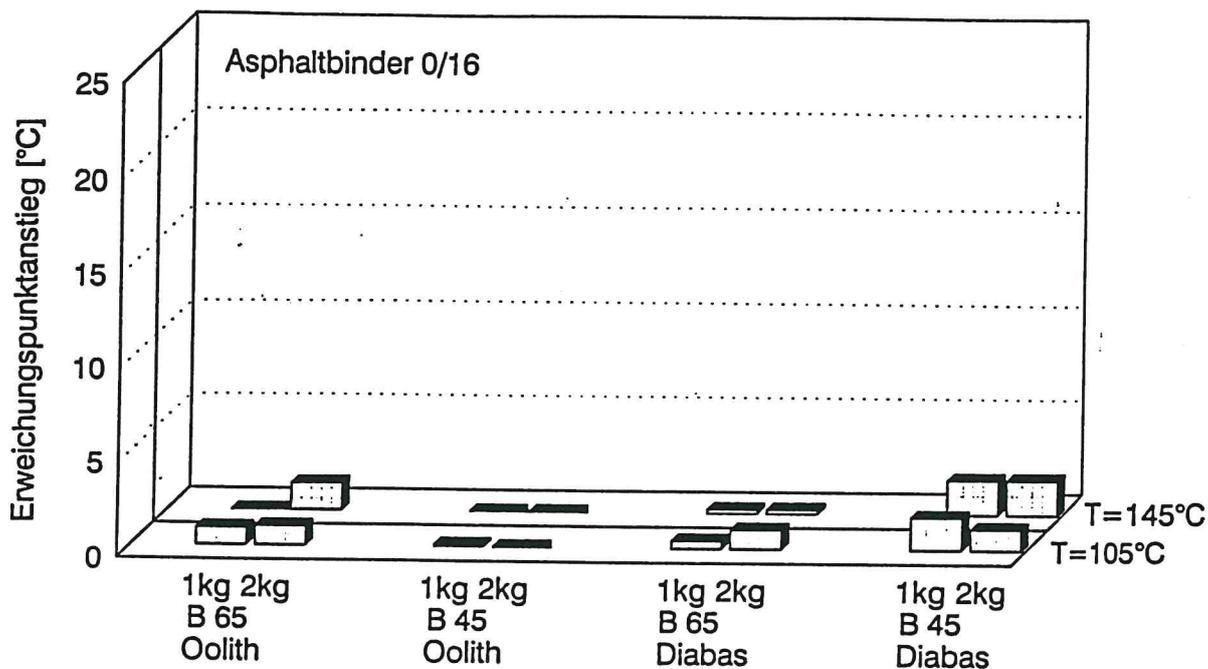


Abb. 26: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Asphaltbindern 0/16 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

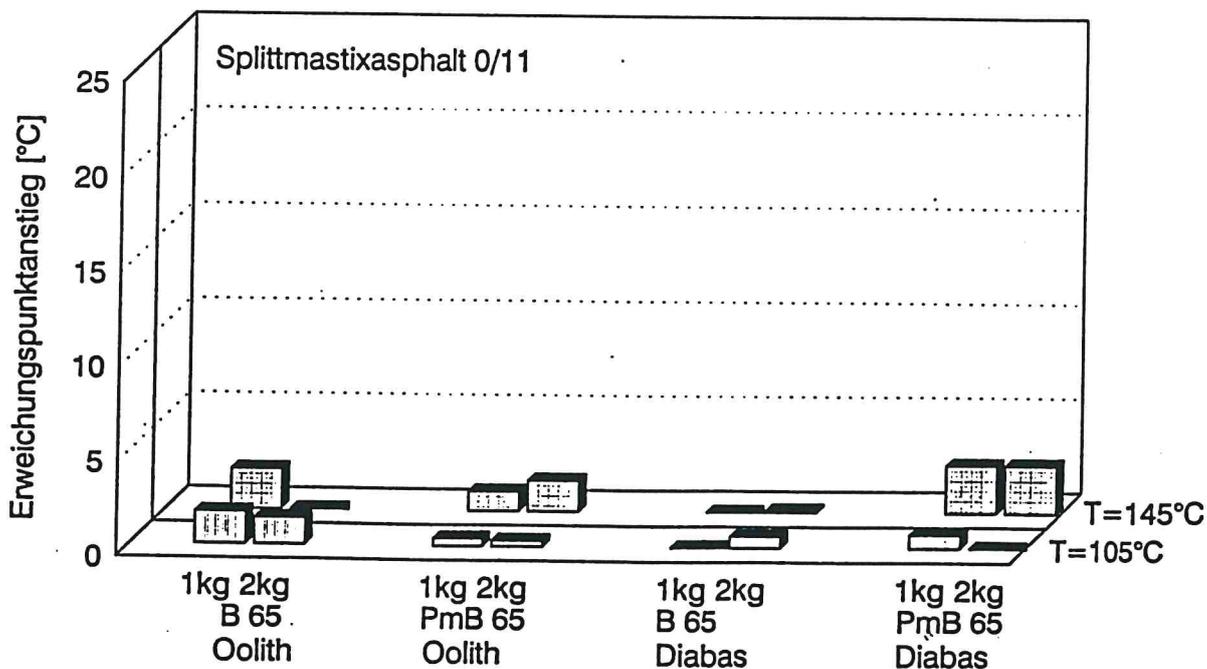


Abb. 27: Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Bitumen aus Splittmastixasphalten 0/11 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

Tabelle 29: Erweichungspunktanstieg alleine aufgrund der Wiedererwärmung des Mischguts mittels Hochfrequenztechnik

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel		Hochfrequenztechnik					
			Sorte	EP RuK [°C]	T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1	AB 0/8	Oolith	B 80	47,8	-	1,6	2,1	-	1,0	1,7
2		Oolith	B 65	51,5	-	2,3	1,3	-	2,4	1,6
3		Diabas	B 80	47,8	-	0	-0,2	-	1,5	1,1
4		Diabas	B 65	51,5	-	-0,8	-1,1	-	-0,9	1,5
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	51,5	-	0,9	1,0	-	-0,5	1,4
6		Oolith	B 45	57,3	-	0,1	0	-	-1,9	-1,5
7		Diabas	B 65	51,5	-	0,4	1,0	-	0,2	0,2
8		Diabas	B 45	57,3	-	1,7	1,1	-	1,8	1,8
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	51,5	-	1,7	1,4	-	2,1	-0,6
10		Oolith	PmB 65	50,5	-	0,4	0,3	-	1,0	1,6
11		Diabas	B 65	51,5	-	-0,1	0,6	-	-0,9	0,1
12		Diabas	PmB 65	50,5	-	0,7	-1,7	-	2,5	2,5

Die Ergebnisse dieser Varianzanalysen sind in Anlage III.2 beigefügt. Die daraus abgeleitete Entscheidung, ob Gleichheit der Mittelwerte vorliegt oder nicht, ist der Tabelle 30 zu entnehmen. In sechs Fällen wird die Hypothese „Gleichheit der Mittelwerte“ akzeptiert. In drei Fällen - nämlich bei den Varianten 1, 8 und 9 - wird ein kleinerer Wert für den mittleren Erweichungspunkt Ring und Kugel der Null-Probe gegenüber den wärmebeanspruchten Proben gefunden; bei den beiden Varianten 4 und 5 wurden jeweils bei der auf T = 145 °C wiedererwärmten 2000 g schweren Mischgutprobe leicht erhöhte Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel ermittelt; bei der Variante 12 ist der Erweichungspunkt des aus der auf 105 °C wiedererwärmten 2000 g schweren Mischgutprobe sogar kleiner als der entsprechende Wert der nicht beanspruchten Probe.

Bei Berücksichtigung der Tatsache, daß die Erweichungspunkte Ring und Kugel der Bitumen aus den mittels Hochfrequenztechnik erwärmten Asphalten durchschnittlich nur um 0,7 K und im Maximum lediglich um 2,5 K höher liegen als diejenigen der Null-Proben, also innerhalb einer Größenordnung, die durch die Präzision des Verfahrens zur Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel am wiedergewonnenen Bitumen abgedeckt ist, so muß ein Einfluß der Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel des zurückgewonnenen Bitumens als nicht nachgewiesen gelten.

Tabelle 30: Ergebnisse des multiplen Mittelwertvergleichs zur Klärung des Einflusses der Modalitäten der Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel des wiedergewonnenen Bitumens

Mischgut-variante	stat. Größe [°C]	Gruppen:					Mittelwerte gleich?
		Null-probe 1	105 °C 1000 g 2	105 °C 2000 g 3	145 °C 1000 g 4	145 °C 2000 g 5	
1	\bar{x} s	50,0 0,41	51,6 1,03	52,1 1,32	51,5 0,41	52,2 0,29	nein $x_1, x_2 - x_5$
2	\bar{x} s	55,2 1,19	57,5 0	56,5 0,58	58,0 1,15	57,2 0,65	ja
3	\bar{x} s	51,0 0	51,0 2,61	50,8 0,87	51,6 1,65	51,2 1,44	ja
4	\bar{x} s	55,9 0,48	55,1 1,03	54,8 0,29	55,1 0,48	57,5 0,58	nein $x_1 - x_4, x_5$
5	\bar{x} s	51,1 0,75	52,0 0,41	52,1 0,48	52,1 0,75	54,0 0	nein $x_1 - x_4, x_5$
6	\bar{x} s	59,8 0,72	60,0 0,58	59,9 0,25	59,6 0,25	60,0 0	ja
7	\bar{x} s	55,4 0,75	55,8 0,65	56,4 0,48	56,0 0	56,0 0	ja
8	\bar{x} s	61,5 0,58	63,2 0,65	62,6 0,48	63,0 0,41	63,0 0,41	nein $x_1, x_2 - x_5$
9	\bar{x} s	55,2 0,87	56,9 0,75	56,6 0,25	57,6 0,25	54,9 0,25	nein $x_5, x_1, x_2 - x_4$
10	\bar{x} s	54,6 0,25	55,0 0,41	54,9 0,48	55,0 1,15	55,6 0,25	ja
11	\bar{x} s	56,6 0,48	56,5 0,41	57,2 0,87	55,9 1,32	56,9 0,75	ja
12	\bar{x} s	56,2 0,65	56,9 0,30	54,5 0,91	58,0 0	58,0 0,41	x_3, x_1, x_2, x_4, x_5

3.3.4 Penetration

Nach Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik wurde aus den unterschiedlich erwärmten Asphaltvarianten das Bitumen wiedergewonnen und hieran die Penetration gemäß DIN 52010 bestimmt. Die arithmetischen Mittel der Penetration von jeweils drei verträglichen Einstichen bilden einen Einzelwert.

Tabelle 31: Festgestellte Penetration in 1/10 mm nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik und Wiedergewinnung (Einzelwerte)

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Penetration des Originalbitumens	Hochfrequenztechnik					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	60	59	60	60	57	58
					61	58	61	61	56	57
					40	39	42	40	39	40
					41	39	41	41	39	40
3	Diabas	B 80	82	66	60	60	66	57	58	
				60	59	60	60	57	59	
4	Diabas	B 65	52	40	42	42	40	40	37	
				41	41	43	41	39	36	
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	53	52	50	53	43	46
6		Oolith	B 45	36	49	53	51	49	43	45
					29	34	30	29	24	32
7		Diabas	B 65	52	31	34	30	31	24	31
					37	35	37	37	36	37
8		Diabas	B 45	36	39	34	37	39	35	36
					30	26	27	30	27	26
					28	25	27	28	26	26
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	40	39	41	40	29	39
10		Oolith	PmB 65	86	39	37	40	39	31	38
					61	57	56	61	54	53
11		Diabas	B 65	52	63	57	56	63	53	53
					38	39	40	38	38	39
12		Diabas	PmB 65	86	35	38	39	35	38	38
	51				55	62	51	44	52	
				48	54	61	48	44	52	

Wegen der Wiederholungsprüfung fallen zwei Einzelwerte an, die beide in die Tabelle 31 eingetragen wurden; die Tabelle 32 enthält die aus den Einzelwerten gebildeten Mittelwerte. Diese bilden die Grundlagen der Tabellen 33 und 34, in denen die absolute Verminderung der Penetration der Bitumen aller zwölf Asphaltvarianten in

der Dimension 1/10 mm infolge Herstellung, Wiedererwärmung und Wiedergewinnung sowie infolge Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik alleine angegeben ist. Die prozentualen Veränderungen der Penetration in bezug auf den Penetrationswert des Originalbitumens sind in den Tabellen 35 und 36 beschrieben, wobei die Tabelle 35 die Werte für die prozentuale Verminderung der Penetration aufgrund der Mischgutherstellung, Wiedererwärmung und Wiedergewinnung enthält, und die Tabelle 36 die entsprechenden Werte alleine infolge der Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik. Die Zahlenwerte dieser Tabellen sind der besseren Anschauung wegen in Abbildungen 28, 29 und 30 sowie 31, 32 und 33 als Säulendiagramme abgebildet.

Tabelle 32: Festgestellte Penetration in 1/10 mm nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik und Wiedergewinnung (H arithmetische Mittel)

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Penetration des Originalbitumens	Hochfrequenztechnik					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	60	58	60	60	57	58
2		Oolith	B 65	52	40	39	42	40	39	40
3		Diabas	B 80	82	63	60	60	63	57	59
4		Diabas	B 65	52	41	42	43	41	40	36
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	51	52	51	51	43	46
6		Oolith	B 45	36	30	34	30	30	24	32
7		Diabas	B 65	52	38	34	37	38	36	36
8		Diabas	B 45	36	29	25	27	29	26	26
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	40	38	40	40	30	39
10		Oolith	PmB 65	86	62	57	56	62	54	53
11		Diabas	B 65	52	37	39	40	37	38	39
12		Diabas	PmB 65	86	50	55	62	50	44	52

Tabelle 33: Festgestellte Verminderung der Penetration in 1/10 mm nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittelsorte	Penetration des Originalbitumens	Hochfrequenztechnik					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	22	24	22	22	25	24
2		Oolith	B 65	52	12	13	10	12	13	12
3		Diabas	B 80	82	19	22	22	19	25	23
4		Diabas	B 65	52	11	10	9	11	12	16
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	1	0	1	1	9	6
6		Oolith	B 45	36	6	2	6	6	12	4
7		Diabas	B 65	52	14	18	15	14	16	16
8		Diabas	B 45	36	7	11	9	7	10	10
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	12	14	12	12	22	13
10		Oolith	PmB 65	86	24	29	30	24	32	33
11		Diabas	B 65	52	15	13	12	15	14	13
12		Diabas	PmB 65	86	36	31	24	36	42	34

Tabelle 34: Festgestellte Verminderung der Penetration in 1/10 mm aufgrund der Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittelsorte	Penetration des Originalbitumens	Hochfrequenztechnik					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	-	2	0	-	3	2
2		Oolith	B 65	52	-	1	-2	-	1	0
3		Diabas	B 80	82	-	3	3	-	6	4
4		Diabas	B 65	52	-	-1	-2	-	1	5
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	-	-1	0	-	8	5
6		Oolith	B 45	36	-	-4	0	-	6	-2
7		Diabas	B 65	52	-	4	1	-	2	2
8		Diabas	B 45	36	-	4	2	-	3	3
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	-	2	0	-	10	1
10		Oolith	PmB 65	86	-	5	6	-	8	9
11		Diabas	B 65	52	-	-2	-3	-	-1	-2
12		Diabas	PmB 65	86	-	-5	-12	-	6	-2

Tabelle 35: Festgestellte Verminderung der Penetration in % nach Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik und Wiedergewinnung

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Pene-tration des Original-bitumens	Hochfrequenztechnik					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	27	29	27	27	30	29
2		Oolith	B 65	52	23	25	19	23	25	23
3		Diabas	B 80	82	23	27	27	23	30	28
4		Diabas	B 65	52	21	19	17	21	23	31
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	2	0	2	2	17	12
6		Oolith	B 45	36	17	6	17	17	33	11
7		Diabas	B 65	52	27	35	29	27	31	31
8		Diabas	B 45	36	19	31	25	19	28	28
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	23	27	23	23	42	25
10		Oolith	PmB 65	86	28	34	35	28	37	38
11		Diabas	B 65	52	29	25	23	29	27	25
12		Diabas	PmB 65	86	42	36	28	42	49	40

Tabelle 36: Festgestellte Verminderung der Penetration in % aufgrund der Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik

Variante	Mischgutart	Mineralstoffart	Bindemittel-sorte	Pene-tration des Original-bitumens	Hochfrequenztechnik					
					T = 105 °C			T = 145 °C		
					Nullpr.	1000 g	2000 g	Nullpr.	1000 g	2000 g
1	AB 0/8	Oolith	B 80	82	-	2	0	-	4	2
2		Oolith	B 65	52	-	2	0	-	2	0
3		Diabas	B 80	82	-	4	4	-	7	5
4		Diabas	B 65	52	-	0	0	-	2	10
5	Abi 0/16	Oolith	B 65	52	-	0	0	-	15	10
6		Oolith	B 45	36	-	0	0	-	17	0
7		Diabas	B 65	52	-	8	2	-	4	4
8		Diabas	B 45	36	-	11	6	-	8	8
9	SMA 0/11	Oolith	B 65	52	-	4	0	-	19	2
10		Oolith	PmB 65	86	-	6	7	-	9	10
11		Diabas	B 65	52	-	0	0	-	0	0
12		Diabas	PmB 65	86	-	0	0	-	7	0

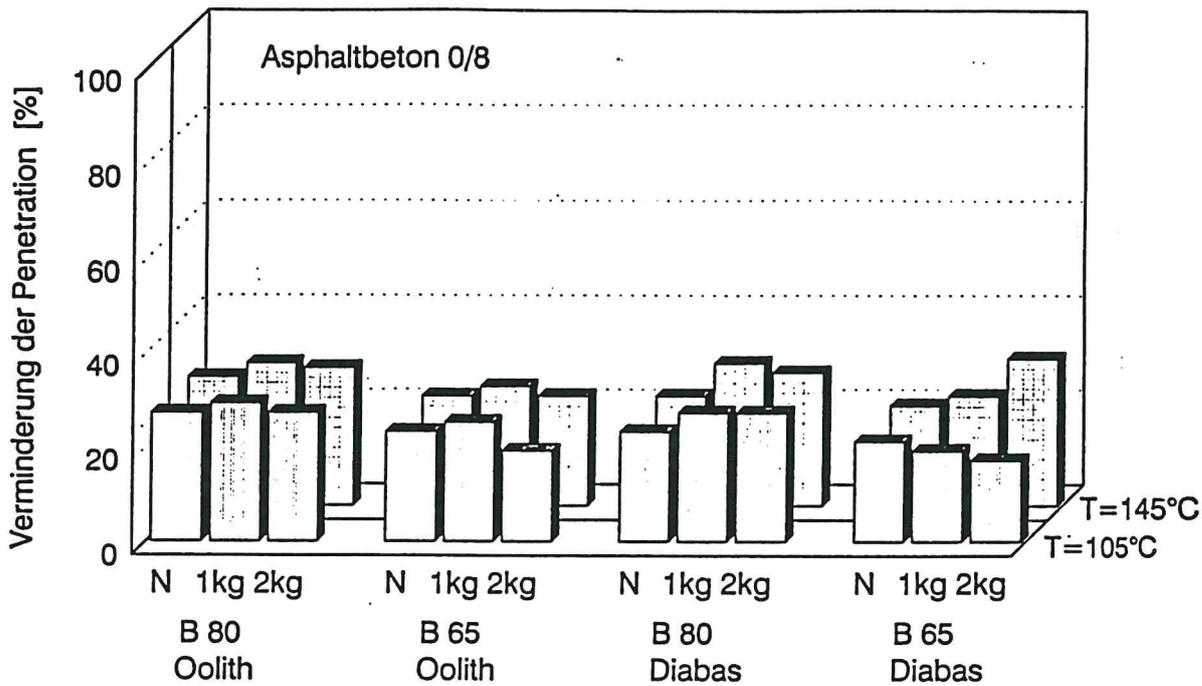


Abb. 28: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Asphaltbetonen 0/8 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

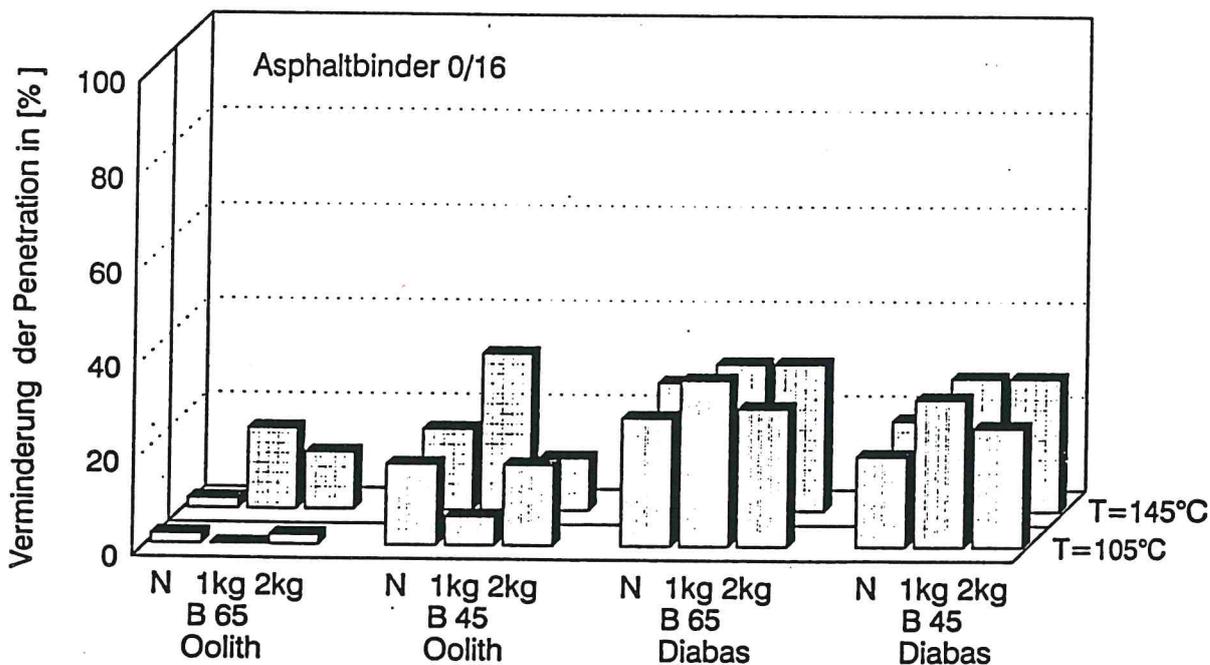


Abb. 29: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Asphaltbindern 0/16 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

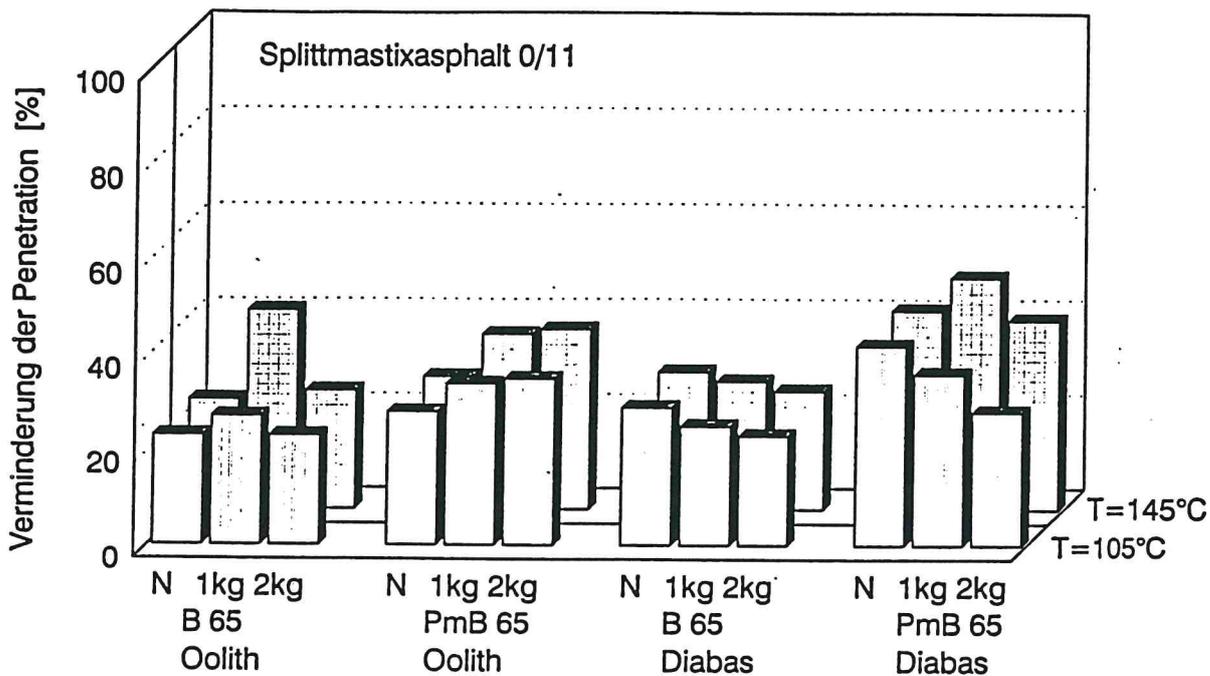


Abb. 30: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Splittmastixasphalten 0/11 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Mischgutherstellung, Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C und Wiedergewinnung

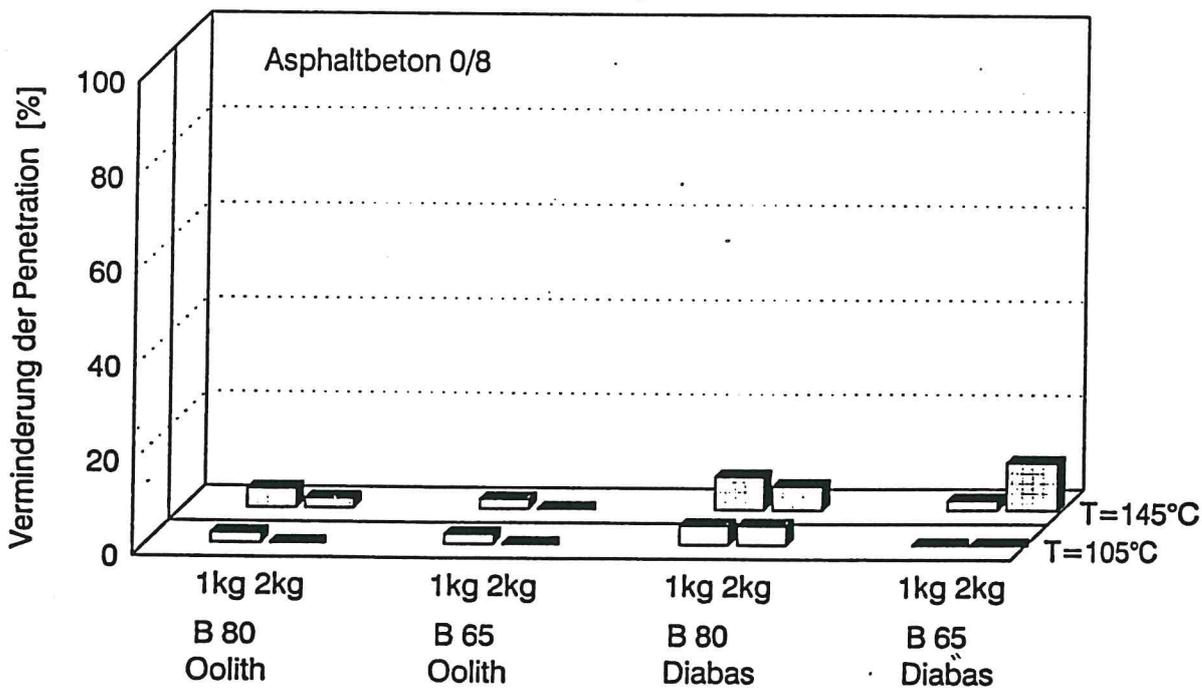


Abb. 31: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Asphaltbetonen 0/8 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

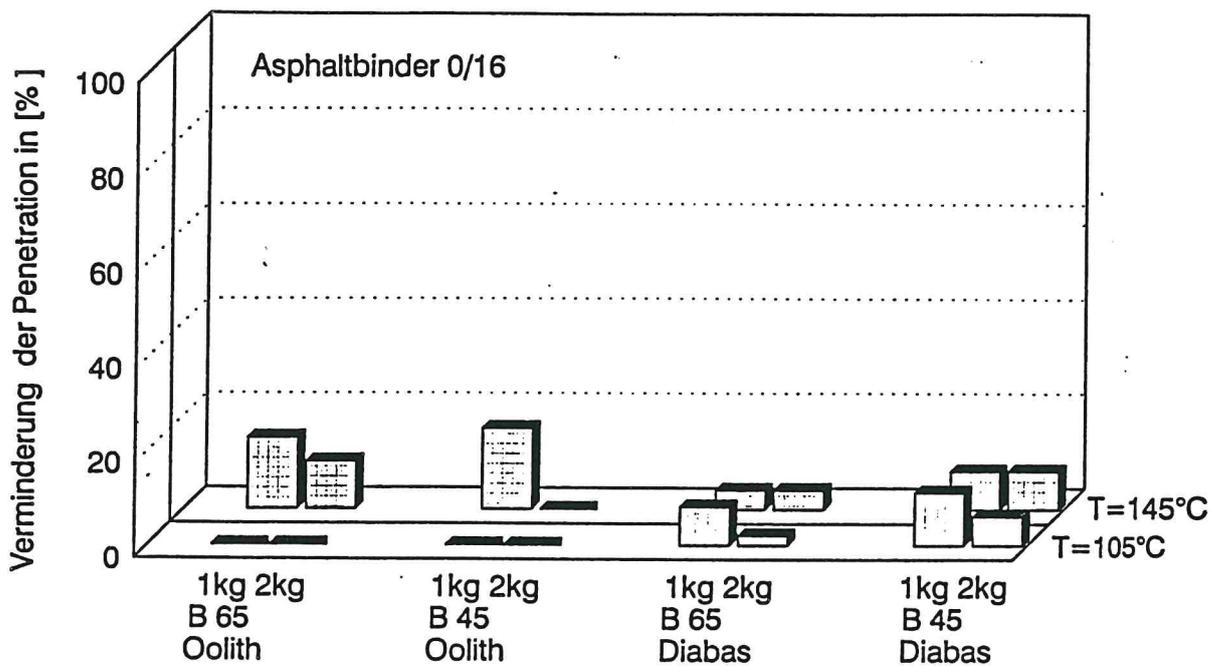


Abb. 32: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Asphaltbindern 0/16 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

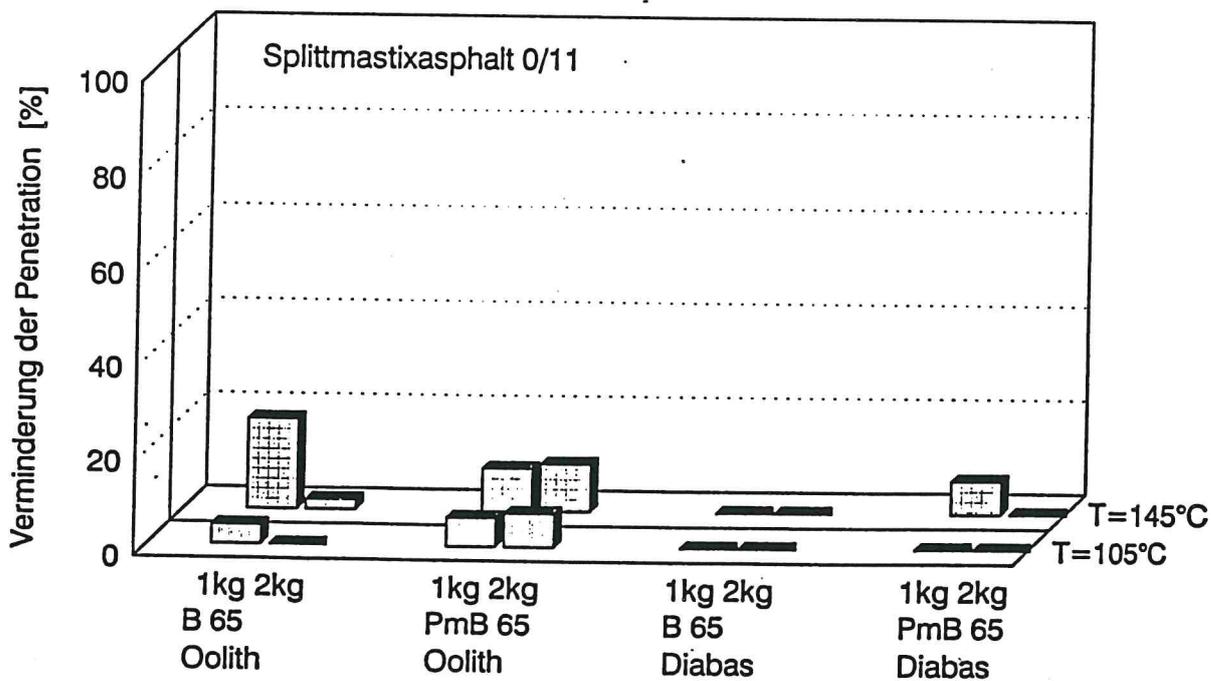


Abb. 33: Verminderung der Penetration von Bitumen aus Splittmastixasphalten 0/11 mit zwei verschiedenen Bitumensorten und zwei verschiedenen Mineralstoffarten infolge Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf Temperaturen von 105 °C beziehungsweise 145 °C

Selbst bei aufmerksamer Betrachtung der Histogramme ist ein systematischer Einfluß weder der Modalitäten der Wiedererwärmung im Mikrowellenofen noch der Mischgutvarianten zu erkennen. Daraufhin wurde eine Varianzanalyse der fünffachen Klassifikation mit dem Ziel durchgeführt, mögliche Einflüsse auf den Penetrationswert des wiedergewonnenen Bitumens festzustellen. Für diese statistischen Analysen wurde das Zahlenmaterial der Tabelle 31 verwendet. Das Ergebnisprotokoll kann der Anlage III.2 und die histogrammische Darstellung der wichtigsten Varianzkomponenten und deren prozentuale Anteile an der Gesamtvarianz können der Abbildung 34 entnommen werden.

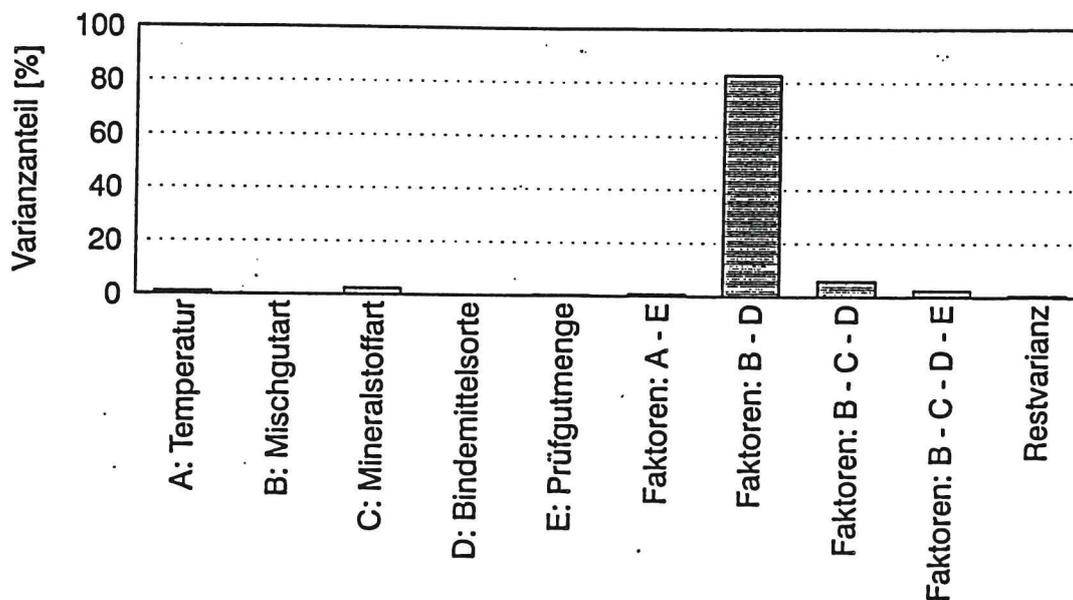


Abb. 34: Einfluß der Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik auf die Penetration des wiedergewonnenen Bitumens - Varianzanteile der Einflußgrößen und ihrer wichtigsten Wechselwirkungen als Ergebnis einer fünffachen Varianzanalyse

Das Ergebnis der Varianzanalyse der fünffachen Klassifikation gestattet die Aussage, daß die Mischgutart und die Bindemittelsorte bei der Erwärmung des Asphalts mittels Hochfrequenztechnik überhaupt keinen Einfluß auf die Veränderung der Penetration des Bitumens besitzen. Ein Einfluß der Wiedererwärmungstemperatur, der Mineralstoffart und der Prüfgutmenge wurde zwar gefunden, er ist aber äußerst gering. Der dominante Einfluß fällt mit 82,8 % auf die Wechselwirkung der Mischgutart

und der Bitumensorte (B-D). Dieser Einfluß ist aber nicht auf die Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik zurückzuführen sondern darauf, daß die unterschiedlichen Mischgutvarianten mit unterschiedlich harten Bindemitteln, gekennzeichnet durch unterschiedliche Penetrationswerte, hergestellt worden sind.

Ein Einfluß der Wiedererwärmung im Hochfrequenzverfahren auf die Viskosität des wiedergewonnenen Bitumens der Asphaltvarianten kann also nicht festgestellt werden.

3.3.5 Elastische Rückstellung

Die Versuchsergebnisse zur elastischen Rückstellung sind in der Tabelle 37 zusammengestellt.

Tabelle 37: Elastische Rückstellung des aus den Asphaltvarianten 10 und 12 nach Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik wiedergewonnenen polymermodifizierten Bitumens

Art der Wiedererwärmung		Elastische Rückstellung	
Prüfgutmenge	Temperatur	Variante 10	Variante 12
[g]	[°C]	[%]	[%]
Originalbitumen		76	76
ohne Wiedererwärmung		72	65
1000	105	Wert fehlt	63
2000	145	72	70
2000	105	78	72

Wie bereits bei der Diskussion der für die im konventionellen Wärmeschrank wiedererwärmten Asphaltvarianten gefundenen Ergebnisse zur elastischen Rückstellung,

werden auch im Fall der Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik keine Einflüsse der Mischgutzusammensetzung und/oder der Wiedererwärmungsmodalitäten auf die Werte für die elastische Rückstellung gefunden.

3.3.6 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Zur Überprüfung des Einflusses der Art der Wiedererwärmung von Asphaltproben auf die Viskosität des Bindemittels wurden unterschiedliche Probenmengen von zwölf verschiedenen Mischgutvarianten bei unterschiedlichen Temperaturen mittels Hochfrequenztechnik wiedererwärmt und anschließend das Bindemittel zurückgewonnen. Die Mischgutanalysen und die Untersuchungen am wiedergewonnenen Bitumen zeigten, daß durch die Wiedererwärmung die überprüften Merkmalsgrößen im statistischen Sinn nicht signifikant verändert worden sind.

Es konnte weder ein Einfluß der Wiedererwärmungsmodalitäten auf die kompositionellen Merkmalsgrößen Bindemittelgehalt, Füllergehalt, Sandgehalt und Splittgehalt noch ein Einfluß auf die Bitumenkennwerte Erweichungspunkt Ring und Kugel, Penetration und elastische Rückstellung nachgewiesen werden. Eine Wiedererwärmung von Asphaltproben im Mikrowellenofen ist demnach bis zu Temperaturen von $T = 145 \text{ °C}$ für das Asphaltmischgut absolut unschädlich.

3.4 Vergleich der Untersuchungsergebnisse nach Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank und mittels Hochfrequenztechnik

Programmgemäß war zu untersuchen, ob und gegebenenfalls in welchem Maße die Bedingungen der Wiedererwärmung von Asphaltmischgut im konventionellen Wärmeschrank beziehungsweise mittels Hochfrequenztechnik einen Einfluß auf

- die Zusammensetzung der Asphalte und
- die Viskosität des in den Asphalten enthaltenen Bitumens

haben würden.

Der Frage nach dem Einfluß der Wiedererwärmungsmodalitäten auf die Zusammensetzung der Asphalte wurde mittels varianzabhängiger statistischer Testverfahren nachgegangen, indem die Hypothese der Homogenität des Datenmaterials für bestimmte kompositionelle Merkmalsgrößen - nämlich den Bindemittelgehalt, den Füllergehalt, den Sandgehalt und den Splittgehalt - überprüft wurde. Im Zuge dieser Überprüfung wurde abgefragt, ob die experimentell ermittelten Werte für die Null-Probe - das ist diejenige Probe, die unmittelbar nach Herstellung des Asphalts ohne nachfolgende Wiedererwärmung gezogen wurde - zusammen mit den nach Wiedererwärmung der Asphalte ermittelten experimentellen Werten im statistischen Sinne einer Grundgesamtheit angehören oder nicht.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß sowohl für den Bindemittelgehalt als auch für die Korngrößenverteilung der im konventionellen Wärmeschrank beziehungsweise mittels Hochfrequenztechnik wiedererwärmten Asphaltproben im statistischen Sinne praktisch keine Unterschiede zu den Null-Proben festgestellt werden konnten. Es darf somit konstatiert werden, daß keines der beiden Wiedererwärmungsverfahren einen nachweisbaren Einfluß auf die Zusammensetzung wiedererwärmter Asphalte besitzt. In diesem Punkt sind die Verfahren der Wiedererwärmung von Asphalten im konventionellen Wärmeschrank und mittels Hochfrequenztechnik gleichwertig.

Gleiches läßt sich vom Einfluß der Art des Wiedererwärmungsverfahrens auf die Viskosität des in den Asphalten enthaltenen Bindemittels leider nicht sagen. Um den Einfluß der Art des Wiedererwärmungsverfahrens auf das Ausmaß der Viskositätsverschiebung quantifizieren zu können, wurde das Bitumen aus den unterschiedlich vorbehandelten Asphalten unmittelbar nach Herstellung sowie nach Herstellung und Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank beziehungsweise im Mikrowellenofen durch Extraktion zurückgewonnen. Am extrahierten Bitumen wurden der Erweichungspunkt Ring und Kugel, die Penetration und - bei polymermodifizierten Bitumen - die elastische Rückstellung ermittelt.

Unabhängig von der Art der Wiedererwärmung der Asphalte wurde unmittelbar nach deren Herstellung und Rückgewinnung des Bitumens ein Erweichungspunktanstieg

zwischen 0,0 und 5,3 K, im Mittel 3,5 K, festgestellt. Dieses deckt sich in etwa mit den Erfahrungen der Praxis, nach denen auch bei der Herstellung von Asphalten in großtechnischen Mischanlagen mit Erhöhungen des Erweichungspunktes Ring und Kugel von durchschnittlich 4 bis 5 K zu rechnen ist. Da das für die Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank vorgesehene Asphaltmischgut aus derselben Charge stammte wie das für die Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik vorgesehene, gilt der Erweichungspunktanstieg von durchschnittlich 3,5 K für beide Arten der Wiedererwärmung.

Unterschiede zeigen sich dann jedoch bei den Erweichungspunkten Ring und Kugel nach Wiedererwärmung des Asphalts. Während bei den mittels Hochfrequenztechnik wiedererwärmten Asphalten der Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel des extrahierten Bindemittels im Mittel bei 0,7 K, und im Maximum bei 2,5 K lag, wurden an den Bitumen nach Wiedererwärmung der Asphalte im konventionellen Wärmeschrank bei einer Temperatur von 105 °C Erweichungspunktanstiege zwischen 0,0 und 5,9 K, im Mittel um 2,6 K, und nach Wiedererwärmung bei 145 °C solche zwischen 3,0 und 28,3 K, im Mittel um 10,5 K, beobachtet. Bei den angegebenen Spannen für die Erweichungspunktanstiege gelten die kleineren Werte stets für die kürzeren Expositionsdauern und die höheren Werte für die längeren. Während die Mischgutart praktisch keinen Einfluß auf den Erweichungspunktanstieg hatte, wurden beim Einsatz von Diabas als Mineralstoff im Vergleich zum Oolith sowie bei härteren Bitumen im Vergleich zu weicheren stets Tendenzen zur stärkeren Nachhärtung registriert.

Ähnliches gilt auch für die Verminderung der Penetration. Nach Herstellung der Asphalte und unmittelbar anschließender Rückgewinnung des Bitumens wurden bei beiden Wiedererwärmungsverfahren Verminderungen der Penetration zwischen 2 und 27 %, im Mittel 20 %, festgestellt. Die Wiedererwärmung der Asphalte im konventionellen Wärmeschrank bewirkte bei einer Temperatur von 105 °C eine weitere Verminderung der Penetration um 6 bis 36 %, im Mittel 17,5 %, und bei einer Temperatur von 145 °C um 15 bis 63 %, im Mittel 35,8 %. In diesen Werten manifestiert sich insbesondere für den Fall der hohen Temperatur von 145 °C und der langen

Expositionsdauer von 16 Stunden eine nicht hinnehmbare Veränderung der Viskosität des Bitumens im Asphalt infolge Wiedererwärmung.

Im Gegensatz zur Wiedererwärmung von Asphalten im konventionellen Wärmeschrank verläuft die Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik sehr viel schonender. Bei Wiedererwärmung auf 105 °C wurde eine Penetrationsverminderung zwischen - 14 und + 11 %, im Mittel 0,1 %, und bei einer Wiedererwärmung auf 145 °C eine solche zwischen - 6 und + 19 %, im Mittel um 5,5 %, beobachtet. Die Wiedererwärmung von Asphalten im Mikrowellenofen verläuft also wesentlich schonender als im konventionellen Wärmeschrank. Dieses zeigt sich auch am Ergebnis einer multiplen Varianzanalyse, nach dem Unterschiede in der Penetration der extrahierten Bindemittel mit einem Varianzanteil von fast 83 % dominant der Wechselwirkung zwischen Mischgutart und Bitumensorte zuzuschreiben sind. Unterschiede in der Penetration der Bitumen nach Rückgewinnung sind also kaum dem Einfluß der Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik sondern vielmehr der systematischen Variation bei der Zusammensetzung der eingesetzten Asphalte zuzurechnen.

Keines der beiden untersuchten Verfahren zur Wiedererwärmung von Asphalten besitzt einen systematischen Einfluß auf die elastische Rückstellung polymermodifizierter Bitumen.

4. Schlußfolgerungen

4.1 Direkt mögliche Schlußfolgerungen für die Praxis

Aus den Ergebnissen des abgewickelten Versuchsprogramms läßt sich ableiten, daß selbst bei Einhaltung der in DIN 1996 Teil 3 vorgeschriebenen Bedingungen der Wiedererwärmung im konventionellen Wärmeschrank das Bitumen in einem Asphaltmischgut thermisch geschädigt werden kann. Diese Nachhärtung ist bekannt und wurde bei der Formulierung der Anforderungen an den Erweichungspunkt Ring und Kugel eines Bitumens aus Asphalt gemäß ZTV-Asphalt mit 8 K berücksichtigt. Hierin enthalten sind die möglichen Erweichungspunktanstiege aufgrund der Mischgutherstellung, der Lagerung, des Transports, der Wiedererwärmung und der Rückgewinnung.

Bei Wiedererwärmung von Asphalten im Laboratorium bei einer Temperatur oberhalb von 105 °C und bei einer Expositionsdauer von mehr als 4 Stunden, also insbesondere bei einer Wiedererwärmung bei höheren Temperaturen über Nacht, kann das Bitumen im Asphalt in einem nicht mehr hinnehmbaren Maße verhärten. Dieses Erkenntnis ist für den Fall von Bedeutung, daß größere Mischgutmengen, beispielsweise für die Herstellung von Probepplatten zur Durchführung von Spurbildungstests, auf Verdichtungstemperatur gebracht werden müssen: Erfahrungsgemäß reicht hierzu eine Wiedererwärmung selbst bei einer Temperatur von 145 °C für die Dauer von 4 Stunden nicht mehr aus. Da sich eine Nachhärtung des Bitumens infolge Wiedererwärmung des Asphalt es unmittelbar auf die Asphalteeigenschaften auswirkt - und die Asphalteeigenschaften zukünftig über sogenannte verhaltensorientierte Prüfungen angesprochen werden sollen - muß der schonenden Wiedererwärmung von Asphalt besondere Aufmerksamkeit zugemessen werden.

Aus den vorgelegten Untersuchungsergebnissen kann dagegen zweifelsfrei geschlossen werden, daß eine schonende Wiedererwärmung von Asphalt ohne

nennenswerte Schädigung des darin enthaltenen Bitumens durch Anwendung der Hochfrequenztechnik gelingt.

Im Gegensatz zur Erwärmung im konventionellen Wärmeschrank, bei welcher der Temperaturübergang von außen ins Innere der Mischgutprobe geschieht, erfolgt bei der Erwärmung der Asphaltproben mittels Mikrowellentechnik die Erwärmung von den Mineralstoffkörnern ausgehend von innen nach außen und damit sehr viel schonender. Dabei folgt die Temperatur des Bitumens der Temperatur der Mineralstoffe und kann diese deshalb nicht überschreiten.

Voraussetzung für die Wiedererwärmung von Asphalten mittels Hochfrequenztechnik ist aber eine weitgehende Beherrschung der Steuerung beziehungsweise Regelung der Mikrowellenöfen. Durch sorgfältige Abstimmung der Impuls- und Pausenzeiten ist die Wiedererwärmung so vorzunehmen, daß die Temperaturen langsam ansteigen und an allen Stellen der Mischgutproben möglichst gleich hohe Temperaturen erzeugt werden. Dazu ist die Mischgutprobe horizontal rotierend zu bewegen. Der Prozeß der Wiedererwärmung von Asphalten mittels Hochfrequenztechnik muß optimiert werden.

Mikrowellenöfen ohne Bewegungsvorrichtung und ohne Möglichkeit der Steuerung von Impuls- und Pausenzeiten sind für eine Wiedererwärmung von Asphaltproben nicht geeignet.

Für eine allgemeine Anwendung der Hochfrequenztechnik sind kontinuierliche Temperaturmessungen mittels berührungsloser Temperaturmeßsysteme, beispielsweise mittels Strahlungs-pyrometern, unerlässlich. Diese Strahlungspyrometer müssen die Temperatursignale an eine Regelelektronik weitergeben, die sicherstellt, daß die Asphalttemperaturen auch bei Mineralstoffen mit unbekanntem und unterschiedlichen Wärmekapazitäten für eine gewünschte Expositionsdauer auf einem vorgegebenen Temperaturniveau gehalten werden können.

Schließlich ist zu beachten, daß die mittels Hochfrequenztechnik wiedererwärmten Asphaltproben nicht in Metallbehälter abgefüllt werden dürfen. Als tauglich haben sich hierfür Pappkartons erwiesen, die allerdings beim Transport und Stapeln auf der Baustelle, dem Mischwerk oder dem Laboratorium Nachteile aufweisen.

Bei im Laboratorium hergestelltem Mischgut existiert dieses Problem nicht, da das Mischgut sofort in Keramikbehältnisse oder Pappkartons abgefüllt und hierin wieder- oder auf ein höheres Temperaturniveau erwärmt werden kann.

4.2 Offen gebliebene Probleme und Anregungen für weitere Forschungsarbeiten

Unbeantwortet ist bisher die Frage, welches Behältermaterial bei der routinemäßigen Entnahme von Mischgutproben zum Zwecke der Durchführung von Eigenüberwachungs-, Kontroll- oder Schiedsprüfungen praxistauglich ist und gleichzeitig eine Hochfrequenzerwärmung gestattet.

Des weiteren müssen zur Wiedererwärmung von großen Mischgutmengen, beispielsweise bis zu 20 kg, auch größere Mikrowellenöfen eingesetzt werden. Derartige Öfen mit unterschiedlichen Leistungen werden bereits im gastronomischen Gewerbe zur Erwärmung von Nahrungsmitteln verwendet. Es ist bisher ungeklärt, welche Gerätemodifikationen vorgenommen werden müssen, um die Hochfrequenztechnik für die Wiedererwärmung von Asphaltproben einsetzen zu können. Gleichzeitig ist zu prüfen, ob und gegebenenfalls in welchem Maße die Wiedererwärmungsgeschwindigkeit von der Prüfgutmenge und von der Leistung des Mikrowellenherdes abhängt.

Da das Verfahren der schonenden Wiedererwärmung von Asphalt mittels Hochfrequenztechnik prinzipiell erforscht ist, sollten die Voraussetzungen für eine allgemeingültige Anwendung geschaffen werden. Dazu müssen zunächst die Einsatzbedingungen von Mikrowellenöfen zur Wiedererwärmung von Asphalten aufgrund

systematischer Untersuchungen hinsichtlich der Prozeßregelung so festgelegt werden, daß Fehlschläge in der Praxis absolut zuverlässig vermieden werden können. Schließlich muß eine Ringanalyse mit dem Ziel durchgeführt werden, die Präzision für die Bestimmung der Änderung des Erweichungspunktes Ring und Kugel aufgrund der reinen Wiedererwärmung mittels Hochfrequenztechnik unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen festzulegen.

Braunschweig, den 30. Mai 1996

Der Bearbeiter:



(Dr.-Ing. Peter Renken)

Der Forschungsbeauftragte:



(Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Arand)

5. Literatur

- [1] Püschner, H.: Wärme durch Mikrowellen. Grundlagen, Bauelemente, Schaltungstechnik. Philips Technische Bibliothek 1964
- [2] Graalman, M.: Die Verzögerung der Bitumenalterung mit Alterungsinhibitoren. Bitumen - Teere - Asphalte - Peche und verwandte Stoffe 21 (1970) 1, 10 - 14
- [3] Zenke, G.: Über die Problematik der Untersuchung und normfähigen Erfassung spezieller Eigenschaftsmerkmale von Bitumen - Teil 3: Thermische Veränderung. Bitumen - Teere - Asphalte - Peche und verwandte Stoffe 25 (1974) 3, 87 - 90
- [4] Bisio, R.G.; Spooner, J.; Granger, J.: Asphalt Road Maintenance with a Mobil Microwave Power Unit. Journal of Microwave Power 9 (1974) 4
- [5] Zenke, G.: Modellversuche zum Ablauf der thermischen Alterung von Bitumen. Bitumen 37 (1975) 2, 238 - 240
- [6] Güsfeldt, K.H.: Bitumen, dessen Eigenschaften im Hinblick auf verschiedene Anwendungsgebiete. VDI-Bericht Nr. 252 (1976) 7 - 17
- [7] Arand, W.: Zur Alterung von Bitumen. Die Asphaltstraße 16 (1982) 4, 159 - 163
- [8] Gay, G.C.W.: Bestimmung des Wassergehalts mit Mikrowellen. Schlußbericht zum Forschungsauftrag FA 5.074 des Bundesministers für Verkehr, Stuttgart 1983
- [9] Neumann, H.-J.: Oxidation von Bitumen bei Gebrauchstemperaturen. Erdöl - Erdgas - Kohle (1987) 3, 131 - 133
- [10] Müller-Rochholz, J.: Hochfrequenzerwärmung von Asphalt. Bitumen 50 (1988) 4, 158 - 162
- [11] Richter, E.: Zur Verhärtung des Bitumens und deren Auswirkung auf die Lebensdauer von Asphaltbetondeckschichten. Bitumen 51 (1989) 1, 13 - 18
- [12] Arand, W.; Renken, P.: Entwicklung eines im Laboratorium anwendbaren Verdichtungsverfahrens, durch welches Walzasphalten dieselben mechanischen Eigenschaften wie bei der Walzverdichtung in der Praxis vermittelt werden. Schlußbericht zum Forschungsauftrag 07.123 G 86 I des Bundesministers für Verkehr, Braunschweig 1990
- [13] Renken, P.: Erwärmung von Asphalt mittels Mikrowellen. Bitumen 56 (1994) 3, 108 - 111
- [14] DIN 1996: Prüfung von Asphalt, Teile 2, 3, 4, 6, 7, 14 und 20; jeweils neueste Ausgabe. Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln
- [15] Prüfung von Bitumen: DIN 52010 Bestimmung der Nadelpenetration.
DIN 52011 Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel.
Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln
- [16] Sachs, L.: Angewandte Statistik. Springer-Verlag Berlin - Heidelberg - New York, 6. Auflage 1984