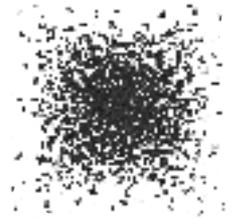


FACHHOCHSCHULE FRANKFURT MAIN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

FACHBEREICH BAUINGENIEURWESEN
Prof. Dr.-Ing. R.-R. Schulz



Entschichten durch Kaltstrahlen
Diplomarbeit im WS 2000/2001

von Márton G. Hajós

Entschichten durch Kaltstrahlen

Diplomarbeit vorgelegt von
Márton Gergely Hajós
geb. 21.08.1973
Matrikelnummer: 532955

Fachhochschule Frankfurt Main
Fachbereich Bauingenieurwesen
WS 2000/2001

Referent: Prof. Dr.-Ing. R.-R. Schulz
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. R. Gerster

Vorwort

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing R.-R. Schulz dafür bedanken, daß er mir sehr kurzfristig die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit überhaupt anfertigen zu können. Durch seine intensive Betreuung während der gesamten Bearbeitungszeit, hatte ich dabei jederzeit die Gewißheit den richtigen Weg zu gehen und konnte nicht zuletzt aus diesem Grund die vorliegende Arbeit erfolgreich beenden.

Meinen besonderen Dank möchte ich den Mitarbeitern des Betonlabors des Fachbereichs aussprechen, dabei einen ganz persönlichen an Herrn Stefan Herborn, auf deren praktische Hilfe ich mich besonders im Zuge der verschiedenen Versuche immer verlassen konnte. Insbesondere hat mir die immer freundliche und kollegiale Atmosphäre die Arbeit im Labor sehr erleichtert. Auch hierfür vielen Dank.

Ich danke außerdem der Firma MC-Bauchemie für die freundliche unentgeltliche Bereitstellung der Beschichtungsstoffe, ohne die diese Diplomarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Herrn C. Andreesen von der Firma Bilfinger und Berger und Herrn Dipl.-Ing. Otter von der Firma Ether Bau danke ich für die unkomplizierte Hilfe beim Freistrahlen der Frischbetonprobekörper.

Für die Entschichtungsversuche mittels Trockeneisstrahlen danke ich der Firma LKY Kältetechnik, die mir diese Versuche unentgeltlich ermöglicht hat. Mein persönlicher Dank gilt dabei Herrn Dipl.-Ing. Frank Hoffart, der sich viel Zeit für mich nahm und mir mit ausgezeichnetem fachlichen Rat zur Seite stand.

In diesem Zusammenhang möchte ich ebenfalls der Firma Green Tech Trockeneisstrahlanlagen und dabei insbesondere dem Geschäftsführer Herrn Raphael Rotstein für die fachliche Beratung meinen Dank aussprechen.

Danke auch an Herrn Dipl.-Ing. Juhnke vom Fachbereich MND, der mir für die Zeit der Stickstoffversuche ein Dewargefäß zur Verfügung gestellt hat.

In diesem Zusammenhang möchte ich mich ebenfalls bei der Firma NMS für das schnelle Liefern des für die Versuche benötigten flüssigen Stickstoffs bedanken.

Vielen Dank auch an die Mitarbeiter der Schreinerei der Fachhochschule, die mich selbst beim fünften Besuch mit offenen Armen empfangen haben und daher ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein persönlicher Dank gilt insbesondere Herrn cand. ing. Knut Anthes, mit dem ich gemeinsam alle Versuche unserer beiden Diplomarbeiten durchgeführt habe und dabei immer auf ihn zählen konnte.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Freundin und Lebenspartnerin Tatjana und meinen beiden Familien bedanken, die mich während meiner Studienzeit immer unterstützt und nie allein gelassen haben.

Frankfurt, im Dezember 2000

Márton G. Hajós

Inhalt:	Seite
0 Aufgabenstellung	
1 Einleitung	1
1.1 Umweltrechtliche Problemstellung bei den bisherigen Verfahren	1
1.2 Wirkungsweise cryogener Verfahren	3
2 Vorstellung der einzelnen Verfahren	4
2.1 Fluten mit flüssigem Stickstoff	4
2.1.1 Vorbemerkungen	4
2.1.2 Wirkungsweise	4
2.1.3 Benötigte Ausrüstung	7
2.2 Trockeneis-/Wassereisstrahlen	7
2.2.1 Vorbemerkungen	7
2.2.2 Trockeneisstrahlen	10
2.2.2.1 Wirkungsweise	10
2.2.2.2 Benötigte Ausrüstung	14
2.2.3 Wassereisstrahlen	15
2.2.3.1 Wirkungsweise	15
2.2.3.2 Benötigte Ausrüstung	16
3 Vorüberlegungen und Vorbereitungen zu den Hauptversuchen	17
3.1 Untergrund	17
3.2 Beschichtung	18
3.3 Überprüfung des Verbundes	19
3.4 Temperaturmessungen	20
4 Durchführung der Entschichtungsversuche	22
4.1 Allgemeines	22
4.2 Entschichtung mittels flüssigem Stickstoff	22
4.3 Entschichtung mittels Trockeneisstrahlen	23
4.4 Entschichtung mittels Vakuumsandstrahlen	23
5 Auswertung der Ergebnisse	24
5.1 Flüssiger Stickstoff	24
5.2 Trockeneisstrahlen	25
5.3 Wassereisstrahlen	27
6 Fazit	28
7 Anlage 1 und Abbildungen	29
8 Literatur	56

Diplomarbeit

Bearbeiter: Marton G. Hajos

Thema: Entschichten durch Kaltstrahlen

Anstriche und Beschichtungen haben nur eine begrenzte Lebensdauer und sind nicht wartungsfrei. Dies bedeutet, daß sie in bestimmten Zeitabständen erneuert werden müssen. Angesichts der zahlreich ausgeführten Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen an Betonbauteilen dürfte diese Aufgabe künftig immer häufiger anfallen. In manchen Fällen verkürzen sich die Erneuerungsintervalle durch mangelhafte Ausführung bzw. mangelhafte Materialien. Vor dem Auftragen neuer Anstriche und Beschichtungen müssen die Altbeschichtungen in der Regel entfernt werden, weil sie z.T. nur unzureichend am Untergrund haften oder selbst schadhaft sind. Hinzu kommen ggf. Unverträglichkeiten mit nachfolgenden Materialien oder insgesamt zu große Schichtdicken, die die bauphysikalischen Eigenschaften des Bauwerks beeinträchtigen können. Herkömmliche Entschichtungsmethoden sind z.T. sehr arbeitsaufwendig und/oder umweltgefährdend.

Beim Kaltstrahlen wird die Beschichtung entweder durch thermische Spannungen und/oder durch Strahlimpulse abgelöst. Das umweltfreundliche Strahlmittel verdampft und es findet keine Vermischung mit dem Strahlgut statt, was den Entsorgungsaufwand minimiert. Aufgrund dieser Vorteile erscheint das Verfahren auch für die Entschichtung von Betonbauteilen interessant zu sein. Bisher liegen dazu allerdings erst wenig Erfahrungen vor. In der vorliegenden Diplomarbeit sollen daher die Möglichkeiten des Kaltstrahlens von beschichtetem Beton mit eigenen Versuchen weiter erforscht werden.

Die Aufgabe umfaßt im einzelnen:

- ▶ Literaturlauswertung
- ▶ Versuchsplanung (ggf. Vorversuche zur Festlegung der Parameter)
- ▶ Durchführung der Hauptversuche
- ▶ Auswertung der Ergebnisse
- ▶ Schlußfolgerungen im Hinblick auf die Umsetzbarkeit in die Praxis
- ▶ Ausblick

Beginn: 09.10.2000

Fertigstellung: 21.12.2000



(Dr.-Ing. R.-R. Schulz)

1 Einleitung

Ist eine vorhandene Beschichtung unerwünscht oder schadhaft und muß deshalb erneuert werden, so stellt sich für das Entschichtungssystem die Aufgabe den Untergrund von den Resten der ursprünglichen Beschichtung zu befreien sowie etwaige oberflächige Verunreinigungen zu entfernen. Zusätzlich kann als weiteres Kriterium vorgegeben sein den Untergrund nicht zu beschädigen, sei es aus optischen oder statisch-konstruktiven Überlegungen.

Gemäß den einschlägigen Richtlinien soll eine zu beschichtende Betonunterlage dabei unter anderem gleichmäßig fest und frei sein von artfremden Stoffen, scharfen Schalungskanten und Graten. Außerdem soll sie eine dem zu verwendenden Stoff angepaßte Rauheit aufweisen und darf weder abmehlen noch absanden [1], [2]. Sind diese Parameter eingehalten, kann eine optimale Haftung der dann folgenden neuen Beschichtung gewährleistet werden.

Bisher wird diese Aufgabe durch herkömmliche, seit langem erprobte Entschichtungssystemen bewerkstelligt. Dabei fallen jedoch durch die Funktionsweise der Entschichtungssysteme (je nach Verfahren) ungewollte, unterschiedlich stark kontaminierte Reststoffe an, die gemäß den einschlägigen abfallrechtlichen Vorschriften wirksam aufgefangen und entsorgt werden müssen. Möglich ist in manchen Fällen zwar eine vor der Entsorgung durchzuführende Trennung des Strahlmittels, daß dann nach sorgfältiger Reinigung wiederverwendet werden kann, jedoch ist dies mit zusätzlichem Aufwand verbunden und verschlechtert dabei die Entschichtungsleistung. Bei der Entschichtung durch Kaltstrahlen verflüchtigt sich das verwendete Strahlmittel nach der Applikation auf die zu entfernende Beschichtung, bzw. ist im Falle von Wassereisstrahlen nur noch als geringe Menge von Wasser vorhanden, so daß keine zusätzliche Kontaminierung/Verschmutzung zu der ohnehin schon vorhandenen entsteht.

1.1 Umweltrechtliche Problemstellung bei den bisherigen Verfahren

Das Problem der in den letzten Jahren zunehmenden Umweltbelastung durch steigende Reststoffmengen, die z.B. durch immer häufiger ausgeführte Instandsetzungsmaßnahmen anfallen und der damit verbundenen Verknappung der Deponiekapazitäten hat zu immer höheren Kosten in der Reststoffentsorgung geführt. Durch das 1996 eingeführte Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [3] wurde dieser Umweltproblematik durch den Gesetzgeber Rechnung getragen, seitdem steht die Schließung von Stoffkreisläufen im umweltpolitischen Vordergrund. Das bedeutet am Beispiel der Entfernung von Beschichtungen, daß nach den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft [3] „Abfälle (...)

1. in erster Linie zu vermeiden, insbesondere durch die Verminderung ihrer Menge und Schädlichkeit,
2. in zweiter Linie
 - a. stofflich zu verwerten oder
 - b. zur Gewinnung von Energie zu nutzen (energetische Verwertung) (sind)“.

Demnach kommt als Maßnahme zur Vermeidung von Abfällen insbesondere die anlageninterne Kreislaufführung von Stoffen in Betracht, was in einigen Fällen bereits

umgesetzt wurde. Beispielsweise kann mit dem Vakuumsandstrahlverfahren oder dem Kugelstrahlverfahren sogar praktisch staubfrei gearbeitet und das Strahlmittel mehrfach wiederverwendet werden. Allerdings stehen dem Vorteil dieser realtiv umweltfreundlichen Verfahren höhere Kosten und in der Regel eine geringere Strahlleistung gegenüber; sie eignen sich eher für den kleinflächigen Einsatz an einzelnen Stellen [4].

Ist eine anlageninterne Kreislaufführung nicht möglich, müssen Abfälle (kontaminierte Reststoffe) dauerhaft von der Kreislaufwirtschaft ausgeschlossen und beseitigt werden [3], was nur auf entsprechenden Deponien geschehen darf und mit ebenfalls hohen Kosten verbunden ist.

Das 1996 teilweise neugefaßte Wasserhaushaltsgesetz knüpft an das umwelpolitische Konzept des Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetzes an und stellt hohe Auflagen an Anlagen mit wassergefährdenden Stoffen [5]. Diese müssen so beschaffen sein und so betrieben werden, daß eine Verunreinigung der Gewässer ausgeschlossen werden kann. Zum Beispiel beim Hochdruckwasserstrahlen muß daher das in großen Mengen anfallende Wasser bzw. der kontaminierte Schlamm erfaßt und entsorgt oder aufbereitet werden. Dies verursacht wiederum erhöhte Kosten.

Die seit dem 01. Januar 2000 gültige Gefahrstoffverordnung [6] konkretisierte die zu treffenden Schutzmaßnahmen, das Arbeitsverfahren ist nun so zu gestalten, daß gefährliche Gase, Dämpfe oder Schwebstoffe nicht frei werden und Arbeitnehmer nicht mit diesen in Kontakt kommen. Kann durch solche Schutzmaßnahmen eine Kontamination der Umgebung nicht unterbunden werden, sind die durch die Arbeiten frei gewordenen Stoffe an ihrer Austritts- oder Entstehungsstelle vollständig zu erfassen und anschließend zu entsorgen. Ist dies ebenfalls nicht möglich, so sind entsprechende Lüftungsmaßnahmen zu treffen. Diese drei Hauptvorschriften beziehen sich dabei jeweils auf den *Stand der Technik*. In § 7a Abs. 4 des Wasserhaushaltsgesetzes [5] ist eine genaue Definition des Begriffes „Stand der Technik“ formuliert, demnach „ist (er) der Entwicklungsstand technisch und wirtschaftlich durchführbarer fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, die als beste verfügbare Techniken zur Begrenzung von Emissionen geeignet sind.“

Unter diesem Gesichtspunkt ist eine genauere Untersuchung weiterer Möglichkeiten der umweltfreundlichen Entschichtung von Betonoberflächen praktisch zwingend geboten und ratsam, da man in Anbetracht einer weiter steigenden Umweltverschmutzung von einer noch strengeren Umweltpolitik ausgehen kann. Mangels einer wirksamen Überwachung werden heute grundlegende Aspekte des Umweltschutzes in der Praxis leider immer noch häufig nicht befolgt. Ist beispielsweise bei Sandstrahlarbeiten die Umgebung nicht mittels einer Einhausung vor abgetragenen Rest- bzw. Schwebstoffen geschützt, sind kontaminierte „Staubwolken“ und millimeterdicke Ablagerungen in unmittelbarer Nähe dann leider keine Seltenheit. Dies kann und wird jedoch mit Sicherheit in Zukunft unterbunden werden. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Untersuchung der noch neuen umweltfreundlichen Verfahren der Entschichtung von Betonoberflächen mittels Kaltstrahlen.

In Abbildung 1 sind die umweltrechtlichen Probleme der heute üblichen automatisierten Entschichtungsverfahren für oberflächennahe Schichten zusammengestellt.

1.2 Wirkungsweise cryogener Verfahren

In jüngster Zeit werden cryogene Verfahren häufiger als neue Reinigungstechnik in umweltkritischen Bereichen (beispielsweise bei Reinigungen im Atomreaktorbereich), sowie zur Reinigung sehr empfindlicher Bauteile eingesetzt. Hierbei kommen drei unterschiedliche cryogene Reinigungs- bzw. Entschichtungsverfahren zum Einsatz:

- das Fluten mit flüssigem Stickstoff,
- das Strahlen mit Trockeneis und
- das Strahlen mit Wassereiskristallen.

Sie sind in ihrer Wirkungsweise zwar unterschiedlich, haben jedoch die grundlegende Gemeinsamkeit auf eine plötzliche Abkühlung der Beschichtung zu basieren. Durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Beschichtung und des Untergrundes können sich dabei erhebliche Zwangsspannungen aufbauen; die dabei entstehende tiefe Abkühlung führt dann zusätzlich zu einer Versprödung und Elastizitätsverlust der Beschichtung. Daraus können Auflockerungen zwischen den beiden Materialien entstehen, was bei günstigen Bedingungen sogar zu Ablösungen führen kann. Diese Zwangsspannungen sind umso höher, je unterschiedlicher die Wärmeausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien sind und/oder je höher der Temperaturunterschied zwischen den beiden Schichten ist. Wird das Bauteil daher vor der Entschichtung z.B. durch Sonnenstrahlen erwärmt, müßte die Beschichtung durch ein cryogenes Verfahren leichter zu entfernen sein, da durch die Erwärmung das Temperaturgefälle noch höher wird und dadurch noch höhere Zwangsspannungen entstehen. Dieser Effekt wird durch die im allgemeinen schlechte Wärmeleitfähigkeit der Beschichtung und dem daher hohen Wärmedurchlaßwiderstand, durch die im Vergleich zum Untergrund sehr geringe Schichtdicke und durch das träge Wärmeverhalten des Betons ermöglicht. Bei einer längeren Erwärmungsphase von mehreren Sonnenstunden wird das Bauteil trotzdem bis in tiefer liegende Schichten aufgewärmt. Dabei herrscht in der obersten Schicht des Untergrundes in der Regel praktisch dieselbe Temperatur wie an der Oberfläche, so daß dann bei der Behandlung mit einem cryogenen Verfahren die höchstmöglichen Zwangsspannungen in der Grenzschicht entstehen und die Beschichtung sich vom Untergrund ablösen kann.

Dabei sind alle drei Verfahren umweltfreundlich, sie verursachen keine ungewollte zusätzliche Reststoffe wie die heute üblichen Verfahren dies tun; nach der Applikation wechseln sie in den gasförmigen bzw. flüssigen Aggregatzustand und entweichen demzufolge schlicht in der Luft bzw. verbleiben als geringe Feuchte an der Oberfläche zurück. Zusätzlich haben sie die Eigenschaft den Untergrund nicht zu beschädigen, was ganz nebenbei eine Entsorgung der anfallenden Reststoffe aus der Beschichtung sehr vereinfacht und die anfallende Reststoffmenge stark verringert.

Mit den heute gebräuchlichen Verfahren ist eine derart gezielte, kontrollierte Entschichtung sehr schwierig, ohne ungewollt auch Teile des Untergrundes abzutragen. Mit den zu untersuchenden Verfahren könnte daher insgesamt weit effektiver gearbeitet werden. Die getroffenen Annahmen und Überlegungen werden in den folgenden Kapiteln näher durchleuchtet.

2 Vorstellung der einzelnen Verfahren

2.1 Fluten mit flüssigem Stickstoff

2.1.1 Vorbemerkungen

Flüssiger Stickstoff wird im Bauwesen bereits seit einiger Zeit eingesetzt; im Fordergrund stand dabei bisher insbesondere die Bodenvereisung stark wasserhaltiger bindiger, zum Fließen neigender Böden beispielsweise im Tunnelbau oder bei Baugruben. Ebenso kann Frischbeton durch Stickstoff gekühlt werden, um Rißbildungen infolge thermischer Spannungen durch die Hydratationswärme massiger Bauteile steuern bzw. verhindern zu können [7].

Im Bereich des Stahlbaus wird zwar bereits seit einigen Jahren an der Tauglichkeit des Stickstoffs bezüglich der Entschichtung von Stahlflächen geforscht, doch existieren hierzu noch keine endgültigen Ergebnisse. Prof. Dr. Ing. Heinz Klopfer von der Universität Dortmund hat hierzu feststellen können, daß bei Beschichtungen auf Stahlbauteilen Schichtdicken von wenigstens 500 µm erforderlich sind, um dieses Verfahren erfolgreich einsetzen zu können [8].

2.1.2 Wirkungsweise

Das Verfahren basiert ausschließlich auf thermische Spannungen und Versprödung der Beschichtung, die durch das -196 °C kalte flüssige Stickstoff in das Material induziert werden. Da diese jedoch durch die entstehenden thermischen Spannungen allein nicht entfernt werden kann, muß in einem zweiten Arbeitsgang die gelockerte Beschichtung mechanisch nachbearbeitet werden. Das Verfahren könnte jedoch durch die Auflockerung die Anwendung umweltschonender Entschichtungssysteme ermöglichen, die für sich allein genommen ungeeignet wären oder einen zu großen Zeitaufwand bedeuteten (z.B. Kugelstrahlen, oder Sandstrahlen).

Maßgebend für den Erfolg dieses Verfahrens ist der Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha^{(1)}$ der Beschichtung (er muß höher sein als der des Untergrundes), der E-Modul sowie die Dicke der Beschichtung. Zwei Wirkungsmechanismen kommen dabei in Betracht:

1. Spannungen in der Grenzschicht

a)

Bei der Beaufschlagung mit flüssigem Stickstoff wird das Material zumindest kurzfristig durch eine ungleichmäßige Temperaturänderung $\Delta t^{(2)}$ belastet, da an der Grenzschicht zum Untergrund noch die ursprüngliche Temperatur herrscht, gleichzeitig jedoch an der Oberfläche der Beschichtung bereits eine plötzliche Abkühlung durch das flüssige Stickstoff erfolgt ist.

Es entsteht ein Temperaturgefälle von innen nach außen, wobei die thermischen Spannungen dadurch entstehen, daß die oberste Beschichtungsschicht schrumpft und die tiefer liegenden, wärmeren Schichten dieser Bewegung nicht im selben Maße folgen können.

Die Beschichtung würde sich genau dann an den Rändern vom Untergrund abheben, wenn die resultierenden Kräfte der entstehenden Zwangsspannungen infolge behinderter Verformung größer würden als die Adhäsion⁽³⁾ zwischen Untergrund und Beschichtung.

(1) α = Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist die Verformung um eine Längeneinheit je Temperaturänderung von 1 K [1/K].

(2) $\Delta t = t_{\text{Oberfläche}} - t_{\text{Grenzschicht}} \quad 0 \text{ [K]}$.

(3) Adhäsion = „das Aneinanderhaften der Moleküle im Bereich der Grenzfläche zweier verschiedener Stoffe [9].

Vorraussetzung für diesen Effekt ist, daß ein möglichst großer Temperaturunterschied t zwischen Grenzschicht zum Untergrund und der Oberfläche der Beschichtung vorhanden und die Dicke der Beschichtung möglichst klein ist. Sind diese Parameter nicht gleichzeitig gegeben, bleibt die Verformung quer zur Grenzschicht und die entstehenden Zwangsspannungen sehr klein, so daß es dann nicht zu einer Ablösung in der Beschichtung kommen kann (Abbildung 2).

Allein infolge der in der Regel maximal wenige Millimeter dicke Beschichtung würde sich bei einem gleichzeitig hohen Temperaturunterschied eine sehr große Verformung ergeben.

Da die Dicke der Beschichtung jedoch nicht nur die Verformung sondern zusätzlich auch den Wärmedurchlaßwiderstand $1/\lambda$ ⁽⁴⁾ beeinflusst, ist der Temperaturunterschied t durch die dünne Beschichtung höchstwahrscheinlich sehr gering. Die Temperatur in der Grenzschicht wird sich daher nur gering von der Oberflächentemperatur unterscheiden, so daß Verformungen quer zur Grenzschicht infolge ungleichmäßiger Temperaturänderung als mögliche Versagensursache ausscheiden und man vereinfachend davon ausgehen kann, daß

b)

die Wirkungsweise eher auf eine gleichmäßige Temperaturänderung t_s ⁽⁵⁾ beruht. Es wird sich dabei eine praktisch gleichmäßige Verkürzung längs der Grenzschicht über die gesamte Dicke der Beschichtung einstellen, die durch den in der Regel höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten der im Bauwesen eingesetzten Beschichtungen größer ist, als die des Untergrundes. Die Verformung in der Grenzschicht wäre hier also gleich der an der Oberfläche der Beschichtung, wenn sie nicht durch die Adhäsion behindert wäre. Die hierbei entstehenden Zwangsspannungen infolge behinderter Dehnung breiten sich als Scherspannung konstant über die Grenzschicht zum Untergrund aus. Übersteigen die resultierende Zwangskräfte die Adhäsion, können sie schließlich zum Abscheren der Beschichtung in der Grenzschicht zum Untergrund führen (Abbildung 3).

In Wirklichkeit kann nicht genau gesagt werden welche der beiden Wirkungsweisen wieviele Spannungen erzeugen. In der Natur wird niemals ein Effekt alleine auf die Beschichtung einwirken, vielmehr wird je nach vorhandenen Parametern mal der eine und mal der andere überwiegen. Wenn es jedoch gelänge den flüssigen Stickstoff gleichmäßig über die gesamte zu entschichtende Fläche zu verteilen, wäre in Anbetracht der in der Regel sehr dünnen Schichtdicken vermutlich die Temperaturänderung über die gesamte Dicke tatsächlich ungefähr gleich, so daß die Spannungen infolge t vernachlässigbar klein werden würden.

2. Versprödung der Beschichtung

Rebhan [10] berichtet von stationären Entlackungsanlagen, daß beim Eintauchen lackierter Bauteile aus Stahl in flüssigen Stickstoff zusätzlich ein „Aufreißen“ der Lackschicht auftritt, was auf die Versprödung durch die sehr tiefen Temperaturen zurückzuführen ist. Dabei seien beim Entlacken von Stahlteilen in zwei bis drei Minuten selbst zentimeterdicke Lackschichten so stark abgekühlt, daß sie durch die

⁽⁴⁾ $1/\lambda$ = Schichtdicke (s)/ Wärmeleitfähigkeit (λ) [$m^2 \cdot K/W$].

⁽⁵⁾ t_s = Gleichmäßige Temperaturänderung über die gesamte Dicke eines Bauteils ($t = 0$) [K].

Kälte ihre Elastizität verloren haben und „glasartig“ werden [11]; allerdings kann bei den von ihm beschriebenen Verfahren die vorhandene Wärme durch das vollständige Eintauchen in den flüssigen Stickstoff optimal ausgenutzt werden. Durch die dadurch bedingte starke Abkühlung erhöht sich der E-Modul und es kommt zu einer Versprödung des Materials. Die infolge der gleichmäßigen Temperaturänderung t_s entstehende Schrumpfung innerhalb der Lackschicht wird behindert, was wiederum zu den schon beschriebenen Zwangsspannungen führt. Diese treten hierbei jedoch in Form von Zugspannungen auf, die infolge der sehr tiefen Abkühlung und des dadurch hohen E-Moduls entstehen und schließlich zu Haarrissen in der Lackschicht führen können.

Diese Erkenntnis ist im übertragenen Sinne höchstwahrscheinlich auch für Betonbeschichtungen richtig. Im Bauwesen könnte jedoch nur von einer Seite gekühlt werden, daher wird der Versprödungseffekt höchstwahrscheinlich weniger stark ausfallen als dies bei stationären Anlagen beobachtet werden konnte.

Beide Effekte, die Scherspannung in der Grenzschicht und die Zugspannung innerhalb der Beschichtung, sind also hauptsächlich für den Erfolg der Entschichtung mit flüssigem Stickstoff verantwortlich; beides hängt ursächlich vom Wärmeausdehnungskoeffizienten, dem E-Modul der zu entfernenden Beschichtung und der Schichtdicke ab.

Wahrscheinlich ist daher auch, daß die Beschichtung eines Betonuntergrundes analog zu den Versuchen bzw. Anlagen Rebhan's nicht allein durch die thermischen Spannungen entfernt werden kann. Eine mechanische Nachbearbeitung ist daher unmittelbar nach und/oder während der Beaufschlagung durch den flüssigen Stickstoff höchstwahrscheinlich nötig, um eine restlose Entfernung sicherstellen zu können. Im Falle der schon erwähnten Versuche werden von Rebhan [10] Schleuderrad-Strahlanlagen vorgeschlagen, da hierbei das Strahlmittel durch die Wirkungsweise des Verfahrens relativ leicht von der entfernten Beschichtung getrennt werden kann⁽⁶⁾. Der gesamte Aufwand wird dadurch natürlich größer, doch wird die Entschichtung erheblich durch die vorhergehende umweltschonende Auflockerung durch das flüssige Stickstoff erleichtert und dieser Vorteil nicht durch zusätzliche Reststoffe wieder zunichte gemacht. Weiterhin konnte Rebhan beobachten, daß bei cryogenen Entlackungsanlagen ein hoher Anteil der Beschichtung durch die starke Versprödung in Korngrößen vorliegt, die ein einfaches Trennen durch Absieben erlauben [11]; ähnlich könnte es bei Beschichtungen von Betonbauteilen aussehen, was ein Kombination beider Verfahren begünstigen würde, da sich beide gegenseitig gut ergänzen. Vermutlich kann keines der beiden Verfahren alleine den gewünschten Effekt erreichen, was ebenfalls für eine Kombination spricht. Die durch das flüssige Stickstoff gelockerte Beschichtung könnte zwar auch manuell -z.B. durch Meißel- restlos entfernt werden, doch ist dies nur für sehr kleine Flächen oder sehr unzugängliche Bereiche praktikabel.

Aus der Überlegung, daß das Verfahren auf die cryogene Abkühlung der beaufschlagten Beschichtung beruht und die im Bauwesen zu bearbeitenden Bauteile überwiegend im Freien anzutreffen sind, ergeben sich je nach Klima unterschiedliche Temperaturdifferenzen. Im Sommer muß das Bauteil länger abgekühlt werden als in der kälteren Jahreszeit, da es stark aufgewärmt sein kann. Natürlich ergeben sich bei einer plötzlichen Abkühlung eines warmen Bauteils höhere Spannungen, was die Wirkung cryogener Verfahren bei aufgewärmten Bauteilen begünstigen würde. Da die Wirkungsweise jedoch sowohl auf die Zugspannungen infolge Ver-

⁽⁶⁾ Beim Kugelstrahlen werden kleine Stahlkugelchen mittels eines Schleuderrades auf die zu behandelnde Fläche geschleudert und durch einen Magnetbesen vom Boden wieder aufgenommen, um im Gerät von Reststoffen getrennt und dem Kreislauf wieder zugeführt zu werden [4].

sprödung der Beschichtung, als auch auf die Scherspannungen in der Grenzschicht infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten basiert, bleibt die erforderliche Temperaturdifferenz bis zur Auflockerung der Beschichtung höchstwahrscheinlich etwa gleich groß. Da die Beschichtung sich während der Erwärmung ausdehnt, wird die Schrumpfung insgesamt größer sein als bei einem kälteren Bauteil. Es ist also wahrscheinlich, daß nicht in dem Maße abgekühlt werden muß um dieselbe Auflockerung zu erreichen wie bei einer kälteren Beschichtung. Die höheren Scherspannungen würden in dem Fall die niedrigeren Zugspannungen infolge nicht so starker Versprödung aufheben.

2.1.3 Benötigte Ausrüstung

Flüssiger Stickstoff kann mit einem Kleinmengenfahrzeug oder einem größeren Tankwagen geliefert werden und wird dabei in vorhandene Tankanlagen oder durch die Lieferfirma mietweise bereitgestellte Dewargefäße umgefüllt (Abbildung 4). Diese haben einen recht hohen Verdampfungsverlust, so daß ein möglichst schneller Verbrauch vorzusehen ist. Beispielsweise hat die kleinste stationäre Tankanlage T 18 S 6 der Firma LINDE bei einem Nutzvolumen von 600 l und einer Höhe von etwa 1,8 m bereits einen Verlust infolge Eigenverdunstung von etwa 1,6 %/24h [11], und das obwohl diese im Gegensatz zu Dewargefäßen mit einem Ventil ausgestattet und geschlossen ist.

Der Preis für flüssigen Stickstoff liegt dabei je nach Abnahmemenge durchschnittlich zwischen 2,5 - 3,0 DM/l.

2.2 Trockeneis-/Wassereisstrahlen

2.2.1 Vorbemerkungen

Obwohl die US-Navy bereits 1945 Tests mit Trockeneis gemacht haben soll, wurde aufgrund der Geheimhaltung nichts darüber veröffentlicht.

Als Ursprung der Verfahren wird daher Lockheed angesehen, deren Beschichtungsingenieur Calvin C. Fong nach Möglichkeiten suchte alte Beschichtungen zu entfernen und 1976 als erster das „Sandstrahlen mit Pellets aus Material das in der Lage ist zu sublimieren“ erfand und patentieren ließ [12]. Nachdem er das Verfahren verfeinert hatte und schließlich 1983 eine komplette Strahlmaschine zum Patent anmeldete [13], die sublimierende Partikel als Strahlmedium benutzte, erwarb der amerikanische Hertseller CAE Alpheus das Patent und stellte es 1987 nach eigenen Angaben als erster der Öffentlichkeit vor [14]. Mittlerweile wird es mit geringfügigen Änderungen von allen Herstellern angewandt; wobei auf dieses „Ursprungs“-Patent alle folgenden Verbesserungen und Verfeinerungen basieren.

Aus der ursprünglichen Strahlanlage haben sich dabei zwei unterschiedliche Anlagensysteme entwickelt (Abbildung 5):

1.

Das Zweischlauch- oder Injektorsystem, das nach dem Saugstrahlprinzip arbeitet. Dabei wird in separaten Förderschläuchen die Druckluft bzw. das Strahlgut zur Düse gefördert. Wichtigstes Element bei dieser Anlage ist die Düse, die bei diesem

Anlagensystem eine Venturidüse sein muß (Abbildung 6).

In dieser Düse wird der Druckluftstrom über den Anschluß des Förderschlauches geführt. Häufig ist dieser versetzt bzw. schräg angeordnet, so daß dabei zusätzlich ein Drall -ein sogenannter Zyklon- im Luftstrom erzeugt wird. Durch die vorbeiströmende Druckluft entsteht ein Unterdruck, der das Strahlmittel durch den Sogeffekt zur Düse befördert. Hierbei wird das Strahlgut mit dem Druckluftstrom vermischt und gleichzeitig beschleunigt.

Durch das Saugprinzip hat dieser Anlagentyp jedoch den entscheidenden Nachteil, daß ein nicht unerheblicher Teil der Druckluftenergie für die für das Strahlgut benötigte Sogwirkung verbraucht wird und die maximale Förderlänge physikalischen Gründen begrenzt ist. Die Austrittsgeschwindigkeit des Strahlgemisches ist daher niedriger als sie eigentlich sein könnte.

Vorteilhaft ist jedoch, daß durch die geringe Fördergeschwindigkeit weniger Strahlgut durch Reibung verbraucht wird. Daher kommt es weniger häufig zu Verstopfungen infolge zugefrorener Leitungen, und die Anlagen können relativ einfach hergestellt werden, da sie lediglich eine Vorrats- und Steuerfunktion haben. Ein günstigerer Anschaffungspreis ist hierbei ein zusätzlicher Nebeneffekt und macht diese Art von Anlagen zumindest aus preislicher Hinsicht interessanter als

2.

Einschlauchsyste m e, die nach dem Druckstrahlprinzip arbeiten.

Dabei wird das Strahlgut bereits in der Anlage dem Druckluftstrom beigemischt und durch einen gemeinsamen Förder- bzw. Druckluftschlauch zur Düse transportiert (Abbildung 5). Beim Verlassen der Strahlanlage (Eindosieren) hat das Strahlgemisch lediglich eine Geschwindigkeit von etwa 20-30 m/s und wird erst in der Düse auf eine sehr hohe Endgeschwindigkeit beschleunigt. Als Düse werden hierbei Lavaldüsen verwendet, da diese eine maximale Beschleunigung und damit Austrittsgeschwindigkeit des Strahlguts ermöglichen.

Nachteilig bei diesem Anlagentyp ist ein höherer Verlust an Strahlgut, daß durch die hohe Fördergeschwindigkeit im Druckluftstrahl kollidiert bzw. durch Reibung stark zerkleinert wird und sich dabei teilweise verflüchtigt. Durch das Beimischen des Strahlguts in der Anlage sind diese außerdem komplizierter aufgebaut als die der Einschlauchsyste m e, so daß sie dadurch entsprechend teurer in der Anschaffung wird.

Der größte Vorteil dieser Anlagen liegt bei den hohen Austrittsgeschwindigkeiten, die erreicht werden können. Es gibt keinen Druckverlust wie bei Zweischlauchsyste m en, da keinerlei Sogwirkung für die Strahlgutförderung benötigt wird.

Lavaldüsen sind daher für maximale Austrittsgeschwindigkeiten optimiert, wobei in der Literatur bzw. von einigen Herstellern sogar Überschallgeschwindigkeiten angegeben werden [14, 15, 16, 17].

Bei diesen maximalen Geschwindigkeiten entsteht beim Aufprall auf die zu behandelnde Fläche der größte Flächendruck, so daß mit Einschlauchsyste m en höchste Abtragsleistungen erzielt werden können.

Problematisch ist bei beiden Anlagentypen die hohe Lärmentwicklung an der Düse. Diese ist eine Funktion des Luftvolumens, der Geschwindigkeit des Strahlstroms sowie der geometrischen Beschaffenheit bzw. Rauigkeit der bestrahlten Fläche. Durch Luftverwirbelungen zwischen unterschiedlich schnellen Luftschichten ins-

besondere auch beim Austritt aus der Düse und durch den Aufprall des Strahl- gemisches auf die zu behandelnde Oberfläche entstehen Schalldrücke am Ohr des Düsenführers zwischen 85 - 135 dB(A). Dieser kann also bis in den Bereich eines startenden Düsenjets gehen, der noch in 100 m Entfernung einen Schalldruck von 125 dB(A) erzeugt [18]. Der Einsatz von Gehörschutz ist daher sowohl beim Wassereis- als auch beim Trockeneisstrahlen wenigstens für den Düsenführer zwin- gend vorgeschrieben. Obwohl von einigen Herstellern bereits Lösungen in Form von Spezialdüsen angeboten werden, die eine Verringerung der Lärmentwicklung um bis zu 40,0 dB(A) erreichen sollen, können diese aus wirtschaftlicher Hinsicht nicht empfohlen werden. Sie können eine solche Verringerung der Lärmentwicklung nur erreichen, weil insbesondere die Strahlgeschwindigkeit verringert wird. Nur auf diese Weise ist eine solch hohe Schalldämpfung zu erreichen, als Konsequenz kön- nen jedoch nur entsprechend geringere Abtragsleistungen erzielt werden [14, 19]. Hier ist also noch Raum für Verbesserungen.

Beachtet werden muß ebenfalls die starke Abkühlung der bestrahlten Oberfläche sowohl beim Wassereis- als auch beim Trockeneisstrahlen, hier kommt es je nach Verfahren zu mehr oder weniger starker Kondensation wenn der Taupunkt der umgebenden Luft unterschritten wird. Dies dürfte im Falle des Bauwesens recht häufig der Fall sein. Als Lösung wird hier zumindest für Zweischlauchsyste me eine Beheizung des Druckluftstroms angeboten. Durch die Wirkungsweise der Anlagen bei Einschlauchsyste men ist dies nicht möglich, da andernfalls das Strahlgut schmelzen bzw. sublimieren und zu einer stark verringerten Abtragsleistung bzw. im Falle von Wassereisstrahlen zu vermehrten Verstopfungen führen würde. Für diese Anlagen wird daher von einigen Herstellern vorgeschlagen die bestrahlte Oberfläche gleichzeitig mit einem Heisluftmesser (ähnlich einem Fön) zu erwärmen und auf diese Weise einer Kondensation vorzubeugen [14, 20]. Letzterer könnte auch an der Strahldüse montiert werden, um eine automatische Nachbehandlung zu erreichen und eine fertig entschichtete und trockene Fläche zu erhalten.

Ein weiteres Problem könnte in Einzelfällen die hohe elektrostatische Aufladung des Strahlguts sein. Da es während dem Strahlen einer permanent hohen Reibung bei gleichzeitig hohen Geschwindigkeiten ausgesetzt ist (vor allem beim Einschlauch- system) kann die statische Aufladung nicht verhindert, sondern muß durch wirk- same Erdung der Strahlanlage abgeführt werden. Trotzdem ist gerade am Düsen- austritt sowie während dem Auftreffen des Strahlguts auf die Oberfläche eine Funkenbildung nicht auszuschließen, so daß ein Einsatz in explosiver Umgebung aus Sicherheitsgründen ausgeschlossen werden muß.

Als Vorraussetzung gilt bei allen Anlagen, daß die durch den Kompressor bereitge- stellte Druckluft sauber und ölfrei und möglichst trocken sein muß, damit eine sonst häufig resultierende Verstopfung der Anlage verhindert bzw. erschwert werden kann.

2.2.2. Trockeneisstrahlen

2.2.2.1 Wirkungsweise

Bei diesem Verfahren wird Kohlendioxid als Strahlgut eingesetzt. Dieses hat die besondere Eigenschaft bei plötzlichem Druckabfall zu Trockeneisschnee zu erstarren, das in speziellen Anlagen (sogenannten Pelletierern) zu Trockeneis-pellets⁽⁷⁾ verdichtet wird. Diese Pellets sind etwa Reiskorn groß und unter Atmosphärendruck relativ stabil, da sich um die sublimierenden Pellets eine Gaswolke bzw. Dampfschicht bildet, die wie eine Art Wärmedämmschicht wirkt und weiteres Sublimieren der Pellets verhindert bzw. stark verringert. Einen ähnlichen Effekt kann man bei einer Wasserperle beobachten, die auf der heißen Herdplatte tanzt und erst nach längerer Zeit verdampft. Diese Eigenschaft wird als Leidenfrost'sches Phänomen bezeichnet und ist immer dann vorhanden, wenn ein fester oder flüssiger Stoff in den gasförmigen Aggregatzustand übergeht.

Führt man den Pellets Energie zu, sublimieren⁽⁸⁾ sie wieder ohne sich dabei zu verflüssigen und gehen in den gasförmigen Aggregatzustand über. Die hierzu erforderliche Energie kann dabei in Form von Wärme oder in Form von mechanischer Energie zugeführt werden; beides ist beim Trockeneisstrahlen der Fall, so daß nach erfolgter Entschichtung kein Strahlgut zurückbleibt und lediglich die entfernte Beschichtung zu entsorgen ist. Es wird bereits seit einigen Jahren erfolgreich eingesetzt und zwar überwiegend als Reinigungsverfahren. Die Hersteller bzw. Anwender geben als Kunden vor allem die Auto- und Reifenindustrie bzw. deren Zulieferer an, da dort häufig Produktreste, Trennmittelrückstände und Verunreinigungen von Formteilen zu entfernen sind, die mit herkömmlichen Verfahren lange Produktionsstops zur Folge haben und damit hohe Kosten verursachen [14, 16, 17, 20, 21].

Insbesondere Gummiartige und ähnliche elastisch-zähe Kunststoffe, die beispielsweise bei der Reifenherstellung in den Reifenformen zurückbleiben, sind mit den heute üblichen Verfahren nur schwer zu entfernen, da sie im Bezug auf den Umweltschutz teilweise problematisch sind und dabei zusätzlich den Untergrund angreifen. Diese ungewollten Effekte herkömmlicher Verfahren treffen auf das Trockeneisstrahlen gerade nicht zu, was bereits zu einer großen Verbreitung in diesen Industriezweigen geführt hat.

Da für das Verfahren gasförmiges CO₂ benötigt wird um das Strahlgut herzustellen, stellt sich sogleich die Frage wie dies mit dem Umweltschutz und insbesondere dem Treibhauseffekt zu vereinbaren ist.

Obwohl natürlich CO₂ ein Treibhausgas und somit entscheidend am Treibhauseffekt beteiligt ist, ist es in der Umweltrelevanz völlig unproblematisch, da es im industriellen Kreislauf lediglich einen Umweg macht. CO₂-Gas fällt beispielsweise bei

- der Ammoniaksynthese,
- Öl-/Gasraffination,
- Ethanolproduktion,
- Alkoholproduktion als Nebenprodukt an und

wird sogar in Ungarn als natürliches, geologisch vorkommendes Gas vulkanischen Ursprungs gefördert [17].

Wie bereits geschildert, wird entweichendes Kohlendioxid aufgefangen, zu Pellets verarbeitet und nach der Sublimation wieder in die Atmosphäre zurückgeführt. Das

(7) engl. pellets = Tabletten mit etwa der Größe von Reiskörnern.

(8) Sublimation = Wechsel des Aggregatzustandes fest zu gasförmig.

Trockeneisstrahlen ist also Kohlendioxidneutral und die Ökobilanz ist in dieser Hinsicht gleich Null. Der Treibhauseffekt wird zumindest durch dieses Verfahren nicht verstärkt.

Beachtet werden muß jedoch, daß CO₂ in bestimmten Konzentrationen giftig ist. Es gilt zwar nicht als Gefahrstoff, trotzdem darf eine MAK⁽⁹⁾ von 5.000 ppm (0,5 Vol.-%) nicht überschritten werden. Da CO₂ etwa 1,5 x schwerer als Luft ist, setzt es sich am Boden ab und ist (da es farb- und geruchlos ist) nicht wahrnehmbar; für ausreichende Belüftung muß also gesorgt werden

Bewußtlosigkeit setzt bei Konzentrationen zwischen 70.000 – 100.000 ppm aufgrund von Sauerstoffmangel ein.

Das Trockeneisstrahlen basiert im wesentlichen auf drei physikalische Effekte:

1.

Dem thermischen Schock; hierdurch werden

- a) Zwangsspannungen quer zur Grenzschicht erzeugt, die durch die unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten des Untergrundes und der Beschichtung entstehen,
- b) Zwangsspannungen längs zur Grenzschicht erzeugt, die ebenfalls durch die unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten des Untergrundes und der Beschichtung entstehen und
- c) eine Versprödung der Beschichtung erreicht (analog zum Flüssigstickstoff, jedoch durch die vermutlich geringere Abkühlung im geringeren Umfang), die dadurch an Elastizität verliert.

Die Zwangsspannungen quer zur Grenzschicht können hierbei jedoch im Gegensatz zum Fluten mit flüssigem Stickstoff nicht vernachlässigt werden, da der Trockeneisstrahl immer nur punktuell auf die Beschichtung auftritt und von daher schon in der Randzone zum unbestrahlten Bereich eine ungleichmäßige Temperaturänderung geschieht. Entsprechend entstehen vermutlich gerade in diesem Grenzbereich des Trockeneisstrahls die höchsten Spannungen, da noch unbehandelte an bereits stark abgekühlte Bereiche treffen. Aus diesem Grund ist es vorstellbar, daß obwohl hier die Tiefkühlleistung lediglich bei -78 °C liegt zumindest in besagtem Grenzbereich die erzeugten Zwangsspannungen trotzdem mit den des flüssigen Stickstoffs vergleichbar sind. Haberland untersuchte hierzu die Ursachen für die Höhe der Kühlleistung und variierte dabei Vorschubgeschwindigkeit, Düsenabstand, Pelletdurchsatz, Strahlwinkel und die Höhe des Druckes im Druckluftstrom [22]. Als Ergebnis stellte sich heraus, daß die Verweildauer der Pellets auf der Oberfläche entscheidend für die Abkühlleistung ist. Diese ist nach seinen Beobachtungen umso höher, je größer der Düsenabstand und je langsamer die Vorschubgeschwindigkeit gewählt wird. Da dies jedoch nur eines der drei Effekte des Trockeneisstrahlens ist, ist in der Praxis diese Erkenntnis insofern nicht relevant, als das der Düsenführer ohnehin so lange versucht diese Parameter zu variieren, bis quasi automatisch der größte Abtragseffekt erreicht und dabei die optimale „Einstellung“ für jeden spezifischen Fall gefunden wird.

(9) „Die Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) ist die Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz, bei der im allgemeinen die Gesundheit der Arbeitnehmer nicht beeinträchtigt wird.“ [6].

2.

Dem mechanischen Abtragseffekt der Trockeneispellet. Sie haben jedoch lediglich eine Härte von etwa 2,0 Mohs⁽¹⁰⁾, so daß im Vergleich mit beispielsweise Quarzsand (eines der Strahlmittel beim Sandstrahlen), das eine Mohshärte von etwa 7,0 Mohs hat eine weit niedrigere Abrasivität⁽¹¹⁾ zur Verfügung steht (Beton hat nach [23] eine Mohshärte von 5 Mohs, die es für einen Abtrag der tieferen Betonschichten beim Sandstrahlen zu überwinden gilt). Ein Abtrag von Betonschichten erscheint aus dieser Hinsicht mehr als unwahrscheinlich.

Sichtbar wird die sehr wohl vorhandene Abrasivität jedoch beim Bestrahlen von Holzoberflächen; die Holzstruktur/ -maserung wird dabei zerstört und man erhält ein Oberfläche, die der einer gesandstrahlten visuell sehr nahe kommt. Bei einer sehr niedrigen Vorschubgeschwindigkeit wurde sogar mittels Trockeneisstrahlen eine 22,0 mm dicke Fichtenholzplatte erfolgreich durchgetrennt [22].

Entscheidend für die Abtragsleistung ist zusätzlich die Stoßkraft der einzelnen Trockeneispellets. Bei seinen Versuchen mit doppelt belichteten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen erhielt er Bilder mit zwei Abbildungen ein und desselben Pellets. Daraus konnte er dann eine maximale Geschwindigkeit für diesen von etwa 275 m/s ermitteln. Für diesen Geschwindigkeit gibt er eine resultierende Stoßkraft von 60 N und einen dann entstehenden Flächendruck beim Aufprall auf die Oberfläche von 76 N/mm² je Pellet an [22].

Da er diesen Wert jedoch lediglich bei einer Einschlauchanlage mit einem für das Bauwesen in der Praxis praktisch unerreichbaren Kompressordruck von 20 bar erreichte (herkömmliche transportable Baukompressoren können lediglich einen Druck bis 14 bar erzeugen), ist dieser Wert eher hypothetisch. Unter bauüblichen Bedingungen könnte für die Pellets bei einem Kompressordruck von 10 bar bei allen von Haberland getesteten Anlagen mindestens eine Geschwindigkeit von 200 m/s erreicht werden. Hieraus ergäbe sich eine Stoßkraft von dann nur noch rund 30 N und damit höchstens ein Flächendruck von 37 N/mm² je Pellet (Anlage 1).

Gemäß den Überlegungen Haberalands gilt dieser Werte für jede Pelletgröße, da größere Pellets zwar eine höhere Masse haben jedoch die Dichte unverändert bleibt, die Stoßkraft dann auch auf eine entsprechend größere Fläche wirkt und sich der Flächendruck daher nicht verändert.

Für den Abtragseffekt macht er dann zwar die Stoßkraft der im Strahl weniger häufig vorkommenden größeren Teilchen verantwortlich, nach Meinung des Autors dieser Diplomarbeit ist der entstehende Flächendruck jedoch weit wichtiger für den Abtragseffekt als die Stoßkraft. Haberland schreibt selbst, daß „(...) beim Wasserstrahlschneiden mit einer Düse von 0,25 mm Durchmesser und einem Pumpendruck von 3.450 bar eine Strahlstoßkraft von maximal 25 N erzeugt (wird)“ [22]. Daraus errechnet er dann für die durch den homogenen Wasserstrahl 0,05 mm² große bestrahlte Fläche einen Flächendruck von 500 N/mm². Wäre die Strahlstoßkraft für den Abtrags- bzw. Schneideeffekt verantwortlich, müßte also mit dem Trockeneisstrahlen ein noch besseres Ergebnis zu erreichen sein, als beim Wasserstrahlschneiden; dies ist jedoch nicht der Fall.

Vielmehr ist im Gegenteil der Flächendruck für den Abtrags- bzw. Schneideeffekt verantwortlich, was angesichts des kontinuierlichen Wasserstrahls, der einen 13-fach höheren Flächendruck erzeugt auch einleuchtet.

(10) Friedrich M. Mohs, Mineraloge, der die Mineralien in 10 Härtegrade einteilte, wonach jedes folgende das vorhergehende Mineral ritzt. Der weichste Stoff steht am Anfang der Skala und der härteste am Ende [23].

(11) Abrasion = lat. Abschabung, Abtragung [9].

Der Flächendruck beim Trockeneisstrahlen tritt hingegen nur diskontinuierlich und dabei zusätzlich nicht an derselben Stelle auf. Die Pellets treffen eher zufällig (ähnlich einem Hagelschauer) innerhalb des Strahlquerschnitts auf die Oberfläche auf, so daß der Flächendruck nicht so effektiv ausgenutzt wird; er wirkt immer nur für die Dauer des Aufpralls und dabei an vielen unterschiedlichen Stellen.

Durch die im Vergleich zu Quarzsand geringe „Schärfe“ der Pellets (deren Oberfläche ist eher rundlich und hat im Gegensatz zu Quarzsand keine „Ecken und Kanten“) und die im Vergleich ebenfalls geringe Härte, ist die Abrasivität daher auf einer härteren Oberfläche für sich selbst betrachtet im Gegensatz zum Sandstrahlen vernachlässigbar klein.

3.

Beim Aufprall auf die Oberfläche sublimieren die Trockeneispellets und verflüchtigen sich dabei. Die bei dieser sogenannten Phasenumwandlung entstehende Energie führt zu einer plötzlichen Volumenzunahme von fest auf gasförmig, was eine Besonderheit für das Trockeneisstrahlen darstellt.

Hierbei geschieht in bereits gerissenen Bereichen der Beschichtung möglicherweise eine Unterwanderung, die Pellets breiten sich pilzartig unter die abgelöste Beschichtung (einer Explosionswelle ähnlich) aus und sprengen diese dabei quasi von innen heraus ab (Abbildung 7). Haberland konnte in diesem Zusammenhang mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen belegen, daß die Pellets beim Auftreffen nicht etwa zerplatzen oder sogar zurückprallen, sondern tatsächlich sublimieren und dabei kurzfristig den flüssigen Aggregatzustand einnehmen (Abbildung 8). Er errechnete dabei einen Flächendruck von etwa 18,4 N/mm² bzw. 184 bar für das fotografierte Pellet, womit es bei einer Umgebungs- und Oberflächentemperatur von etwa 20 °C weit im flüssigen Bereich des Phasendiagramm liegt (Abbildung 9) [22]. Zumindest solange die Oberfläche nicht abgekühlt ist erklärt sich somit ein kurzfristiger flüssiger Zustand des CO₂, das unmittelbar darauf in den gasförmigen Zustand übergeht.

Der Expansionskoeffizient, der von den Herstellern unterschiedlich groß angegeben wird (zwischen 500 – 800) [14, 16 17, 20], ist nach seinen Überlegungen direkt von der Umgebungs- bzw. Oberflächentemperatur der Beschichtung abhängig, da dieser ein Quotient von $E_{CO_2} = \frac{\text{Trockeneis}}{\text{Gas}}$ ist, und die Dichte des Gases direkt von der Temperatur beeinflusst wird. Der minimale Expansionskoeffizient beträgt daher bei einer eher hypothetischen Abkühlung der Umgebung auf -78,5 °C $E_{CO_2} = 500$ und für den wahrscheinlich häufigsten Fall bei 20 °C $E_{CO_2} = 1.400 \cdot 1,8287 = 766$. Für den Fall, daß das $E_{CO_2} = 800$ sein soll müßte die Temperatur schon auf etwa 40 °C steigen, was in den meisten Fällen eher unwahrscheinlich sein dürfte, zumal das Bauteil durch das Bestrahlen eine Abkühlung erfährt und in der Folge auch das E_{CO_2} kleiner wird. Lediglich für ein durch beispielsweise Sonnenbestrahlung erwärmtes Bauteil kann sich im Sommer ein kurzfristig höherer Expansionskoeffizient ergeben, was jedoch eher die Ausnahme bleiben dürfte. Ein explosionsartiger Expansionsschock kann dabei nur dann entstehen, wenn aus der Umgebung genügend Wärme schnell genug entzogen werden kann, so daß diese den sublimierenden Partikeln kontinuierlich zur Verfügung steht [22]. Da die Wärme jedoch nur nach und nach abgegeben werden kann, ist es fraglich ob es tatsächlich zu einer kontinuierlichen explosionsartigen Ausbreitung der Pellets kommen kann.

2.2.2.2 Benötigte Ausrüstung

Das benötigte Strahlgut kann von Gaswerken oder Dienstleistern erworben werden. Der hierzu nötige Herstellungsprozeß erfolgt mittels eines sogenannten Pelletierers, den beispielsweise die Firma ASCO für rund 33.000 € anbietet [24]: An den Pellethersteller wird vom Gaslieferanten eine Tankanlage mit flüssigem CO₂ geliefert, das unter einem Druck von 14 – 20 bar steht und dabei eine Temperatur von -30 – -20 °C hat. Wird das flüssige CO₂ aus dem Tank entnommen, verringert sich der Druck schlagartig auf Atmosphärendruck und der Tripelpunkt⁽¹²⁾ wird unterschritten (etwa 5,2 bar und -56,6 °C); dabei geht das CO₂ in den festen Aggregatzustand über, es wird „entspannt“. Durch diese sogenannte Expansion entsteht zunächst CO₂-Schnee. Bei diesem Vorgang geht etwa die Hälfte des flüssigen CO₂'s durch Verdampfen zu Kohlenstoffgas verloren (der Dienstleister LKY nennt sogar einen Verlust von etwa 60 %), so daß bei größeren Anlagen das Gas aufgefangen, verflüssigt und wieder in den Kreislauf zurückgeführt wird. Der entstandene Schnee wird dann gesammelt, bei einem Druck von etwa 140 bar durch Matrizen gepresst und dabei zu Pellets verdichtet, die das Aussehen und die Größe von Reiskörnern haben (Abbildung 10) [22]. Der Vorgang ist in etwa mit einem Schneeball aus Pulverschnee vergleichbar; wird er zusammengepresst, verdichtet er sich und als Endprodukt entsteht ein komprimierter Eisball. Es können statt der Pellets auch Blöcke oder Nuggets gepresst werden (Abbildung 11, 12), wobei diese jedoch in der Regel für Kühlzwecke benutzt werden, lediglich ein Hersteller hat eine Strahlanlage entwickelt, die alle Größen verarbeiten kann auf die etwas später kurz eingegangen wird. Bei der Expansion des flüssigen CO₂'s wird Wärme abgegeben, so daß die fertigen Pellets eine Temperatur von etwa -78 Grad Celsius haben und in speziellen Kühlboxen gelagert werden müssen. Der Sublimationsverlust solcher Behälter wird durch das Leidenfrost'sche Phänomen beschränkt und schwankt zwischen 2,0 – 10,0 %/d. Er ist abhängig von der Dichtheit bzw. Beschaffenheit des Behälters und der umgebenden Temperatur. Die Pelletpreise liegen etwa zwischen 1,5 – 3,0 DM/kg und sind damit relativ teuer, trotzdem würde sich die Anschaffung eines Pelletierers im Bauwesen nicht rechnen, da hier (wenn das Verfahren überhaupt zum Einsatz käme) nicht über eine kontinuierlich große Menge an Pellets verfügt werden müßte.

Strahlanlagen

Es gibt mittlerweile eine Vielzahl von Strahlanlagen, die sich meist nur in Details unterscheiden. Sie arbeiten entweder nach dem Einschlauch- oder nach dem Zweischlauchsystem und können Trockeneispellets verarbeiten, lediglich die Strahlanlage MiniBlast SDI-5 des Herstellers CAE Alpheus ist in der Lage jede Art bzw. Größe von Trockeneis zu verarbeiten; sie schält zunächst den Block Schicht für Schicht ab bzw. zerkleinert zunächst die Nuggets, um dann das entstandene Granulat in den Druckluftstrom beizumischen [14]. Der Vorteil hierbei ist, daß der Block bzw. die Nuggets bei der Herstellung und dadurch auch im Ankauf günstiger sind und durch das bessere Verhältnis von Volumen zu Umfang bzw. Oberfläche zu Masse weniger Verlust durch Sublimation auftritt. Es kann zusätzlich gezielt erst dann Strahlgut hergestellt werden, wenn es tatsächlich gebraucht wird, nämlich während dem Strahlen. Diese Art von Strahlanlage ist jedoch bei der Anschaffung erheblich teurer als solche herkömmlicher Bauart, so daß sie sich nur bei häufigem Einsatz rentiert. In Abbildung 13 sind die bis zum Abgabetermin dieser Diplomarbeit erhältlichen Strahlanlagen zusammengestellt, zu denen Preise recherchiert werden konnten.

(12) Tripelpunkt = Temperaturbereich, bei dem ein Stoff in allen drei Aggregatzuständen gleichzeitig vorkommt. Beispielsweise im Winter an einem zugefrorenen See zu beobachten; dort ruht das Seewasser unter einer zugefrorenen Eisdecke und darüber treibt bei exakt 0,01 °C ein leichter Nebel [25].

2.2.3 Wassereisstrahlen

2.2.3.1 Wirkungsweise

Dieses Verfahren wurde in Canada entwickelt, als die Canadische Navy ein Reinigungsgerät benötigte, das staublos sein sollte, wenig kontaminierte Reststoffe hinterließ und im Bauch eines Schiffes angewendet werden konnte. Durch die Verwendung von Wassereis als Strahlgut werden die Reststoffe minimiert, da es beim Aufprall in den flüssigen bzw. teilweise in den gasförmigen Aggregatzustand übergeht und dadurch lediglich die entfernte Beschichtung zurückbleibt.

Das Verfahren basiert dabei im Wesentlichen auf zwei Wirkungsweisen:

1.

Spannungen infolge plötzlichem Abkühlens der Beschichtung; diese sind jedoch im Vergleich mit den thermischen Effekten des flüssigen Stickstoffs so gering, daß die entstehenden Spannungen so unwesentlich werden, daß sie vernachlässigt werden können. Dies ist auf den doch sehr großen Temperaturunterschied zwischen dem tiefkalten Stickstoff und den gering unter 0 °C liegenden Wassereiskristallen zurückzuführen; die sehr tiefe Temperatur von -196 °C steht den heute nur noch knapp unter 0 °C betriebenen Wassereisstrahlanlagen gegenüber, was den krassen Unterschied anschaulich macht.

Dies führt zu unbedeutenden geringen Zugspannungen innerhalb der Beschichtung bzw. Scherspannungen in der Grenzschicht, so daß hochwiderstandsfähige Beschichtungen wie z.B. Epoxidharze, Polyurethane oder Beschichtungen mit Schichtdicken im Millimeterbereich durch die implizierte Abkühlung vermutlich keinen bzw. nur geringsten Schaden nehmen und dadurch die Adhäsion nicht überschritten wird. Eine effektive und wirksame Auflockerung wie im Falle des LN₂ bzw. des CO₂ ist im höchsten Maße unwahrscheinlich.

Handelt es sich bei der Beschichtung jedoch lediglich um elastische, beispielsweise bituminöse Abdichtungen, Versiegelungen oder dünne Farbanstriche im Mikrometerbereich, ist es vorstellbar, daß diese zumindest gering aufgelockert werden könnten und durch die zweite Wirkungsweise, der

2.

abrasiven Eigenschaft der Eiskristalle vollends vom Untergrund entfernt werden könnten. Dies geschieht dann durch mechanische Energie, die durch die Härte der Eiskristalle und der über die Strahldüse erzeugten sehr hohen Austrittsgeschwindigkeit auf die Beschichtung wirkt. Der auf diese Weise erzeugte Flächendruck liegt bei einer angenommenen Geschwindigkeit der Wassereispartikel von ebenfalls 200 m/s mit einer analog zu den Trockeneispellets angenommenen Partikelgröße bei rund 25 N/mm² je Wassereispartikel und liegt damit etwas unterhalb des durch die Trockeneispellets erzeugten (Anlage 1). Die dabei insgesamt zu erzielende abrasive Wirkung dürfte daher ebenfalls geringer ausfallen als beim Trockeneisstrahlen, da die Härte der Eispartikel vermutlich kleiner oder gleich der von Trockeneispellets ist.

Diese Annahme bestätigt sich z.B. während und nach einem Hagelschauer; die dabei beispielsweise auf ein Automobil auftreffenden Hagelkörner rufen zumindest solange keine mechanische Beschädigungen hervor, solange sie eine Größe von etwa einer Erbse nicht überschreiten. Bei größeren Hagelkörnern wird in der Regel nur das Blech verbeult, ohne daß die Lackbeschichtung Schaden nimmt. Diese

Beobachtungen weisen zusätzlich auf eine ebenfalls sehr geringe „Schärfe“ der Eiskristalle hin.

Alle drei Eigenschaften sind jedoch zusammengenommen für die Höhe der abrasiven Wirkung verantwortlich, so daß diese insgesamt weit geringer ist als beim Trockeneisstrahlen.

In Firmenschriften des weltweit vielleicht einzigen Unternehmens, das Wassereisstrahlgeräte herstellt und in diesem Bereich seit Jahrzehnten Forschungen und Verbesserungen vorgenommen hat, wird daher auch weniger das Entschichten, als das Reinigen von verschiedenen Untergründen als Einsatzmöglichkeit vorgeschlagen und beschrieben [26]. Anfragen bei Anwendern dieses Verfahrens bestätigten dies sehr deutlich. Es wurden zwar Betonoberflächen mit Erfolg durch Wassereisstrahlen entschichtet, jedoch erst nachdem die Beschichtung anhand eines chemischen Weichmachers aufgelöst wurde. Diese Methode führt jedoch das gesamte Verfahren quasi ad absurdum und scheidet durch die in Deutschland herrschenden Umweltschutzvorschriften und Gesetze von vorneherein gänzlich als mögliche Variante aus, wenn nicht entsprechende Schutzmaßnahmen vorgenommen werden. Als mögliches Einsatzgebiet verbleibt daher lediglich die Reinigung verschiedener Oberflächen, inklusive solcher mineralischen Ursprungs wie Betone, Estriche, Putze etc. Die Oberfläche wird dabei nicht angegriffen sondern lediglich gesäubert, dies allerdings mit weit weniger Wasseranfall und dadurch leichter Reststoffentsorgung als das mit den heute üblichen möglich wäre.

Es liegen zwar bisher kaum Erfahrungswerte zum Entschichten von Betonen vor auf die zurückgegriffen werden könnte, doch es erscheint als sehr wahrscheinlich, daß dieses Verfahren für die gestellte Aufgabe ungeeignet ist.

In Ermangelung entsprechender Anwender können jedoch in der vorgeschriebenen Bearbeitungszeit keine Versuche durchgeführt werden, so daß die getroffenen Überlegungen und Annahmen nicht überprüft werden können. Es soll daher lediglich die genaue Funktionsweise und die benötigte Ausrüstung im folgenden Abschnitt näher beschrieben werden.

2.2.3.2 Benötigte Ausrüstung

Um das Verfahren anwenden zu können benötigt man zunächst einmal das Strahlmittel in Form von möglichst gleichgroßen Wassereispartikeln. Die Herstellung ist dabei weit weniger aufwendig als die der Trockeneispartikel und ist seit der Erfindung von Mansted 1951 [27] nur in Details verbessert worden. Eine sich drehende Trommel wird dabei teilweise in ein Wasserbad getaucht und gleichzeitig tiefgekühlt, so daß sich beim Durchfahren durch das Wasserbad ein dünner Eisfilm auf der Trommeloberfläche bildet. Diese wird durch einen meißelartigen Hammer im kontinuierlichen Rythmus von der Walze geklopft bzw. geschlagen und über eine Art Trichter in einen Behälter geleitet, um von dort den Druckluft- bzw. Förderstrom zugeführt zu werden. In den Anfangszeiten wurde dabei ein Einschlauchsysteem verwendet, was vermehrt zu Problemen infolge Pfropfen- und Klumpenbildung und schließlich zu Verstopfungen führte, die auf das beförderte Strahlmittel in Form der Eiskristalle zurückzuführen waren. Problematisch dabei war insbesondere die kontinuierliche und gleichmäßige Kühlung der gesamten Apparatur und des Förderschlauches. Durch ungewollte Temperaturunterschiede innerhalb derselben kam es häufig gerade im Dauerbetrieb

zum lokal begrenzten teilweise Schmelzen des Strahlmittels mit anschließender Verklumpung und Verstopfung der Anlage. Dies führte regelmäßig zu langen Stillständen, die den Wirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit stark begrenzten. Erst Ende der 90-er Jahre gelang es Visaisouk diesem Problem einigermaßen Herr zu werden indem er eine verbesserte Anlage entwickelte, die an die Zweischlauchsysteme der Trockeneisstrahlanlagen angelehnt war. Das System wurde 1996 in den USA patentiert und wird seitdem unverändert eingesetzt [28].

Seitens des Herstellers wird keine besondere Fachkenntnis vorausgesetzt, so daß nach einer kurzen Einführungsphase problemlos durch einen Hilfsarbeiter gestrahlt werden könnte.

3 Vorüberlegungen und Vorbereitungen zu den Hauptversuchen

3.1 Untergrund

Entsprechend der Aufgabenstellung war die Entschichtung von Betonoberflächen mittels Kaltstrahlen von Interesse. Es galt daher zunächst einen geeigneten Untergrund für die Beschichtung zu finden. Hierfür sollten ursprünglich 36 Betonplatten aus zwei unterschiedlichen Betonen hergestellt und beschichtet werden, damit ein eventuell vorhandener Einfluß der Betongüte hätte dokumentiert werden können. Angesichts einer parallel laufenden Diplomarbeit über Blasenbildungen in Beschichtungen wurden die Probekörper zunächst gemeinsam hergestellt. Aus der Überlegung, daß eventuell bei einzelnen Platten keine Blasenbildung auftreten würde, hätten diese für die Entschichtungsversuche der hier vorliegenden Arbeit verwendet werden können. Diese wurden daher in Anlehnung an geltende Richtlinien [1, 2] mit den Abmessungen 300 • 300 • 60 mm hergestellt und zwar jeweils mit einem Beton hoher und einem mit schlechter Güte. Diese wurden dann in unterschiedlichen Klimata gelagert, vor der Beschichtung gesandstrahlt und danach mit einem Hochdruckreiniger gesäubert. Nach einer mindestens 24-stündigen Trocknung konnten sie dann beschichtet werden.

Um dabei nicht völlig vom Umfang der Blasenbildung abzuhängen, wurden parallel hierzu zusätzlich 21 Betonwerksteinplatten (Gehwegsplatten) mit den Abmessungen 300 • 300 • 40 mm als Vergleichskörper herangezogen, da diese eine besonders gleichmäßige Oberfläche haben und damit vergleichbare Ergebnisse hätten liefern können. Diese sind ab Werk mit einem sehr niedrigen w/z-Wert hergestellt und zusätzlich komprimiert um die garantierte Frostbeständigkeit sicher erreichen zu können. Daher haben sie vermutlich eine genügend große Festigkeit und sind in ihrer Zusammensetzung durch die Automatisierung in der Herstellung sehr gleichmäßig. Die Oberfläche ist ab Werk sehr eben und zusätzlich zwar porig jedoch praktisch lunkerfrei, so daß auf ein Aufrauen der Oberfläche mittels Sandstrahlen verzichtet wurde. Sie wurde lediglich mittels eines Hochdruckreinigers von Verunreinigungen befreit (Abbildung 14).

Im Idealfall hätten auf diese Weise 36 Probekörper/ 2 Betongüten • 3 Entschichtungsverfahren = 6 verschiedene Beschichtungen auf ihre Tauglichkeit für die einzelnen Verfahren untersucht werden können, wobei jedoch durch die 21 Betonwerksteinplatten jederzeit auf zusätzlich 21 Probekörper/ 3 Entschichtungsverfahren = 7 verschiedene Beschichtungen als Ausweichlösung hätte zurückgegriffen werden können.

3.2 Beschichtungen

Insgesamt standen 6 verschiedene Beschichtungen der Firma MC-Bauchemie zur Verfügung, die auf die vorhandenen 56 Probekörper (eine der 36 betonierten Platten war während der Herstellung kaputt gegangen) aufgetragen wurden. Da wie befürchtet die ursprünglich angedachten Versuche mit den gemeinsam hergestellten Platten nicht durchgeführt werden konnten, da diese erfolgreich Blasen in der Beschichtung geworfen hatten, sind in Abbildung 15 lediglich die übrigen 21 Betonwerksteinplatten mit den dazugehörigen Beschichtungen eingetragen. Hierbei wurden 5 Beschichtungen letztendlich verwendet, davon 3 auf Epoxidharz- und 2 auf Polyurethanharzbasis. Zusätzlich wurden je 3 Platten mit einem Schutzanstrich auf Bitumenbasis der Firma Deitermann beschichtet und 3 weitere mit Alkydharzlack (Graffiti) der Firma Dupli-Color besprüht.

Auf diese Weise waren einige der am häufigsten vorkommenden Beschichtungsarten abgedeckt, so daß aussagefähige Ergebnisse erwartet werden konnten. Da neben dicken Beschichtungen auch dünne Versiegelungen auf ihre Eignung untersucht werden sollten, diese jedoch bereits die Poren des Betons teilweise auffüllen, wurde auf eine Kratz- und Lunkerspachtelung verzichtet, da sonst eine zu glatte Oberfläche entstanden und das Ergebnis verfälscht worden wäre. Gerade dünne Anstriche oder Versiegelungen lassen sich -so die Vermutung- durch Kaltstrahlen nur sehr schlecht vollständig aus den Poren des Betons entfernen, so daß auf besagte Kratz- und Lunkerspachtelung aus diesem Grund verzichtet wurde.

Die einzelnen Systeme wurden -wenn nicht anders angegeben- bei Raumklima (etwa +20 °C und 50 % rel. Luftfeuchte) gemäß den Ausführungsanweisungen des jeweiligen Herstellers aufgetragen und gelagert:

1a-c) Epoxidharzversiegelung MC-DUR 111 D (Abbildung 16);

- keine Kratz- und Lunkerspachtelung,
- Grundierung MC-DUR 111 D transparent durch Rollen aufgetragen,
- etwa 20-stündige Trocknungszeit,
- zweifache Versiegelung mit MC-DUR 111 D farbig,
- 9 Tage Trocknungszeit bis erste Versuchsreihe durchgeführt wurde.

2a-c) Epoxidharzbeschichtung MC-DUR 1200 (Abbildung 17);

- Grundierung MC-DUR 1200 VK mit Gummischiebern aufgetragen,
- etwa 20-stündige Trocknungszeit,
- keine Kratz- und Lunkerspachtelung,
- MC-DUR 1200 mit Gummischiebern verlegt,
- mit einem Roßhaarbesen zweifach entlüftet,
- 9 Tage Trocknungszeit bis erste Versuchsreihe durchgeführt wurde.

3a-c) Epoxidharzbelag MC-DUR 1900 (Abbildung 17);

- Grundierung MC-DUR 1200 VK mit Gummischiebern aufgetragen,
- etwa 20-stündige Trocknungszeit,
- keine Kratz- und Lunkerspachtelung,
- MC-DUR 1900 mit Gummischiebern verlegt,
- mit einem Roßhaarbesen zweifach entlüftet,
- 9 Tage Trocknungszeit bis erste Versuchsreihe durchgeführt wurde.

4a-c) Polyurethanbeschichtung MC-DUR 2052 (Abbildung 17);

- Grundierung MC-DUR 1200 VK mit Gummischiefern aufgetragen,
- etwa 20-stündige Trocknungszeit,
- keine Kratz- und Lunkerspachtelung,
- MC-DUR 2052 mit Gummischiefern verlegt,
- mit einem Roßhaarbesen zweifach entlüftet,
- 9 Tage Trocknungszeit bis erste Versuchsreihe durchgeführt wurde.

5a-c) Polyurethanversiegelung MC-DUR VS-PUR (Abbildung 16);

- keine Kratz- und Lunkerspachtelung,
- Grundierung MC-DUR VS durch Rollen aufgetragen,
- etwa 20-stündige Trocknungszeit,
- zweifache Versiegelung mit MC-DUR VS-PUR,
- 9 Tage Trocknungszeit bis erste Versuchsreihe durchgeführt wurde.

6a-c) Bitumenschutzanstrich EUROLAN 1 (Abbildung 18);

- Voranstrich durch Rollen aufgetragen,
- etwa 20-stündige Trocknungszeit,
- zweifacher Deckanstrich durch Rollen aufgetragen,
- 2 Tage Trocknungszeit bis erste Versuchsreihe durchgeführt wurde.

7a-c) Lackspray Mintgrün;

- rund 1/3 des Doseninhalts als Grundierung aufgesprüht (im Freien),
- etwa 20-stündige Trocknungszeit (Raumklima),
- restlichen Doseninhalt aufgesprüht (im Freien gearbeitet),
- 2 Tage Trocknungszeit (Raumklima) bis erste Versuchsreihe durchgeführt wurde.

Nach einer letzten Untersuchung auf eventuelle Blasenbildung wurde etwa 12 Stunden später mit den Entschichtungsversuchen begonnen.

3.3 Überprüfung des Verbundes

Zur Überprüfung der Haftfestigkeit zwischen Betonwerksteinplatten und der Beschichtungen wurden vor den Hauptversuchen zunächst Abreißversuche in Anlehnung an die ZTV-SIB 90 [2] an zwei Platten durchgeführt, wobei für diese Versuche jeweils ein Beschichtungssystem auf Epoxid- und eines auf Polyurethanharzbasis zusätzlich zu den drei benötigten hergestellt wurde. Hierfür wurde die Epoxidharzversiegelung MC-DUR 111 D und die Polyurethanbeschichtung MC-DUR 2052 willkürlich ausgewählt und mit dem Abreißversuch untersucht, da ohnehin von einem ausreichendem Verbund ausgegangen werden konnte. Es sollte lediglich gezeigt werden, daß der Untergrund für die Beschichtungssysteme generell geeignet ist, so daß eine ausreichende Haftung bzw. Adhäsion gesichert ist.

Dafür wurde auf jede der beiden Platten entlang der Diagonalen an insgesamt fünf Stellen eine entgegen der ZTV-SIB 90 [2] lediglich etwa 5,0 mm tiefe Prüffläche mit einem Bohrkronendurchmesser von 50,0 mm (=Prüffächendurchmesser) vorgebohrt und anschließend abgespült, um bei der Bohrung entstandene Verunreinigungen zu entfernen (Abbildung 19).

Gemäß den technischen Prüfvorschriften [2] soll die Tiefe der Bohrung eigentlich 10 mm betragen. Im Hinblick auf die ohnehin nur 40 mm dicken Betonwerksteinplatten konnte dieser Wert jedoch nicht eingehalten werden, da ein frühzeitiges Versagen des Betons befürchtet wurde. Ohnehin ging es hierbei nicht um eine Festigkeitsprüfung, sondern lediglich um die Kontrolle des Verbunds zwischen aufgetragener Beschichtung und Beton.

Auf die vorgebohrte Prüffläche wurde je ein Prüfstempel aus Stahl mittels eines schnellhärtenden Zwei-Komponenten-Klebers aufgeklebt (Abbildung 20), mit dem Haftzugprüfgerät HZP 12 D1 der Firma Form + Test Prüfsysteme bis zum Bruch belastet (Abbildung 21) und die dabei erreichten Grenzzugkräfte notiert (Abbildung 22). Bei der Polyurethanbeschichtung stellte sich dabei heraus, daß der Verbund zwischen Zwei-Komponenten-Kleber und der Beschichtung offenbar nicht optimal war. Der Bruch trat jeweils vollständig in der Klebefuge auf und die dabei minimal erreichte Zugspannung betrug genau $1,5 \text{ N/mm}^2$ (Abbildung 23). Auch eine versuchsweise durchgeführte Aufrauung mit anschließender erneuter Reinigung brachte keine Verbesserung. Der Mittelwert der fünf Versuche ergab dabei eine Abreißfestigkeit von $1,8 \text{ N/mm}^2$. Da der Adhäsionsbruch hierbei in der Klebefuge auftrat, kann im Bezug auf die Adhäsion zwischen der Beschichtung und dem Untergrund zumindest gesagt werden, daß diese größer als die erzielten $1,8 \text{ N/mm}^2$ war. Bei der Epoxidharzversiegelung trat der Bruch im Beton auf (Kohäsionsbruch) und die dabei erreichte minimale Zugspannung betrug $3,7 \text{ N/mm}^2$ (Abbildung 24). Der Mittelwert der fünf Versuche ergab dabei eine Abreißfestigkeit von $4,2 \text{ N/mm}^2$. Da beide Beschichtungen einen kleinsten Einzelwert größer als $1,0 \text{ N/mm}^2$ erreichten und der Mittelwert jeweils größer als $1,5 \text{ N/mm}^2$ war, entsprachen die Abreißfestigkeiten den von der ZTV-SIB 90 [2] geforderten Werten.

Da die Betonwerksteinplatten durch die hohe Automatisierung bei der Herstellung untereinander praktisch identisch waren und die übrigen Beschichtungssysteme vermutlich ähnliche Adhäsionen erzielten, wurde auf eine weitere Prüfung der übrigen Beschichtungen verzichtet und die Platten für die Hauptversuche als geeignet erklärt.

3.4 Temperaturmessungen

Alle Entschichtungsverfahren basieren zu einem großen Teil auf thermische Spannungen, sowohl in der Beschichtung selbst, als auch in der Grenzschicht zum Untergrund. Um einen Richtwert für die Kühlleistung der verschiedenen Verfahren zu erhalten, sollten daher während der Entschichtungsversuche kontinuierliche Temperaturmessungen in diesen relevanten Schichten durchgeführt werden, um die Kühlleistung der einzelnen Verfahren dokumentieren zu können.

Da die Untersuchung der Entschichtung mittels Wassereisstrahlen aufgrund fehlender Anwender in der vorgegebenen Bearbeitungszeit nicht realisierbar war, wurden exemplarisch zwei Platten für die Temperaturmessung präpariert. Da Haberland ähnliche Versuche (jedoch mit erheblich mehr Meßstellen) an verschiedenen Blechen durchgeführt hat und dabei feststellen konnte, daß die Wärmeleitfähigkeit der Beschichtung die Tiefenwirkung stark beeinflußt, sollten die Meßstellen an einer möglichst dicken Beschichtung angebracht werden [22]. Da zu diesem Zeitpunkt bereits alle Epoxidharzplatten mit entsprechender Schichtdicke beschichtet waren und eine versuchsweise durchgeführte Bohrung die Beschichtung auf der zu ent-

schichtenden Seite absprengte, wurden die verbliebenen Platten, die für die Bitumenemulsion vorgesehen waren vor der Beschichtung mit den Meßstellen bestückt. Wie sich herausstellte war diese hierfür bestens geeignet, da sie eine niedrige Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_R = 0,17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ hat -dadurch quasi als dünne Wärmedämmschicht wirkte- und gute Meßergebnisse lieferte.

Hierfür wurden zwei Bohrungen je Platte angefertigt, je eine durchgehende und eine bis etwa 5,0 mm unter die Oberfläche, in die dann die Meßdrähte eingemörtelt wurden (Abbildung 25, 26). Zusätzlich zu diesen beiden Meßstellen je Platte wurde während der Messung mit dem Meßgerät THERM 2281-8 der Firma Ahlborn Meß- und Regelungs-technik das Infrarotmessgerät AMIR 7812 derselben Firma angeschlossen und die direkte Oberflächentemperatur gemessen. Da unglücklicherweise versäumt wurde die Meßdrähte auf einem möglichst kurzen Stück freizulegen und horizontal in der zu messenden Schicht anzubringen, können die gemessenen Werte nicht exakt mit der tatsächlichen Temperatur übereinstimmen, da diese über die gesamte freigelegte Länge einwirkt. Da die Drähte jedoch in der gewünschten Schicht beginnen und weit bessere Wärmeleiter sind als der sie umgebende Beton bzw. Mörtel, kühlen sie sich vermutlich schnell genug ab, so daß sich der Meßfehler in Grenzen hält und hier vernachlässigt werden kann. Nach erfolgten Entschichtungsversuchen wurde daher zusätzlich die Lage der eingemörtelten Meßstellen kontrolliert; hierzu wurden die beiden bestückten Betonwerksteinplatten durchgeschnitten und die genaue Lage gemessen. Es zeigte sich, daß die Drähte recht genau in den gewünschten Schichten begannen (Abbildung 27).

Die bei der Entschichtung mittels Trockeneisstrahlen bzw. flüssigem Stickstoff gespeicherten Meßwerte sind elektronisch ausgelesen worden. Da das Infrarotmessgerät mit einem Rotlichtlaser ausgestattet war, konnte die Oberflächentemperatur gezielt zwischen den beiden eingemörtelten Meßstellen gemessen werden, so daß alle Messungen in einem Umkreis von etwa 30 mm durchgeführt werden konnten und daher etwa derselben Kälte ausgesetzt waren (Abbildung 28). Dabei wurde die durch das Trockeneisstrahlen bereits teilweise entschichtete Platte beim Versuch mit flüssigem Stickstoff erneut eingesetzt, um die gemessenen Ergebnisse kontrollieren zu können (Abbildung 29). Als Ergebnis der Temperaturmessungen sind die Meßwerte in jeweils einem Diagramm in Abbildung 30, 31 und 32 zusammengestellt.

4 Durchführung der Entschichtungsversuche

4.1 Allgemeines

Eine Entschichtung mittels Wassereisstrahlen war mangels eines Anwenders in der vorgegebenen Zeit nicht realisierbar, der hierfür vorgesehene Probekörper sollte stattdessen mittels Vakuumsandstrahlen entschichtet und die dafür benötigte Zeit gemessen werden.

Da beim Entschichten mittels flüssigem Stickstoff ohnehin eine mechanische Nachbearbeitung nötig war, wurde hierzu ebenfalls das Vakuumsandstrahlverfahren ausgewählt, um somit bestmöglich zwischen den einzelnen Verfahren vergleichen zu können.

Die Entschichtungsversuche mittels LN_2 und Vakuumsandstrahlen wurden jeweils im Freien durchgeführt mit Außentemperaturen zwischen 5 – 10 °C, und der Entschichtungsversuch mittels Trockeneis wurde in der Halle der Firma LKY durchgeführt, in der eine Temperatur zwischen 10 – 15 °C herrschte.

4.2 Entschichtung mittels flüssigem Stickstoff

Da bei diesem Verfahren die gesamte Beschichtung möglichst gleichmäßig zu fluten ist, wurden die hierfür ausgewählten Betonwerksteinplatten nach der Beschichtung an allen vier Rändern mittels eines Gewebe-Klebebandes so abgeklebt, daß etwa die Hälfte des rund 25 mm dicken Gewebe-Klebebandes über die Beschichtung herausragte und dadurch ein ungewolltes Entweichen des flüssigen Stickstoffs ausgeschlossen werden konnte.

Um die rechnerisch benötigte Stickstoffmenge abschätzen zu können waren folgende Schritte notwendig. Nach Rebhan [10] setzt sich die nutzbare Wärmemenge des flüssigen Stickstoffes aus zwei etwa gleich großen Anteilen zusammen.

Je etwa 226 kJ/m³ können als Verdampfungswärme während dem Übergang flüssig-gasförmig verbraucht und in der Folge vom entstandenen noch etwa -20 °C kalten Stickstoffgas aufgenommen werden (Abbildung 33). Dafür müßte das Stickstoffgas über dem Material fixiert werden können, was jedoch selbst in stationären Entlackungsanlagen als zu aufwendig angesehen wird. Es bleibt also höchstens die Hälfte der theoretischen Wärmemenge in der Praxis wirklich nutzbar. In Abbildung 34 sind die rechnerisch erforderlichen Mengen an flüssigem Stickstoff zusammengestellt.

Diese Werte konnten jedoch nur als Anhaltswerte betrachtet werden, da sie auf ideale Bedingungen angewiesen sind. So war es in der Praxis nicht möglich, die gesamte theoretisch verfügbare Wärmemenge zum Abkühlen der Beschichtung zu benutzen. Die Beschichtung konnte lediglich von einer Seite gekühlt werden, so daß vermutlich ein großer Teil der Wärmemenge in die umgebende Luft verloren ging. Es wurde daher entgegen den berechneten Mengen jede Beschichtung mit 0,5 l flüssigem Stickstoff vollständig geflutet, dabei die Einwirkungszeit gemessen und danach Entschichtungsversuche mit dem Vakuumsandstrahlgerät Galaxie-Strahlmax der Firma C.P.-System Strahltechnik durchgeführt, wobei ebenfalls die Zeit gemessen wurde bis eine gut sicht- und meßbare Fläche entschichtet war. Diese wurde ausgemessen und notiert. Wo dies nicht möglich war wurde der Versuch abgebrochen und als mißlungen erklärt. Die erreichten Abtragsleistungen sind in Abbildung 35 zusammengetragen und einander gegenübergestellt.

4.3 Entschichtung mittels Trockeneisstrahlen

Hierbei wurde zunächst mit der Strahlanlage RDS 500 CUB der Firma Cold Jet mit einer Flachdüse gestrahlt. Dies ist eine Einschlauchanlage, die mit dem vorhandenen Druckluftkompressor in der Lage gewesen wäre bei einem Förderdruck von bis zu 12 bar zu strahlen und auf einen Pelletdurchsatz von 80 – 100 kg/h eingestellt war. Aufgrund eines defekten Ventils lief die Anlage jedoch laut Anzeige lediglich bei rund 9 bar. Nachdem zunächst versuchsweise mit einer Flachdüse gestrahlt wurde, wurde diese gegen eine Runddüse ausgetauscht. Mit einer ebenfalls vorhandenen stationären Strahlanlage von Cold Jet wurde zwischenzeitlich bei 11 bar Förderdruck gestrahlt, um den Einfluß des höheren Druckes auf die Abtragsleistung beobachten zu können. Hierbei konnte bei einer exemplarisch gestrahlten Epoxidharzversiegelung zwar eine entsprechend höhere Abtragsleistung erzielt werden, jedoch wurden die Entschichtungsversuche mit der mobilen Strahlanlage weitergeführt, da deren Parameter näher an der Baupraxis waren. Die hierbei erzielten Abtragsleistungen und die dazugehörigen Zeiten sind in Abbildung 35 zusammengetragen. Wo eine Entschichtung nicht möglich war wurde der Versuch abgebrochen und als mißlungen erklärt.

4.4 Entschichtung mittels Vakuumsandstrahlen

Dieses Verfahren ist hinlänglich bekannt und ist nicht Thema dieser Diplomarbeit. Es soll daher nicht näher erläutert werden. Die eingesetzte Strahlanlage Galaxie-Strahlmax war von der Firma C.P.-System Strahltechnik und lief bei einem Förderdruck von rund 9 bar.

Da die Entschichtungsversuche Trockeneisstrahlen bereits abgeschlossen und die dafür vorgesehenen Beschichtungen aus Zeitgründen nicht vollständig entfernt worden waren, wurden diese für das Vakuumsandstrahlen erneut eingesetzt. Dadurch sollte eine noch bessere Vergleichbarkeit erreicht werden, da die Abtragsleistungen und die Gründlichkeit der Entschichtung auf diese Weise nebeneinander sichtbar wurden.

Auch hier wurde die Zeit gemessen, bis eine gut sicht- und meßbare Fläche erfolgreich entschichtet war und diese zusammen mit der Größe der Abtragsfläche in Abbildung 35 eingetragen.

Dort, wo eine Entschichtung nicht möglich war, wurde der Versuch als mißlungen erklärt und abgebrochen.

5 Auswertung der Ergebnisse

5.1 Flüssiger Stickstoff

Bei den Versuchen stellte sich heraus, daß die vorhandene Abkühlung der Beschichtung stark von der erwarteten abwich. Der aufgebrauchte flüssige Stickstoff war in jeweils rund 20 s vollständig verdampft, so daß die Einwirkungsdauer vermutlich schlicht zu kurz war, um eine tiefere Abkühlung zu erzielen (Abbildung 36). Im Vergleich mit dem Trockeneisstrahlen wurde sogar weniger stark abgekühlt, was aus der Sicht der dabei wirkenden mehr als doppelt so tiefen Kälte verwundert. Bei den dickeren Beschichtungen waren zwar über die gesamte Fläche die erwarteten unregelmäßigen Haarrisse sichtbar geworden, doch konnte dadurch keine Auflockerung der Beschichtung beobachtet werden. Die während der Einwirkungsdauer noch sichtbaren Haarrisse verschwanden sogar wieder. Zwar kommt es offenbar tatsächlich zu einer Versprödung der Beschichtung, doch sind die entstehenden Spannungen scheinbar nicht groß genug, um die Adhäsion zu überwinden. Größtenteils liegt dies vermutlich an der großen Verdunstung; die Versuche wurden im Freien durchgeführt wobei es schwach windig war. Im Vergleich mit einer stationären Anlage in einem geschlossenen Raum wie dies bei den Entlackungsanlagen Rebhans der Fall ist sind diese Parameter natürlich nicht gegeben. Dort liegt das flüssige Stickstoff in einem Becken und das zu entlackende Bauteil wird vollständig hineingetaucht. Auf diese Weise wirkt die tiefe Kälte von allen Seiten auf die Beschichtung ein, und weit weniger Stickstoff geht bei dem Entlackungsvorgang verloren. Im Freien dagegen verdunstet offenbar der größte Teil des aufgebrauchten LN_2 , ohne daß die eigentlich vorhandene Wärmemenge vollständig auf die Beschichtung einwirken kann (Abbildung 37).

Weiterhin konnte eine Veränderung der Eigenschaften der Beschichtung beobachtet werden; nachdem diese wieder erwärmt war, war sie weit elastischer geworden als vor dem Entschichtungsversuch. Dies war jedoch für den Ausgang der Versuche nicht von Bedeutung.

Ein Versuch an einer der übriggebliebenen Epoxidharzbeschichtungen diese möglichst tief zu kühlen führte nach insgesamt 5-fachem Fluten mit 500 ml dann doch noch zu den erwarteten unregelmäßigen Haarrissen über die gesamte Fläche der Beschichtung. Es war eine starke Schollenbildung vorhanden, wobei sich diese teilweise gering vom Untergrund abgelöst hatten (Abbildung 38). Diese Schollenbildung wurde nach jedem weiteren Fluten verstärkt, bis nach 2,5 l flüsigem Stickstoff der Effekt nicht mehr gesteigert werden konnte. Eine Nachbearbeitung mit einem Meißel ermöglichte eine vollständige Entfernung, allerdings löste sich hierbei nicht die Beschichtung vom Untergrund, sondern der Beton scherte in einer Tiefe von etwa 1,0 mm ab (Abbildung 39). Diese abgescherte Betonschicht haftete sogar immer noch an der Beschichtung, so daß offenbar selbst bei einer sehr tiefen Abkühlung die Adhäsion noch vollständig intakt ist. Während des Abkühlens wird das Material also zwar spröder und der E-Modul steigt an, doch die entstehenden Spannungen reichen nur aus die Kohäsion innerhalb der Beschichtung zu überwinden, so daß die Beschichtung aufreißt. Hierdurch wird jedoch der größte Teil der Spannung wieder abgebaut, da durch die Schollenbildung die Verformungen nur noch sehr gering werden, wirken sie doch auf eine viel kleineren Fläche ein. Diese Verformung reicht dann bei weitem nicht mehr aus die Adhäsion zu überwinden, was durch den Versuch mit dem Meißel auch bestätigt wurde. Offenbar ist die Kohäsion in der Beschichtung

niedriger als die Adhäsion zum Untergrund, was vermutlich an der starken Verzahnung liegt.

Im Bauwesen kann dieses Verfahren lediglich bei elastischen und gleichzeitig zähen Beschichtungen vorteilhaft werden. An der weit schnelleren und dabei ebenfalls gründlicheren Entschichtung des Bitumenschutzanstrichs bei vorhergehender Behandlung mit LN_2 zeigt sich, daß das Verfahren in Ausnahmefällen einem herkömmlichen Entschichtungsverfahren dazu verhelfen kann eine praktisch unlösbare Aufgabe zu bewältigen (Abbildung 40). Es wird vermutet, daß die Beschichtung hierfür lediglich bis zur Versprödung abgekühlt werden müßte, so daß eine weit geringere Menge an LN_2 ausreichen dürfte.

Bei warmen Wetter, wenn das Bitumen noch elastischer ist, kann eine dicke bituminöse Schicht nicht durch Sandstrahlen entfernt werden. Die Strahlenergie wird durch das zäh-elastische Verhalten der Beschichtung praktisch geschluckt, so daß die Körner in der Beschichtung versinken statt diese „abzukratzen“. Hier kann sonst nur gefräst und dabei die Beschichtung mitsamt einem Teil des Untergrundes entfernt werden. Wenn dies aus statisch-konstruktiven oder anderen Gründen nicht möglich ist, könnte ein wenig flüssiger Stickstoff die Lösung des Problems sein.

Natürlich ist der Umgang nicht ungefährlich, es müssen einige Sicherheitsregeln beachtet werden. Stickstoffgas hat keine festgelegte MAK, jedoch können hohe Konzentrationen Ersticken verursachen. Symptome können Verlust der Bewegungsfähigkeit und des Bewußtseins sein und das Opfer bemerkt das Ersticken nicht [29]. Da es ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas ist kann es nicht wahrgenommen werden und ist außerdem schwerer als Luft und setzt sich am Boden ab, so daß unbedingt auf ausreichende Belüftung geachtet werden muß und auf keinen Fall alleine gearbeitet werden darf. Bei entsprechenden Schutzmaßnahmen (Augen, Gesicht und Haut vor Flüssigkeitsspritzern und damit Kaltverbrennungen schützen) kann das Verfahren jedoch auch in der Praxis mit wenig Aufwand eingesetzt werden, ohne daß dabei eine Strahlanlage wie beispielsweise beim Trockeneisstrahlen erforderlich wäre.

5.2 Trockeneisstrahlen

Dieses Verfahren war zwar das einzige, mit dem mit Ausnahme von einer alle untersuchten Beschichtungen entfernt werden konnten, doch mußte dazu gerade bei den dickeren Beschichtungen eine lange Einwirkungsdauer gewählt werden (Abbildung 41, 42, 43, 44, 45, 46). Vermutlich liegt dies daran, daß dickere Beschichtungen > 1,0 mm erst nach einer längeren Einwirkungsdauer auf die erforderlichen tiefen Temperaturen gekühlt werden können, so daß die resultierenden thermischen Spannungen nicht für eine Auflockerung ausreichen und bei gleichzeitig widerstandsfähigeren Beschichtungen deshalb eine wirksame Entschichtung nicht möglich ist. Die in Abbildung 35 zusammengefaßten Abtragsleistungen sind dabei auf eine Fläche von 1,0 m² umgerechnet worden, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erhalten. Es zeigt sich, daß daß Trockeneisstrahlen lediglich bei den dünnen Versiegelungen mit Polyurethanharz bzw. Alkydharzlack und natürlich dem Bitumenschutzanstrich vergleichbare bzw. sogar bessere Ergebnisse erzielen konnte als die übrigen Verfahren. Für die im Bauwesen am häufigsten vorkommenden dickeren Beschichtungen bzw. widerstandsfähigere Epoxidharze kann es also als Alternative zu den heute angewandten nicht in Frage kommen. Selbst bei einer drastischen

Verschärfung der Gesetze gegen eine fortschreitende Umweltverschmutzung würde vermutlich bei solchen Beschichtungen nichts daran ändern; zu teuer und zu langsam wäre das Arbeiten hierbei. Bei einem von dem Dienstleister LKY genannten Stundenlohn von ca. 400 – 600 DM/h, ergäbe sich im Fall des Bitumenschutzanstrichs also bei einer Schichtdicke von etwa 1,0 mm ein Einheitspreis zwischen 50 – 75 DM/m². Dabei darf nicht vergessen werden, daß eine im Vergleich zum Vakuumsandstrahlen rund 10 mal schnellere Entschichtung mit weit geringeren Reststoffmengen erreicht wurde. Hier wäre daher heute schon ein Einsatzgebiet gefunden, wobei sich dieses bei Einführung noch strengerer Gesetze bzw. besserer Kontrolle heute eingesetzter Verfahren noch vergrößern könnte. Gerade beim Freisandstrahlen kann heute häufig beobachtet werden, daß eine wirksame Einhausung des bestrahlten Bereichs nicht gegeben ist und/oder zwar aufgebaut wird, jedoch im Zuge der Strahlarbeiten nicht mitgeführt sondern „pro Forma“ stehengelassen wird. Dabei können dann während den Strahlarbeiten teilweise erhebliche Staubwolken beobachtet werden, die entgegen der gültigen Gesetze eine starke Kontamination der gesamten Umgebung mit sich bringen. Entsprechend muß davon ausgegangen werden, daß die angebotenen Einheitspreise zumindest bei solchen Baustellen verfälscht sind und das Freisandstrahlen eigentlich höhere Preise verursachen müßte. Diese Vermutung soll hier nicht belegt werden, die vorliegende Diplomarbeit möchte lediglich zeigen, daß bei ordnungsgemäßer Ausführung einer Entschichtung eines Bitumenschutzanstrichs die dafür erforderlichen Einheitspreise vermutlich nicht mehr so sehr von denen des Trockeneisstrahlens abweichen würden, zumal eine vergleichbar saubere Betonoberfläche durch Sandstrahlen alleine nicht zu erreichen ist.

Beim Strahlen mit Trockeneis entsteht beim sublimieren der Pellets ein nebelartiger Schleier um den gestrahlten Bereich, so daß durch die Sichtbehinderung ein effektives arbeiten erschwert wird. Zudem können (abhängig von der Beschichtungsart) während der Reinigung/Entschichtung analog zu herkömmlichen Entschichtungsverfahren feinste Reststoffe der Beschichtung in Form von Staubteilchen entstehen. Es muß daher vor dem Einsatz über die Giftigkeit der Beschichtung bzw. des Untergrundes nachgedacht und entsprechende Gegenmaßnahmen getroffen werden. Anzumerken ist außerdem, daß es während dem Strahlen zu einer starken statischen Aufladung der bestrahlten Oberfläche und der Anlage kommt. Hierbei können Funkenbildungen nicht vollends ausgeschlossen werden, so daß das Verfahren nicht in feuergefährlichen und/oder explosiven Umgebungen angewandt werden darf. Da eine solche jedoch im Bauwesen höchst selten anzutreffen sein dürfte, ist dieser Nachteil in der Regel nicht von Belang.

Von Vorteil ist die leicht zu kontrollierende Abtragsleistung, alle angebotenen Strahlanlagen haben entsprechende Regelmöglichkeiten und man kann diese zusätzlich über die Entfernung der Strahldüse zur Oberfläche steuern. So wurden mit herkömmlichen Strahlanlagen in Italien sogar schon Sandsteinfassaden an denkmalgeschützten Gebäuden gereinigt ohne diese dabei zu zerstören.

Geht es also nicht um eine Entschichtung eines Bauteils sondern lediglich um dessen Reinigung, ist hierfür das Trockeneisstrahlen aus der Sicht des Umweltschutzes prädestiniert.

Verbessern ließe sich die Abtragsleistung vor allem durch eine bessere Kühlleistung bzw. höhere Abrasivität der Pellets, wobei letzteres durch eine kantigere Form und/oder eine höhere Härte der Pellets zu erreichen wäre. Allerdings läßt sich die Oberflächenbeschaffenheit der Pellets nicht verändern. Um die Schärfe zu erhöhen wäre lediglich eine Beimischung von zusätzlichen abrasiven Mitteln möglich. Dies bedeutete im Vergleich mit Freisandstrahlen oder Feuchtsandstrahlen immer noch weit weniger zusätzlich anfallende Reststoffe, jedoch würde sich die Abtragsleistung vermutlich deutlich verbessern. Problematisch könnte jedoch andererseits der dann höhere Verschleiß der Strahlanlage werden, so daß entsprechende Gegenmaßnahmen getroffen werden müßten.

Die Erhöhung der Härte soll laut Haberland der Firma AGA in Laborversuchen bereits geglückt sein, sie erzeugten bei -145 °C zunächst sehr harte Schneekristalle, die nach dem anschließendem Verdichten durch die Pelletmatrizen -120 °C kalte Trockeneispellets mit einer Mohshärte von 7 Mohs ergaben [22]. Sollte eine industrielle Nutzung dieses neuen Herstellungsverfahrens in naher Zukunft möglich werden oder könnte die Pellethärte in anderer Form erhöht werden, würde dies vermutlich den Durchbruch für das Trockeneisstrahlen bedeuten. Die Umweltverträglichkeit des Verfahrens ist im Vergleich mit den üblichen Entschichtungsverfahren heute schon unschlagbar. Problematisch bleibt lediglich die durch die Überschallgeschwindigkeit entstehende hohe Lärmbelastung, die einem Einsatz in bewohntem Gebiet entgegensteht.

5.3 Wassereisstrahlen

Das Verfahren konnte aus den schon beschriebenen Gründen nicht untersucht werden. Die Überlegungen stützen sich daher ausschließlich auf Literaturstudium bzw. Anfragen an Hersteller und Dienstleister. Aufgrund der schon beschriebenen Wirkungsweise dieses Verfahrens ist es lediglich für die Reinigung unterschiedlichster Oberflächen prädestiniert, da es nicht in der Lage ist eine funktionierende und gut haftende Beschichtung vom Untergrund zu lösen. Im Falle einer nicht mehr tragfähigen Altbeschichtung, die bereits angelöst sein müßte, könnte diese ohne den Untergrund abzutragen schonend entfernt werden. Das verwendete Wassereis geht durch die einwirkende Aufprallenergie schlagartig in den flüssigen Zustand über und verdampft sogar teilweise, so daß laut UIBI im Vergleich mit dem Hochdruckwasserstrahlen bei diesem Verfahren lediglich etwa 75 – 95 l Wasser/h statt 2.270 l Wasser/h beim Hochdruckwasserstrahlen anfällt, was etwa eine 30-fache Verringerung bedeutet [26]. Es kann daher häufig auf Absaugsysteme mit entsprechenden Dichtleisten zum Abfangen des anfallenden Restwassers verzichtet werden, da erheblich weniger Wasser wieder von der Oberfläche abfließt und aufgefangen werden muß.

Durch die Eigenherstellung des Strahlmittels aus herkömmlichen Trinkwasser ist die Mobilität etwas eingeschränkt, da eine Wasserversorgung Voraussetzung für den Einsatz des Verfahrens ist. Andererseits ist dies auch der größte Vorteil, da das Strahlmittel nur dann hergestellt wird, wenn es auch tatsächlich gebraucht wird. Aus der Sicht des Umweltschutzes ist dieses Verfahren daher völlig unproblematisch.

Problematisch bleibt jedoch analog zum Trockeneisstrahlen die hohe Lärmbelastung, obwohl hierbei mit niedrigeren Drücken gestrahlt wird. Aufgrund der Funktionsweise der Strahlanlagen läßt sich diese nicht vollends ausschalten. Abschreckend ist außerdem der extrem hohe Preis einer solchen Strahlanlage. Vermutlich ist dies

einer der Hauptgründe weshalb in Deutschland kein Anwender gefunden werden konnte.

Verbessern ließe sich die Leistung des Wassereisstrahlens analog zum Trockeneisstrahlen durch eine Veränderung der Oberflächeneigenschaften des Eises; dieses ist zu „rund“ und besitzt dadurch eine zu geringe „Schärfe“, so daß es bei der Bestrahlung eher von der Beschichtung abprallen würde als diese wie etwa Sandkörner kratzend/fräsend abzutragen. Allerdings läßt sich diese ebenfalls nur durch eine Beimischung von zusätzlichen abrasiven Mitteln erreichen, was im Vergleich mit Freisandstrahlen oder Feuchtsandstrahlen immer noch weit weniger zusätzlich anfallende Wassermasse bzw. Reststoffe bedeutete, die Abtragsleistung jedoch vermutlich ähnlich dem Trockeneisstrahlen verbessern könnte.

6 Fazit

Aufgrund der bei den Versuchen gemachten Erfahrungen, würde sich eine genauere Erforschung des Flutens mit LN_2 und Trockeneisstrahlens sicher lohnen. Durch den engen zeitlichen Rahmen konnten lediglich einige wenige Beschichtungen auf ihre Tauglichkeit untersucht werden. Bei weiterführenden Arbeiten müßten daher weit mehr Systeme entschichtet werden, um die festgestellten Tendenzen zu untermauern oder zu widerlegen. Da das Fluten mit flüssigem Stickstoff beim Bitumenschutzanstrich das Vakuumsandstrahlen zu höchsten Abtragsleistungen ertüchtigen konnte, scheint dieses Verfahren bei dünnen elastischen Beschichtungen seine volle Wirkung zu zeigen. Die Verdopplung der Entschichtungsleistung bei der Alkydharzlackschicht und der dünnen Polyurethanversiegelung deuten ebenfalls darauf hin. Gerade bezüglich bituminöser Beschichtungen könnte sich eine weitergehende Erforschung in der Zukunft lohnen.

Gespannt sein kann man auch auf eine eventuell in Zukunft mögliche Erhöhung der Pellethärte, wobei sich in dem Fall ganz andere Einsatzmöglichkeiten ergeben würden. Ganz sicher wird der Umweltschutz auch im Bauwesen in Zukunft mehr in den Mittelpunkt treten, so daß die vorliegende Diplomarbeit zumindest den ersten Schritt für die spätestens dann fällige tiefer gehende Erforschung der beiden Verfahren gemacht hat.

Anlage 1: Berechnung des Flächendrucks

$$V_{Kugel} = \frac{4}{3} \times \pi \times r_{Kugel}^3$$

$$m_{Kugel} = \rho_{Strahgut} \times V_{Kugel}$$

$$F_{Kugel} = m_{Kugel} \times a_{Kugel}$$

$$a_{Kugel} = \frac{v_{Kugel}}{t}$$

$$\rightarrow t \cong \frac{1}{\frac{v_{Kugel}}{2 \times r_{Kugel}}} \Rightarrow a_{Kugel} \cong \frac{v_{Kugel}^2}{2 \times r_{Kugel}}$$

$$F_{Kugel} = \rho_{Strahgut} \times \frac{4}{3} \times \pi \times r_{Kugel}^3 \times \frac{v_{Kugel}^2}{2 \times r_{Kugel}}$$

$$\sigma = \frac{F_{Kugel}}{A_{Kugel}} = \rho_{Strahgut} \times \frac{2 \times \pi \times r_{Kugel}^2 \times v_{Kugel}^2}{3 \times \pi \times r_{Kugel}^2} \times 10^{-6} \frac{N}{mm^2}$$

mit: $\rho_{Strahgut} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

und: $v_{Kugel} \left[\frac{m}{s} \right]$

$$F_{Trockeneispellet} = 1.400 \times \frac{4}{3} \times \pi \times 0,0005^3 \times \frac{200^2}{2 \times 0,0005} = \underline{\underline{29,3 N}}$$

$$F_{Trockeneispellet} = 1.400 \times \frac{4}{3} \times \pi \times 0,001^3 \times \frac{200^2}{2 \times 0,001} = \underline{\underline{117,3 N}}$$

$$F_{Trockeneispellet} = 1.400 \times \frac{4}{3} \times \pi \times 0,0015^3 \times \frac{200^2}{2 \times 0,0015} = \underline{\underline{263,9 N}}$$

$$\sigma_{Trockeneispellet} = 1.400 \times \frac{2 \times 200^2}{3} \times 10^{-6} = \underline{\underline{37,3 \frac{N}{mm^2}}}$$

$$\sigma_{Sand} = 1.800 \times \frac{2 \times 200^2}{3} \times 10^{-6} = \underline{\underline{48,0 \frac{N}{mm^2}}}$$

$$\sigma_{Wasser} = 1.000 \times \frac{2 \times 200^2}{3} \times 10^{-6} = \underline{\underline{26,7 \frac{N}{mm^2}}}$$

Verfahren	Wirkungsweise	Umweltrelevanz
Fräsen	Prinzip des Schabens	<ul style="list-style-type: none"> • Erschütterungen des Arbeitsbereichs und angrenzender Bereiche • in der Regel hohe Staubentwicklung
Schleifen	Prinzip des Schleifens, ähnlich dem Fräsen	<ul style="list-style-type: none"> • in der Regel hohe Staubentwicklung
Freistrahlen	Strahlen eines feinkörnigen Strahlmittels mit Druckluft	<ul style="list-style-type: none"> • Staubentwicklung auch bei Absaugung nicht unerheblich; Kontaminierung ursprünglich unbelasteter Bauteile möglich • hoher Verbrauch und Anfall und Entsorgung von Strahlgut
Vakuumsandstrahlen	Strahlen eines feinkörnigen Strahlmittels mit Druckluft innerhalb einer Abdeckung und anschließendem Absaugen mittels Vakuum	<ul style="list-style-type: none"> • in der Regel hohe Staubentwicklung
Feuchtsandstrahlen	Strahlen eines feinkörnigen, mittels Wasser benetztem Strahlmittels mit Druckluft	<ul style="list-style-type: none"> • Anfall und Entsorgung von Strahlgut
Kugelstrahlen	Mittels Schleuderrad auf den Untergrund geschleuderte Stahlkügelchen	keine
Hochdruckwasserstrahlen (ohne integrierte Absaugvorrichtung)	Strahlen von Wasser mit sehr hohem Druck, teilweise mit abrasiven Zusatzmitteln	<ul style="list-style-type: none"> • große Mengen an Wasser und Schlamm müssen erfaßt und entsorgt werden • Gefahr der ungewollten Kontamination der Umgebung
Hochdruckwasserstrahlen (mit integrierter Absaugvorrichtung)	Strahlen von Wasser mit sehr hohem Druck, teilweise mit abrasiven Zusatzmitteln, innerhalb einer Abdeckung und anschließendem Absaugen mittels Vakuum	keine, Wasser und Schlamm werden in einer Abwasseraufbereitungsanlage getrennt

Abbildung 1: Zusammenstellung der Umweltrelevanz heute üblicher Entschichtungsverfahren (nach [4])

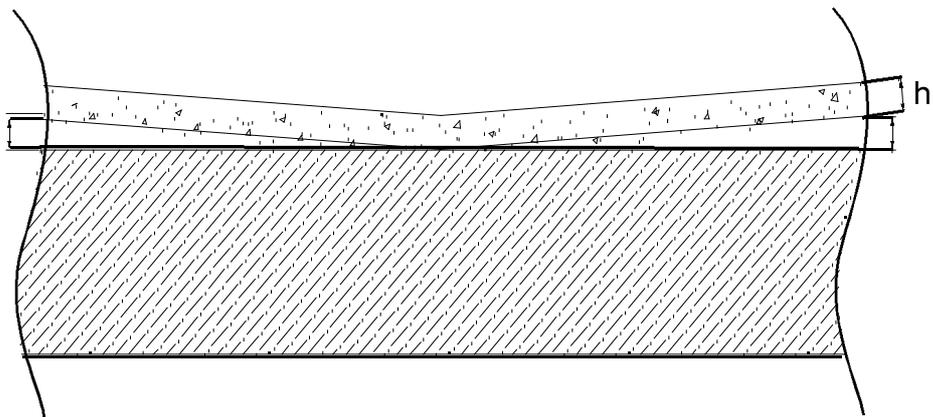


Abbildung 2: Verformungen quer zur Grenzschicht infolge ungleichmäßiger Temperaturänderung t ,

$$= t \cdot t/h \quad ; \quad t/h \rightarrow 0 \rightarrow \epsilon \cong 0$$

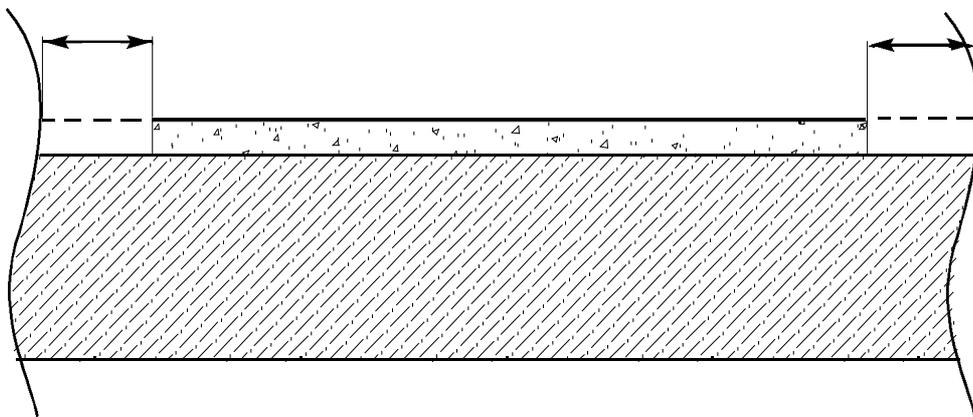


Abbildung 3: Verformungen längs der Grenzschicht infolge gleichmäßiger Temperaturänderung t_s ,

$$= t \cdot t_s \quad ; \text{beispielsweise Abkühlung auf } -20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ und Epoxidharz-}$$

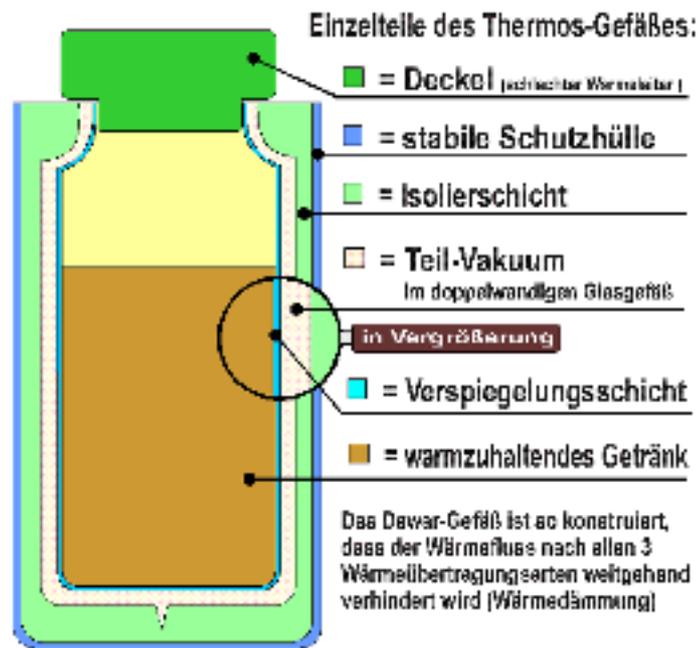
$$\text{beschichtung mit } t = 90 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

$$\text{und } E = 2.100 \text{ N/mm}^2 \text{ bei } -20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$= 90 \cdot 10^{-6} \cdot -20 = -1,8 \cdot 10^{-3}$$

$$= E \cdot = 2.100 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} = 3,78 \text{ N/mm}^2$$

Wärmedämmung beim Dewar-Gefäß: www.kochtopf.de 



Wärmestrahlung wird besonders stark behindert durch die Verspiegelungsschicht der doppelwandigen Glasbehälter.



Wärmeleitung wird besonders stark behindert durch das Teilvakuum im doppelwandigen Glasgefäß und durch die Isollerschicht von Gefäß und Deckel.



Wärmeführung wird besonders stark behindert durch das Teilvakuum im doppelwandigen Glasgefäß und durch einen dicht schließenden Deckel.

Abbildung 4: Dewargefäß [30]

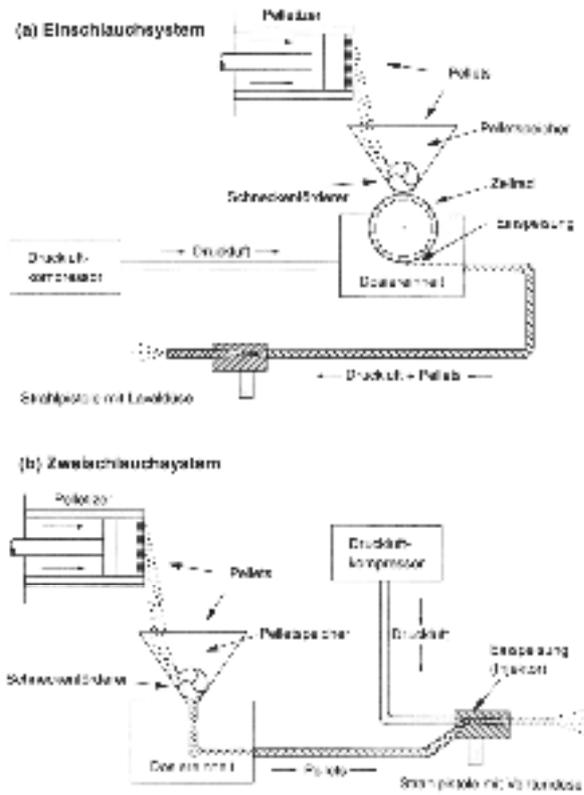


Abbildung 5: Schema von Strahlanlagen [22],
 a) Einschlauchsystem (Druckstrahlprinzip)
 b) Zweislauchsystem (Injektorprinzip)

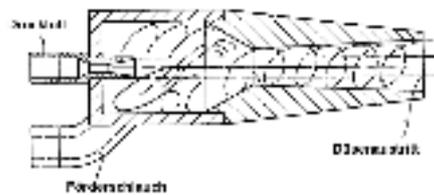


Abbildung 6: Schema einer Venturidüse (nach [31])

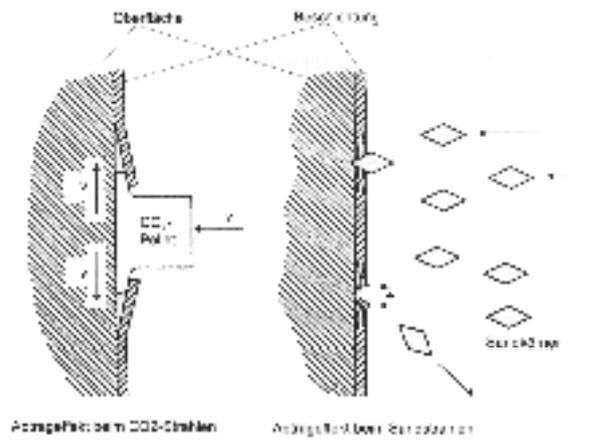


Abbildung 7: Vergleich CO_2 -Strahlen – Sandstrahlen [22]

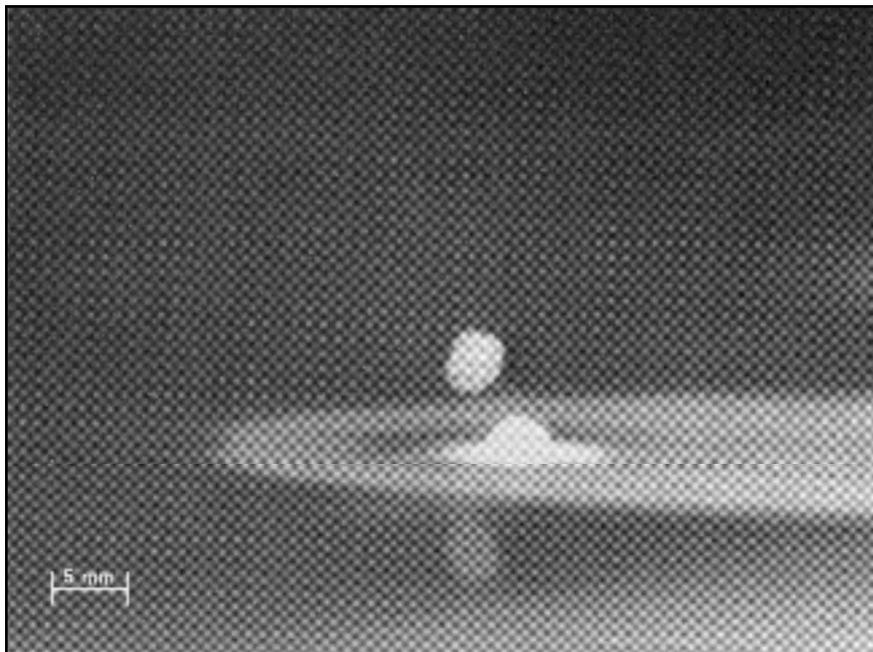


Abbildung 8: Trockeneispellet kurz vor und während Aufprall [22]

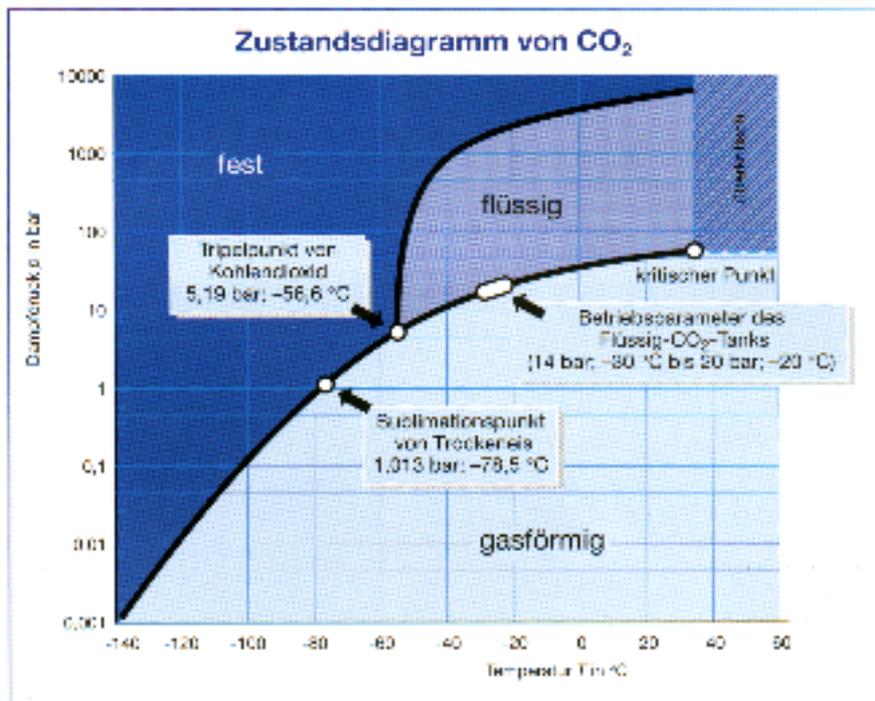


Abbildung 9: CO₂-Zustandsdiagramm [17]



Abbildung 10: Trockeneispellet



Abbildung 11: Trockeneisnuggets



Abbildung 12: Trockeneisblöcke

Hersteller	CRYOCLEAN	CRYOCLEAN	GREEN TECH	GREEN TECH	ASCO	ASCO
Strahlanlage	CRYOMINI	CryoMax	Mini Jet	GT II	ASCOJET 1501	ASCOJET 2001 RS
Strahlgut	Trockeneispellets	Trockeneispellets	Trockeneispellets	Trockeneispellets	Trockeneispellets	Trockeneispellets
Strahlverfahren	Einschlauch	Einschlauch	Zweischlauch	Zweischlauch	Zweischlauch	Zweischlauch
L x B x H [mm]	550 x 500 x 700	750 x 500 x 750	800 x 450 x 670	1.000 x 630 x 1.000	600 x 500 x 940	660 x 470 x 1.120
Gewicht [kg] (ungefüllt)	41,2	102,5	50	80	85	128
Vorratsbehälter [kg]	7	40	20	50	40	20
Strahlgutverbrauch [kg/h]	25 – 30	50 – 70	20 – 60	20 – 60	25 – 80	30 – 100
Strahl Druck [bar]	2 – 16	2 – 16	2 – 16	2 – 16	2,5 – 10	2,5 – 16
Luftverbrauch [m³/min]	2 bei 6 bar	6 bei 12 bar	3 – 8	3 – 10	3 – 7	3 – 12
Druckluftversorgung [bar]	2 < vorh. < 16	5 < vorh. < 16	6 < vorh. < 16	6 < vorh. < 16	4 < vorh < 16	4 < vorh < 16
Strahlschlauchlänge [m]	3	7	3	7	5	7,5
Lärmpegel [dB(A)]	81 (6 bar, 1 m) – 115 (14 bar, 1 m)	81 (6 bar, 1 m) – 115 (14 bar, 1 m)	60 – 120	60 – 120	95 – 112	95 – 112
Stromverbrauch [W]	pneumatisch	pneumatisch	pneumatisch	pneumatisch	600	1.250
Preis ab Werk, exkl. Steuern [€]	7.750	22.660	12.500	20.000	11.250	17.500

Hersteller	COLD JET	COLD JET	UIBI
Strahlanlage	RDS 250 FP	RDS 500 CUB	MX-90
Strahlgut	Trockeneispellets	Trockeneispellets	Wassereispartikel
Strahlverfahren	Einschlauch	Zweischlauch	Zweischlauch
L x B x H [mm]	570 X 438 x 638	660 X 508 x 930	1.372 X 927 x 1.625
Gewicht [kg] (ungefüllt)	52	114	635
Vorratsbehälter [kg]	15	30	(Wasser)
Strahlgutverbrauch [kg/h]	24 – 204	0 – 186	75 – 95 l/h
Strahl Druck [bar]	4 – 8	4 – 20	k.A.
Luftverbrauch [m³/min]	3 – 6	3 – 6	9
Druckluftversorgung [bar]	6 – 8	6 – 20	8
Strahlschlauchlänge [m]	k.A.	k.A.	k.A.
Lärmpegel [dB(A)]	k.A.	k.A.	k.A.
Stromverbrauch [W]	pneumatisch	k.A.	15.000
Preis ab Werk, exkl. Steuern [€]	11.150	27.900	77.000

Abbildung 13: Erhältliche Strahlanlagen verschiedener Hersteller



Abbildung 14: Reinigung der Betonwerksteinplatten mittels Hochdruckwasserstrahlen

Probenummer	1a-c	2a-c	3a-c	4a-c	5a-c	6a-c	7a-c
Art	Epoxidharzversiegelung	Epoxidharzbeschichtung	Epoxidharzbelag	Polyurethanbeschichtung	Polyurethanversiegelung	Bitumenschutzanstrich	Alkydharzlack
Grundierung	MC-DUR 111 D, transparent	MC-DUR 1200 VK, transparent	MC-DUR 1200 VK, transparent	MC-DUR 1200 VK, transparent	MC-DUR VS, transparent	Eurolan 1	DUPLI-COLOR Lackspray, Mintgrün
Verbrauchsmenge [g/m ²]	250	300	300	300	200	250	-
Aufgebrachte Menge [g]	22,5	27	27	27	18	22,5	50 ml
Dichte [g/cm ³]	1,03	1,1	1,1	1,1	0,95	0,91	0,9
Schichtdicke [mm]	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,06
Beschichtung	MC-DUR 111 D	MC-DUR 1200	MC-DUR 1900	MC-DUR 2052	MC-DUR VS-PUR	Eurolan 1	s.o.
Verbrauchsmenge [g/m ²]	300	1400	2000	1500	250	250	-
Aufgebrachte Menge [g]	2*27	126	180	135	2*22,5	3*22,5	100 ml
Dichte [g/cm ³]	1,35	1,37	1,35	1,45	1,3	0,91	0,9
Schichtdicke [mm]	0,4	1	1,5	1	0,4	0,8	0,12
Gesamtschichtdicke [mm]	0,6	1,3	1,8	1,3	0,6	1,1	0,2

Abbildung 15: Beschichtungssysteme



Abbildung 16: Epoxidharzversiegelung MC-DUR 111 D (gelb)
Polyurethanversiegelung MC-DUR VS-PUR (grün)

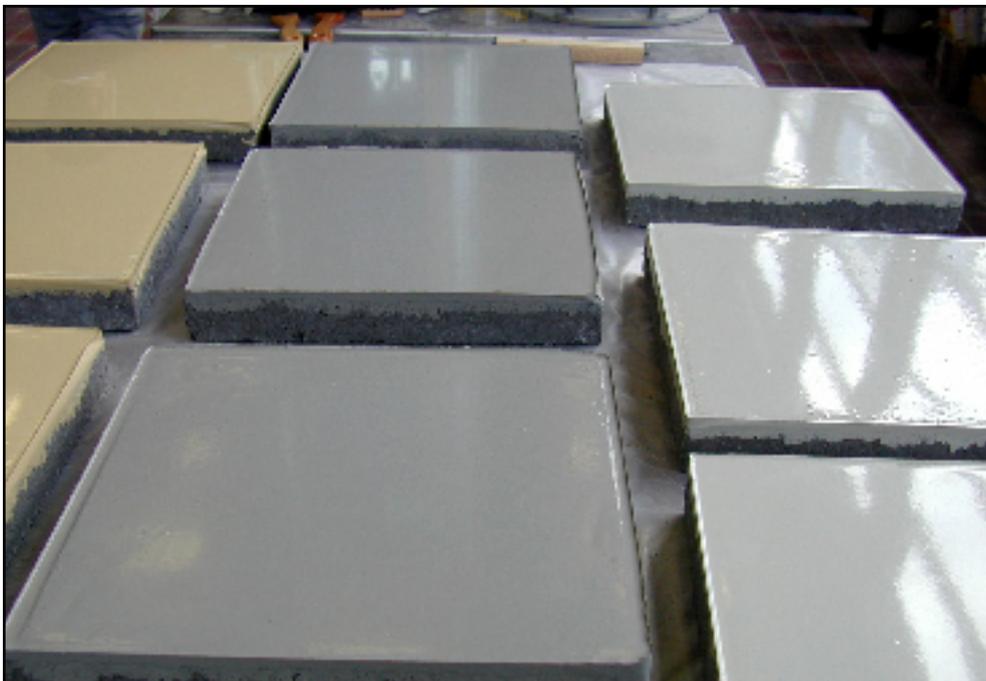


Abbildung 17: Epoxidharzbeschichtung MC-DUR 1200 (ocker)
Epoxidharzbelag MC-DUR 1900 (dunkelgrau)
Polyurethanbeschichtung MC-DUR 2052 (hellgrau)

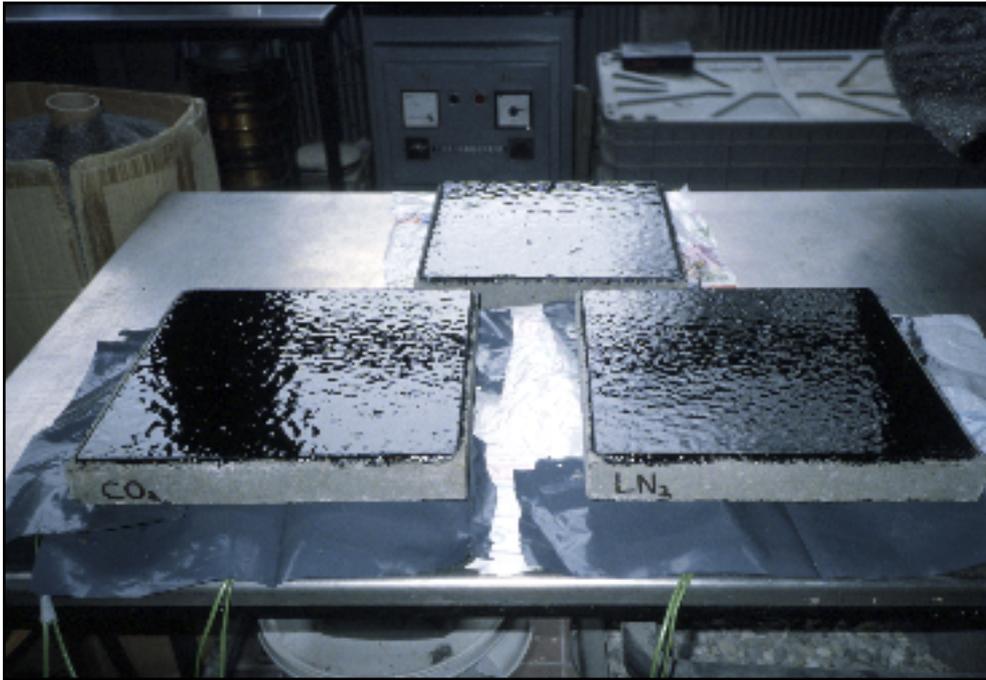


Abbildung 18: Bitumenschutzanstrich Eurolan 1



Abbildung 19: Vorbohren für Haftzugfestigkeitsprüfung

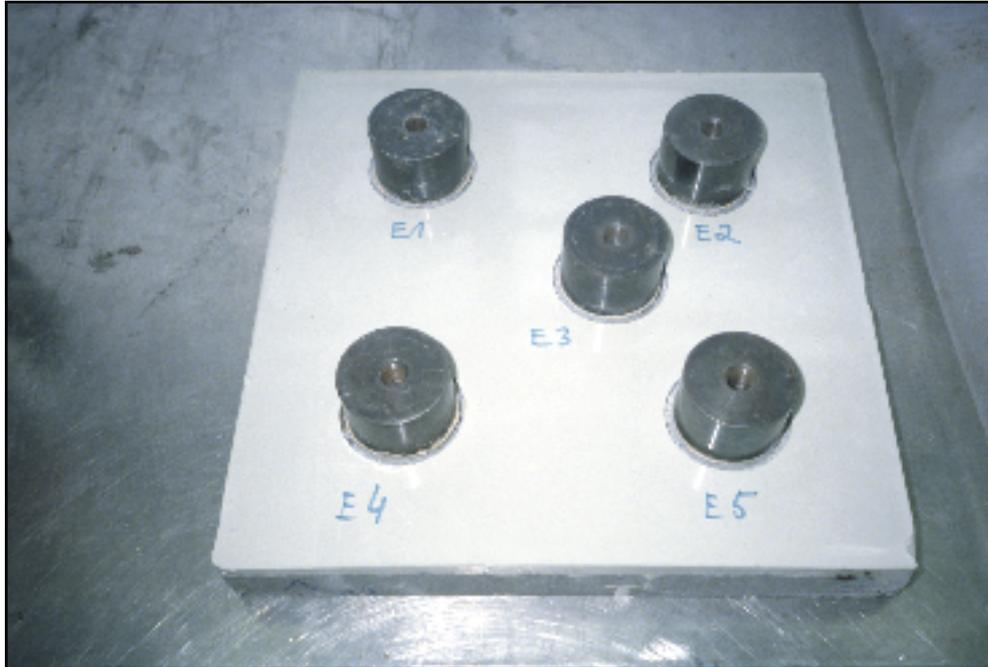


Abbildung 20: Prüfstempel für Haftzugfestigkeitsprüfung

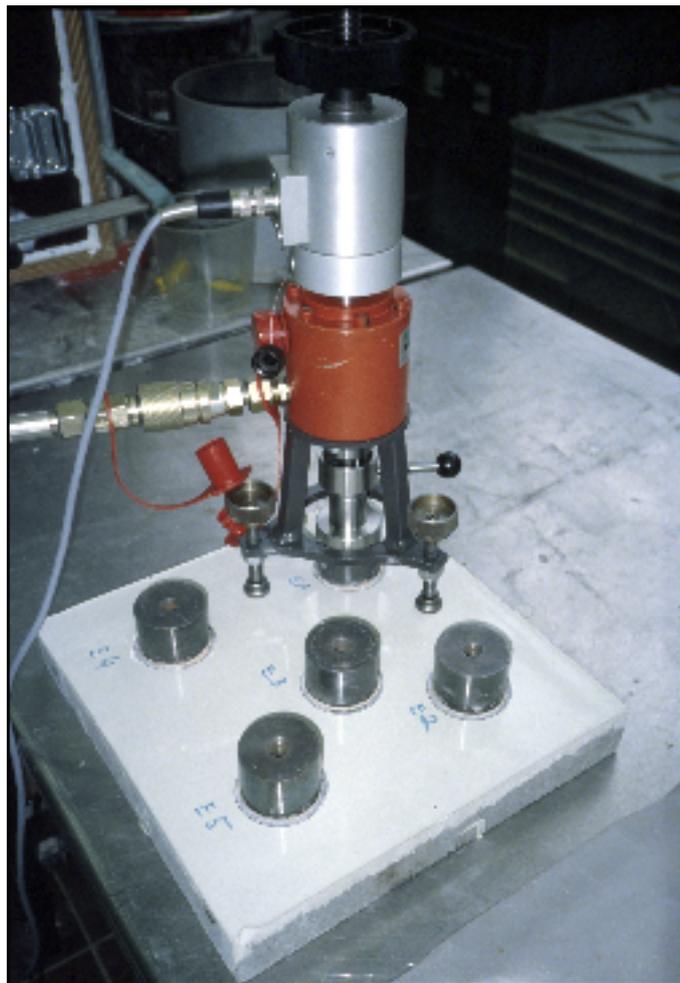


Abbildung 21: Haftzugfestigkeitsprüfung

Prüfstempel [-]	Bruchkraft [kN]	Bruchspannung [N/mm ²]	
Epoxidharzplatte			
E1	2,98	1,52	} <u>1,8 N/mm²</u>
E2	3,16	1,61	
E3	3,22	1,64	
E4	4,42	2,25	
E5	3,71	1,89	
Polyurethanharzplatte			
P1	7,31	3,72	} <u>4,2 N/mm²</u>
P2	7,45	3,79	
P3	9,37	4,77	
P4	9,01	4,59	
P5	7,94	4,04	

Abbildung 22: Haftzugfestigkeiten

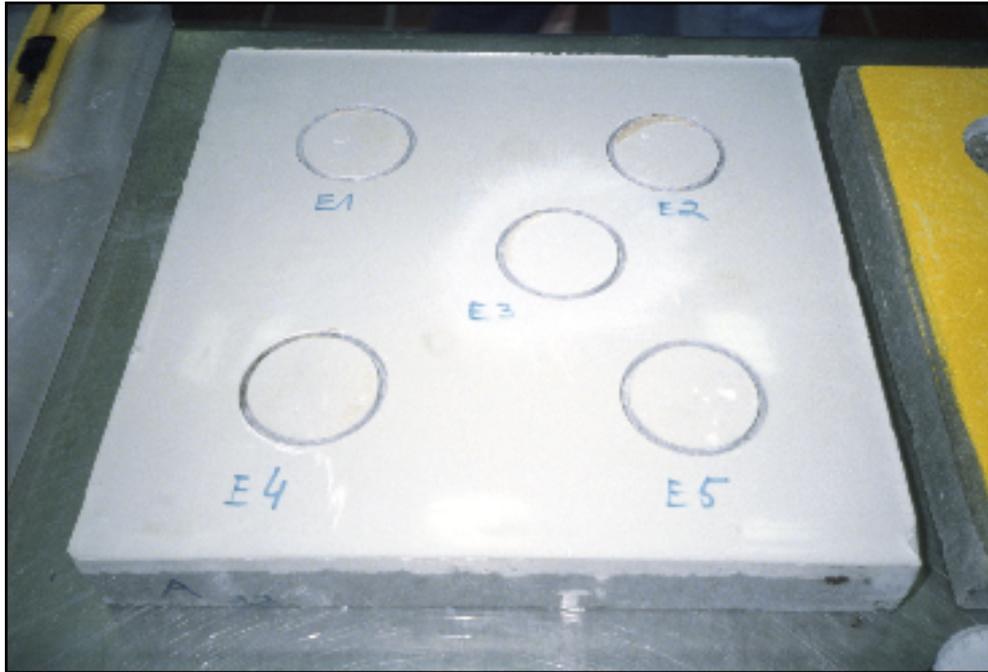


Abbildung 23: Adhäsionsbruch in der Klebefuge

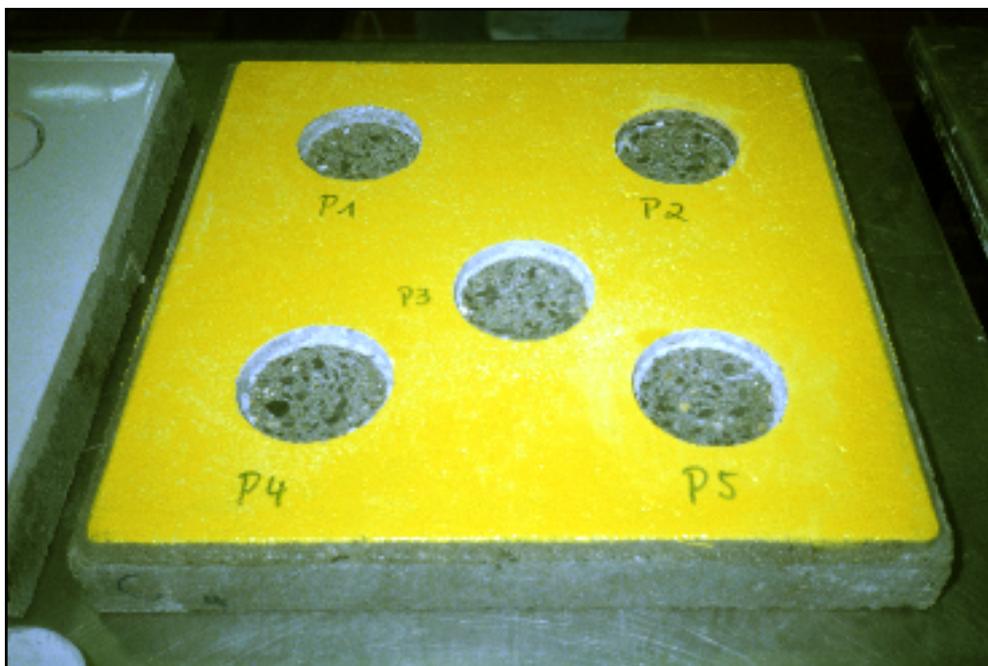


Abbildung 24: Kohäsionsbruch im Beton



Abbildung 25: Temperaturmeßstellen LN₂

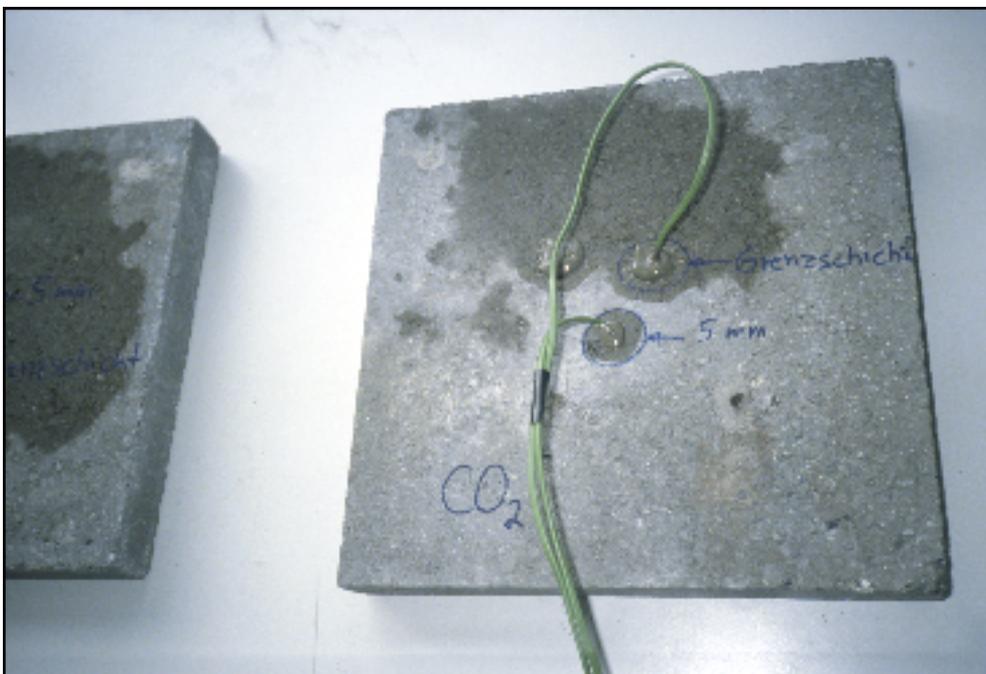


Abbildung 26: Temperaturmeßstellen CO₂

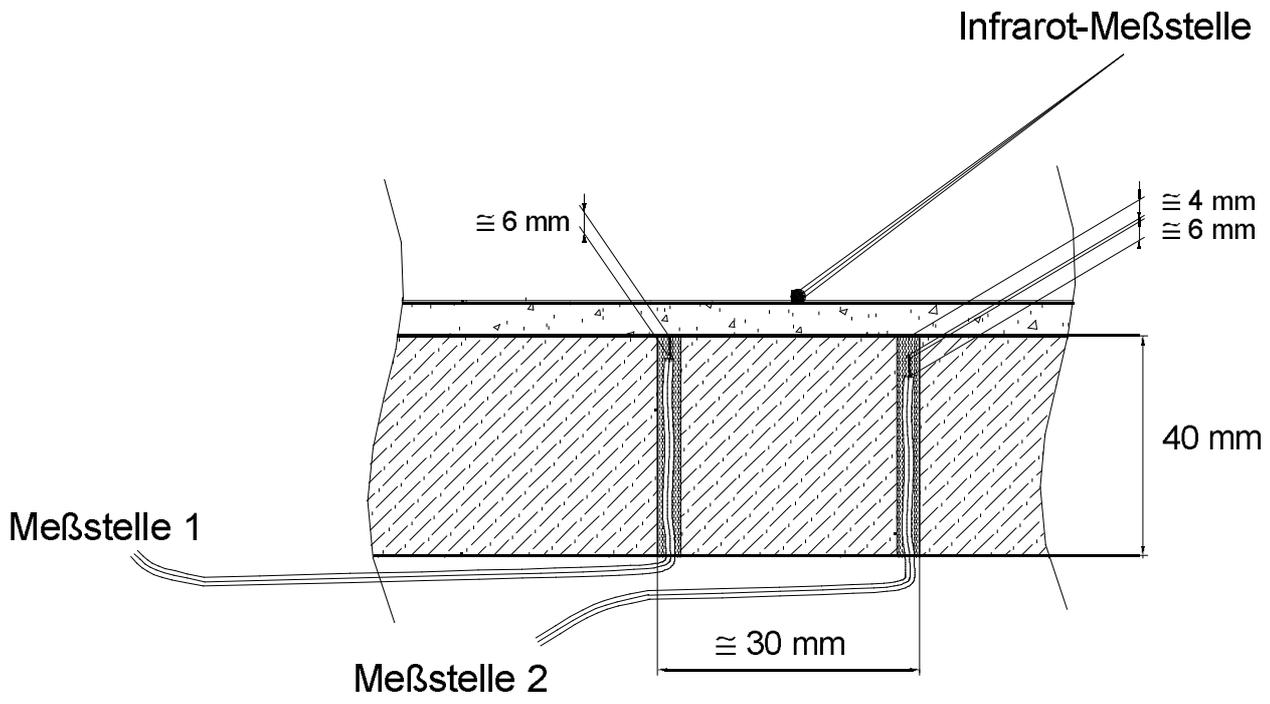


Abbildung 27: Lage der Meßstellen (Schnitt)



Abbildung 28: Lage der Meßstellen (Draufsicht)



Abbildung 29: Kontrollmessung mit LN₂

**Temperaturen beim Fluten mit Flüssigstickstoff
(Kontrollmessung)**

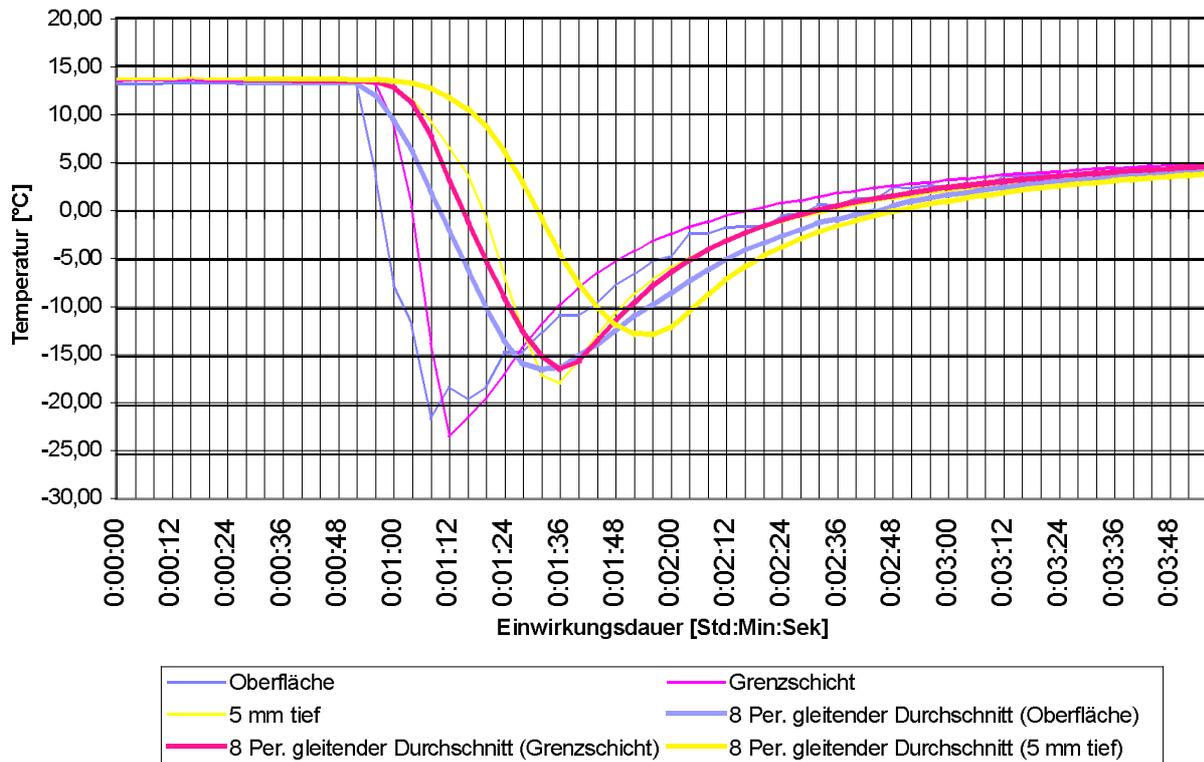


Abbildung 30: Diagramm Kontrollmessung mit LN₂

Temperaturen beim Fluten mit Flüssigstickstoff (neue Messung)

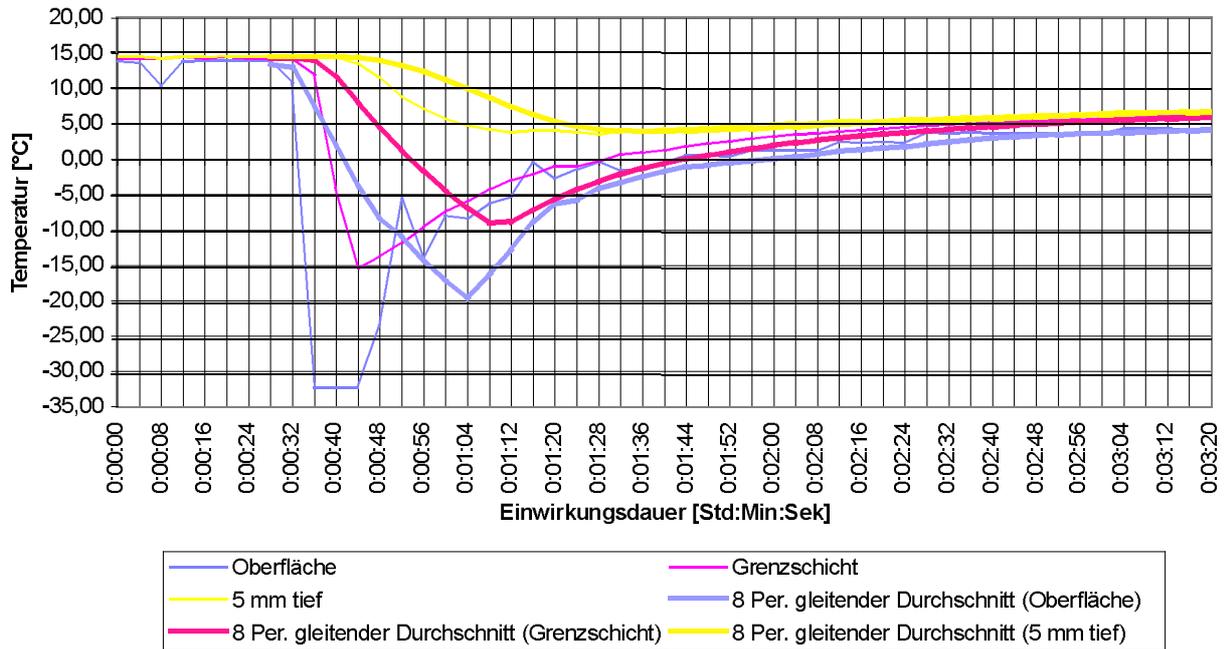


Abbildung 31: Diagramm Temperaturmessung mit LN₂

Temperaturen beim Trockeneisstrahlen

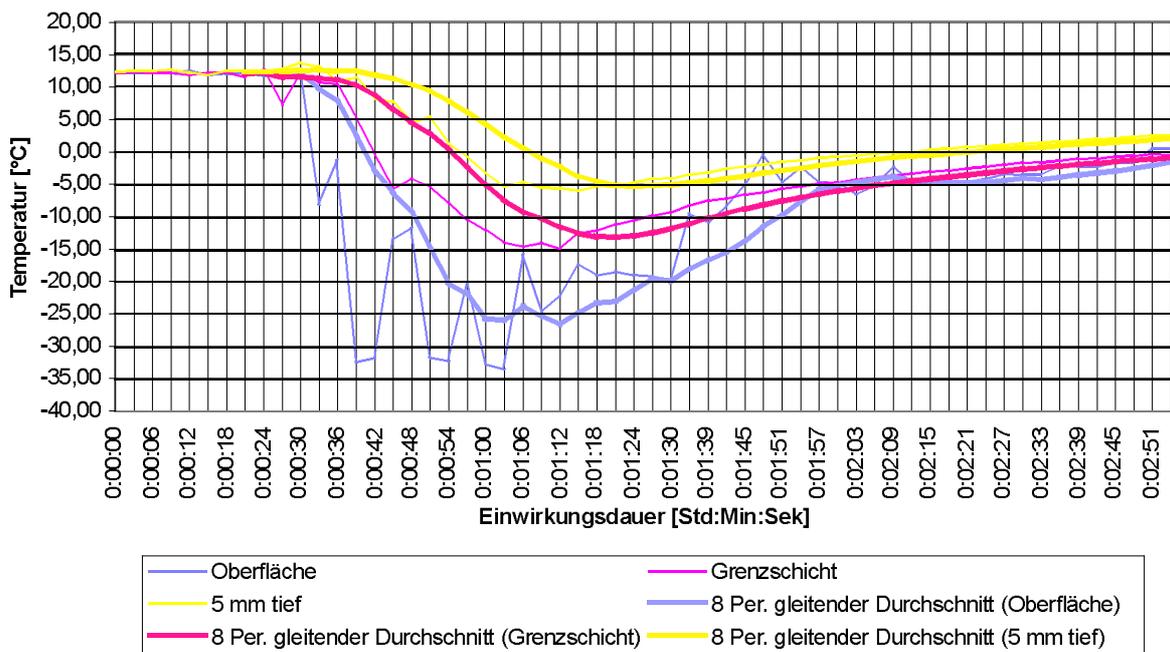


Abbildung 32: Diagramm Temperaturmessung mit CO₂

i-T-Diagramm von Stickstoff

Diagramm zur Berechnung der Stickstoffmenge für die Diffusionskoeffizientenbestimmung (DIN EN 12454-2) mit 2022 und 1000 g/m² (DIN EN 12454-2)

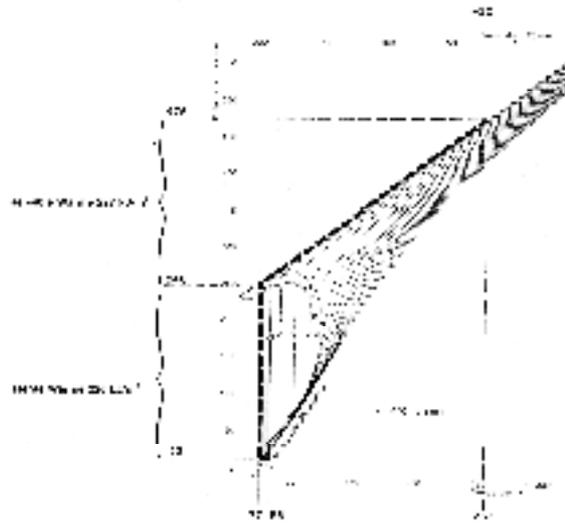


Abbildung 33: i-T-Diagramm von LN₂ [10]

Probennummer	1b	2b	3b	4b	5b	6b	7b
Art	Epoxidharz-versiegelung	Epoxidharz-beschichtung	Epoxidharz-belag	Polyurethan-beschichtung	Polyurethan-versiegelung	Bitumen-schutzanstrich	Alkydharzlack
Beschichtung	MC-DUR 111 D	MC-DUR 1200	MC-DUR 1900	MC-DUR 2052	MC-DUR VS-PUR	Eurolan 1	DUPLI-COLOR Lackspray, Mintgrün
Aufgebrachte Menge [g]	76,5	153	207	162	63	90	ca. 50
rechnerische Menge je kg Beschichtung [m ³ /kg]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,5	1,3
rechnerische Menge je Probe [ml/Probe]	76,5*1,3*1,448 = 144	153*1,3*1,448 = 288	207*1,3*1,448 = 390	162*1,3*1,448 = 305	63*1,3*1,448 = 119	90*1,5*1,448 = 169	50*1,3*1,448 = 94

Abbildung 34: Rechnerisch benötigten Stickstoffmengen

Probenummer	1a + b	2a + b	3a + b	4a + b	5a + b	6a + b	7a + b
Art	Epoxidharz-versiegelung	Epoxidharz-beschichtung	Epoxidharz-belag	Polyurethan-beschichtung	Polyurethan-versiegelung	Bitumen-schutzanstrich	Alkydharzlack
Beschichtung	MC-DUR 111 D	MC-DUR 1200	MC-DUR 1900	MC-DUR 2052	MC-DUR VS-PUR	Eurolan 1	DUPLI-COLOR Lackspray, Mintgrün
Gesamtschichtdicke [mm]	0,6	1,3	1,8	1,3	0,6	1,1	0,2
Flüssig-Stickstoff + Vakuumsandstrahlen	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a
Einwirkungsdauer [s]	21	13	23	25	25	14	22
Strahlzeit [s]	67	> 75	> 130	> 102	59	40	50
Entschichtet je Platte [cm ²]	4*13 = 52	-	-	-	13*13 = 169	24*23 = 552	14*15 = 210
visueller Eindruck	Reste in den Poren	-	-	-	analog Trockeneis-strahlen	saubere Betonoberfläche	geringe Reste in den Poren
<i>rechnerische Abtragsleistung [m²/h]</i>	<i>0,3</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>5</i>	<i>1,5</i>
Trockeneisstrahlen	1b	2b	3b	4b	5b	6b	7b
Strahlzeit [s]	159	75	130	102	103	10	184
Entschichtet je Platte [cm ²]	4*10 = 40	1,5*1,5 = 3,0	1,5*1,5 = 3,0	2*12 = 24	7,5*13 = 97,5	8,5*26 = 221	30*30 - 8*26 = 692
visueller Eindruck	saubere Betonoberfläche	saubere Betonoberfläche	saubere Betonoberfläche	saubere Betonoberfläche	geringe Reste in den Poren	saubere Betonoberfläche	geringe Reste in den Poren
<i>rechnerische Abtragsleistung [m²/h]</i>	<i>0,1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>	<i>8</i>	<i>1,4</i>
Vakuumsandstrahlen	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a
Strahlzeit [s]	205	> 75	> 130	> 102	77	53	115
Entschichtet je Platte [cm ²]	17*10 = 170	1,0*1,0 = 1,0	-	-	10*10 = 100	10*10 = 100	8*26 = 208
visueller Eindruck	Reste in den Poren	Reste in den Poren	-	-	analog Trockeneis-strahlen	geringe Reste in den Poren	analog Trockeneis-strahlen
<i>rechnerische Abtragsleistung [m²/h]</i>	<i>0,3</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0,5</i>	<i>0,7</i>	<i>0,7</i>

Abbildung 35: Abtragsleistungen der einzelnen Entschichtungsverfahren

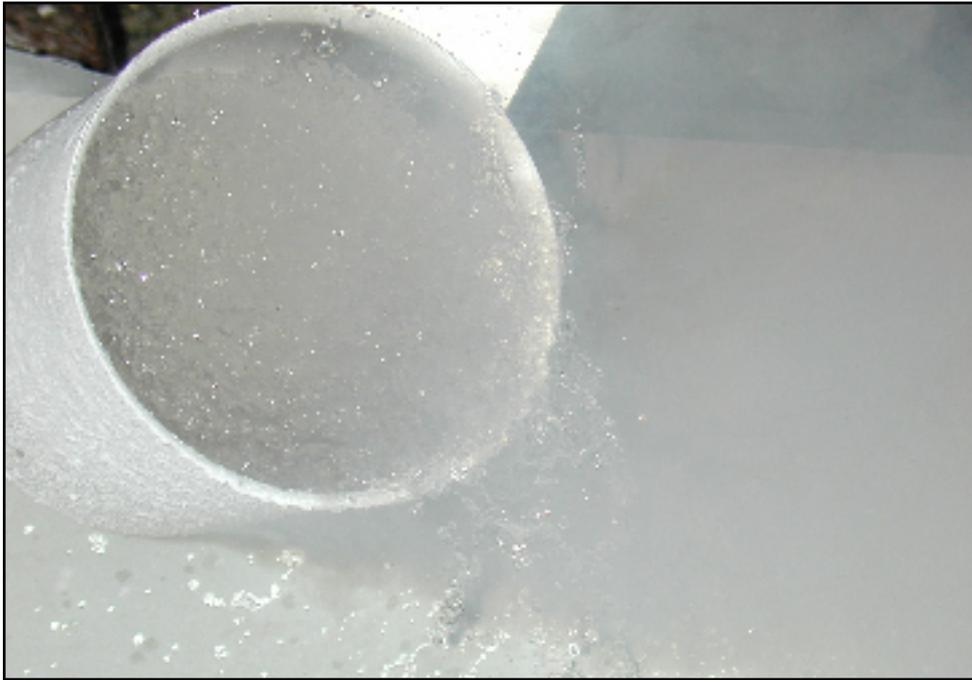


Abbildung 36: Kochendes LN₂



Abbildung 37: Fluten mit LN₂



Abbildung 38: Schollenbildungen durch LN₂

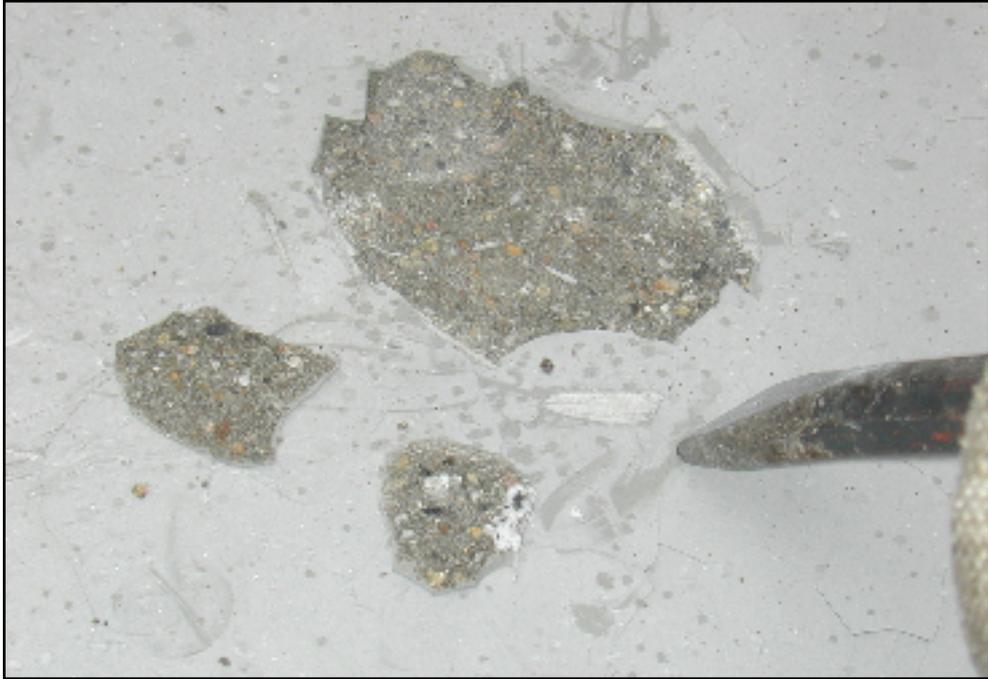


Abbildung 39: Meißelversuch



Abbildung 40: Entschichtung durch LN₂ und Vakuumsandstrahlen



Abbildung 41: Entschichtung durch CO₂-Strahlen



Abbildung 42: Entschichtung durch CO₂-Strahlen



Abbildung 43: Entschichtung durch CO₂-Strahlen



Abbildung 44: Entschichtung durch CO₂-Strahlen



Abbildung 45: Entschichtung durch CO₂-Strahlen



Abbildung 46: Entschichtung durch CO₂-Strahlen

- [1] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (RILI-SIB), Teil 4: Qualitätssicherung der Bauprodukte, Kempten, Rewi Verlag, 1993.
- [2] Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (ZTV-SIB 90), Dortmund, Verkehrsblatt-Verlag, 1990.
- [3] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz KrW-/AbfG), in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. September 1994, BGBl. I 1994 S. 2705; 1996 S. 1354; 1998 S. 509, 1485, 2455.
- [4] Rentz; Schultmann; Ruch; Sindt: Demontage und Recycling von Gebäuden, Landsberg, Ecomed Verlagsgesellschaft, 1997.
- [5] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz WHG), in der Fassung der Bekanntmachung vom 12. November 1996, BGBl. I S. 1696
- [6] Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffverordnung GefStoffV), in der Fassung der Bekanntmachung vom 1. Januar 2000, BGBl. I S. 2233.
- [7] Rebhan, D.: Flüssiger Stickstoff kompensiert Hydratationswärme, Höllriegelskreuth, Sonderdruck 141, Linde Gas AG, 1988.
- [8] Klopfer, H.: Neuere Methoden zur Oberflächenvorbereitung von Stahl In: Bautenschutz + Bausanierung, 8. Jahrgang (1985), Nr. 3, S. 129-131.
- [9] Drosdowski, Scholze-Stubenrecht, Wermke: DUDEN, Fremdwörterbuch, Mannheim, Dudenverlag 1997
- [10] Rebhan, D.: Tieftemperatur-Entlackung mit flüssigem Stickstoff, "Entlacken '88", Fachtagung über Technik und Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Entlackungsverfahren am 14. und 15. März 1988 in München.
- [11] Rebhan, D.: Umweltschonende Entlackung mit flüssigem Stickstoff, In: Oberfläche + JOT, 1988, Nr. 5, S. 58 – 60.
- [12] Fong, C. C.: Sandstrahlverfahren und Einrichtung zu dessen Durchführung, Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift DT 25 43 019 A1, 1976, Lockheed Aircraft Corporation, Burbank, Calif.-USA.
- [13] Fong et al: Blasting machine utilizing sublimable particles, United States Patent, Offenlegungsschrift US 43 89 820, 1983, Lockheed Aircraft Corporation, Burbank, Calif.-USA.
- [14] N. N.: Frequently Asked Questions About Dry Ice Blasting Internet, http://www.cae-alpheus.com/index_qu.htm, CAE-Alpheus, Rancho Cucamonga, Calif.-USA, 2000.
- [15] Linger, D. R.: The Fundamentals of Dry Ice Blast Cleaning, Internet, <http://www.coldjet.com/technical.cfm>, Cold Jet, Loveland OH-USA, 2000.
- [16] N. N.: Trockeneis - der coole Unterschied Informationsschrift, Green Tech Hofolding, 2000.
- [17] N. N.: Strahlreinigung mit Trockeneis – die umweltfreundliche Kraft, Informationsschrift, Cryoclean LINDE, Höllriegelskreuth, 2000

- [18] N. N.: Was ist Lärm?
Internet, http://www.sonicshop.de/De/Was_ist_Laerm.htm, HörStudio Tiesing, Ditzingen, 2000.
- [19] N. N.: Acoustics Guide,
Internet, <http://www.coldjet.com/technical.cfm>, Cold Jet, Loveland OH-USA, 2000.
- [20] N. N.: Frequently Asked Questions,
Internet, <http://www.coldjet.com/faq.cfm>, Cold Jet, Loveland OH-USA, 2000.
- [21] N. N.: Trockeneis-Anwendungstechnik
Informationsschrift, LKY Kältetechnik
Groß-Umstadt, 2000.
- [22] Haberland, J.: Reinigen und Entschichten mit Trockeneisstrahlen
- Grundlegende Untersuchung des CO₂-Strahlwerkzeuges und der
Verfahrensweise,
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2 (Fertigungstechnik) Nr. 502,
Düsseldorf, VDI-Verlag 1999.
- [23] Stahr, M.: Praxiswissen Bausanierung, Erkennen und Beheben von
Bauschäden
Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1999.
- [24] N. N.: Trockeneisreinigung,
Informationsschrift, ASCO Kohlensäure
Romanshorn, CH, 2000.
- [25] N. N.: Temperaturmessung,
Internet,
<http://www.ptb.de/de/blickpunkt/futour/themen/temperaturmessung.html>,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
Braunschweig, 2000.
- [26] N. N.: Questions and Answers,
Internet, <http://www.iceblast.net/IceBlstQA.htm>, UIBI,
Kirkland, WA-USA, 2000.
- [27] Mansted, S. A. J.: Method of and means for producing broken ice,
United States Patent, Offenlegungsschrift US 25 49 215, 1951,
?, ?, ?-USA.
- [28] Visaisouk et al: Particle blasting using crystalline ice,
United States Patent, Offenlegungsschrift US 53 67 838, 1994,
Ice Blast International, Macomb County, Mich.-USA.
- [29] N. N.: Sicherheitsdatenblatt Stickstoff flüssig,
Internet, <http://www.carbagas.ch/new/deutsch/sicherheit.htm>, Carbagas,
Gümligen, CH, 2000
- [30] N. N.: Wärmedämmung beim Dewargefäß
Internet, <http://www.zum.de/dwu/depot/pwl006f.gif>,
Zentrale für Unterrichtsmedien im Internet e.V.
Merzhausen, 1997.
- [31] Fröhlich et al:Verfahren und Einrichtung zur Erzeugung eines zweiphasigen
Gas-Partikel-Strahls, insbesondere mit Trockeneispartikeln,
Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift DE 19 80 797 A1, 1999,
Air Liquide, Düsseldorf

Ich versichere, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und mich fremder Hilfe nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß veröffentlichtem oder unveröffentlichtem Schrifttum entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Ffm., 21.12.2000

M. G. Hays

