



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB

Développement d'une méthode d'essais non-déstructif pour des soudures de membranes polymères d'étanchéité

Development of a nondestructive test method for welded seams of polymeric sealing membranes

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, Abteilung Mechanical Systems Engineering
Dr. Andreas J. Brunner
Peter Flüeler
Dr. Erwin Hack
Roman Mastrangelo
Marcello Stimolo

Forschungsauftrag FGU 2004/003 auf Antrag der Fachgruppe Untertagbau (FGU)

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Peter Flüeler (bis April 2005), Dr. Andreas J. Brunner (ab Mai 2005)

Mitglieder

Dr. Andreas J. Brunner

Dr. Erwin Hack

Roman Mastrangelo

Marcello Stimolo

Begleitkommission

Präsident

Felix Amberg

Mitglieder

Prof. Dr. Gerhard Girmscheid

Martin Bosshard

Antragsteller

Fachgruppe Untertagbau (FGU)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Zusammenfassung	5
Résumé 7	
Summary	9
Vorwort 11	
1 Einleitung	13
1.1 Auftrag.....	13
1.2 Problemstellung	13
1.3 Grundlagen.....	14
1.4 Vorgehensweise.....	14
1.5 Projektziele.....	15
2 Stand der Technik	16
2.1 Relevante Literatur	16
2.2 Prüfung von Schweissnähten.....	16
2.3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren	18
3 Anforderungsprofil für Prüfverfahren	22
3.1 Wesentliche Anforderungen („Muss“)	22
3.2 Wünschbare Eigenschaften („Kann“).....	22
3.3 Vergleichende Bewertung möglicher Ansätze	23
4 Beschaffung, Herstellung und Charakterisierung von Laborprüfmustern	26
4.1 Simulation von Defekten	26
4.2 Schweissmuster unterschiedlicher Qualität	27
4.2.1 Einleitung.....	27
4.2.2 Beschreibung der Polyethylen-Schweissmuster	28
4.2.3 Beschreibung der plastifizierten Poly-Vinyl-Chlorid (PVC)-Schweissmuster	30
5 Laborprüfungen mit Thermografie	34
5.1 Einführung und experimenteller Aufbau.....	34
5.1.1 Einleitung und Vorversuche	34
5.1.2 Impuls-Thermografie	35
5.1.3 Lock-in Thermografie	36
5.2 Prüfmuster mit simulierten Defekten	37
5.2.1 Einleitung.....	37
5.2.2 Impuls-Thermografie	37
5.2.3 Lock-in Thermografie	38
5.2.4 Diskussion und Vergleich der Verfahren.....	39
5.3 Prüfmuster mit unterschiedlicher Festigkeit der Schweissnaht	40
5.3.1 Impuls-Thermografie	40
5.3.2 Lock-in Thermografie	40
5.3.3 Vergleich der Lock-in Thermografie für verschiedene Materialien	43
5.3.4 Vergleich der Lock-in Thermografie mit den Ergebnissen der mechanischen Charakterisierung und dem visuellen Befund im Schälversuch.....	43
6 Perspektiven für zerstörungsfreien Nachweis der Güte von Schweissnähten	45
6.1 Impuls- und Lock-in Thermografie	45
6.2 Andere zerstörungsfreie Prüfverfahren	46
Anhänge	48
Abkürzungen	65

Literaturverzeichnis	66
Projektabschluss.....	69
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	72

Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt untersucht eine Machbarkeitsstudie die Verwendung von Thermografie für die Beurteilung von Schweissnähten von Kunststoff-Dichtungsbahnen im Tiefbau. In einer ersten Phase wird die Machbarkeit an Laborprüfmustern und unter Laborbedingungen beurteilt. Diese Prüfmuster bestehen einerseits aus einer Schweissnahtreihe mit simulierten Defekten (meist durch Einlage von Fremdmaterial), die von der Firma Leister AG zu Verfügung gestellt wurde, andererseits aus Schweissnähten, die von Schweißern ohne Erfahrung im Rahmen eines Studentenpraktikums hergestellt wurden. Der Einsatz passiver Thermografie erwies sich in Vorstudien als wenig Erfolg versprechend. Daher wurden die Laborversuche mit sogenannter Impuls- und Lock-in Thermografie durchgeführt. Dabei wird durch eine gepulste bzw. periodisch modulierte Wärmequelle im Material eine Wärmewelle angeregt und die resultierende Temperaturverteilung im Zeitverlauf bzw. als Amplituden- oder Phasenbild aufgezeichnet.

Die Laborversuche zur Machbarkeit der Nutzung von Impuls- oder Lock-in Thermografie für die Beurteilung der Güte von Handschweissnähten von Kunststoff-Dichtungsbahnen im Tunnelbau haben gezeigt, dass durch Einlegen von Fremdkörpern simulierte Defekte sowie die Nahtbreite regulärer Dichtungsbahnen bestimmt und haftende Schweissnähte von lose aufliegenden, überlappenden Dichtungsbahnen unterschieden werden können. Für die Versuche wurden Dichtungsbahnen aus Poly-Vinyl-Chlorid (PVC) und Polyethylen (PE) genutzt, die unterschiedliche Farben aufwiesen. Es konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Messergebnis und Werkstoff bzw. Farbe der Kunststoff-Dichtungsbahn nachgewiesen werden. Ob ein Nachweis sogenannter „kissing bonds“, d.h. lokal nicht verbundener aber kontinuierlich aufliegender Dichtungsbahnen möglich ist, konnte mangels geeigneter Prüfmuster nicht geklärt werden. Die Versuche haben keine Hinweise darauf ergeben, dass Unterschiede in der Haftung der Schweissnaht, die z.B. in Schälzug- oder Scherwiderstandsversuchen zerstörend quantitativ ermittelt werden kann, mit Lock-in Thermografie nachgewiesen werden können. Damit ist eine wichtige Voraussetzung für weiterführende Untersuchungen zum Einfluss von Baustellenbedingungen nicht gegeben. Im Weiteren wurde im Rahmen des Projekts ein Verfahren zur Herstellung von Schweissnähten mit unterschiedlicher Haftung entwickelt und validiert. Es dabei zeigte sich, dass mit diesem Verfahren hergestellte Schweissnähte von PVC-Dichtungsbahnen typisch eine deutlich höhere Streuung der Haftung aufweisen (Standardabweichung 50%) als jene von Polyethylen-Dichtungsbahnen (Standardabweichung 16%).

Haftende und nicht-haftende Schweissnähte liessen sich mit diesem Verfahren gut unterscheiden. Somit ist eine Bestimmung der Schweissnahtbreite mittels Lock-in Thermografie möglich. Die Haftfestigkeit der Schweissnaht liess sich damit aber nicht ermitteln. Da eine mindestens qualitative oder halb-quantitative Bestimmung der Haftfestigkeit der Schweissnaht für eine Beurteilung der Qualität wie auch der Nutzungsdauer wichtig ist, kann Thermografie diese Aufgabe nicht im gewünschten Mass erfüllen. Alternative Prüfverfahren, die möglicherweise eingesetzt werden können, weisen gegenüber Thermografie meist gewisse Nachteile auf, welche die Anwendbarkeit einschränken. Beispiele dafür sind wellen- oder vibrations-basierte Methoden, welche mechanischen Kontakt mit dem Prüfobjekt bedingen. Methoden, welche direkt den Herstellungsprozess überwachen (z.B. thermisch oder über Ultraschall) bedingen meist genügend konstante Prozessbedingungen, was vielleicht im Labor, aber nicht auf der Baustelle der Fall ist. Eventuell bieten zukünftige Entwicklungen, z.B. basierend auf elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich, Ansätze für eine Prüfmethode, welche Unterschiede in der Morphologie des Schweissguts und der daraus resultierenden Haftfestigkeit aufzeigen kann. Die Machbarkeit alternativer Methoden muss aber in einem separaten Projekt untersucht und beurteilt werden.

Für weitere Versuche zu zerstörungsfreier Prüfung von Handschweissnähten, die eventuell eine qualitative oder quantitative Bewertung der Haftung ermöglichen, stehen auf Grund aktueller Literatur entweder Terahertz-Spektrometrie oder Kernspinresonanz im Vordergrund. Für beide Verfahren sind mobile Geräte entwickelt worden (eventuell kommerziell noch nicht verfügbar) und in ähnlichen, aber nicht direkt vergleichbaren Anwen-

dungsbeispielen untersucht worden. Die Perspektiven für Terahertz-Spektrometrie werden tendenziell besser beurteilt, weil diese durch Bedarf für neue Technologie für sicherheitsrelevante Prüfungen in nächster Zeit geräte-technisch, wie auch bezüglich Datenauswertung und Prüfkosten deutliche Fortschritte verzeichnen sollte. Für die Evaluation der Machbarkeit solcher Methoden für die Anwendung auf Handschweissnähten wird das im vorliegenden Projekt realisierte zwei-stufige Verfahren von Laborversuchen an Prüfmustern unterschiedlicher Güte vor dem Einsatz unter Baustellenbedingungen empfohlen.

Résumé

Le présent projet est consacré à une étude de faisabilité de l'utilisation de la thermographie pour l'évaluation des soudures des lés d'étanchéité polymères utilisés en construction souterraine. Dans une première phase, cette faisabilité a été évaluée sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire et dans des conditions de laboratoire. Ces éprouvettes consistaient d'une part en une série joints soudés présentant des défauts simulés (le plus souvent par insertion de matériau étranger) mis à disposition par la firme Leister AG et d'autre part en des joints soudés réalisés lors d'un stage par des étudiants sans expérience de soudeur. L'utilisation de la thermographie passive s'étant révélée peu prometteuse lors d'études préliminaires, ces essais de laboratoire ont été réalisés à l'aide de la thermographie impulsionnelle et de la thermographie lock-in. Avec ces techniques, une source de chaleur pulsée ou modulée dans le temps crée une onde thermique dans le matériau et l'on enregistre la distribution de température résultante en fonction du temps ou sous forme d'images d'amplitude ou de phase.

Les essais de laboratoire sur la faisabilité de l'utilisation de la thermographie impulsionnelle ou lock-in pour l'évaluation de la qualité des soudures manuelles des lés d'étanchéité polymères en construction souterraine ont montré que ces méthodes permettent de déceler les défauts simulés par insertion de matériau étranger et de déterminer la largeur du joint soudé de lés courants ainsi que de différencier les joints soudés adhérents des simples recouvrements non soudés des lés. Pour ces essais, on a utilisé des lés d'étanchéité en PVC et en polyéthylène qui présentaient des couleurs différentes. On n'a pas décelé de relation nette entre les résultats de mesure et le matériau ou la couleur de ces lés d'étanchéité polymères. Du fait de l'absence d'éprouvettes adéquates, il n'a pas été possible de vérifier si ces méthodes thermographiques permettaient de déceler les «kissing bonds», des manques de liaison locaux sur des lés par ailleurs parfaitement recouverts entre eux. Les essais n'ont fourni aucune indication sur l'adéquation de la thermographie lock-in pour la détermination de différences d'adhésion sur les joints soudés comme le permettent p. ex. des essais destructifs tels que les essais de résistance au pelage ou au cisaillement. Une condition préalable importante pour des études plus approfondies sur l'influence des conditions de chantier n'est ainsi pas remplie. Par ailleurs, on a développé et validé dans le cadre de ce projet un procédé de réalisation de soudure présentant différentes adhérences. Il est apparu que pour les soudures réalisées avec ce procédé, celles des lés d'étanchéité PVC présentaient une dispersion nettement plus élevée de leur adhérence (écart-type 50%) que celles des lés d'étanchéité polyéthylène (écart-type 16%).

Ces méthodes permettent de bien différencier les soudures adhérentes et non adhérentes et ainsi de déterminer la largeur des joints soudés mais toutefois pas de déterminer leur résistance. Elles ne sont donc pas suffisamment adaptées pour l'évaluation de la qualité et ainsi de la durée de vie utile des soudures qui demandent au minimum une méthode qualitative ou semi-quantitative. Les autres méthodes qui pourraient être utilisées à cette fin présentent le plus souvent certains désavantages par rapport à la thermographie qui limitent leurs possibilités d'application. On peut citer, par exemple, les méthodes utilisant des ondes ou des vibrations qui impliquent un contact direct avec l'objet examiné. Les méthodes qui contrôlent directement de processus de fabrication (méthodes thermiques ou ultrasons) exigent le plus souvent des conditions de processus suffisamment stables peut être réalisables en laboratoire mais pas sur un chantier. Des développements futurs, utilisant p. ex. les ondes électromagnétiques dans le domaine des térahertz, pourraient constituer une approche pour le développement d'une méthode de contrôle capable de mettre en évidence les différences de morphologie des soudures et de la résistance qui en résulte. La faisabilité de ces méthodes devrait être étudiée et évaluée dans un projet séparé.

Pour des études ultérieures sur le contrôle non destructif de soudures manuelles pouvant éventuellement permettre une évaluation qualitative ou quantitative de l'adhérence, les procédés qui, selon la littérature actuelle, entrent principalement en ligne de compte sont la spectrométrie térahertz ou la résonance magnétique nucléaire. Les perspectives de la

spectrométrie térahertz sont tendentiellement jugées meilleures, parce que celle-ci, du fait d'une demande de nouvelles technologies dans le domaine des essais de sécurité, devrait faire prochainement de nets progrès sur le plan des équipements ainsi que sur ceux du traitement des données et des coûts. Pour une évaluation de l'adéquation de ces méthodes pour les soudures manuelles, il est recommandé de procéder, comme dans le présent projet, en deux étapes, avec des essais de laboratoire sur des éprouvettes de différentes qualités avant une application dans des conditions de chantier.

Summary

The present project deals with the feasibility of the application of thermography for the assessment of welded seams of polymeric waterproofing membranes for underground civil engineering. In a first phase, the feasibility is assessed for laboratory size specimens under laboratory conditions. The specimens consist on one hand of a series of welded seams with simulated defects (mainly by inserting a foreign material or object) which was provided by the company Leister Corp., and on the other hand of welded seam specimens that were produced by students without welding experience in the framework of a laboratory course. The use of passive thermography had proven rather un-promising in preliminary tests. The laboratory tests were hence performed with impulse and lock-in thermography. These use a pulsed and periodically modulated heat source, respectively to generate a heat wave in the material. The resulting temperature distribution is then recorded as a function of time and as amplitude or phase image, respectively.

The laboratory tests of the feasibility of using impulse or lock-in thermography for assessing the quality of hand-welded seams of polymeric waterproofing membranes for underground construction have shown that defects that had been simulated by inserting a foreign object and the width of the seams of regular welded waterproofing membranes could be determined and that adhering seams could be distinguished from seams that were loosely lying above each other or simply overlapping. The tests were performed on waterproofing membranes made from polyethylene and PVC which had different colours. There was no conclusive relation between result of the measurement and either the colour or the material of the polymeric waterproofing membrane. Whether it is possible to detect so-called "kissing bonds", i.e., locally disbonded, but continuously closely touching waterproofing membranes could not be clarified due to the lack of suitable test objects. The tests further showed no conclusive evidence that differences observed in the bond quality of the welded seams that were, e.g., quantitatively determined by destructive tension-peel or shear testing could be detected by lock-in thermography. Therefore, one important requirement for further studies on the effects under real construction conditions has not been satisfied. Within the current project, an approach for manufacturing welded seams with variable bonding quality has been developed and validated. It was further shown that welded seams of PVC waterproofing membranes that were manufactured following this procedure yielded a clearly higher scatter in the bond quality (coefficient of variation of 50%) than those of polyethylene waterproofing membranes (coefficient of variation 16%).

Adherend and non-adherend welded seams could be well distinguished by these methods. Hence, the width of the welded seams can be determined using lock-in thermography. The adhesion of the seams, however, could not be measured. Since a qualitative or semi-quantitative determination of the adhesion of the seam is essential for an assessment of the quality as well as of the expected service life time of the seams, thermography can not solve this problem to the required extent. Other test methods which could be used instead, often show certain disadvantages compared with thermography that limit their applicability. Examples are wave- or vibration-based test methods which require mechanical contact with the test object. Methods that directly monitor the manufacturing process (e.g., thermal or ultrasonic methods) frequently require sufficiently stable processing conditions which may be maintained in the laboratory but not at the construction site. Future developments of methods such as, e.g., electromagnetic waves in the THz range may yield an approach that could distinguish different morphologies in the welded material and the resulting difference in adhesion. The feasibility for these methods, however, will have to be investigated and assessed in a separate project.

Recent literature suggest that additional investigations using non-destructive test methods of hand-welded seams that possibly allow for a qualitative or quantitative assessment of the bond quality shall preferably be performed with either Terahertz spectrometry or nuclear magnetic resonance methods. For both test methods, mobile equipment has been developed (that, however, may not yet be commercially available) and tried and investigated in similar, but not directly comparable application examples. Perspectives for

Terahertz spectrometry are probably somewhat better, mainly because there is also demand for this technology in the area of security inspections and it is expected that equipment and data analysis will show significant improvements and hence results in reduced test cost. For evaluating the feasibility of these methods for assessing hand-welded seams, it is recommended to proceed via a two-step procedure based first on laboratory testing and later followed by application in a construction site environment.

Vorwort

Nachhaltiges Bauen gewinnt in der Schweiz zunehmend an Bedeutung. Bei der Planung der Neuen Eisenbahn Alpentransversalen (NEAT), d.h. den Gotthard- und Lötschberg-Tunneln, wurden daher hohe Anforderungen an die Qualität und Beständigkeit der Tunnelabdichtungen gestellt. In umfangreichen Laborversuchen wurden Kunststoff-Abdichtungssysteme in einem speziellen Zulassungsverfahren auf ihre Tauglichkeit unter den speziellen Bedingungen in den Tunneln geprüft. Parallel dazu wurde auch die Verlegung der Abdichtungssysteme überwacht und mit ausgewählten Laborversuchen die korrekte Installation überprüft. Dabei zeigte sich, dass vereinzelte Handschweissnähte ungenügende Festigkeit aufwiesen. Diese Prüfungen können entweder an durch Entnahme von Prüfmustern aus verlegten Abdichtungen auf der Baustelle oder an separat unter vergleichbaren Bedingungen hergestellten Prüfmustern durchgeführt werden. Im ersten Fall müssen die Entnahmestellen wieder durch Handschweissungen repariert werden. Im zweiten Fall bleibt die Frage nach der Vergleichbarkeit der Prüfmuster mit den Schweissnähten an den verlegten Abdichtungssystemen. Dies führte zu der Frage, ob mit einem baustellen-tauglichen, zerstörungsfreien Prüfverfahren die Qualität der Handschweissnähte direkt kontrolliert und damit deren Dauerhaftigkeit sichergestellt werden könnte. Erste Abklärungen im Rahmen der Formulierung eines entsprechenden Projekts liessen bald Thermografie als aussichtsreiche Methode erscheinen. Daher fokussierte der Projektantrag darauf, in einer ersten Stufe mit Laborversuchen die prinzipielle Machbarkeit dieses Ansatzes zu klären und, bei Erfolg bzw. hinreichend günstiger Beurteilung der Chancen, dann in einer zweiten Stufe die Anwendbarkeit des Verfahrens unter Baustellenbedingungen im Tunnel zu untersuchen. Allerdings wurden im Rahmen des Projekts auch umfangreiche Literaturstudien zu anderen möglichen Prüfverfahren durchgeführt und diese vergleichend diskutiert. Der vorliegende Bericht fasst diese Studien und die Versuche der ersten Stufe, d.h. der Laborversuche mit Impuls- und Lock-in Thermografie an ausgewählten Handschweissnähten unterschiedlicher Qualität zusammen.

Den Herren Marcello Stimolo und Roman Mastrangelo von der heutigen Empa Abteilung Strassenbau/Abdichtungen wird für die Durchführung von Vorversuchen und ausführliche Diskussionen gedankt. Herrn Adly Necola (Empa Abteilung Mechanical Systems Engineering) wird für die Unterstützung bei der Beschaffung von Normen sowie bei der Bestimmung des Schäl- und Scherwiderstands gedankt. Die Impuls und Lock-in Thermografie-Messungen sowie die entsprechende Datenauswertung wurden von Herrn Dr. Erwin Hack (Empa Abteilung Elektronik, Messtechnik und Zuverlässigkeit) durchgeführt. Verdankt werden ihm auch viele Diskussionen und die kompetente Korrekturlesung des Berichts. Ebenfalls verdankt werden Diskussionen mit Herrn Bruno von Wyl (Leister AG) sowie die Lieferung eines Prüfmusters mit simulierten Defekten.

Sämtlichen Mitgliedern der Begleitkommission der FGU wird für die wohlwollende Begleitung der Studie und das Verständnis für die durch mehrheitlich äussere Umstände bedingte, bedeutende Verzögerung in der Durchführung und im Abschluss des Projekts gedankt.

1 Einleitung

1.1 Auftrag

Das Bundesamt für Strassen (ASTRA) erteilte auf Antrag der Fachgruppe Untertagbau (FGU) der Abteilung Kunststoffe/Composites der Empa mit Schreiben vom 22. Oktober 2004 den Auftrag, zur Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von Kunststoff-Dichtungsbahnen in Form einer Machbarkeitsstudie. Die erste, 2004 bewilligte Tranche umfasst Laborversuche, eine zweite Tranche zu anwendungsspezifischen Fragen würde freigegeben, wenn der Zwischenbericht nach Abschluss der ersten Tranche zu einer positiven Entscheidung führt. Das Projekt wird von einer Kommission der Fachgruppe Untertagbau (FGU) begleitet. Auf Grund von Umstrukturierungen bei der Empa (Fusion der Abteilung Kunststoffe/Composites mit der Abteilung Festigkeit und Technologie zur neuen Abteilung Materials and Engineering sowie der späteren Reorganisation dieser Abteilung unter dem neuen Namen Mechanical Systems Engineering) und auf Grund von gerätetechnischen Problemen (Reparaturen und Kalibration der Thermografie-Kamera bzw. der daraus folgenden Neubeschaffung bei der Empa Abteilung Elektronik, Messtechnik und Zuverlässigkeit) verzögerte sich die Projektabwicklung beträchtlich. Der vorliegende Bericht fasst den Stand der Experimente und Erkenntnisse nach Abschluss der ersten Tranche 2011 zusammen.

1.2 Problemstellung

Ausgangspunkt des Projekts waren Untersuchungen zur Eignung von Abdichtungssystemen, bestehend aus Kunststoff-Dichtungsbahnen kombiniert mit Drainagelagen (mehrerheitlich ebenfalls aus Kunststoff) für die Abdichtung der geplanten bzw. im Bau befindlichen Neuen Eisenbahn-Alpentransversalen (NEAT). Im Rahmen der daraus folgenden Baustellenüberwachung wurden Schweissmuster von Dichtungsbahnen in Schälzug- bzw. Scherwiderstandsversuchen bei der Empa auf ihre Tauglichkeit überprüft. Dabei resultierten folgende Beobachtungen (nicht publizierte Ergebnisse, in den Abschlussberichten zu Händen der AlpTransit AG summarisch dokumentiert):

- mit Schweissautomaten hergestellte Schweissnähte erfüllten in allen untersuchten Fällen die Anforderungen
- vereinzelte von Hand hergestellte Schweissmuster ergaben bei zerstörender Prüfung (Schälversuch im Labor) ungenügende Werte

Da die Überprüfung zerstörend war und somit nur entweder an vor Ort (Baustelle) entnommenen Proben (mit nachträglicher Reparatur) oder an separat hergestellten Prüfmustern eingesetzt werden konnte, wurden die effektiv für die Anwendung hergestellten Schweissnähte, wenn überhaupt, nur qualitativ einer visuellen Inspektion und eventuellen Überprüfung mit der Reissnadel, unterzogen.

Im Sinn einer Qualitätssicherung und zur Vermeidung möglicher Schäden durch frühzeitiges Versagen der Abdichtungssysteme mit entsprechenden Reparaturkosten lag es nahe, Verfahren zur zerstörungsfreien Überprüfung der Schweissnähte auf ihre Eignung für einen stichprobenartigen oder flächendeckenden Einsatz auf der Baustelle zu untersuchen. Gewisse Überlegungen zur Praxistauglichkeit und zum Aufwand für die Anwendung auf der Baustelle führten bereits in der Projektantragsphase zu einer Fokussierung auf berührungslose Thermografie-Verfahren. Auch wenn die experimentellen Untersuchungen im Rahmen des Projekts im Wesentlichen mit Thermografie erfolgten, werden im Bericht doch kurz die Vor- und Nachteile alternativer Ansätze aufgeführt und die Überlegungen, welche zu der Wahl geführt hatten, erläutert.

Neben ihrer Aussagekraft bezüglich der Tauglichkeit von Schweissnähten werden gewisse anwendungsrelevante Aspekte der einzelnen Methoden verglichen, auch wenn die Baustellentauglichkeit effektiv Thema der geplanten zweiten Tranche des Projekts ist. Mit Blick auf die Erfahrungen aus dem AlpTransit-Projekt lag der Fokus der Untersuchungen

auf Handschweissnähten. Grundsätzlich lassen sich dieselben Verfahren aber auch für die Überprüfung von Schweissnähten nutzen, die mit Schweissautomaten hergestellt werden. Die Unterschiede zwischen diesen und den von Hand hergestellten Schweissnähten liegen tendenziell in der Länge der Schweissnaht (Handschweissnähte z.B. bei lokalen Reparatur- oder bei Verankerungsstellen der Dichtungsbahnen) oder in ihrer Lage (Handschweissnähte z.B. bei Kanten, Abschlüssen, Übergängen). Dass gerade Letzteres höhere Ansprüche an die Fähigkeiten des Schweissers stellt, ist offensichtlich. Eingeschränkte Zugänglichkeit (z.B. Nischen) oder schwieriger Untergrund (z.B. stark korrodiert) sowie die Arbeitsbedingungen in den NEAT-Tunnels (erhöhte Temperatur, Feuchte) stellen den Schweisser vor zusätzliche Probleme. Diese wenigen Beispiele begründen hinreichend, warum Handschweissnähte bei der Überprüfung eher versagen als solche, die mit Schweissautomaten hergestellt werden. Effiziente Prüfung lokal unterschiedlich verteilter Schweissnähte verschiedenster Form bzw. Gestaltung ist ein wesentlicher Aspekt der Problemstellung.

1.3 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden kurz die zum Zeitpunkt der Projektdurchführung vorliegenden Unterlagen zur Prüfung von Schweissnähten diskutiert. Für Schweissnahtprüfungen sind in erster Linie die Richtlinien des Deutschen Verbands für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS) zu beachten. Dabei werden zerstörende und zerstörungsfreie Prüfungen eingesetzt. Es gibt DVS-Richtlinien mit allgemein definierten (z.B. Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen), aber auch mit spezifischen Anwendungsbereichen (z.B. Erd- und Wasserbau, Abdichtung von Deponien und Altlasten). Die einzelnen Prüfungen sind oft gleich oder mindestens vergleichbar, unabhängig vom Anwendungsbereich. Weitere Normen und Richtlinien werden von Europäischen (Comité Européen de Normalisation, CEN) und internationalen Organisationen (International Organization for Standardization, ISO, oder American Society for Testing and Materials International, ASTM International) herausgegeben. Zerstörungsfreie Prüfungen aus diesen Richtlinien werden im Kapitel 2 Stand der Technik ausführlich diskutiert.

Die Schweizer SIA Norm 280 (2009) „Kunststoffdichtungsbahnen (Kunststoff- und Elastomerbahnen, Geosynthetische Kunststoffdichtungsbahnen) – Produkte und Baustoffprüfung, Anwendungsgebiete“ verweist auf die EN 13491 „Geosynthetische Dichtungsbahnen - Eigenschaften, die für die Anwendung beim Bau von Tunneln und Tiefbauwerken erforderlich sind“. Die frühere Version SIA V280 enthielt als Empfehlung eine Prüfung der Nahtfestigkeit. Dabei werden drei Streifen mit einer Naht in einer Zugprüfmaschine bei konstanter Abzugsgeschwindigkeit bis zum Bruch bzw. totalen Abscheren belastet und die Ergebnisse mit jenen an Streifen ohne Naht verglichen. Zerstörungsfreie Prüfungen werden in beiden Versionen nicht erwähnt.

1.4 Vorgehensweise

Im Projektantrag wurde das geplante Vorgehen in folgende Arbeitspakete unterteilt: Abklärung der Machbarkeit für (1) Impulsthermografie und (2) Lock-in Thermografie im Laborversuch an ausgewählten Prüfmustern bekannter Qualität, gefolgt von entsprechenden Versuchen an Mustern sämtlicher Materialklassen, sofern die prinzipielle Machbarkeit mit mindestens einem der beiden Verfahren gezeigt werden kann. In einem nächsten Schritt soll das Verfahren optimiert werden, speziell wird auch die Frage untersucht, ob eine Überwachung mit Thermografie direkt bei der Herstellung möglich ist. Eine weitere Option ist die Untersuchung der Kombination geeignet erscheinender Prüfverfahren, sofern Thermografie allein nicht für eine Bewertung ausreichen sollte. Danach wird ein Zwischenbericht erstellt, der zum Entscheid über die Durchführung der zweiten Phase (Laborversuche zwecks Abklärung der Durchführbarkeit unter Tiefbaubedingungen, d.h., analog zu jenen im Tunnel) führen soll.

Der erste Schritt des Projekts ist die Beschaffung geeigneter Prüfmuster. Diese sollen unterschiedliche Qualität der Schweissnaht aufweisen, erwünscht ist ein möglichst breites Spektrum in Bezug auf Haftung bzw. Beständigkeit. Die Qualität dieser Schweissnähte kann mit (zerstörenden) Schälzug- und Scherwiderstandsversuchen quantitativ ermittelt

werden. Je nach Grösse der Schweissmuster muss dies nach der Thermografie- bzw. weiteren zerstörungsfreien Untersuchungen erfolgen.

1.5 Projektziele

Das Projektziel wurde im Antrag definiert als „Abklärung im Sinn einer Machbarkeitsstudie, ob eine oder mehrere Varianten von Thermografie sich prinzipiell für die Prüfung der Qualität von Handschweissnähten von Kunststoffdichtungsbahnen für Anwendungen im Tunnelbau eignen“. Dies basiert auf dem Anforderungsprofil für ein solches Prüfverfahren, das folgende Punkte umfasst: auf der Baustelle einsetzbar, ermöglicht gegebenenfalls 100% Prüfung der Schweissnähte (nicht nur Stichproben), ist zerstörungsfrei (keine nachträgliche Reparatur der Prüfstelle), ist einfach anwendbar, liefert eine möglichst eindeutige Anzeige mit geringer Fehlerquote und ist kostengünstig. Weitere Eigenschaften wurden als wünschbar eingestuft, darunter z.B. Echtzeitanzeige fehlerhafter Schweissnähte (d.h. ohne nachträgliche Datenauswertung), automatisierte Auswertung und Anzeige, Aufzeichnung und Dokumentation der Prüfdaten, geringe Anforderungen an Ausbildung oder Qualifikation des Prüfpersonals und direkte Überwachung des Schweissvorgangs, d.h., Prüfung praktisch während der Herstellung.

Es ist klar, dass kaum alle diese Eigenschaften mit einem einzigen Verfahren erfüllbar sind, eine Rangordnung nach Prioritäten wurde aber zur Zeit des Projektantrags nicht vorgenommen. Es wurde aber vermerkt, dass ein berührungsloses, bildgebendes Verfahren im Prinzip dem Anforderungsprofil sowie einigen weiteren wünschbaren Eigenschaften entspricht. Dies wird im Detail in Abschnitt 3 diskutiert.

2 Stand der Technik

2.1 Relevante Literatur

Der Stand der Technik wird in Normen, Regelwerken und teilweise in publizierter Literatur beschrieben. Wichtige Regelwerke sind die Richtlinien, welche vom DVS, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., herausgegeben werden. Weitere Prüfverfahren und Richtlinien werden vom SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein), von der ISO (International Organization for Standardization), vom CEN (Comité Européen de Normalisation) oder von der ASTM International (American Society for Testing and Materials, International) herausgegeben (Listen in den Anhängen I.1 - I.5). Mit Verbindungstechnik für Kunststoffe befasst sich auch eine Kommission des IIW (International Institute of Welding, Commission XVI: Polymer joining and adhesive technology), diese hat aber bisher (November 2011) keine Publikationen zu diesen Themen veröffentlicht. Eine im Herbst 2011 aktualisierte Literaturrecherche ergab weitere Referenzen (siehe Literaturverzeichnis im Anhang).

Ausgewählte Literatur (Normen, Richtlinien, Publikationen) wird in den nächsten Abschnitten kurz zusammengefasst, um einen Überblick über den Stand der Technik bezüglich Prüfung von Schweissnähten von Kunststoff-Dichtungsbahnen zu erhalten. Die Normen und Richtlinien der ASTM International gelten für die Schweizer Baubranche grundsätzlich nicht, ausser dies wird speziell vereinbart.

2.2 Prüfung von Schweissnähten

Wie erwähnt (siehe auch Abschnitt 1.3 oben) enthalten die Normen und Richtlinien zahlreiche Hinweise auf Prüfungen an Schweissnähten. Die verwendeten Verfahren sind sowohl zerstörend wie zerstörungsfrei. Die in den Dokumenten erwähnten Verfahren werden hier kurz zusammengestellt.

Die DVS Richtlinie 2225 Teil 2 bezieht sich auf Baustellenprüfungen für das Fügen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen. Dabei wird von überlappt verlegten Dichtungsbahnen ausgegangen, unterschieden werden Überlappnähte ohne bzw. mit Prüfkanal (d.h. Einzel- bzw. Doppelnäht) und Auftragsnähte. Überprüfte Kriterien sind (1) äussere Beschaffenheit der Naht, (2) Abmessungen der Naht, (3) Festigkeit der Naht und (4) Dichtigkeit der Naht. Die äussere Beschaffenheit wird durch Augenschein (visuelle Inspektion) und eventuell mit Reissnadel überprüft. Diese Prüfung ist prinzipiell noch zerstörungsfrei (die Naht kann bei korrekter Beschaffenheit genutzt werden), erlaubt aber nur beschränkt Aussagen über Festigkeit und Dichtigkeit der Naht und ist kaum quantifizierbar. Die Abmessungen können an streifenförmigen Probekörpern oder an der Naht selbst ermittelt werden, möglich ist auch die Verwendung von Ultraschall. Je nach verwendetem Probekörper ist diese Prüfung zerstörungsfrei oder zerstörend (bei Entnahme von Proben). Die Festigkeit der Naht wird zerstörend mit Schälzugversuchen quantitativ überprüft (mit baustellen-tauglichen Prüfgeräten vor Ort oder mit Prüfmaschinen im Labor). Die Dichtigkeit der Naht wird je nach Nahtform mit unterschiedlichen Verfahren geprüft. Für Überlappnähte ohne Prüfkanal werden Hochspannung, Ultraschall (Impuls-Echoverfahren) oder Vakuum (transparente Prüf-„Glocke“) eingesetzt, Überlappnähte mit Prüfkanal werden mit Druckluft geprüft und Auftragsnähte mit Hochspannung oder Vakuum. Diese Prüfungen sind prinzipiell zerstörungsfrei, weisen aber gewisse Einschränkungen bezüglich Aussagekraft auf (expliziter Hinweis dazu in der DVS-Richtlinie!).

Die DVS-Richtlinie 2226 Teil 1 „Prüfung von Fügeverbindungen an Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen – Prüfverfahren, Anforderungen“ definiert nur zerstörende Prüfungen (Zugscherversuch, Schälversuch und Zeitstand-Zugversuch) und verweist für zerstörungsfreie Prüfungen auf die DVS Richtlinie 2225 Teil 2 Abschnitte 4.2, 4.3 und 4.5 (äussere Beschaffenheit, Abmessungen und Dichtigkeit, siehe oben).

Die DVS-Richtlinie 2207 Teil 3 „Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen: Warmgaszieh- und Warmgasfächelschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln“ erwähnt als mögliches zerstörungsfreies Prüfverfahren noch die Durchstrahlungsprüfung (nach DVS Richtlinie 2206, Abschnitt 3.5). Diese Methode ist vermutlich für Schweissnähte von Dichtungsbahnen wegen der geringen Dicken der Prüfkörper und der beschränkten Zugänglichkeit nach der Verlegung kaum geeignet. Bei der Anwendung auf Baustellen wären zudem Strahlenschutzvorschriften zu beachten, was den Aufwand beträchtlich erhöhen kann.

Die DVS Richtlinie 2227 Teil 1 „Schweißen von Halbzeugen aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) für die Abdichtung von Betonbauwerken im Bereich des Grundwasserschutzes und zum Korrosionsschutz“ definiert für Baustellenprüfungen wieder äussere Beschaffenheit, Abmessungen (Nahtbreite, Nahtdicke), mechanische Eigenschaften (Kurzzeit-Zugversuch, Kurzzeit-Zugscherversuch, Kurzzeit-Schälversuch) und Dichtigkeit (Vakuum oder elektrische Hochspannung) und bemerkt, dass [Zitat] „Die vorgenannten Prüfungen ergänzen sich nach Art und Umfang gegenseitig. Eine Aussage über die Qualität einer Naht mit einem Prüfverfahren allein ist nicht möglich“.

Die DVS-Richtlinie 2230 Teil 1 „Schweißen von Kunststoffserienteilen: Qualitätssicherung, Prüfung“ führt eine umfangreiche Liste von Prüfverfahren für Qualitätsüberwachung der geschweissten Serienteile an, darunter neben den bereits erwähnten Verfahren auch Thermografie, NMR-Prüfung (NMR = Nuclear Magnetic Resonance oder Nuklear-Magnetische Resonanz) und Ultraschallthermografie. Thermografie wird erklärt als Aufnahme des Restwärmebilds der Naht direkt nach dem Schweißen, was (Hinweis in der DVS-Richtlinie) lediglich Aufschluss über die Homogenität der Schweissnahtausbildung gibt. Ultraschallthermografie nutzt durch Ultraschall lokal erzeugte Erwärmung für Fehlstellennachweis in Wärmebildern.

Die ISO- und EN-Normen beschreiben neben Anforderungen meist zerstörende Charakterisierung von Schweissnähten mittels mechanischen Messungen (z.B. Schälwiderstand oder Scherwiderstand in EN 12316 und 12317). Zerstörungsfreie Prüfung spielt, mit Ausnahme visueller Inspektion, kaum eine Rolle. Auch aus den Normen und Richtlinien für Dachabdichtungen lassen sich keine weiteren Ansätze für zerstörungsfreie Prüfung von Dichtungsbahnen für Tiefbau ableiten.

Dieselben oder mindestens vergleichbare Methoden werden in den ASTM Richtlinien und Verfahren beschrieben. ASTM D4437 beschreibt zerstörungsfreie Prüfungen für Nähte von Polymerfolien, verweist aber für die Einzelheiten auf weitere Richtlinien. Diese umfassen D5641 (Vakuum-„Glocke“), D5820 (Prüfkanal), D6365 („Spark“-Prüfung, d.h., elektrischer Durchschlag), D7006 (Ultraschall), und D7177 (Prüfkanal).

ASTM D7006 „Standard Practice for Ultrasonic Testing of Geomembranes“ erläutert Prinzipien und Möglichkeiten der Ultraschallprüfung von Schweissnähten sehr detailliert. Es wird auch darauf verwiesen, dass damit eine Überwachung der Naht während der Nutzungsdauer möglich ist. Dies setzt aber voraus, dass die Naht zugänglich bleibt oder für periodische Überprüfung freigelegt wird. Ebenfalls hervorgehoben wird die kurze Prüfdauer, dies gilt aber nur für eine Einzelmessung an einem Punkt. Wenn längere Schweissnähte überprüft werden müssen, benötigt das Rastern entsprechend mehr Zeit. Bei Prüfung längerer Schweissnähten müsste zudem die Datenerfassung bzw. die Dokumentation der Prüfergebnisse geregelt werden.

Die Verwendung zerstörungsfreier Eindringverfahren (Penetration Testing, abgekürzt PT, z.B. ASTM E165, E1208, E1209, E1210, E1219, E1220, E1418) bzw. ihre Anwendbarkeit auf Schweissnähte ist weder in Richtlinien noch Literatur dokumentiert. Da damit nur Oberflächendefekte nachgewiesen werden können, sind Machbarkeit bzw. Anwendbarkeit solcher Ansätze fraglich. Thermografie als Mittel für die Charakterisierung oder Untersuchung von Schweissnähten erwähnt in den konsultierten Normen und Richtlinien nur die DVS 2230 (siehe oben). Für Thermografie-Prüfung von Dächern bzw. Dachisolationen gibt es Empfehlungen und Richtlinien (z.B. ASTM D7053 oder ASTM E936), die aber sehr allgemein gehalten sind und nicht bei Tiefbaubedingungen angewandt werden können.

In der Literatur gibt es einige Arbeiten zur Verwendung von Thermografie für die Inspektion von Kunststoff-Abdichtungssystemen. In einer der ersten Arbeiten [1] wird versucht, Ablösungen in Nähten nachzuweisen. Es ist dabei gelungen in einigen Fällen Hohlräume bzw. ungenügende Haftung nachzuweisen. Diese Arbeit wird auch einem relativ neuen Buch [2] als einzige Anwendung von Infrarot-Thermografie für Schweissnahtprüfung (in diesem Fall von Polyethylen-Dichtungsbahnen hoher Dichte) zitiert. Interessant sind die detaillierten Diskussionen in einer Publikation [3], in der neben den zerstörungsfreien Methoden, die in den Richtlinien enthalten sind (Vakuum-„Glocke“, elektrischer Durchschlag, Ultraschall und elektrische Messungen) auch Thermografie erwähnt wird. Damit soll es möglich sein, Löcher und innere Schwachstellen (im englischen Originaltext „flaws“) wie Poren (englisch „voids“) und Lunker oder Blasen (englisch „bubbles“) zu orten. Ebenfalls soll damit die Nahtfestigkeit zerstörungsfrei beurteilt werden. In der im Beitrag wiedergegebenen Diskussion taucht die Frage nach der Effektivität der Thermografie-Bilder (englisch „thermograms“) auf. Es wird festgestellt, dass keine zwei Streifen gleich sind und die Variabilität vergleichbar mit jener anderer, konventioneller Methoden ist. Allerdings werden keine Daten oder Ergebnisse präsentiert, mit denen diese Aussagen belegt werden. Das Thema wird aber auch in neuerer Literatur behandelt [4-6]. Die Autoren dieser Studie untersuchten mit Thermografie-Aufnahmen den Einfluss von Kratzern auf der Oberfläche von Dichtungsbahnen für Deponien und von Fremdkörpern, die eingefügt wurden, auf die Schweissbarkeit. Diese simulierten Defekte liessen sich mit Thermografie (Wärmebild unmittelbar nach Herstellung der Schweissnaht mittels Schweissroboter) nachweisen. Eine andere Arbeit [7] befasst sich nicht mit Dichtungsbahnen, sondern der Prüfung geschweisster Verbindungen zweier Kunststoffteile mittels Thermografie. Diskutiert werden Ergebnisse von Transmissions-Thermografie, Reflektions-Thermografie (inkl. Impuls-Thermografie) und Infrarot-Tomografie. Die als Prüfmuster verwendeten, jeweils am Boden zusammengefügteten Becher aus Polyethylen hoher Dichte lassen, im Gegensatz zu Schweissnähten von verlegten Dichtungsbahnen, Transmissionsprüfung zu. Reflektions-Thermografie und Infrarot-Tomografie benötigen aber einen beträchtlichen Rechenaufwand für die Auswertung der Daten. Im Prinzip konnten damit sogenannte „kissing bonds“, d.h. sich berührende, aber nicht verbundene Flächen nachgewiesen werden. Mit Transmissions-Thermografie (Anregung von einer, Messung auf der anderen Seite des Prüfkörpers) konnte über die Steigung des Temperaturanstiegs für die gewählten Prüfbjekte sogar eine Korrelation zwischen Temperatur und Fügefestigkeit ermittelt werden. Dieser eigentlich vielversprechende Ansatz eignet sich für Schweissnähte von Dichtungsbahnen kaum, da diese nach Verlegung verschweisst und damit meist nur von einer Seite zugänglich sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass thermografische Methoden für die Überprüfung von Schweissnähten bisher wenig untersucht worden sind und die publizierten Laborergebnisse mehrheitlich die Erwärmung der Schweissnaht bei ihrer Herstellung nutzen. Dieser Ansatz ist für die Prüfung von Handschweissnähten im Tiefbau kaum anwendbar, da die Zugänglichkeit, vor allem bei kleinflächigen Schweissnähten (z.B. lokale Reparaturstellen) kaum gegeben ist. Handschweissgeräte mit Thermografie-Kameras zu einem Gerät zu kombinieren, würde umfangreiche Entwicklungsarbeiten benötigen und, bei praktisch gleichzeitiger Herstellung und Kontrolle der Schweissnaht erhebliche Anforderungen an die Qualifikation des Schweissers stellen.

Nach der Herstellung der Schweissnaht durchgeführte Thermografie mit gezielter Anregung einer lokalen Erwärmung ist bisher für Dichtungsbahnen im Tiefbau praktisch nicht untersucht worden. Daher muss ihre Eignung für die Charakterisierung und Bewertung der Schweissnahtqualität noch detailliert überprüft werden. Dies stellt den methodischen Ansatz der vorliegenden Untersuchung dar.

2.3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Vor der Untersuchung der Anwendbarkeit thermografischer Methoden auf die Bewertung von Schweissnähten von Dichtungsbahnen für Tiefbauanwendungen werden kurz die Motivation sowie weitere zerstörungsfreie Prüfmethode diskutiert.

Eine zerstörende Prüfung von Schweissnähten, wie z.B. die Entnahme von Prüfmustern nach Einbau der Dichtungsbahn bzw. des Abdichtungssystems und deren Charakterisierung auf der Baustelle oder im Labor, hat den Nachteil, dass einerseits die Entnahmestelle wieder repariert werden muss und andererseits, dass nur eine umfangsmässig kleine Stichprobe geprüft werden kann. Bei der separaten Herstellung von Prüfmustern für zerstörende Charakterisierung bleibt z.B. der Vorbehalt, dass deren Vergleichbarkeit mit den tatsächlich installierten Schweissnähten nicht belegt werden kann, auch wenn beide vom selben Schweißer und unter nominell vergleichbaren Bedingungen hergestellt werden.

Eine vollständige Prüfung der effektiv in der Anwendung genutzten Schweissnähte ist daher nur mit einem zerstörungsfreien Prüfverfahren möglich. Um die Vielzahl der zerstörungsfreien Methoden auf ihre Eignung für die Prüfung von Schweissnähten von Dichtungsbahnen zu beurteilen, ist es sinnvoll, Klassen von Verfahren zu bilden. Eine übliche Klassierung ist nach der Art der Anregung, dies ist aber nicht die einzige Möglichkeit (siehe [8,9] für Details). Mechanische zerstörungsfreie Prüfmethode bestimmen im Wesentlichen mechanische Eigenschaften des Prüfobjekts (z.B. Elastizität), optische zerstörungsfreie Prüfmethode nutzen den sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (z.B. visuelle Inspektion), Strahlung kann elektromagnetische Wellen (z.B. Röntgenstrahlen) oder Teilchenstrahlen (z.B. Neutronen) nutzen, elektromagnetische zerstörungsfreie Prüfmethode nutzt die elektromagnetischen Eigenschaften der Prüfkörper (z.B. elektrischer Widerstand, dielektrische Permeabilität), akustische zerstörungsfreie Prüfmethode nutzen die Anregung oder Ausbreitung mechanischer Wellen, thermische zerstörungsfreie Prüfmethode nutzt wieder einen bestimmten Teil des elektromagnetischen Spektrums (z.B. Thermografie) und chemisch-analytische zerstörungsfreie Prüfmethode bestimmen im Wesentlichen die chemische Zusammensetzung der Prüfkörper bzw. deren Veränderungen.

Frühe Ansätze für zerstörungsfreie Prüfung von Schweissnähten sind in drei Beiträgen [10-12] in einer Sonderausgabe der Zeitschrift „Geotextiles and Geomembranes“ (ISSN 0266-1144, Vol. 9, No. 4-6) von 1990 zusammengefasst. Bereits damals verwendete Verfahren sind Vakuum-Glocke, Luftstoss (englisch „air lance“), Druck, elektrischer Widerstand, elektrischer Durchschlag und mechanische Punktbelastung [10]. Zu den Neuentwicklungen jener Zeit gehören elektrische Prüfung mit eingelegtem Kupferdraht (Weiterentwicklung der elektrischen Durchschlagsprüfung), elektrische Messung mit Wasserfüllung, Ultraschall Puls-Echo-, Ultraschall Impedanz- und Ultraschall Signalschwächungsmethode (Methode der geführten Wellen), akustisches Verfahren (Vibrationssensor) bei Druckprüfung von Dichtungsbahnen mit Prüfkanal, Georadar und bildgebende Thermografie (Temperaturunterschiede nach Herstellung) [11]. Die unterschiedlichen Ansätze werden in einer Tabelle bezüglich Machbarkeit, Stand der Entwicklung, Einsatz, Geräte- und Prüfkosten, Prüfdauer und Echtzeitdatenausgabe verglichen. Unabhängig von den beurteilten Verfahren sind diese Kriterien auch heute noch aktuell.

Neuere Literatur verweist auf die Möglichkeiten der Ultraschallprüfung [13], speziell auch luft-gekoppelter (kontaktloser) Ultraschall [14] sowie auf berührungslose optische Verfahren wie Shearografie oder Elektronische Speckle-Muster Interferometrie (englisch: Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI) [15]. Ebenfalls jüngeren Datums ist Ultraschall-angeregte Thermografie (siehe z.B. [16]). Neu entwickelte, elektromagnetische Verfahren [17] haben Potential, speziell Tera-Hertz-Messungen oder Tera-Hertz-Spektroskopie [18-20] sind für Schweissnahtprüfung ausführlich untersucht und beschrieben worden [21-23]. Mobile NMR [24,25] wird eventuell in Zukunft neue Möglichkeiten eröffnen, ist aber für die spezielle Problemstellung der Beurteilung der Schweissnahtqualität noch nicht detailliert untersucht worden. Thermografie wird als Methode für die Überprüfung der Dichtheit von Abdichtungen bzw. der Qualität von Schweissverbindungen [26] in mehreren Publikationen beschrieben bzw. untersucht. Es gibt dazu auch frühere Arbeiten der Empa [27], allerdings für den Bereich bituminöser Abdichtungen im Brückenbau.

Wenn man die Problematik von der Materialseite her betrachtet, stellt sich die Frage, wie sich das Material der Schweissnaht von dem der daneben liegenden bzw. ursprünglichen Dichtungsbahn unterscheidet. Der Schweissvorgang kann zu Veränderungen der Morphologie des thermoplastischen Kunststoffes führen, welche z.B. die Festigkeit und das

Versagensverhalten (bei Polymethylmethacrylat - PMMA und Poly-Vinyl-Chlorid - PVC [28]) oder das Langzeitverhalten (bei Polypropylen [29]) beeinflussen. Entsprechende Modellvorstellungen wurden z.B. von [30] entwickelt. Veränderungen in kovalenten chemischen Bindungen sind bei korrektem Schweissvorgang, wenn die Wärmezufuhr an den verarbeiteten Thermoplast angepasst wird, weniger zu erwarten. Daraus ergeben sich folgende, in Tabelle 2.3.1 zusammengefasste, prinzipielle Möglichkeiten für die zerstörungsfreie Prüfung von Schweissnähten (die Einteilung der Klassen zerstörungsfreier Prüfmethode erfolgt nach [8,9]). Diese prinzipiellen Möglichkeiten werden dann im Abschnitt 3.3 bezüglich Erfüllung der Anforderungen an das Prüfverfahren vergleichend bewertet.

Tabelle 2.3.1 Mögliche Ansätze für zerstörungsfreie Prüfung von Schweissnähten

Klasse	Verfahren	Bemerkungen
mechanisch	Reissnadel (Prüfung von Hand) durch den Schweisser ist in der Praxis üblich	100% Prüfung ist möglich, mögliche Variabilität je nach Prüfer
mechanisch	Zug- oder Schälbelastung bis zu einer maximalen Prüflast (minimaler Anforderungswert) von Hand oder mit Luftstoss („air lance“), sofern der minimale Anforderungswert nicht überschritten wird Prüfung separater Prüfmuster, die unter vergleichbaren Bedingungen vom selben Schweisser bzw. Schweissautomaten hergestellt werden, ist in der Praxis üblich	Kann zu Schwächung oder Zerstörung der Schweissnaht führen, siehe auch Tabelle in [11] Prüfvorrichtungen für Baustellenprüfung separater Prüfmuster (Streifen) sind verfügbar, eignen sich aber nicht für Anwendung auf verlegten Dichtungsbahnen
mechanisch	Vakuumglocke (Prüfung von Hand)	Lokale Prüfung innerhalb Glocke, wird für 100% Prüfung aufwändig
mechanisch	Druckbeaufschlagung über Prüfkanal zwischen zwei Schweissnähten, bei Handschweissnähten üblicherweise nicht implementiert	Bedingt entsprechende Herstellung von Prüfkanälen mit Anschlüssen
mptisch	Visuelle Inspektion der Schweissnaht durch Schweisser oder separaten Prüfer	Kann Hinweise auf Schwachstellen liefern, Festigkeit der Schweissnaht aber nicht quantifizierbar, Dokumentation mit Fotos möglich
optisch	Optische Verfahren, die Deformation oder Spannungsverteilungen messen, z.B. Shearografie, ESPI (meist Vergleich zwischen zwei Zuständen mit unterschiedlicher Belastung)	Kann Hinweise auf Schwachstellen (z.B. grosse Deformation) liefern, Festigkeit der Schweissnaht aber nicht quantifizierbar
Strahlung	Röntgenprüfung (Radiografie, Durchstrahlung) mit mobilen Geräten	Durchstrahlung bei verlegten Dichtungsbahnen mit Schweissnähten kaum anwendbar, Unabhängig von der Haftung der Schweissfläche ist die durchstrahlte Masse etwa gleich, Strahlenschutzvorschriften bedingen im Allgemeinen aufwändige Vorkehrungen
elektromagnetisch	Elektrische Prüfverfahren (z.B. Spark-Test, elektrische Kapazität)	Mehrere ASTM Standards behandeln Wahl elektrischer Prüfverfahren und spezielle Anwendungen (siehe Anhang I.5), bedingt teilweise speziell hergestellte Schweissnähte mit elektrisch leitendem Material, Details zu Spark-Test sind beschrieben in [31]
elektromagnetisch	Prüfung mit elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich	Neuere Entwicklung mit Potential, im Labor untersucht [21-23]
akustisch und Ultraschall	Ultraschallprüfung mit einem Ultraschallwandler kann punktuell oder auf einer Fläche sowie prinzipiell mit mehreren Ansätzen durchgeführt werden (z.B. Impuls-Echo-Methode, A-Scan, C-Scan, nicht-linearer Ultraschall, etc.)	Rastern der gesamten Fläche der Schweissnaht ist zeitaufwändig, Nachweis von „kissing bonds“ schwierig, Festigkeit der Schweissnaht nicht quantifizierbar

akustisch und Ultraschall	Verwendung von zwei Wandlern erlaubt Nutzung der Wellenausbreitung (geführte Wellen), Ultraschall kann auch luftgekoppelt eingesetzt werden [14], Messsignal enthält Information über gesamten Bereich zwischen Emitter und Sensor (integrales Verfahren)	Interpretation bzw. Quantifizierung der Signale bezüglich Nahtfestigkeit ist schwierig (eventuelle Nutzung von Vergleichsmustern mit bekannten Defekten)
thermisch und Infrarot	Passive Thermografie, a) mit direkter Nutzung der Prozesswärme bzw. b) nachträglich mit Nutzung der Umgebungswärme	Bildgebendes Verfahren liefert direkt eine Dokumentation, im Fall a) müsste entsprechendes Gerät in Zusammenarbeit mit Schweissgerätehersteller entwickelt werden
thermisch und Infrarot	Impuls-Thermografie nach Herstellung	Gezielte Erwärmung durch kurzzeitiges Bestrahlen mit einer Licht-/Wärmequelle („Blitzlicht“), Intensität ist regelbar, Aufnahme während Abkühlen zu „geeignetem“ Zeitpunkt
thermisch und Infrarot	Lock-in Thermografie nach Herstellung	Gezielte Erwärmung durch periodisch modulierte Wärme-„Welle“, Aufnahme mit angepasster Frequenz (wird im Weiteren detailliert untersucht)
chemisch	Bildgebende Magnet-Resonanzverfahren, z.B. mobile MRI = (englisch) Magnetic Resonance Imaging	Der Schweißvorgang kann zu Änderungen in der Morphologie des Werkstoffs führen, für PVC oder Polyethylen (PE) ist dies in der Literatur nicht dokumentiert, aber analoge Effekte wurden z.B. für Polypropylen (PP) untersucht [29]

3 Anforderungsprofil für Prüfverfahren

3.1 Wesentliche Anforderungen („Muss“)

Im Projektantrag sind bereits wesentliche Anforderungen an das Prüfverfahren formuliert worden. Diese werden hier nochmals zusammengefasst und ergänzt.

- Zerstörungsfreie Prüfung der für die Abdichtung genutzten Schweissnaht vor Ort (Baustelle), die keine separaten Schweissmuster benötigt und prinzipiell eine 100%-Prüfung sämtlicher Schweissnähte erlaubt
- Das Verfahren muss möglichst einfach und unter realen Einsatzbedingungen anwendbar sein und möglichst wenige Hilfsmittel oder Vorbereitungen benötigen
- Das Verfahren liefert eine einfach interpretierbare, eindeutige Aussage zur Qualität der Schweissnaht mit möglichst geringer Fehlerquote, d.h. eine „bessere“ Aussage als andere, bisher eingesetzte Verfahren bzw. ermöglicht die Identifikation „kritischer“ Schweissnähte
- Das Verfahren ist kostengünstiger oder nicht teurer als bisher eingesetzte Verfahren (letzteres bei gleichzeitig verbesserter Aussagekraft oder einfacherer Durchführung)

Als „kritisch“ werden Schweissnähte mit zu schmaler Nahtbreite (aber breiter als mit der Reissnadel prüfbar) oder mit ungenügender Haftung, sei es in Teilbereichen oder über die gesamte Breite oder Länge der Schweissnaht, definiert. Als „bessere“ Aussagekraft wird definiert, wenn die Aussage, ob die geprüfte Naht als kritisch oder nicht-kritisch gilt, mit geringerem Aufwand oder geringeren Anforderungen an den Prüfer oder gleichzeitig bzw. unabhängig davon mit erhöhter Zuverlässigkeit (weniger falsche Bewertungen) ermöglicht wird.

3.2 Wünschbare Eigenschaften („Kann“)

Neben wesentlichen Anforderungen gibt es Eigenschaften, die das Prüfverfahren nicht zwingend erfüllen muss, die aber unter Umständen vorteilhaft sind. Einige davon sind im Projektantrag bereits aufgeführt. In der Praxis sind folgende Eigenschaften wichtig:

- Möglichst geringe Anforderungen an die Ausbildung und Qualifikation des Prüfers (Kostenfrage)
- Möglichst Echtzeitanzeige der Messergebnisse und eventuell sogar der Bewertung
- Prüfung der Schweissnaht während bzw. in direktem Anschluss an den Schweissvorgang, um eine direkte Möglichkeit für Korrekturarbeiten zu bieten
- Dokumentierbarkeit der Ergebnisse für Qualitätssicherung und Rückverfolgbarkeit, dies bietet zusätzlich die Möglichkeit, automatisierte, bediener-unabhängige Bewertungssysteme zu nutzen (bedingt aber zuerst deren Entwicklung und Validierung)
- Durchführung der Prüfung während der Herstellung der Schweissnaht kombiniert mit Anzeige der Bewertung und des Fehlertyps in Echtzeit kann im Prinzip direkte Prozesssteuerung ermöglichen, eventuell aber auch sofortige Nacharbeit bzw. Korrektur
- Möglichst Verwendung eines bildgebenden Verfahrens, um Lage und Ausmass der Schweissnahtfläche mit ungenügender Qualität direkt anzuzeigen, dies ist auch für die Dokumentation wichtig, im Prinzip kann damit auch der Schweisser direkt beurteilt werden

Es wird kaum möglich sein, neben den wesentlichen, auch alle wünschbaren Anforderungen an die Eigenschaften mit einem einzigen Verfahren zu erfüllen.

3.3 Vergleichende Bewertung möglicher Ansätze

Eine Reihe möglicher Ansätze für ein Prüfverfahren, die den grössten Teil der wesentlichen Anforderungen erfüllen sowie einige wünschbare Eigenschaften aufweisen, werden in Tabelle 3.3.1 vergleichend bewertet. Dabei werden jene Verfahren aus Tabelle 2.3.1 berücksichtigt, die als zerstörungsfrei eingestuft werden, zerstörende Verfahren werden nicht beurteilt. Dies zeigt, dass mit grosser Wahrscheinlichkeit nur wenige Prüfverfahren für eine vollständige, zerstörungsfreie Prüfung von (Hand)-Schweissnähten geeignet sind. Technisch sind alle Verfahren auch auf maschinell hergestellte Schweissnähte anwendbar, allerdings ist für diese Art von Schweissnähten erfahrungsgemäss der Prüfbedarf kaum gegeben.

Das Problem, sich berührende, aber nicht haftende Stellen von Schweissnähten und ähnlichen Verbindungen zu identifizieren oder nachzuweisen, wird in der englisch-sprachigen Literatur oft als „detection of kissing bonds“ beschrieben [32]. Die zerstörungsfreie Prüfung von Schweissnähten beschränkt sich aber nicht auf das Problem, haftende von nicht-haftenden Stellen zu unterscheiden. Erwünscht ist ein Verfahren, das eine Aussage über die Festigkeit der Schweissnaht, analog zu den im Zug- oder Schälversuch [z.B. DVS 2226-2, DVS 2226-3] ermittelten Werten liefert. Trotzdem kann Information über das Vorhandensein von „kissing bond“ bereits nützlich sein und erste Anhaltspunkte für eine Bewertung der Schweissnahtqualität liefern.

Tabelle 3.3.1 Vergleichende Bewertung möglicher Ansätze für zerstörungsfreie Prüfung von Schweissnähten (Vorteile bzw. Nachteile bezüglich Anforderungen)

Methoden (Klasse)	Vorteile	Nachteile	Bewertung	Bemerkungen
Reissnadel (mechanisch)	100% Prüfung möglich, überall einsetzbar, wenige Hilfsmittel, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar	liefert nur bedingt Nachweis ungenügender Schweissnähte, benötigt qualifizierten Prüfer, nicht bildgebend	kein Fortschritt, daher nicht geeignet	Stand der Technik
Luftstoss, englisch „air-lance“ (mechanisch)	100% Prüfung möglich, beinahe überall einsetzbar, wenige Hilfsmittel, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar	liefert nur bedingt Nachweis ungenügender Schweissnähte, benötigt qualifizierten Prüfer, nicht bildgebend	aufwändiger als Reissnadel, wenig Fortschritt, daher nicht geeignet	
Vakuumglocke (mechanisch)	100% Prüfung möglich, überall einsetzbar, wenige Hilfsmittel, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar	Nachweis undichter Schweissnähte, kein Festigkeitsnachweis, Zeitaufwand für grössere Schweissnähte, nicht bildgebend	aufwändiger als Reissnadel, Undichtheit erkennbar, kein Fortschritt, daher wenig geeignet	Stand der Technik
Druck über Prüfkanal (mechanisch)	100% Prüfung prinzipiell möglich, Vorbereitung und Hilfsmittel aufwändig, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar	Herstellung Prüfkanal eventuell nur bedingt möglich, kein Festigkeitsnachweis, Zeitaufwand für Herstellung, nicht bildgebend	aufwändiges Verfahren, Undichtheit erkennbar, aber wenig geeignet	Eher geeignet für maschinell hergestellte Schweissnähte
visuelle Inspektion (optisch)	100% Prüfung möglich, praktisch überall einsetzbar, kaum Hilfsmittel, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, fotografisch dokumentierbar	liefert nur bedingt Nachweis ungenügender Schweissnaht, kaum Nachweis der Festigkeit, benötigt qualifizierten Prüfer, abhängig von Erfahrung des Prüfers	kein Fortschritt, daher kaum geeignet	Stand der Technik

Deformations- oder Spannungsmessung (optisch)	100% Prüfung prinzipiell möglich, praktisch überall einsetzbar, Hilfsmittel vergleichbar zu anderen bildgebenden Verfahren, dokumentierbar (bildgebend)	liefert nur bedingt direkten Nachweis ungenügender Schweißnaht, oft Vergleich zweier Spannungs- oder Dehnungszustände, benötigt qualifizierten Prüfer	kaum geeignet	Potenzial für Echtzeit-Überwachung der Schweißnaht-Herstellung (z.B. Rückschlüsse aus Spannungs- oder Dehnungsverteilung) könnte untersucht werden
Röntgenprüfung (Strahlung)	dokumentierbar (Röntgenfilm oder elektronischer Bildspeicher)	100% Prüfung kaum möglich, nur in wenigen Fällen einsetzbar, Aufwand für Strahlenschutz, kein Festigkeitsnachweis, aufwändige Geräte/Hilfsmittel, benötigt qualifizierten Prüfer, nachträgliche Auswertung (ausser bei Echtzeit-Radiografie)	ungeeignet	
„Spark“-Test (elektrisch)	100% Prüfung möglich, Echtzeitanzeige, anwendbar bei komplex geformten Schweißnähten, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar	benötigt spezielle Schweißnaht mit eingelegtem oder unterlegtem elektrisch leitendem Material, kein Festigkeitsnachweis, elektrische Hochspannung, benötigt erfahrenen Prüfer, nicht bildgebend	beschränkt geeignet	Ausführliche Diskussion der Vor- und Nachteile in [31]
Tera-Hertz-Wellen (elektromagnetisch)	100% Prüfung möglich, prinzipiell überall einsetzbar, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar, (teilweise bildgebend)	Technologie in Entwicklung, Kosten noch unklar, unklar, ob Nachweis der Festigkeit möglich, aufwändige Geräte bzw. Hilfsmittel, benötigt qualifizierten Prüfer	falls Transfer in Praxis gelingt, Methode mit Potenzial	Anwendung in Forschungsliteratur beschrieben [21-23]
Impuls-Echo Ultraschall (akustisch und Ultraschall)	100% Prüfung möglich, prinzipiell überall einsetzbar, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar (je nach Gerät, teilweise bildgebend)	liefert nur bedingt Nachweis ungenügender Schweißnaht, benötigt qualifizierten Prüfer	wenig geeignet	Impuls-Echo Ultraschall-Prüfung von Geomembranen wurde untersucht von [33]
nicht-linearer Ultraschall (akustisch und Ultraschall)	100% Prüfung möglich, prinzipiell überall einsetzbar, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar (teilweise bildgebend)	liefert nur bedingt Nachweis ungenügender Schweißnaht, benötigt qualifizierten Prüfer, Ansätze für Datenauswertung unklar	bei heutigem Stand der Technik beschränkt geeignet	nicht-lineare Ultraschall-Effekte in Klebverbindungen beschrieben von [34]
Geführte elastische Wellen (akustisch und Ultraschall)	100% Prüfung möglich, prinzipiell überall einsetzbar, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar (je nach Gerät)	liefert nur bedingt Nachweis ungenügender Schweißnaht, eher für vergleichende Messungen bzw. Überwachung geeignet, Datenauswertung unklar, nicht bildgebend	bei heutigem Stand der Technik beschränkt geeignet	bedingt Entwicklungsaufwand bezüglich Signalauswertung Interpretation bzw. Bewertung der Schweißnaht

passives Wärmebild (thermisch und Infrarot)	100% Prüfung möglich, prinzipiell überall einsetzbar, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar (bildgebend)	kaum Nachweis ungenügender Schweißnähte (Dichtheit oder Festigkeit)	wenig geeignet (Vorversuche innerhalb Projekt durchgeführt)	Nachweis der Qualität der Schweißnaht unter Nutzung der Prozessenergie (z.B. Messaufsatz auf Schweißgerät) müsste speziell entwickelt werden
Wärmebild nach Wärmeimpuls (thermisch und Infrarot)	100% Prüfung möglich, prinzipiell überall einsetzbar, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar (bildgebend)		Versuche innerhalb Projekt durchgeführt, potenziell geeignet, aber weniger als Lock-in Thermografie	
Lock-in Wärmebild mit periodischer Anregung (thermisch und Infrarot)	100% Prüfung möglich, prinzipiell überall einsetzbar, Echtzeitanzeige, Nacharbeit direkt möglich, dokumentierbar (bildgebend)		potenziell geeignet (daher in Projekt vertieft untersucht)	
Magnet-Resonanzverfahren (chemisch)	100% Prüfung möglich, Echtzeitanzeige, dokumentierbar	aufwändige Geräte bzw. Hilfsmittel, benötigt qualifizierten Prüfer, Auswertung der Daten unklar	bei heutigem Stand der Technik beschränkt geeignet	Anwendung mit mobilen Geräten in Forschungsliteratur beschrieben [24,25]

Eine Frage ausserhalb des vorliegenden Projekts, aber methodisch damit verknüpft, ist die periodische Überprüfung bestehender, ursprünglich intakter Schweißnähte auf ihre Dichtigkeit bzw. weitere Funktionsfähigkeit. Dies ist nur möglich, wenn die Schweißnähte so hergestellt werden, dass sie für das Prüfverfahren zugänglich bleiben. Mit der Methode der geführten Wellen müssten z.B. entweder entsprechende Sender bzw. Empfänger (typisch Piezowandler) eingebaut werden oder Ankopplungsstellen für solche Wandler im Rahmen periodischer Inspektion zugänglich bleiben bzw. entsprechend ausgestaltet werden. Dies ist bei vielen Abdichtungssystemen nicht der Fall. Dichtungssysteme mit Prüfkanälen für mechanische Druckprüfung, die auch nach der Fertigstellung des Bauwerks langfristig zugänglich bleiben, sind dem Autor nicht bekannt.

Eine weitere Frage bei der Sicherung langfristiger Nutzung des Abdichtungssystems bildet die Reparierbarkeit der Schweißnähte. Auch da stellt sich zuerst die Frage der Zugänglichkeit. Eine Möglichkeit, theoretisch langfristige Nutzung zu sichern, wäre z.B., Prüfkanäle so auszulegen und anzuschliessen, dass nachträglich ein langsam härtender Kleber injiziert werden könnte, der anstelle der versagenden bzw. undichten Schweißverbindung die Haftung zwischen den Dichtungsbahnabschnitten sicherstellt.

Diese Möglichkeiten sind aber aus Kostengründen (Arbeitsaufwand, Materialverbrauch) wahrscheinlich kaum realisierbar und in jedem Fall mit erheblichem Entwicklungsaufwand verbunden. Ähnliches gilt möglicherweise im folgenden Fall: In der Forschung werden seit einigen Jahren sogenannte „selbst-heilende“ Polymere untersucht, es gibt eine Reihe möglicher Ansätze [35-37]. Es dürfte aber noch einige Jahre dauern, bis entsprechende Systeme für Tunnelabdichtung entwickelt und kommerziell verfügbar werden.

4 Beschaffung, Herstellung und Charakterisierung von Laborprüfmustern

4.1 Simulation von Defekten

Für die Herstellung von Labor-Prüfmustern wurde als erster Ansatz versucht, künstliche Defekte in Dichtungsbahnen oder Folien aus Kunststoff einzubauen. Diese Defekte sollten Ablösungen der verschweissten Schichten simulieren.

Die Firma Leister AG (Hersteller von Handgeräten und Automaten für das Schweißen von Kunststoffen sowie entsprechender Prüfgeräte) stellte der Empa eine Kunststoffbahn mit Schweissnaht (in Längsrichtung) zu Verfügung. Die Schweissnaht wurde am 19.03.2007 hergestellt, die Schweisstemperatur betrug +420°C und die Schweissgeschwindigkeit 4.5 m/min (alle Angaben nach Herstellervermerk auf Folie). Die totale Breite der Bahn beträgt ca. 17 cm (verschweisst wurden Einzelbahnen von ca. 130 mm und 80 mm Breite), die Schweissnahtbreite ca. 30 mm und deren Länge ca. 250 cm. Entlang dieser Schweissnaht sind fünf Defekte simuliert worden, bei denen jeweils mit Einfügen unterschiedlicher Fremdkörper versucht worden war, eine lokale Diskontinuität herzustellen. Die Lage dieser Defekte war auf dem Prüfmuster angegeben (Nr. 1 – 5) und somit bekannt.

Die Defekte sind in Abb. 4.1 dargestellt und zwar jene Seite, auf welcher die Markierung des Herstellers angebracht war. Fotoaufnahmen der Defekte auf der anderen Seite sowie Lock-in Thermografie-Bilder der Defekte bei zwei Frequenzen (0.25 und 0.50 Hz) sind in den Anhängen III.1 und III.2 abgebildet. In den Fotoaufnahmen ist teilweise die Art des verwendeten Fremdkörpers erkennbar.

Bei den meisten dieser simulierten Defekte ist allerdings visuell oder mindestens haptisch (z.B. durch einen Steifigkeitsunterschied) ein Unterschied zur nicht modifizierten Schweissnaht erkennbar bzw. fühlbar.

Bei Verwendung von Schweissautomaten ist die Simulation von Schweissfehlern relativ schwierig, sofern diese nicht durch Einfügen von Fremdkörpern erzeugt und somit durch visuelle und eventuell haptische Überprüfung (Berührung) erkennbar sein sollen. Versuche zur Simulation fehlerbehafteter Spiegelstumpfschweißungen von Kunststoffrohren aus Polyethylen hoher Dichte an der Empa (nicht publizierte Resultate) illustrieren dies. Dafür wurde ein kommerzieller Schweissautomat (Typ Polypress 4002 CNC der Firma WIDOS) verwendet. Das Einbringen von Fremdkörpern wie z.B. kleinen Kieselsteinen, Bruchstücken von geschäumtem Polystyrol oder anderer Materialien führte zu einer visuell mehr oder weniger deutlich erkennbaren Unregelmässigkeit des Schweisswulsts, wie z.B. in der Richtlinie DVS 2202-1 beschrieben. Versuche, die Schweisstemperatur zu reduzieren und so eine ungenügende Qualität der Verschweissung zu erzielen, resultierten wieder in einer visuell erkennbaren Unregelmässigkeit des Schweisswulsts bzw. einem entsprechenden Vermerk im automatisch erstellten Schweissprotokoll. Als einzige Möglichkeit, den Schweissvorgang negativ zu beeinflussen, ohne dass dies in der Schweissnaht visuell erkennbar war oder ein Hinweis auf Unregelmässigkeiten im Schweissprotokoll vermerkt wurde, blieb die Unterlassung des Arbeitsgangs, in dem die Oxidschicht der zu verschweisenden Rohrstümpfe maschinell entfernt wurde (allerdings nur, sofern der Hobel betätigt wurde, der Schweissautomat stellte aber nicht fest, dass kein Kontakt zum Rohrmaterial bestand). Analog dazu gibt es bei der Handschweissung von Dichtungsbahnen prinzipiell die Möglichkeit, die Schweissflächen ohne entsprechende Vorbehandlung zu verschweissen. Zusätzlich können bei der Handschweissung Temperatur und Anpressdruck so variiert werden, dass eine ungenügende Verschweissung entstehen kann. Dieser Ansatz wurde schliesslich für Prüfmuster ohne visuell erkennbare Unregelmässigkeit und ohne Verwendung von Fremdkörpern genutzt.

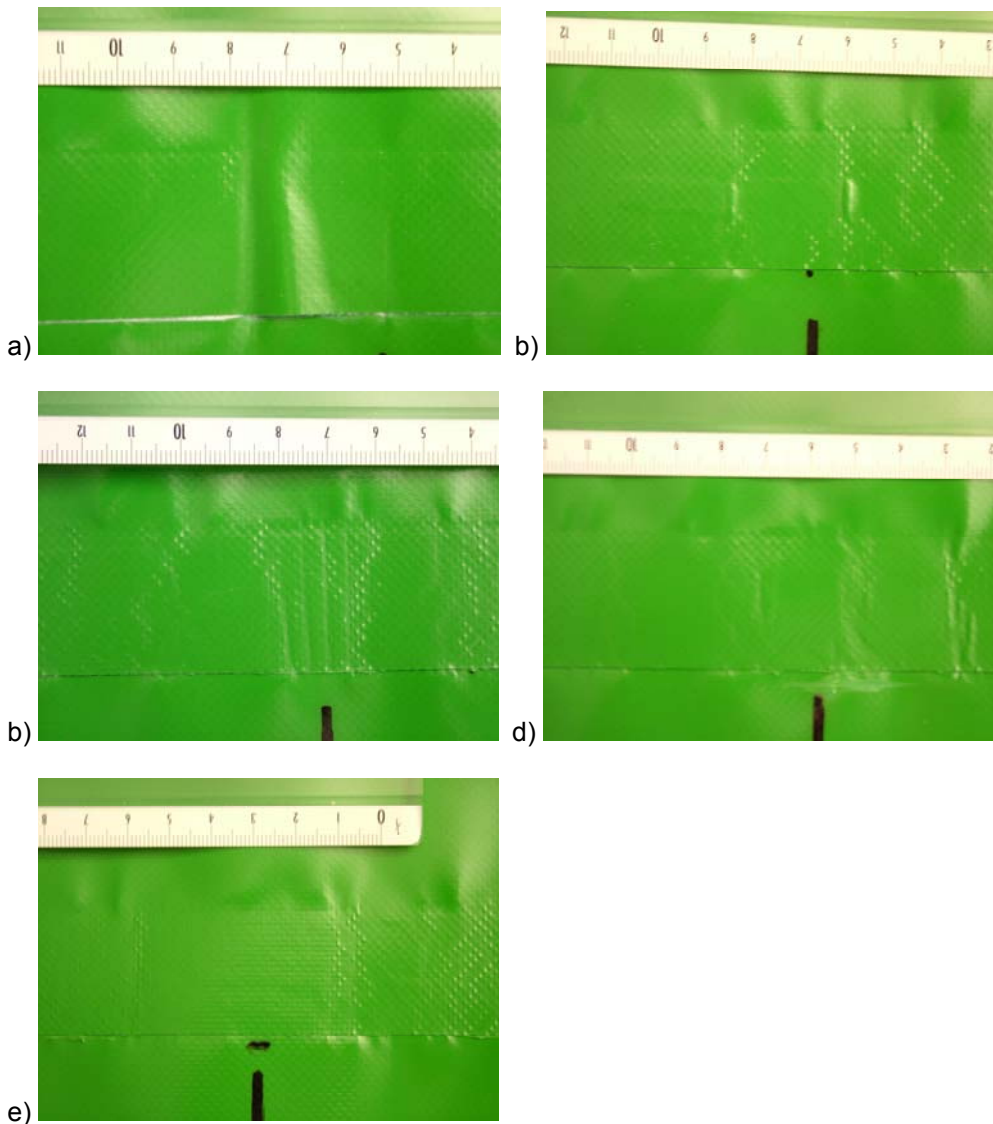


Abb. 4.1 Fotos der Dichtungsbahn mit simulierten Defekten in der Schweißnaht, das Prüfmuster wurde von der Firma Leister AG hergestellt und der Empa für Thermografie-Versuche zur Verfügung gestellt, a) Defekt Nr. 1, b) Defekt Nr. 2, c) Defekt Nr. 3, d) Defekt Nr. 4, e) Defekt Nr. 5.

4.2 Schweißmuster unterschiedlicher Qualität

4.2.1 Einleitung

Da die Handschweißmuster aus der Überwachung des Einbaus der Abdichtungssysteme in den AlpTransit-Tunnel am Lötschberg (der Auslöser für das vorliegende Projekt) nicht für die Untersuchungen verwendet werden konnten, musste eine andere Möglichkeit, Schweißmuster unterschiedlicher Qualität herzustellen, gefunden werden. Im Rahmen eines Praktikums für Bauingenieurstudenten der ETH bei der Empa stellten diese jeweils Handschweißungen von Poly-Vinyl-Chlorid- bzw. Polyethylen-Dichtungsbahnen her. Die typische Länge und Breite dieser Muster beträgt zwischen ca. 40 cm und 60 cm mit einer Schweißnahtbreite von etwa 3-4 cm. Im Praktikum wurden nur einfache Schweißnähte (keine Doppelnähte) ausgeführt, wobei das korrekte Vorgehen inklusive Vorbehandlung instruiert wurde. Allein auf Grund der mangelnden Erfahrung der Schweißer resultierten Schweißmuster unterschiedlicher Qualität. Ausgewählte Prüfmuster (nominelle Breite 20 mm) wurden jeweils im Schälzugversuch, einzelne Prüfmuster zusätzlich im Scherwiderstandsversuch auf ihre Gebrauchstauglichkeit geprüft. Tabelle 4.2.1 fasst Werte der Schälversuche an PVC- und Polyethylen-Dichtungsbahnen aus

fünf Jahren zusammen. Dabei wurde ein Baustellenprüfgerät (Typ EXAMO 600F MC der Firma Leister AG) verwendet. Es zeigte sich, dass Schweißnähte, die visuell, aber ohne Prüfung mit der Reissnadel, den Anforderungen genügten, eine erstaunlich breite Spanne bezüglich Schälwiderstand bzw. Scherfestigkeit (sofern geprüft) aufwiesen. Damit eignen sie sich als Muster für Blindversuche mit Thermografie. Interessant ist, dass die PVC-Dichtungsbahnen eine deutlich höhere Streuung (Standardabweichung von über 50% des Mittelwerts) zeigen, während die Streuung bei den Polyethylen-Dichtungsbahnen nur 16% beträgt.

4.2.2 Beschreibung der Polyethylen-Schweissmuster

Die verwendete Polyethylen-Dichtungsbahn ist etwa 1.5 mm dick, mehrschichtig, mit Verstärkung aus Polyesterlege und Glasvlies und wurde von der Firma Sika Sarnafil für das Praktikum zu Verfügung gestellt (Typ nicht spezifiziert). Die Oberflächen sind matt, auf der Oberseite beige und auf der Rückseite schwarz (Abb. 4.2.1). Die typische Verarbeitungstemperatur beträgt etwa +380°C.

Eine nachträgliche, zerstörende Prüfung der Schweissmuster zur Verifikation der Qualität der Schweißnaht erfolgte durch den Schälzugversuch in Anlehnung an SIA 280.321 bzw. EN 12316-2 (vergleiche Abb. 4.2.2) sowie den Versuch zur Bestimmung des Scherwiderstands in Anlehnung an SIA 280.316 bzw. EN 12317-2 (vergleiche Abb. 4.2.2) an streifenförmigen Prüfmustern (ca. 20 mm breit). Pro Schweißnaht und Versuchstyp wurde nur ein Prüfkörper geprüft, die Prüfgeschwindigkeit betrug 100 mm pro Minute und die Einspannlänge 100 mm. Die Werte sind in Tabelle 4.2.2 zusammengefasst, die Messkurven des Schälzugversuchs sind in Abb. 4.2.3 dargestellt. Alle Messkurven sind für den Vergleich in den Anhängen II.1 und II.2 zusammengestellt.



Abb. 4.2.1 Fotos der Polyethylen-Schweissmuster für die Thermografie-Prüfung (links) Prüfmuster Nr. 2, (rechts) Prüfmuster Nr. 4 (oben) Seite Richtung Berg, (unten) Seite Richtung Gewölbe.

Die nach DVS 2226-3 „Schälversuch“ geforderten Prüfkörperdimensionen (15 mm breit, mindestens fünf Mal die Bahndicke bei homogenen Bahnen bzw. 50 mm bei verstärkten Bahnen) und die Prüfparameter (Prüfgeschwindigkeit 50 mm/min) weichen von den in

den Versuchen an der Empa verwendeten Werten (Prüfkörper Streifen von ca. 20 mm Breite, Prüfgeschwindigkeit 100 mm/min) ab. Für die vergleichende Analyse der Resultate ist dies aber nicht von Bedeutung.

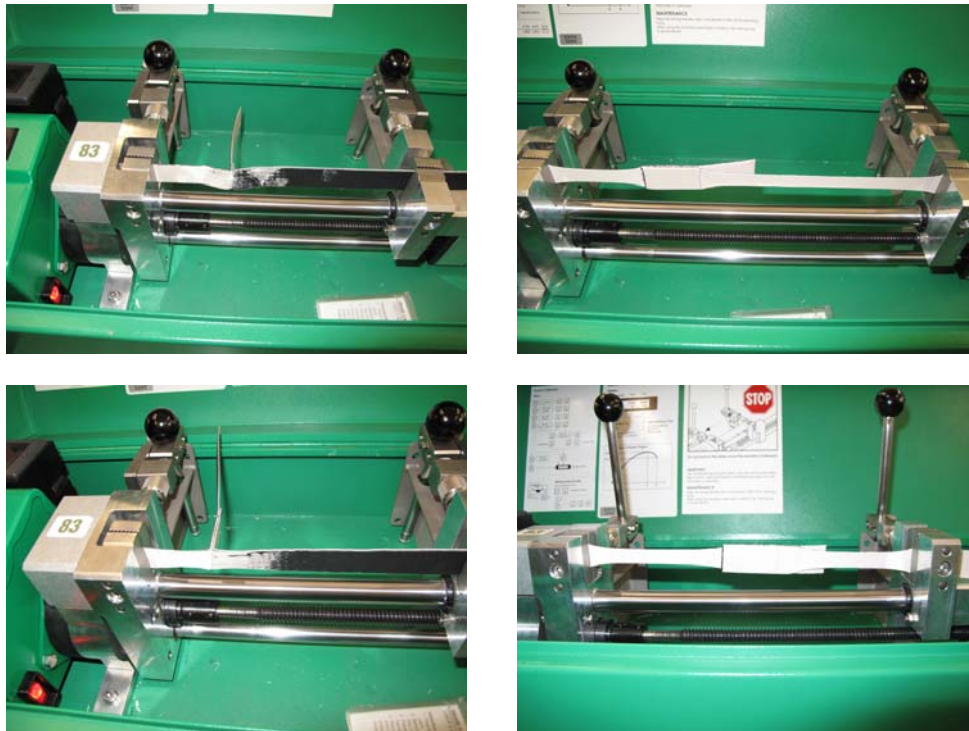


Abb. 4.2.2 Fotos der Versuche zur Bestimmung des Schälwiderstands (Schälzugversuch, jeweils links) und des Scherwiderstands (Zugversuch, jeweils rechts) an den Prüfkörpern Nr. 2 (oben) und Nr. 4 (unten) aus Polyethylen.

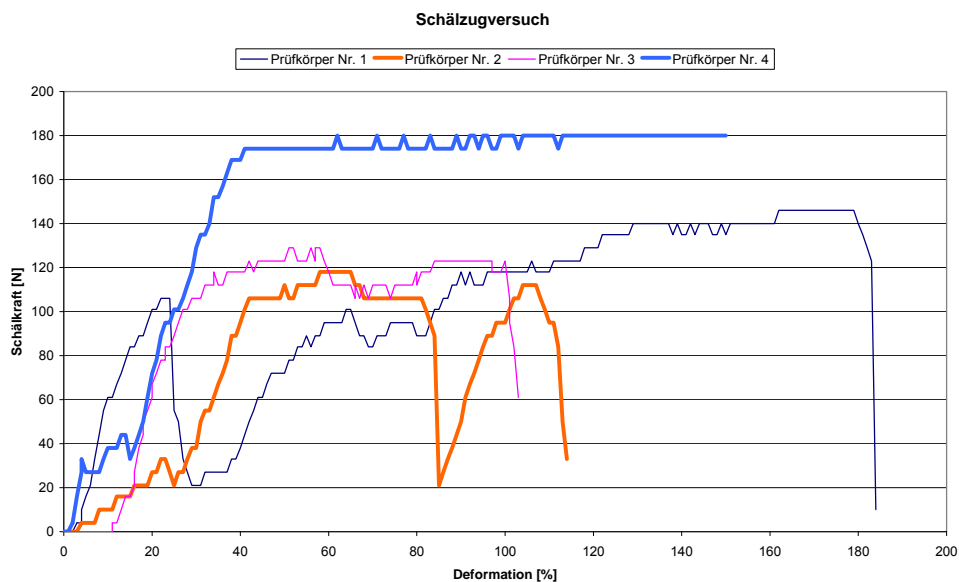


Abb. 4.2.3 Schälkraft in Funktion der Deformation für Prüfkörper Nr. 2 und Nr. 4 aus Polyethylen (PE, dicke Linien); die Prüfkörper Nr. 1 und Nr. 3 aus Poly-Vinyl-Chlorid (PVC) sind zum Vergleich ebenfalls dargestellt (dünne Linien).

Tabelle 4.2.1 Werte der maximalen Schälkraft pro Prüfmusterbreite an Schweissnähten von Dichtungsbahnen aus Poly-Vinyl-Chlorid (PVC) und Polyethylen (PE), die Schweissnähte wurden von Schweissern ohne Übung bzw. Erfahrung hergestellt

Material und Zeitraum	Maximale Schälkraft pro Prüfmusterbreite (Mittelwert) (N/mm)	Standardabweichung [N/mm / %]	Maximaler Wert aus Stichprobe [N/mm]	Minimaler Wert aus Stichprobe [N/mm]
PVC 2006	4.96	2.46 / 49.6	7.99	0.57
PVC 2007	6.07	2.37 / 39.1	13.25	1.40
PVC 2008	6.30	2.99 / 47.5	11.56	0.25
PVC 2009	4.22	2.37 / 56.2	7.77	0.24
PVC 2010	5.70	3.41 / 59.9	11.59	0.76
PVC 2006 - 2010	5.47	2.79 / 51.1	-	-
-PE 2006	7.86	1.06 / 13.5	8.82	4.52
PE 2007	8.96	1.33 / 14.8	12.60	6.25
PE 2008	7.55	0.35 / 4.6	7.94	6.95
PE 2009	7.33	1.10 / 14.9	9.16	4.15
PE 2010	7.34	1.02 / 13.9	8.37	4.24
PE 2006 - 2010	8.03	1.29 / 16.1	-	-

Tabelle 4.2.2 Übersicht über Dichtungsbahn-Prüfmuster aus Polyethylen (PE)

Bezeichnung	Länge parallel zur Naht [cm]	Breite [cm]	Nahtbreite [cm]	Überlapp [cm]	Zugfestigkeit [N/mm] *	Schälwiderstand [N/mm] **
2	24.9	32.3	4.4 – 6.4	1.6 – 3.6	10.98	5.62 (4.66)
4	20.0	32.4	5.0 – 6.5	1.6 – 3.0	10.28	8.50 (8.29)

* Die Belastung wurde bei einer Deformation von 280% (Prüfkörper Nr. 2) bzw. von 150% (Prüfkörper Nr. 4) manuell gestoppt (vergleiche Diagramm im Anhang II.2).

** Die Werte des Schälwiderstands entsprechen wie in Tabelle 4.2.1 der maximal aufgezeichneten Kraft (normiert über die separat gemessene, mittlere Probenbreite), die Werte in Klammern entsprechen den nach SIA 280.321 bzw. EN 12316-2 über den Dehnungsbereich zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Gesamtdehnung gemittelten Lastwerten.

Der Vergleich mit Tabelle 4.2.1 zeigt, dass Prüfmuster Nr. 2 einen niedrigen, Prüfmuster Nr. 4 dagegen einen eher hohen Wert des Schälwiderstands (Mittelwert Tabelle 4.2.1 8.03 N/mm, minimal 7.33 N/mm, maximal 8.96 N/mm) aufweist. Damit unterscheiden sich die beiden Prüfmuster deutlich voneinander. Der Scherwiderstand der beiden Prüfmuster ist etwa vergleichbar, die Messkurven sind im Anhang II.2 dargestellt. Beim Zugversuch zur Bestimmung des Scherwiderstands wurde die Belastung manuell gestoppt, bevor das Material versagte.

4.2.3 Beschreibung der plastifizierten Poly-Vinyl-Chlorid (PVC)-Schweissmuster

Die verwendete PVC-Dichtungsbahn ist ca. 1.7 mm dick, mehrschichtig (mit Polyesterlage) wurde ebenfalls von der Firma Sika Sarnafil AG für das Praktikum zu Verfügung gestellt (Typ nicht spezifiziert). Die matte Oberfläche ist auf der Oberseite hellgrau und auf der Unterseite dunkelgrau.



Abb. 4.2.4 Fotos der PVC-Schweissmuster für die Thermografie-Prüfung (links) Prüfmuster Nr. 1, (rechts) Prüfmuster Nr. 3, (oben) Seite Richtung Berg, (unten) Seite Richtung Gewölbe.

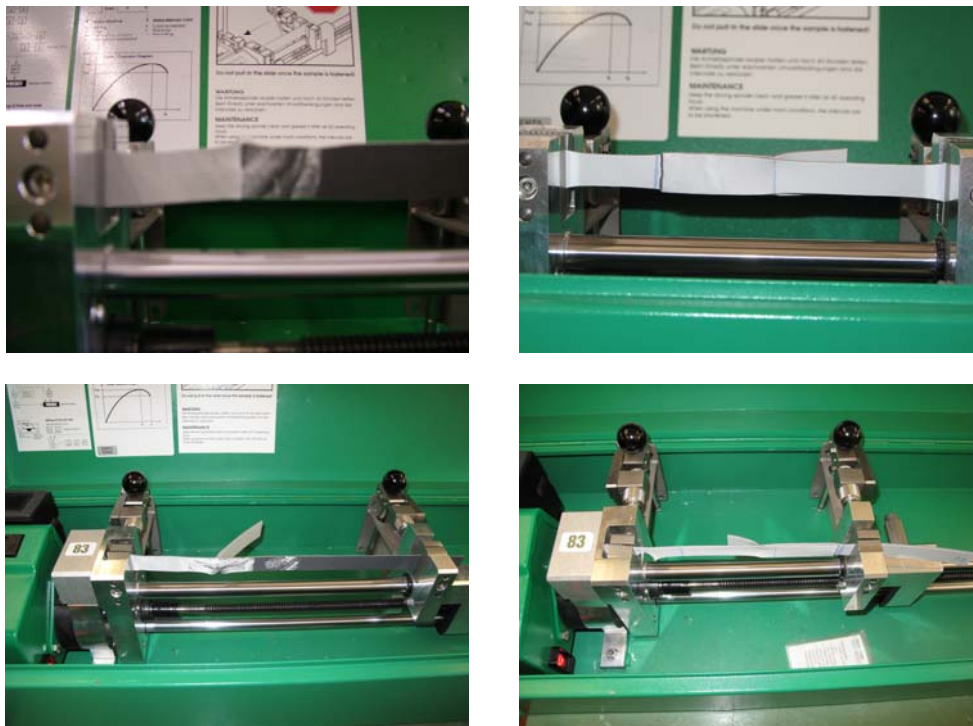


Abb. 4.2.5 Fotos der Versuche zur Bestimmung des Schälwiderstands (Schälzugversuch, jeweils links) und des Scherwiderstands (Zugversuch, jeweils rechts) an den Prüfkörpern Nr. 1 (oben) und Nr. 3 (unten).

Wie für die Polyethylen-Dichtungsbahnen wurden die Schälzugkraft und der Scherwiderstand (Zugversuch) der PVC-Dichtungsbahnen nachträglich zerstörend bestimmt. Die Werte für sind in Tabelle 4.2.3 zusammengefasst, die Messkurven sind in den Anhängen II.1 und II.2 dargestellt.

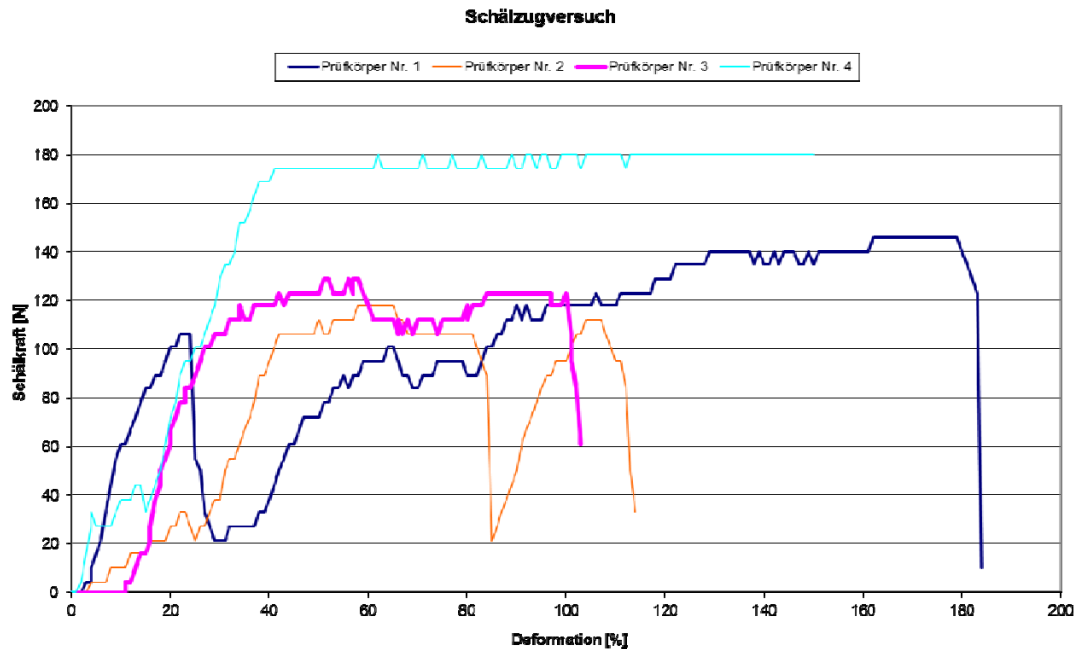


Abb. 4.2.6 Schälkraft in Funktion der Deformation für Prüfkörper Nr. 1 und Nr. 3 aus Poly-Vinyl-Chlorid (PVC) (dicke Linien); die Prüfkörper Nr. 2 und Nr. 3 aus Polyethylen (PE) sind zum Vergleich ebenfalls dargestellt (dünne Linien).

Tabelle 4.2.3 Übersicht über Dichtungsbahn-Prüfmuster aus Poly-Vinyl-Chlorid (PVC)

Bezeichnung	Länge parallel zur Naht [cm]	Breite [cm]	Nahtbreite [cm]	Überlapp [cm]	Zugfestigkeit [N/mm] *	Schälwiderstand [N/mm] **
1	31.2	32.4	4.0	4.0	13.62	7.11 (5.34)
3	27.3	31.7	2.3 – 5.5	2.3 – 5.7	13.21	6.12 (5.48)

* Nach SIA 280.316 bzw. EN 12317-2 sind die Werte ungültig, da die Prüfkörper im Einspannbereich versagten (vergleiche Diagramm in den Anhängen II.1 und II.2).

** Die Werte des Schälwiderstands entsprechen wie in Tabelle 4.2.1 der maximal aufgezeichneten Kraft (normiert über die separat gemessene, mittlere Probenbreite), die Werte in Klammern entsprechen den nach SIA 280.321 bzw. EN 12316-2 über den Dehnungsbereich zwischen ¼ und ¾ der Gesamtdehnung gemittelten Lastwerten.

Der Vergleich mit Tabelle 4.2.1 zeigt, dass Prüfmuster Nr. 1 und Prüfmuster Nr. 2 einen eher hohen Wert des Schälwiderstands (Mittelwert Tabelle 4.2.1 5.47 N/mm, minimal 4.22 N/mm, maximal 6.30 N/mm) aufweisen. Damit unterscheiden sich die beiden Prüfmuster nur wenig voneinander. Der Scherwiderstand ist etwa vergleichbar, allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass die Prüfkörper im Einspannbereich versagten und der Versuch somit nach Norm ungültig zu werten ist.

Ausgewählte Fotos der Versuche zur Bestimmung des Schälwiderstands (Schälzugversuch) und des Scherwiderstands (Zugversuch) sind in Anhang III.3 zusammengestellt.

Die Ergebnisse der Charakterisierung der Prüfmuster bezüglich Schäl- und Scherwiderstand und deren Korrelation mit den Thermografie-Messungen werden weiter unten in Abschnitt 5.3.3 diskutiert.

5 Laborprüfungen mit Thermografie

5.1 Einführung und experimenteller Aufbau

5.1.1 Einleitung und Vorversuche

Neben der passiven Thermografie, mit der z.B. Wärmebrücken in Gebäudehüllen festgestellt werden, gibt es auch mehrere Varianten sogenannter „aktiver“ Thermografie. Aktiv bedeutet, dass eine externe bzw. zusätzliche Wärmequelle verwendet wird, um eine Temperaturdifferenz im Prüfkörper zu erzielen. Wird als Wärmequelle eine Art „Blitzlicht“ verwendet, spricht man von Impuls-Thermografie. Für Lock-in Thermografie verwendet man eine periodisch veränderliche Wärmelampe, bei der die Frequenz der Modulation innerhalb gewisser Grenzen (Bruchteile von Hz bis einige Hz) frei wählbar ist. Durch periodische mechanische Anregung mit Frequenzen im Schall- oder Ultraschallbereich können an inneren Defekten der Prüfkörper ebenfalls Temperaturdifferenzen erzeugt werden, die dann für die sogenannte Vibro-Thermografie genutzt werden. Diese Methoden werden in der Literatur beschrieben und zum Teil vergleichend diskutiert [38-40]. In den folgenden Abschnitten werden die an der Empa verwendeten Geräte und Verfahren kurz erläutert.

Für alle in diesem Bericht beschriebenen Laborversuche (ausgenommen frühe Vorversuche, siehe unten) wurde eine Thermografie-Kamera des Typs Jade III MWIR der Firma Cedip verwendet. Die technischen Daten sind: Wellenlängenbereich 3-5 μm , Indium-Antimonid (InSb)-Detektor, Detektorauflösung 240 x 320 Pixel (Pixelgrösse 30 μm x 30 μm), Bildrate (Vollbild) 170 pro Sekunde, minimale Objektgrösse 6 mm x 8 mm und Temperaturbereich von -20°C bis $+1000^{\circ}\text{C}$.

In Vorversuchen im Labor waren Prüfmuster (Handschweissnähte unterschiedlicher Qualität) mit typischer Grösse von ca. 20 cm x 30 cm und Nahtbreiten von ca. 2 cm in einem Ofen auf eine Temperatur von etwa $+90^{\circ}\text{C}$ erwärmt und dann das Wärmebild dieser Prüfmuster (auf einem Tisch als Unterlage) bei abklingender Temperatur in einem Laborraum (bei Raumtemperatur, etwa $+20^{\circ}\text{C}$) aufgezeichnet worden. Dieses Verfahren wird auch als Transienten-Thermografie bezeichnet. Für die Messungen wurde eine Kamera des Typs LW900 von Agema benutzt.

In einem gewissen Temperaturintervall waren die Schweissnähte während der Abkühlung der Prüfmuster im Thermografiebild (passive Thermografie) erkennbar (Abb. 5.1.1). Damit lässt sich grundsätzlich die Breite der Schweissnaht überprüfen. Schwankungen in der Nahtbreite, welche wenige Millimeter überschreiten, können so im Prinzip nachgewiesen werden. Eindeutig identifizierbare Fehlstellen (z.B. Ablösungen) wurden nicht beobachtet, die Prüfmuster waren allerdings weder mit simulierten noch absichtlich erzeugten Fehlstellen hergestellt worden. Die Art der verwendeten Erwärmung (Ofen, d.h. allseitige, relativ gleichmässige Erwärmung) ist für eine Anwendung auf der Baustelle nicht geeignet. Der Versuch entspricht auch nicht der lokalen Wärmeverteilung, die bei einer Messung direkt während der Herstellung zu erwarten ist. Erwärmung im Ofen und anschliessende passive Thermografie könnte daher bestenfalls für die Qualitätskontrolle, speziell die Bestimmung der Nahtbreite separat hergestellter oder an der Baustelle entnommener Prüfmuster mit genügend kleinen Abmessungen eingesetzt werden.

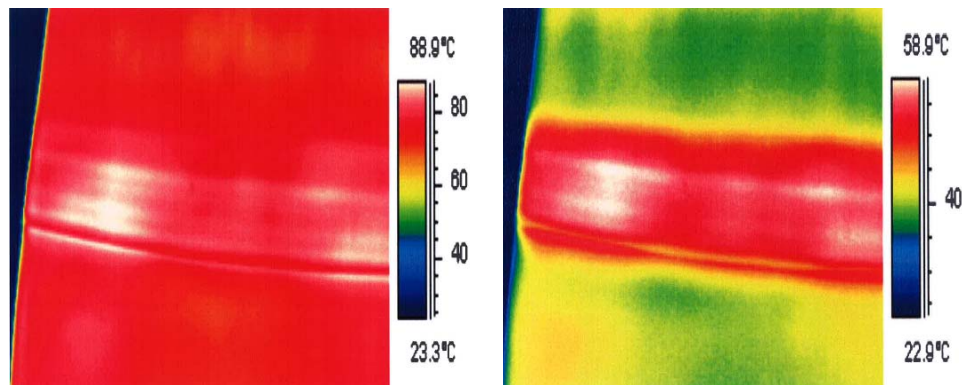


Abb. 5.1.1 Transienten-Thermografie (Vorversuch) an einem Schweißnahtmuster ohne simulierte Defekte, die Erwärmung erfolgte in einem Umluftofen (nominelle Temperatur ca. +90°C), die Messung im Bild links erfolgte ca. 3 Minuten 30 Sekunden nach Entnahme, jene im Bild rechts nach ca. 13 Minuten

5.1.2 Impuls-Thermografie

Als Wärmequelle („Blitzlicht“) für die Impulsthermografie wurde ein Gerät der Firma Bischof Studiolicht mit maximal 6000 Joule pro Puls (Empa-Geräte Nr. 31'217) verwendet. Das Prinzip wird in Abb. 5.1.2 dargestellt. In der vorliegenden Untersuchung werden die Lichtquelle und die Kamera beide auf derselben Seite der Dichtungsbahn eingesetzt. Die sogenannte Transmission-Thermografie mit der Wärmequelle auf der einen und der Kamera auf der anderen Seite des Prüfkörpers wurde nicht untersucht, da dieser Fall durch die vorgesehene Anwendung auf Dichtungsbahnen im Tiefbau ausgeschlossen werden kann.

Die Erwärmung der Oberfläche des Prüfkörpers durch den Licht-Impuls führt zu einer sich zeitlich im Material ausbreitenden Temperaturerhöhung. Diese wird lokal an Inhomogenitäten (z.B. Einschlüssen, Fremdkörpern, Ablösungen) quasi „gestaut“, was an der Oberfläche zu einer Temperaturdifferenz im Wärmebild zwischen der Inhomogenität und ihrer Umgebung führt (Abb. 5.1.3). Die Zeitdifferenz zwischen Wärmeimpuls und Feststellung des Temperaturunterschieds ist proportional zur Tiefenlage der Inhomogenität. Die Nachweisempfindlichkeit nimmt mit zunehmender Tiefenlage ab.

Durch die Distanz zwischen Kamera und Prüfobjekt sowie die gewählte Kameraeinstellung (Linse) werden die Grösse des Bildausschnitts sowie die Auflösung (Bildpunkte pro Längeneinheit) gewählt. Die Distanz und der Winkel des Prüfobjekts relativ zur Lichtquelle und dessen Form beeinflussen die „Ausleuchtung“ des Prüfkörpers und damit auch den Verlauf der Wärmewelle im Prüfobjekt. Weitere wichtige Parameter sind die Energie und die Dauer des Pulses, eventuell auch deren spektrale Komponenten. Die Oberfläche des Prüfobjekts sollte möglichst homogen absorbieren, damit sich nicht schon bei der Anregung eine inhomogene Temperaturverteilung an der Oberfläche ergibt. Dies lässt sich zum Teil ausgleichen, indem die Differenztemperatur oder die relative Temperaturänderung bezogen auf die Anfangstemperaturverteilung rechnerisch bestimmt wird. Da die für jeden Bildausschnitt durchgeführt werden muss, verlängert sich die Auswertzeit entsprechend.

Das Messprinzip führt dazu, dass die auf der Oberfläche feststellbare Temperaturdifferenz zu einem bestimmten, von der Tiefenlage des Defekts abhängigen, Zeitpunkt maximal ist. Gleichzeitig nimmt diese Temperaturdifferenz mit zunehmender Tiefenlage des Defekts ab. Dies ist schematisch in Abb. 5.1.3 dargestellt. Aus denselben Gründen hängt die Bestimmung der effektiven lateralen Ausdehnung des Defekts ebenfalls von dessen Tiefenlage ab.

Je nach Prüfkörper kann die Erwärmung des Prüfobjekts durch die Wärmelampe wiederholt werden, um optimale Erwärmung zu erzielen. Dabei können prinzipiell die Messparameter (Anordnung Lichtquelle relativ zum Prüfobjekt, Lichtintensität etc.) angepasst werden, um „optimale“ Bilder für die Auswertung zu erhalten.

Typisch sind Abstände zwischen Lichtquelle bzw. Kamera und Prüfkörper in der Größenordnung von einem Meter. Bei Tunnelbauten mit entsprechenden Gewölberadien müsste für vergleichbare Bedingungen ein ähnlicher Abstand gewählt werden. Dies bedeutet, dass die Geräte z.B. auf einer fahrbaren Hebebühne montiert werden müssten, um Schweißnähte in der Nähe des Gewölbefirsts zu untersuchen.

Impuls-Thermografie Aufbau

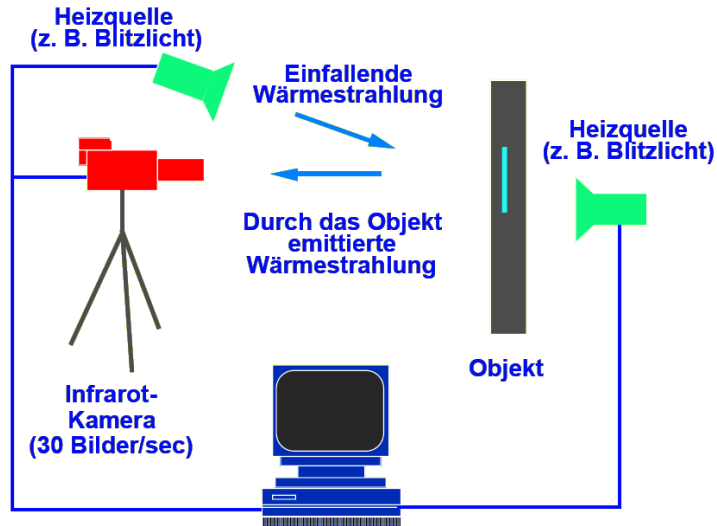


Abb. 5.1.2 Schematische Darstellung des Messaufbaus mit Impuls-Thermografie, Transmissions-Thermografie (Blitzlicht und Kamera auf unterschiedlichen Seiten des Prüfkörpers) wird im vorliegenden Bericht nicht verwendet.

Temperaturanstieg als Funktion der Zeit Messung

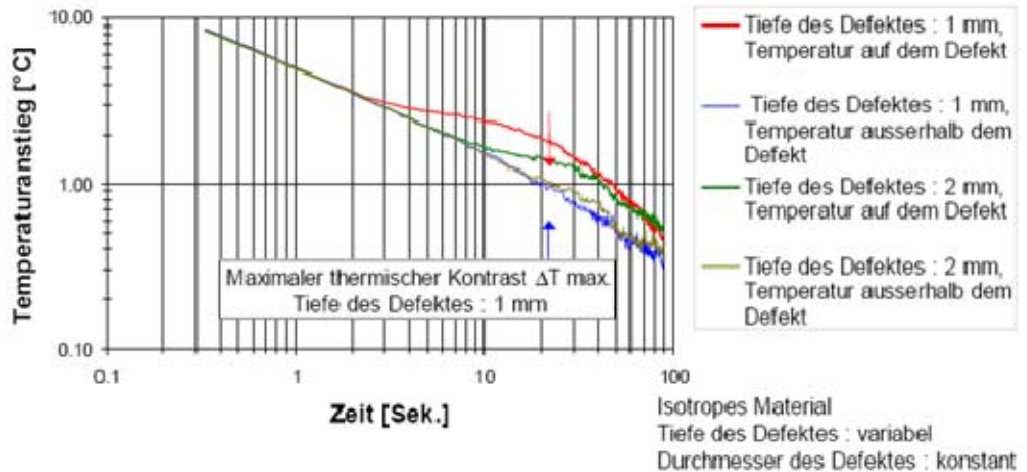


Abb. 5.1.3 Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Oberflächentemperatur des Prüfobjekts und Tiefenlage des Defekts bei Impuls-Thermografie.

5.1.3 Lock-in Thermografie

Der Messaufbau für die Lock-in Thermografie ist grundsätzlich gleich wie jener für die Impuls-Thermografie (Abb. 5.1.2). Als einziger Unterschied wird die Impuls-Wärmequelle

durch eine zeitlich in der Intensität modulierbare Wärmequelle (Eigenbau der Empa) ersetzt. Transmissions-Thermografie wird bei der verwendeten Lock-in Thermografie wieder ausgeschlossen, da diese Konfiguration in der Anwendung nicht realisierbar ist.

Durch die modulierbare Wärmequelle wird im Prüfkörper eine Wärmewelle ausgelöst, die an Inhomogenitäten gestaut oder gestreut wird. Die momentane Temperaturverteilung an der Oberfläche ist ebenfalls und mit gleicher Frequenz moduliert wie die Anregung. Sie kann aber gegenüber der Anregung phasenverschoben sein (Abb. 5.1.4). Damit stehen immer zwei Informationen zur Verfügung: das Amplitudenbild, das die Schwankung der Oberflächentemperatur, und das Phasenbild, das den zeitlichen Versatz gegenüber der einfallenden Wärmewelle beschreibt. Je nach Tiefe des Defekts und der Anregungsfrequenz ergibt sich im Phasen- oder im Amplitudenbild ein besserer Kontrast.

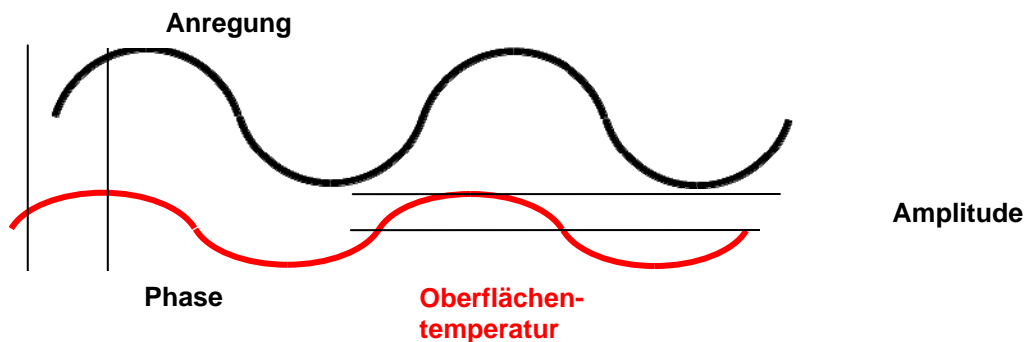


Abb. 5.1.4 Schematische Darstellung der Anregung und der Oberflächentemperatur bei der Lock-in Thermografie.

5.2 Prüfmuster mit simulierten Defekten

5.2.1 Einleitung

Das Prüfmuster mit fünf simulierten Defekten wurde mit Impuls- und Lock-In Thermografie untersucht und die Ergebnisse bezüglich Nachweisempfindlichkeit verglichen. Das Prüfmuster dient gleichzeitig als Beispiel für eine Dichtungsbahn (Folie) mit glänzend-reflektierender Oberfläche. Die später geprüften Muster weisen mehrheitlich eine eher matte Oberfläche auf (vergleiche oben). Die Folie wurde aufgerollt und auf einem Tisch stehend vermessen. Hinter Folie befindet sich daher Luft, ein guter Wärmeisolator, entlang dem unteren Rand berührt die Folie die Tischoberfläche.

5.2.2 Impuls-Thermografie

Abb. 5.2.1 zeigt Thermografie-Bilder des simulierten Defekts Nr. 1, die im Abstand von wenigen Sekunden nach dem Licht-Impuls (Blitz) aufgenommen wurden. In beiden Aufnahmen ist klar eine helle Diskontinuität in der dunkel (grau-schwarz) wiedergegebenen Schweißnaht erkennbar. Die Schweißnaht erscheint dunkler, d.h. mit niedrigerer Temperatur als der Rest der Folie, da dort die Masse grösser und somit die erzielte Erwärmung reduziert ist. Der Defekt zeichnet sich als heller Fleck ab, da dort offensichtlich der thermische Kontakt zur Rückseite reduziert oder gar unterbrochen ist. Beim hochauflösenden Bild (Abb. 5.2.1 links) ist das Folienträgergewebe als Punktmuster deutlich erkennbar.

Form und Ausmass der Diskontinuität, welche den Defekt Nr. 1 (eine durch eingelegte Folie erzeugte Trennung) anzeigt, ändern sich mit der Zeit nach dem Impuls. Das effektive Ausmass des Defekts ist mit diesen Bildern nicht genau bestimmbar. Der Nachweis mittels visueller Inspektion der Aufnahmen ist aber eindeutig.

Oberhalb der Schweissnaht sind in beiden Aufnahmen hell-dunkel Modulationen unterschiedlicher Breite erkennbar, die mehrheitlich auf einen schmalen Streifen (etwa ein Viertel der Breite der Schweissnaht) begrenzt sind. Dieser schmale Streifen wird durch den nicht verschweissten Überlapp der Kunststoffbahn auf der Rückseite des Prüfmusters verursacht. Durch die Berührung der beiden Folien wird die Wärme teilweise weitergeleitet, so dass auch hier die Temperatur leicht erniedrigt wird. Die Modulation der Temperatur im Streifen wird wahrscheinlich von der Welligkeit des Prüfmusters und speziell der Welligkeit des losen Überlapps verursacht.

Zusammenfassend kann zur Impuls-Thermografie an diesem Prüfmuster gesagt werden, dass (1) die Breite der Schweissnaht sich mit beiden Aufnahmen gut beurteilen lässt, (2) der verschweisste Teil und der lose Überlapp gut unterschieden werden können, (3) der simulierte Defekt (eine Trennung innerhalb der Schweissnaht) prinzipiell erkennbar ist, aber (4) bezüglich Grösse bzw. Ausmass und (5) Art kaum beurteilt werden kann.

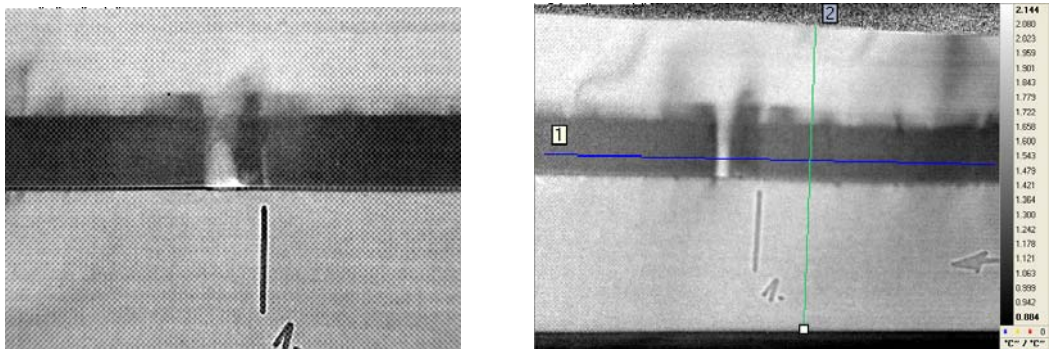


Abb. 5.2.1 Simulierter Defekt Nr. 1 (Prüfmuster Leister AG) Impuls-Thermografie Aufnahme 1 Sekunde (links) und 3 Sekunden (rechts, grösserer Abstand zur Kamera) nach Impuls.

5.2.3 Lock-in Thermografie

Abb. 5.2.2 zeigt Bilder desselben simulierten Defekts (Nr. 1), die mit Lock-in Thermografie aufgenommen wurden. Dargestellt ist das Phasenbild bei zwei unterschiedlichen Frequenzen. Wie in den Impuls-Thermografie Bildern ist die Schweissnaht klar erkennbar. Ebenfalls erkennbar ist der lose Überlapp mit der auf Welligkeit zurückzuführenden Temperatur-Modulation. Der Defekt zeichnet sich deutlich ab und sein Ausmass ist erkennbar.

Die Ergebnisse der Lock-in Thermografie sind, bei den benutzten Frequenzen unterhalb 1 Hz, weitgehend vergleichbar mit jenen der Impuls-Thermografie, die innerhalb weniger Sekunden nach dem Impuls aufgenommen wurden. Im visuellen Vergleich fällt der Unterschied in der hell-dunkel Skala im Bereich der Schweissnaht inklusive beim Defekt auf. Der Bereich des Phasenwinkels, welcher dem schwarz-weißen Kontrast (siehe Skala) entspricht, ist in den beiden Bildern aber nicht gleich. Das Phasenbild mit 0.5 Hz zeigt im Bereich des Überlapps die Details der Welligkeit besser, unterscheidet sich aber im Bereich des Defekts nicht wesentlich vom Phasenbild bei 0.25 Hz. Die Änderung des Kontrasts von dunkler Fehlstelle auf heller Naht (Abb. 5.2.2. links) zu heller Fehlstelle auf dunkler Naht (Abb. 5.2.2. rechts) ist eine Folge der Anregungsfrequenz.

Zusammenfassend kann zur Lock-in Thermografie an diesem Prüfmuster gesagt werden, dass (1) die Breite der Schweissnaht im Phasenbild sehr gut beurteilt werden kann, (2) verschweisster Teil und loser Überlapp unterscheidbar sind und (3) der simulierte Defekt erkennbar und (4) bezüglich Grösse und Ausmass bewertbar ist. Ohne die Information, dass es sich um einen simulierten Defekt handelt, ist die Art der Diskontinuität kaum zu beurteilen. Für die Praxis ist in erster Linie der Hinweis auf eine mögliche Fehlstelle wichtig, diese kann dann genauer inspiziert werden, bevor über eventuelle Reparatur oder Nachbearbeitung entschieden wird.

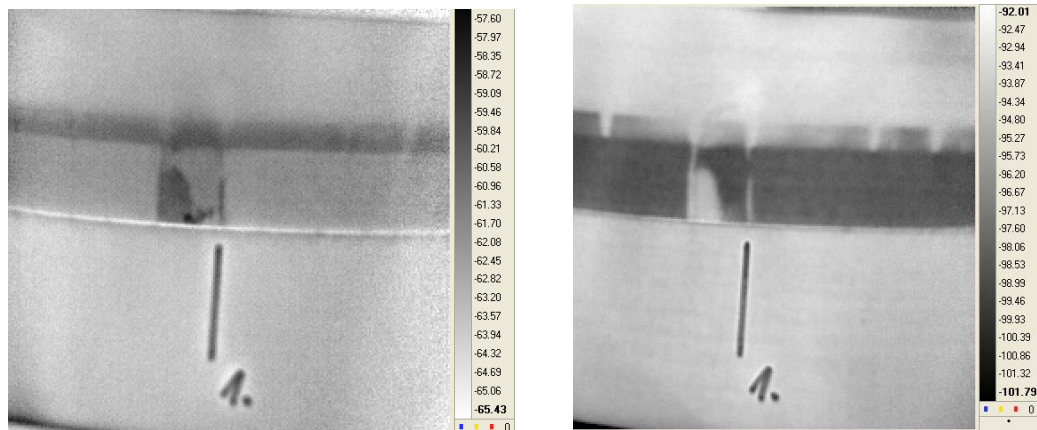


Abb. 5.2.2 Simulierter Defekt Nr. 1 (Prüfmuster Leister AG) mit Lock-in Thermografie, Phasenbild mit Frequenz 0.5 Hz (links) und 0.25 Hz (rechts).

5.2.4 Diskussion und Vergleich der Verfahren

Grundsätzlich können die simulierten Defekte sowohl mit Impuls- wie mit Lock-in Thermografie nachgewiesen werden. Eine visuelle Bewertung der Thermografie-Bilder deutet darauf hin, dass Lock-in Thermografie eine etwas bessere Erkennbarkeit der Defekte ergibt. Allerdings ist der Aufwand für die Lock-in Messung grösser als jener für Impuls-Thermografie und dies kann als Vorteil der letzt-genannten Methode gesehen werden. Alle nachgewiesenen, simulierten Defekte sind aber Fremdkörper und somit deutliche Diskontinuitäten. Die Frage, ob Impuls- oder Lock-in Thermografie ausreichen, um „kissing bonds“ (abgelöste, sich aber berührende Oberflächen) oder gar Unterschiede in der Haftung, d.h. eventuell kritische Schweißnähte anzuzeigen, bleibt daher offen.

Die reflektierende Oberfläche und die Farbe (grün) des Prüfmusters haben die Nachweisempfindlichkeit beider Verfahren (Impuls bzw. Lock-in) höchstens geringfügig beeinflusst. Da das Prüfmuster als Rolle gelagert wurde und die Schweißnaht zu gewissen Verformungen neigt, zeigen die Aufnahmen auch den Einfluss einer gewissen Welligkeit. Diese kann die Nachweisempfindlichkeit ebenfalls beeinflussen, da sowohl Impuls-Thermografiebilder wie Amplituden- und Phasenbilder der Lock-in Thermografie dadurch gewisse Kontrastwirkung zeigen. Dies deutet auf mögliche Probleme hin, falls das Verfahren in der Anwendung auf stark korrigierter Unterlage oder dadurch teilweise deformierte oder verzerrte Dichtungsbahnen angewendet werden soll. Ebenfalls ist der thermische Einfluss des Untergrunds nicht zu unterschätzen. Wo die Folie aufliegt, erfolgt ein rascherer Wärmeabfluss als dort, wo ein Luftspalt besteht. In der Lock-in Thermografie muss deshalb die Frequenz so gewählt werden, dass der Hauptkontrast auf jene Tiefe eingestellt wird, die der Foliendicke entspricht.

Bezüglich Bild-Ausschnitts zeigen die Beispiele, dass das Thermografie-Bild einen größeren Bereich als der hier gewählte erfassen kann, ohne die Nachweisbarkeit grundsätzlich zu reduzieren. Allerdings sinkt mit zunehmendem Bildausschnitt die Ortsauflösung, d.h., dass eine zu messende kritische Defektgröße letztlich die Auflösung und somit den Arbeitsabstand bestimmt. Der maximal erfassbare Bildausschnitt hängt aber auch von der Position und Leistungsfähigkeit der Wärmequelle ab. Für eine erhöhte Nachweiswahrscheinlichkeit ist zudem der Einsatz von Bildbearbeitungs- und Bildanalyse-Programmen unumgänglich.

Ausgewählte Thermografie-Bilder (Lock-in Thermografie) aller fünf simulierter Defekte des Prüfmusters (Leister AG) sind im Anhang III.2 dargestellt. Damit wird gezeigt, dass jeder Defekt unabhängig von der Art der Simulation sowohl mit Impuls- wie mit Lock-in Thermografie grundsätzlich erkennbar ist. Allerdings hängt die Erkennbarkeit von den gewählten Prüfparametern (z.B. Lock-in Frequenz) ab. Diese sind nicht für jeden simulierten Defekttyp gleich. Es ist daher kaum möglich, eine einzige Prüfbedingung anzuge-

ben, bei der jeder Defektyp optimal erkennbar ist. Die eventuell notwendige Anpassung der Lock-in Frequenz kann in der Anwendung aufwändig werden, wenn die Erkennbarkeit der Defekte optimiert werden soll. Es muss folglich für jeden Bildausschnitt eine Serie von Aufnahmen bei unterschiedlichen Frequenzen aufgenommen werden. Impuls-Thermografie scheint hier im Vorteil zu sein, da es sich aber um eine dynamische Messung handelt, muss der Zeitverlauf bewertet werden, d.h. es müssen Bilder zu verschiedenen Zeiten nach dem Puls verglichen bzw. verrechnet werden.

5.3 Prüfmuster mit unterschiedlicher Festigkeit der Schweißnaht

5.3.1 Impuls-Thermografie

Auf Grund der Erfahrung mit dem Prüfmuster mit simulierten Defekten (siehe Abschnitt 5.2.2) wurde auf eine Prüfung der späteren Prüfmusterserien (Handschweissmuster unterschiedlicher Qualität) mit Impuls-Thermografie verzichtet und nur Lock-in Thermografie benutzt.

5.3.2 Lock-in Thermografie

Eine Serie von total vier Prüfmustern wurde mit Lock-in Thermografie bei unterschiedlichen Frequenzen (1 Hz, 0.5 Hz, 0.33 Hz, 0.2 Hz, 0.1 Hz) geprüft. Die Aufnahme dauerte zwischen 10 Sekunden (bei 1 Hz) und 20 Sekunden (bei 0.1 Hz). Die Versuche erfolgten als Blindversuch, d.h. dem Thermografie-Prüfer war nicht bekannt, ob die Prüfmuster eine genügende Qualität der Schweißnaht aufwiesen oder nicht.

Erste Informationen liefern die Amplitudenbilder, d.h. die Aufzeichnung der Temperaturverteilung. Ein Beispiel aus der Auswahl solcher Bilder, die bei unterschiedlichen Frequenzen aufgezeichnet wurden, ist in Abb. 5.3.1 dargestellt, es zeigt ein Schweißmuster aus Polyethylen.

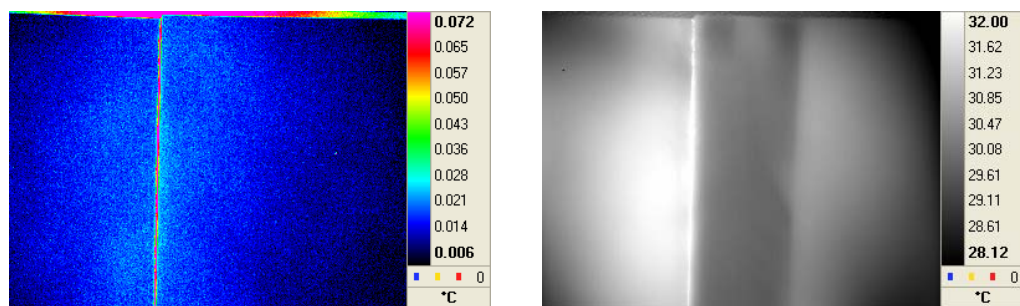


Abb. 5.3.1 Amplitudenbild (links) und mittlere Oberflächentemperatur (rechts) eines Schweißmusters aus Polyethylen (PE).

Im Amplitudenbild ist die Schweißnaht kaum zu erkennen, da nur die Kante links als senkrechte Linie hervorgehoben wird. In der Aufnahme mit der mittleren Oberflächentemperatur ist die Schweißnaht deutlich erkennbar. In der Schweißnaht selbst sind gewisse Unterschiede der Oberflächentemperatur feststellbar (speziell beim oberen Rand der Folie). Ob diese aber auf mögliche Defekte oder Unterschiede in der Haftung hinweisen, bleibt vorerst unklar.

Die Aufnahme mit mittlerer Oberflächentemperatur zeigt, dass die Ausleuchtung (Anregung) durch die Wärmequelle ungleichmässig erfolgt. In der Mitte des Prüfmusters ist daher die mittlere Oberflächentemperatur höher als im Randbereich (Abb. 5.3.1 rechts). Wird dieser Effekt berücksichtigt, indem man das Amplitudenbild durch Bilder bei unterschiedlicher mittlerer Oberflächentemperatur dividiert, wird die Erkennbarkeit der Schweißnaht etwas besser (Abb. 5.3.2). In beiden dargestellten Beispielen hebt sich die Schweißnaht von der umgebenden Folie ab, die Temperaturerhöhung innerhalb der

Schweißnaht ist gering (ca. 1 mK) und sehr homogen. Zwar lässt sich die Breite der Schweißnaht mit diesem Verfahren kontrollieren, aber das hier untersuchte Prüfmuster liefert keine Hinweise auf mögliche Defekte oder Unterschiede in der Festigkeit der Schweißnaht.

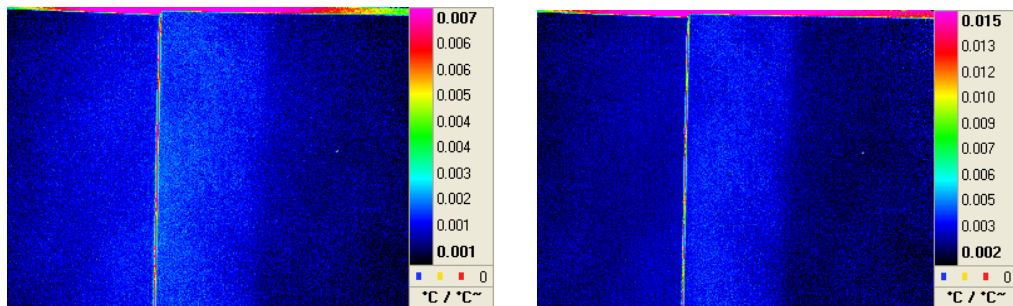


Abb. 5.3.2 Amplitudenbilder nach Bearbeitung (links) Division des Amplitudenbilds in Abb. 5.3.1 durch mittlere Temperatur von +20°C, (rechts) dasselbe für eine mittlere Temperatur von +25°C.

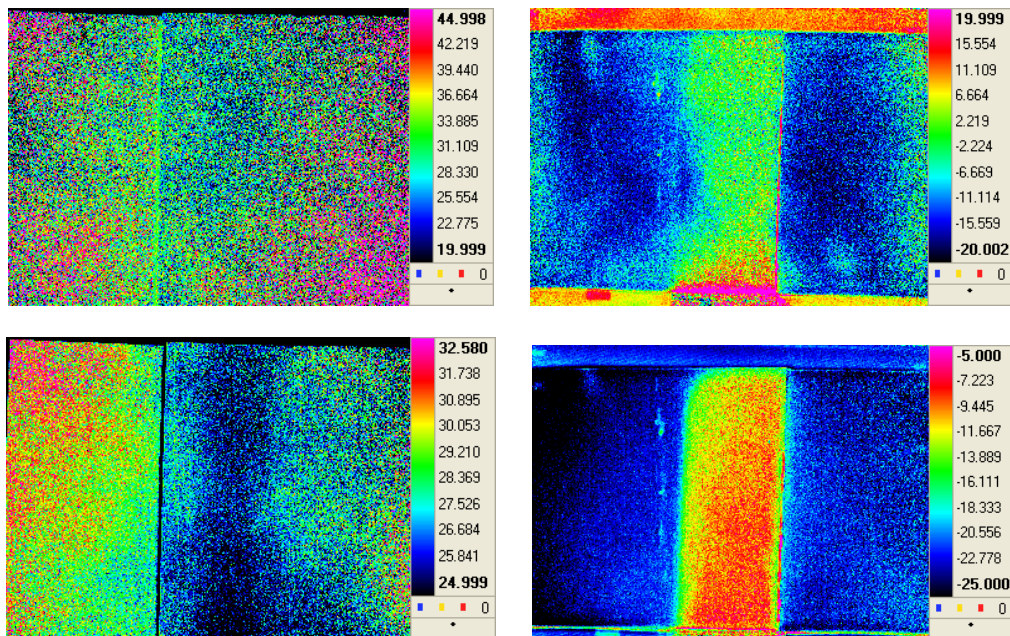


Abb. 5.3.3 Phasenbilder (Lock-in Thermografie) von Schweißnähten an Polyethylen-Dichtungsbahnen (links) Prüfmuster 2 und (rechts) Prüfmuster 4 mit unterschiedlichen Frequenzen (oben) 1 Hz und (unten) 0.33 Hz.

Da Amplitudenbilder höchstwahrscheinlich keine eindeutig interpretierbare Information zur Festigkeit der Schweißnaht enthalten (weitere Folien lieferten mit dem oben beschriebenen Verfahren ebenfalls keine eindeutigen Ergebnisse), wurden noch die Phasenbilder untersucht. Beispiele dafür sind in Abb. 5.3.3 und 5.3.4 für je einen Folientyp dargestellt. Verglichen werden jeweils zwei Prüfmuster des selben Typs bei zwei unterschiedlichen, aber in beiden Beispielen gleich gewählten Lock-in Frequenzen.

Damit ist aber noch nicht klar, ob die Bilder auch Information bezüglich Qualität, d.h. Festigkeit der Schweißnaht enthalten. Die meisten dargestellten Phasenbilder zeigen im Bereich der Schweißnaht unterschiedliche Farben und somit eine gewisse Variation in der Phase. Allerdings sind die Bilder nicht direkt vergleichbar, da die Farbskala bei jedem Bild einen anderen Winkelbereich (Phase) abdeckt. Die Phasenauflösung ist daher bei Phasenbildern mit geringerem Winkelbereich (z.B. PVC-Folie Muster Nr. 3 Bereiche von 20°-40° bzw. von 30°-39°) grösser.

Ein erster Vergleich der Phasenbilder für 1 Hz und 0.33 Hz zeigt, dass die Schweissnaht in den Bildern mit niedrigerer Frequenz besser erkennbar ist, weil die Eindringtiefe der Wärmequelle in etwa der Foliendicke entspricht. Auffallend ist aber auch der Unterschied zwischen Prüfmuster 2 und Prüfmuster 4, die nominell aus demselben Material gefertigt wurden. Wenn man die analogen Phasenbilder für das zweite Material (PVC, Abb. 5.3.4) vergleicht, ist die Erkennbarkeit der Schweissnaht für beide Prüfmuster und beide Frequenzen etwa vergleichbar. Im Vergleich zu den Amplitudenbildern ist die Erkennbarkeit der Schweissnaht in den Phasenbildern deutlich besser. Die Breite der Schweissnaht kann, soweit die Naht selbst erkennbar ist, gut beurteilt werden.

Für die Polyethylen-Folie (Prüfmuster 2) zeigt die Schweissnaht einen Phasenwinkel, der sich teilweise wenig von jenem ausserhalb der Schweissnaht unterscheidet. Bei Prüfmuster 4 unterscheidet sich der Phasenwinkel deutlich, im Bereich der Schweissnaht ist der Wert höher als ausserhalb.

Grundsätzlich ist die Schweissnaht in den meisten Phasenbildern der PVC-Dichtungsbahnen gut erkennbar. Ein Streifen innerhalb der Schweissnaht scheint jeweils einen anderen Phasenwinkel aufzuweisen. Ob dies als Hinweis auf unterschiedliche Festigkeit interpretiert werden kann, ist aber nicht klar.

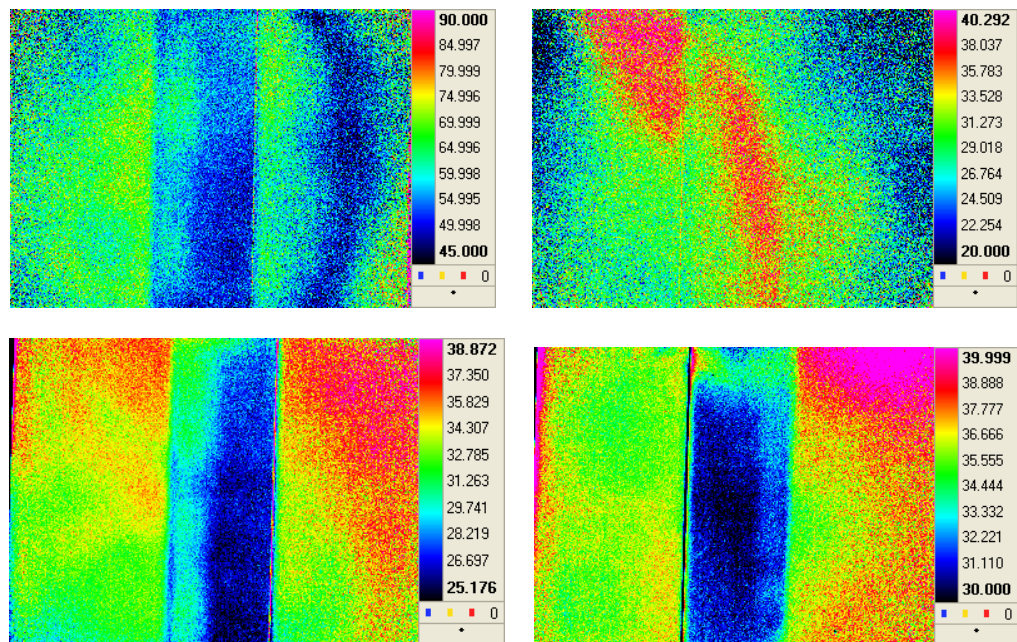


Abb. 5.3.4 Phasenbilder (Lock-in Thermografie) von Schweissnähten an PVC-Dichtungsbahnen (links) Prüfmuster 1 und (rechts) Prüfmuster 3 mit unterschiedlichen Frequenzen (oben) 1 Hz und (unten) 0.33 Hz.

Phasenunterschiede innerhalb der nicht verschweissten Folienbereiche deuten auch darauf hin, dass durch Reflexionen oder andere Inhomogenitäten Artefakte entstehen können. Insbesondere kann durch die Welligkeit der Folie die Wärmeaufnahme je nach Winkel zur Wärmequelle unterschiedlich stark sein. Zudem erfolgt bei den hier notwendigen, niedrigen Anregungsfrequenzen eine globale Erwärmung der Folie. Durch die damit ansteigende Temperatur werden die Phasen- und Amplitudenauswertungen verfälscht. Aus Zeitgründen ist es andererseits nicht möglich, so lange anzuregen, bis sich ein Temperaturgleichgewicht eingestellt hat, da die Folie im Labor isoliert in der Luft steht und somit nur radiativ abkühlen kann.

5.3.3 Vergleich der Lock-in Thermografie für verschiedene Materialien

Die Phasenbilder der Lock-in Thermografie in Abb. 5.3.3 und 5.3.4 zeigen, dass die Schweissnaht bei den beiden PVC-Prüfmustern bei vergleichbaren Messbedingungen besser erkennbar ist als jene der beiden Polyethylen-Prüfmuster. Die Nahtbreite lässt sich aus drei (von vier) Bildern der PVC-Prüfmuster ohne zusätzlichen Aufwand genügend genau bestimmen, während dies nur für zwei Bilder der Polyethylen-Prüfmuster der Fall ist.

Lock-in Thermografie und ausgewählte Anwendungen, darunter auch auf PVC und Polyethylen werden von [41] beschrieben. Generell wird bemerkt, dass der gemessene, mittlere Phasenwinkel mit zunehmender thermischer Diffusivität zunimmt. Eine Verbindung zweier PVC-Rohre (für Abwasseranwendung) zeigt einen niedrigeren Phasenwinkel (233°) für das Rohr mit hellgrauer Farbe, während das zweite Rohr mit dunkelgrauer Farbe einen höheren Phasenwinkel (236°) ergibt. Im Übergangsbereich der Verbindung wird eine grössere Variation des Phasenwinkels beobachtet (ca. $230\text{-}240^\circ$). Als weiteres Beispiel wird ein Polyethylen-Rohr diskutiert, das durch Strecken auf einen grösseren Durchmesser (von 15 mm auf 50 mm) aufgeweitet wird, bei gleichzeitiger Abnahme der Wandstärke. Wieder unterscheiden sich Ausgangsmaterial (250°) und aufgeweitetes Rohr (244°) im Phasenwinkel.

5.3.4 Vergleich der Lock-in Thermografie mit den Ergebnissen der mechanischen Charakterisierung und dem visuellen Befund im Schälversuch

Bei den PVC-Dichtungsbahnen (Prüfmuster Nr. 1 und Nr. 3) ergab Prüfmuster Nr. 1 einen höheren Schälwiderstand als Prüfmuster Nr. 3, sofern die maximal ermittelte Schälkraft für die Bestimmung verwendet wird (vergleiche Tabelle 4.2.3). Bei der Auswertung des Mittelwerts der Zugkraft über einen Dehnungsbereich zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Dehnung (in Anlehnung an SIA 280.321) war dies aber umgekehrt. Allerdings liegen beide Werte relativ nahe beim langjährigen Mittelwert des Schälwiderstands (vergleiche Tabelle 4.2.1). Der Verlauf der Zugkraft in Funktion der Dehnung deutet darauf hin, dass Prüfmuster Nr. 1 eine gewisse Variation des Schälwiderstands über die Breite der Schweissnaht aufweist (vergleiche Abb. 4.2.6 bzw. Anhang II.1). Dies wird auch aus visueller Beobachtung deutlich, es gibt eine Mischung grau-farbiger und weisser Stellen auf der im Schälzugversuch entstehenden Grenzfläche (Abb. 4.2.5 bzw. Anhang III.3). Beim Prüfkörper Nr. 3 gibt es nur eine relativ geringe Variation der Schälkraft über die Breite der Schweissnaht und die visuelle Erscheinung der Grenzfläche ist deutlich gleichmässiger. Der (maximale) Schälwiderstand der beiden Prüfmuster ist aber etwa vergleichbar und somit die Qualität der Schweissnaht nominell etwa ähnlich. Dies ist mit den Phasenbildern der Lock-in Thermografie (Abb. 5.3.4) dieser beiden Prüfmuster konsistent. Der bei Prüfmuster Nr 1 beobachtete Phasenunterschied, der als grün-türkis-farbiger Kontrast zur sonst dunkelblau erscheinenden Schweissnaht ist effektiv gering (etwa $3^\circ - 4^\circ$) und kaum mit der Variation des Schälwiderstands erklärbar.

Bei den Polyethylen-Dichtungsbahnen (Prüfmuster Nr. 2 und Nr. 4) deutet der Schälzugversuch auf signifikante Unterschiede im Schälwiderstand hin, unabhängig davon, ob der Maximal- oder der Mittelwert bestimmt wird. Der eine Wert liegt deutlich unterhalb, der andere eher über dem langjährigen Mittelwert (vergleiche Tabelle 4.2.1). Die Schälzugkraft in Funktion der Dehnung zeigt für Prüfkörper Nr. 2 aber eine Variation, die etwa mit jener des Prüfkörpers Nr. 1 vergleichbar ist. Prüfkörper Nr. 4 ergibt dagegen eine praktisch konstante Zugkraft bzw. konstanten Schälwiderstand mit einem vergleichsweise hohen Messwert. Die im Schälzugversuch gebildete Grenzfläche zeigt bei Prüfkörper Nr. 2 eine Mischung aus schwarz und weiss, beim Prüfkörper Nr 4 aber eine sehr gleichmässige Weissfärbung (vergleiche Abb. 4.2.2 bzw. Anhang III.3). Dies ist für Nr. 4 mit dem Phasenbild der Lock-in Thermografie (vergleiche Abb. 5.3.3) konsistent, das nur geringfügige Unterschiede in der Schweissnaht zeigt. Allerdings sind auch dort einzelne Bereiche mit leicht unterschiedlicher Phase erkennbar, aber der Phasenunterschied beträgt wie im Fall der PVC-Dichtungsbahnen nur wenige Grad. Bei Prüfmuster Nr. 2 zeigt das Lock-in Thermografie-Bild auch nur geringe Variation bezüglich Phasenwinkel, trotz der möglichen Variation im Schälwiderstand. Somit wird der Unterschied im Schälwiderstand

zwischen den beiden Prüfmustern von der Lock-in Thermografie nicht im erwarteten Mass hervorgehoben.

Da im Laborversuch unter kontrollierten und vergleichsweise idealen Messbedingungen keine eindeutige Korrelation zwischen Schälzugwiderstand und Lock-in Thermografie-Messung nachgewiesen werden kann, werden die Perspektiven für eine Nutzung dieses Verfahrens unter Baustellenbedingungen prinzipiell als eher ungünstig beurteilt. Dies wird im folgenden Abschnitt noch ausführlich diskutiert.

6 Perspektiven für zerstörungsfreien Nachweis der Güte von Schweissnähten

6.1 Impuls- und Lock-in Thermografie

Schweissnähte thermoplastischer Folien aus unterschiedlichen Materialien (Polyethylen und PVC) mit unterschiedlicher Farbe bzw. optischen Eigenschaften wurden im Labor-massstab und unter Laborbedingungen mittels Impuls- bzw. Lock-in Thermografie geprüft. Die im vorliegenden Bericht dokumentierten und diskutierten Ergebnisse zeigen:

- Die Breite der haftenden Schweissnaht konnte im Laborversuch mit Thermografie berührungslos überprüft und an Prüfmustern von ca. 40 cm x 40 cm mit Schweissnahtbreiten von etwa 20 – 30 mm auf etwa 1 - 2 mm genau bestimmt werden
- Der Nachweis simulierter Defekte (lokal eingebrachte Fremdkörper) in einem Typ Prüfmuster (von Leister AG zu Verfügung gestellt) war mittels Impuls- und Lock-in Thermografie möglich
- Ebenso war die Unterscheidung zwischen haftender und lose aufliegender bzw. leicht absteher Folie (Überlapp) auf der Rückseite der durch Schweisser ohne Erfahrung (in einem Studentenpraktikum) hergestellten Prüfmuster eindeutig möglich. Dabei lieferten Impuls- und Lock-in Thermografie etwa vergleichbare Auflösung bzw. Nachweiswahrscheinlichkeit
- Unterschiedliche Qualität der Haftung der Schweissnaht (bestimmt mit Schälzug- oder Scherwiderstandsversuch) von PVC- und Polyethylen-Folien ergab in einem Blindversuch mit Lock-in Thermografie keine eindeutigen Hinweise auf diese Unterschiede

Damit besteht eine eher geringe Wahrscheinlichkeit, dass Lock-in Thermografie auf der Baustelle erfolgreich für eine Beurteilung der Qualität der Schweissnaht bezüglich ihrer Haftfestigkeit und somit der Beständigkeit eingesetzt werden kann. Wenn es nur um eine Beurteilung der Breite der Schweissnaht bzw. eine quantitative Bestimmung der Breite der haftenden Schweissnaht geht, kann Lock-in Thermografie eingesetzt werden. Um diesen Ansatz zur Anwendungsreife zu entwickeln und speziell den Einfluss der Umgebungsbedingungen auf der Baustelle abzuschätzen, sind aber weitere, möglicherweise umfangreiche Versuche notwendig. Im Tunnel ist es vermutlich deutlich schwieriger, mit den Laborprüfungen vergleichbare Ergebnisse bezüglich Auflösung (Breite der Schweissnaht) zu erzielen. Ein wichtiger Faktor spielt dabei voraussichtlich die Topografie des Untergrunds (Korrugation), welche unterschiedliche Wärmeausbreitung bewirken kann. Ob das Kosten-Nutzen-Verhältnis für eine Aussage über die Schweissnahtbreite ohne quantitative und sogar ohne qualitative Beurteilung der Güte der Schweissnaht bezüglich Haftung und somit bezüglich Langzeitverhalten den Aufwand für die weitere Entwicklung des Verfahrens für den Einsatz im Tunnel rechtfertigen kann, ist eher fraglich. Die ökonomische Beurteilung dieses Ansatzes ist aber nicht Gegenstand des vorliegenden Projekts, bei dem es allein um technische Machbarkeit ging.

Die Qualität der Schweissnaht könnte eventuell auch direkt während der Herstellung über Thermografie-Bilder, die unter Verwendung der Prozesswärme aufgenommen werden, bestimmt werden. Diese Möglichkeit war in Gesprächen von Vertretern der Firma Leister AG als potenziell interessant erwähnt worden. Durch die bei Handschweißungen oft vorliegenden, komplexen geometrischen Verhältnisse (Untergrund bzw. Topografie) muss der Wärmeeintrag oft deutlich variiert werden, um eine optimale Schweissung zu erhalten. Damit bestehen vermutlich kaum genügend reproduzierbare Verhältnisse für Thermografie-Aufnahmen und deren Bewertung. Im Rahmen des Projekts sind dazu keine Versuche gemacht worden.

Neuere Literatur (siehe z.B. [42]) weist darauf hin, dass mit entsprechenden Signal- bzw. Bildverarbeitungsalgorithmen die Bildqualität (Signal-Rausch-Verhältnis) der Lock-in Thermografie-Bilder verbessert werden kann. Ob mit solchen Ansätzen Unterschiede in

der Festigkeit bzw. Haftung der Schweissnaht nachgewiesen werden können, bleibt offen. Die bisher verwendeten Bildverarbeitungsalgorithmen (z.B. Differenzbildung) reichen dafür nicht aus. Der Aufwand für Entwicklung und Validierung neuer Algorithmen ist relativ gross. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass sich, wie bereits mehrfach erwähnt, die Aufnahmebedingungen auf der Baustelle in mehreren Aspekten deutlich von Laborversuchen unterscheiden (z.B. Umgebungstemperatur, Form der Schweissnaht, Korrugation des Untergrunds).

Ultraschall-angeregte Lock-In Thermografie für Defektnachweis wurde an metallischen Prüfmustern untersucht [43]. Diese Methode wurde auch für den Nachweis sich berührender Ablösungen („kissing bonds“) in einer Sandwichstruktur genutzt [44]. Diese Laborversuche ergaben vielversprechende Ergebnisse. Im Fall von Schweissnähten von Kunststoff-Dichtungsbahnen wird das Verfahren aber kaum bessere Ergebnisse als die „konventionell“ mit Wärmelampe angeregte Lock-in Thermografie liefern, da das weiche, dämpfende in die Dichtungsbahn eingelegte Gewebe mit Ultraschall nicht ausreichend erwärmt werden kann.

Im Rahmen thermografischer Methoden bietet frequenzmodulierte Thermografie (siehe z.B. [45,46]) einen möglichen, weiteren Ansatz, der aber nicht untersucht worden ist. Ob dieser eine Unterscheidung der Haftfestigkeit von Schweissnähten liefern kann, ist daher unklar. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird im in der Literatur untersuchten Beispiel (CFK-Laminat mit partiell durch die Dicke des Laminats gefrästen Löchern) durch die Frequenzmodulation zwar verbessert, aber ob das bei unterschiedlicher Morphologie der Schweissnaht und daraus resultierenden Haftungsunterschieden nachweisbare Phasenunterschiede liefert, kann ohne Experimente nicht beurteilt werden.

6.2 Andere zerstörungsfreie Prüfverfahren

Mögliche Perspektiven für weitere Untersuchungen bieten neuere Entwicklungen anderer zerstörungsfreier Prüfmethode, die aber im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht durchgeführt werden konnten. Die Gründe dafür waren, dass weitere Geräte hätten beschafft werden müssen und der experimentelle Aufwand den geplanten Projektumfang überschritten hätte.

Zwei dieser Methoden werden kurz erwähnt. In neuerer Literatur werden Technologien beschrieben (vgl. Tabelle 3.3.1), die nicht Thermografie bzw. Infrarot-Strahlung nutzen, mit denen aber möglicherweise die Haftfestigkeit von Schweissnähten qualitativ oder sogar quantitativ ermittelt werden kann.

- Elektromagnetische Strahlung im THz-Frequenzbereich ist in den letzten Jahren vor allem im Zusammenhang mit sicherheitsrelevanten Kontrollen von Personen und Objekten (z.B. mittels THz-Scanner [47]) intensiv untersucht worden. Eine Gruppe beschreibt Anwendungen von THz-Strahlung auf Schweissnähte thermoplastischer Rohre [21-23]. Diese Versuche bzw. Ergebnisse lassen sich eventuell auf Schweissnähte thermoplastischer Dichtungsbahnen übertragen. Ob das Problem des Nachweises anwendungsrelevanter Festigkeitsunterschiede in Laborversuchen bzw. unter Baustellenbedingungen mit diesem Verfahren gelöst werden könnte, müsste in einem separaten Projekt untersucht werden. Es gibt nun mobile Kamerasysteme für THz-Scanner-Anwendungen [48,49]. Die erreichbare Auflösung wird in einem Beispiel [48] mit ca. 2 cm bei 8 Metern Distanz zum untersuchten Objekt, und das Gewicht eines mobilen Geräts mit 11 Pfund (rund 5 kg) angegeben [49]. Da diese Technologie für sicherheitsrelevante Kontrollen wichtig ist, kann voraussichtlich mit weiteren technischen Fortschritten gerechnet werden. Ob diese in Reduktion der Masse, des Gewichts oder Kosten der Geräte, oder in erhöhter Auflösung bzw. gleichzeitiger Verbesserung mehrerer Eigenschaften resultieren, bleibt abzuwarten. Die Technologieentwicklung kann verfolgt und zu einem späteren Zeitpunkt ein entsprechendes Projekt zur Abklärung der Machbarkeit für die Prüfung von Schweissnähten geplant werden.
- Ein anderer auf Magnetresonanz-Verfahren beruhender Ansatz ist die Nutzung mobiler Kernspinresonanz (Englisch: „Nuclear Magnetic Resonance“, abgekürzt NMR) [24,25]. Ähnlich zum Fall elektromagnetischer THz-Strahlung sind die in der Literatur

beschriebenen Anwendungen mobiler NMR nicht direkt auf die Schweissnahtprüfung thermoplastischer Dichtungsbahnen übertragbar. Daher dieselbe Schlussfolgerung wie im ersten Fall: Ob das Problem des Nachweises anwendungsrelevanter Festigkeitsunterschiede in Laborversuchen bzw. unter Baustellenbedingungen mit diesem Verfahren gelöst werden könnte, müsste wieder in einem separaten Projekt untersucht werden.

Allgemein kann aber gesagt werden, dass zurzeit (Herbst 2012) für Schweissnahtprüfung auf Baustellen mit THz-Strahlung und mobiler NMR kaum geeignete, kommerzielle Geräte direkt verfügbar sind. Entsprechende Projekte sollten daher, analog zum vorliegenden Thermografie-Projekt, zwei-stufig, d.h. zuerst mit Laborversuchen und dann Prüfungen unter Baustellenbedingungen geplant werden.

Anhänge

I	Normenliste	49
I.1	Liste der Schweizer Normen und Richtlinien.....	49
I.2	Liste der DVS-Richtlinien.....	49
I.3	Liste der ISO-Normen und Richtlinien.....	50
I.4	Liste der CEN-Normen und Richtlinien	51
I.5	Liste der ASTM-Normen und Richtlinien (Sub-Committee D35.10).....	52
II	Dokumentation Messkurven.....	54
II.1	Messkurven Schälwiderstand (Zugversuch).....	54
II.2	Messkurven Scherwiderstand (Zugversuch)	54
III	Fotografische Dokumentation und Thermografie-Bilder des Prüfmusters der Firma Leister AG	55
III.1	Fotos der Defekte im Prüfmuster der Firma Leister AG	55
III.2	Ausgewählte Thermografie-Bilder des Prüfmusters der Firma Leister AG	58
III.3	Ausgewählte Fotos der Zugversuche (Schälwiderstand und Scherwiderstand).....	59

I Normenliste

I.1 Liste der Schweizer Normen und Richtlinien

Tabelle I.1 Schweizer Normen und Richtlinien

Dokument	Titel	Ausgabe	Bemerkungen
SIA 272	Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagbau	2009	-
SIA 274	Abdichtung von Fugen in Bauten - Projektierung und Ausführung	2010	-
SIA V280	Kunststoff-Dichtungsbahnen (Polymer-Dichtungsbahnen) Anforderungswerte und Materialprüfung – Prüfung Nr. 16 Nahtfestigkeit	1996 ersetzt durch SIA 280:2009	Zerstörende Prüfung
SIA 280	Kunststoffdichtungsbahnen – Kunststoff- und Elastomerbahnen – Geosynthetische Dichtungsbahnen, Produkte- und Bauteilprüfung, Anwendungsgebiete	2009	Keine Prüfung im Dokument beschrieben, nur Verweis auf Anforderungs- und Prüfnormen
SIA 280.316	Abdichtungsbahnen –Bestimmung des Scherwiderstandes der Fügenähte – Teil 2: Kunststoff-und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen	2001	Identisch mit EN 12317-2
SIA 280.321	Abdichtungsbahnen –Bestimmung des Schälwiderstandes der Fügenähte – Teil 2: Kunststoff-und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen	2001	Identisch mit EN 12316-2

I.2 Liste der DVS-Richtlinien

Tabelle I.2 DVS Richtlinien

Dokument	Titel	Ausgabe	Bemerkungen
DVS 2201-1	Prüfen von Halbzeug aus Thermoplasten, Grundlagen, Hinweise	1989-02-00	Mehrere Beiblätter
DVS 2201-2	Prüfen von Halbzeug aus Thermoplasten, Schweißseignung – Prüfverfahren - Anforderungen	1985-07-00	-
DVS 2202-1	Fehler an Schweißverbindungen aus thermo-plastischen Kunststoffen – Merkmale, Beschreibung, Bewertung Heizwendelschweißen Heizelementmuffenschweißen	2006-07-00	Beiblatt 2 (2011) Beiblatt 3 (2011)
DVS 2203-1	Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Röhren aus thermoplastischen Kunststoffen, Prüfverfahren, Anforderungen Kurzzeitzug-Schweißfaktor Zeitstandzug-Schweißfaktor Anforderungen im technologischen Biegeversuch Anforderungen an Scher- und Schälversuche	2003-01-00	Zerstörungsfreie und zerstörende Prüfungen Beiblatt 1 (2010) Beiblatt 2 (2009) Beiblatt 3 (2003) Beiblatt 4 (2008)
DVS 2203-2	Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen, Zugversuch Tieftemperatur-Zugversuch	2010-08-00	Zerstörende Prüfung Beiblatt 1 (2010)

DVS 2203-3	Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen, Schlagzugversuch	2011-04-00	Zerstörende Prüfung
DVS 2203-6	Prüfen von Fügeverbindungen aus polymeren Werkstoffen, Scher- und Schälversuche Torsionsscher- und Radialschälversuch Klebverbindungen im Scher- und Schälversuch	2008-01-00	Zerstörende Prüfung Beiblatt 1 (2008) Beiblatt 2 (2008)
DVS 2211	Schweißzusätze für thermoplastische Kunststoffe, Geltungsbereich, Kennzeichnung, Anforderung, Prüfung	2005-04-00	Hinweise zur Qualität von Schweißzusätzen
DVS 2212-3	Prüfung von Kunststoffschweißern – Prüfgruppe III – Bahnen im Erd- und Wasserbau	1994-10-00	-
DVS 2219-2	Thermokontaktschweißen von thermoplastischen Folien (Polyolefine)	2005-04-00	-
DVS 2225-1	Fügen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen im Erd- und Wasserbau; Schweißen, Kleben, Vulkanisieren	1991-02-00	-
DVS 2225-2	Fügen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen im Erd- und Wasserbau - Baustellenprüfungen	1992-08-00	Zerstörungsfreie und zerstörende Prüfungen
DVS 2225-3	Fügen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen im Erd- und Wasserbau – Anforderungen an Schweißmaschinen und Schweißgeräte	1997-07-00	-
DVS 2225-4	Schweißen von Dichtungsbahnen aus Polyethylen (PE) für die Abdichtung von Deponien und Altlasten	1996-02-00	-
DVS 2225-5	Schweißen von Dichtungsbahnen aus thermoplastischen Kunststoffen im Tunnelbau	2011-03-00	-
DVS 2226-1	Prüfen von Fügeverbindungen an Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen – Prüfverfahren, Anforderungen	2000-09-00	-
DVS 2226-2	Prüfen von Fügeverbindungen an Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen - Zugscherversuch	1997-07-00	Zerstörende Prüfung
DVS 2226-3	Prüfen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen - Schälversuch	1997-07-00	Zerstörende Prüfung
DVS 2226-4	Prüfen von Fügeverbindungen an Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen – Zeitstand-Zugversuch an Polyethylen	2000-11-00	Zerstörende Prüfung
DVS 2227-1	Schweißen von Halbzeugen aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) für die Abdichtung von Betonbauwerken im Bereich des Grundwasserschutzes und zum Korrosionsschutz	2004-08-00	-
DVS 2230-1	Schweißen von Kunststoffserienteilen – Qualitätssicherung, Prüfung	2003-07-00	-

I.3 Liste der ISO-Normen und Richtlinien

Tabelle I.3 ISO-Normen und Richtlinien

Dokument	Titel	Ausgabe	Bemerkungen
ISO 10319	Geosynthetics – Wide-width tensile test	2008	Zerstörende Prüfung

ISO 10321	Geosynthetics – Tensile test for joints/seams by wide-width strip method	2008	Nicht anwendbar auf polymere oder bituminöse Sperren
ISO 13426-1	Geotextiles and geotextile-related products – Strength of internal structural junctions – Part 1: Geocells	2003	Zerstörende Prüfung
ISO 13426-2	Geotextiles and geotextile-related products – Strength of internal structural junctions – Part 2: Geocomposites	2005	Zerstörende Prüfung
ISO 13431	Geotextiles and geotextile-related products – Determination of tensile creep and creep rupture behavior	1999	Zerstörende Prüfung

I.4 Liste der CEN-Normen und Richtlinien

Tabelle I.4 CEN-Normen und Richtlinien

Dokument	Titel	Ausgabe	Bemerkungen
EN 1850-2	Abdichtungsbahnen – Bestimmung sichtbarer Mängel – Teil 2: Kunststoffbahnen und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen	2001	Teil 1 Bitumendichtungsbahnen
EN 12316-2	Abdichtungsbahnen – Bestimmung des Schälwiderstandes der Fügenähte – Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen	2000	Zerstörende Prüfung Teil 1 Bitumendichtungsbahnen
EN 12317-2	Abdichtungsbahnen – Bestimmung des Scherwiderstandes der Fügenähte – Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen	2010	Zerstörende Prüfung Teil 1 Bitumendichtungsbahnen
EN 13252	Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in drainage systems	2000	Amendment / A1 (2005)
EN 13256	Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in the construction of tunnels and underground structures	2000	Amendment / AC (2003) und /A1 (2005)
EN 13265	Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in liquid waste containment projects	2000	Amendment / AC (2003) und /A1 (2005)
EN 13491	Geosynthetic barriers – Characteristics required for use as a fluid barrier in the construction of tunnels and underground structures	2004	Amendment / A1 (2006) Siehe auch SIA 272, 274
EN 13956	Flexible sheet for waterproofing – Plastic and rubber sheets for roof waterproofing – Definitions and characteristics	2005	Amendment / AC (2006)

I.5 Liste der ASTM-Normen und Richtlinien (Sub-Committee D35.10)

Tabelle I.5 ASTM-Normen und Richtlinien

Dokument	Titel	Ausgabe	Bemerkungen
ASTM D4437	Standard Practice for Non-destructive Testing (NDT) for Determining the Integrity of Seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes	2008	Verweist auf ASTM D5641, D5820, D6365, D7006, D7177
ASTM D4545	Standard Practice for Determining the Integrity of Factory Seams Used in Joining Manufactured Flexible Sheet Geomembranes	1986 (1999)	2008 ersatzlos zurückgezogen
ASTM D5641	Standard Practice for Geomembrane Seam Evaluation by Vacuum Chamber	1994 (2011)	-
ASTM D5820	Standard Practice for Pressurized Air Channel Evaluation of Dual Seamed Geomembranes	1995 (2011)	Verweist auf ASTM D4491 *
ASTM D6214	Standard Test Method for Determining the Integrity of Field Seams Used in Joining Geomembranes by Chemical Fusion Method	1998 (2008)	Stellt keine Schweißnaht-Prüfung dar
ASTM D6365	Standard Practice for the Nondestructive Testing of Geomembrane Seams using the Spark Test	1999 (2011)	Verweist auf ASTM D4491 *
ASTM D6392	Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams Produced Using Thermo-Fusion Methods	2008	In Revision WK29716 ab 20.07.2010
ASTM D6747	Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Detection of Potential Leak Paths in Geomembranes	2004	In Revision WK27739 ab 18.02.2010
ASTM D7002	Standard Practice for Leak Location on Exposed Geomembranes Using the Water Puddle System	2010	Auch auf Nähte anwendbar
ASTM D7006	Standard Practice for Ultrasonic Testing of Geomembranes	2003 (2008)	-
ASTM D7007	Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials	2009	-
ASTM D7177	Standard Specification for Air Channel Evaluation of Polyvinyl Chloride (PVC) Dual Track Seamed Geomembranes	2005 (2010)	-
ASTM D7240	Standard Practice for Leak Location using Geomembranes with an Insulating Layer in Intimate Contact with a Conductive Layer via Electrical Capacitance Technique (Conductive Geomembrane Spark Test)	2006 (2011)	-
ASTM D7272	Standard Test Method for Determining the Integrity of Seams Used in Joining Geomembranes by Pre-manufactured Taped Methods	2006 (2011)	-
ASTM D7703	Standard Practice for Electrical Leak Location on Exposed Geomembranes Using the Water Lance System	2011	-
ASTM D7747	Standard Test Method for Determining Integrity of Seams Produced Using Thermo-Fusion Methods for Reinforced Geomembranes by the Strip Tensile Method	2011	Zerstörende Prüfung

ASTM D7749	Standard Test Method for Determining Integrity of Seams Produced Using Thermo-Fusion Methods for Reinforced Gemembranes by the Grab Method	2011	Zerstörende Prüfung
ASTM WK22761	New Guide for Selecting Test Methods for Geomembrane Seams	In Vorbereitung	ab 29.01.2009
ASTM WK34962	New Guide for Limitations with the different Techniques for Electrical Detection of Potential Leaks Paths in Geomembranes	In Vorbereitung	ab 17.10.2011
* ASTM D4491 - 99a(2009) Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity			

Bitte beachten: ASTM WK24606 „New Test Method for Determining Integrity of Seams Produced Using Thermo-Fusion Methods for Reinforced Geomembranes by the Strip Tensile Method“ behandelt ebenfalls zerstörende Prüfung.

II Dokumentation Messkurven

II.1 Messkurven Schälwiderstand (Zugversuch)

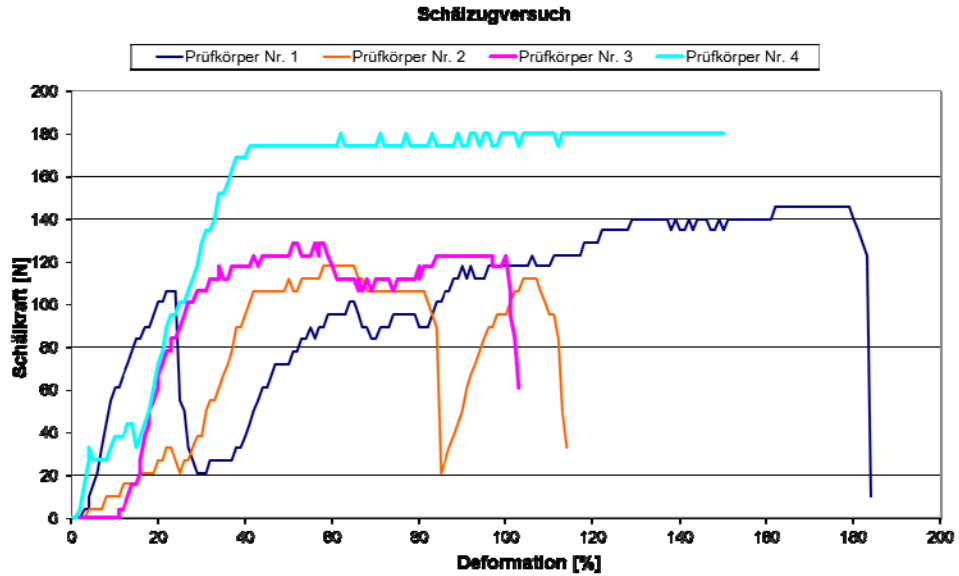


Abb. II.1.1 Messkurven des Versuchs zur Bestimmung des Schälwiderstands (Schälzugversuch) für die vier Prüfmuster, die Messung an Prüfkörper Nr. 4 wurde bei einer Dehnung von 150% manuell gestoppt.

II.2 Messkurven Scherwiderstand (Zugversuch)

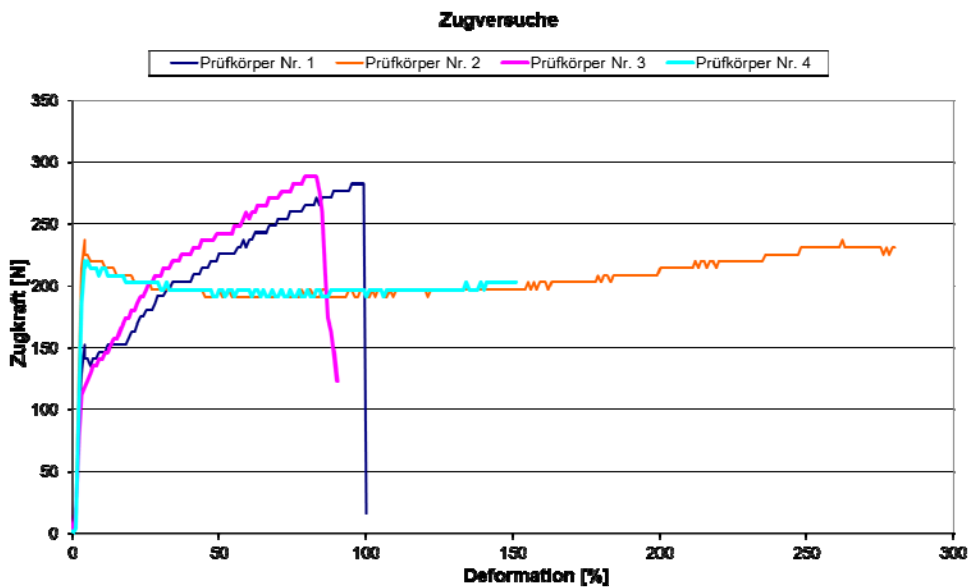


Abb. II.2.1 Messkurven des Versuchs zur Bestimmung des Scherwiderstands (Zugversuch) für die vier Prüfmuster, die Messungen an Prüfkörper Nr. 3 und Nr. 4 wurde bei einer Dehnung von 150% bzw. 280% manuell gestoppt.

III Fotografische Dokumentation und Thermografie-Bilder des Prüfmusters der Firma Leister AG

III.1 Fotos der Defekte im Prüfmuster der Firma Leister AG

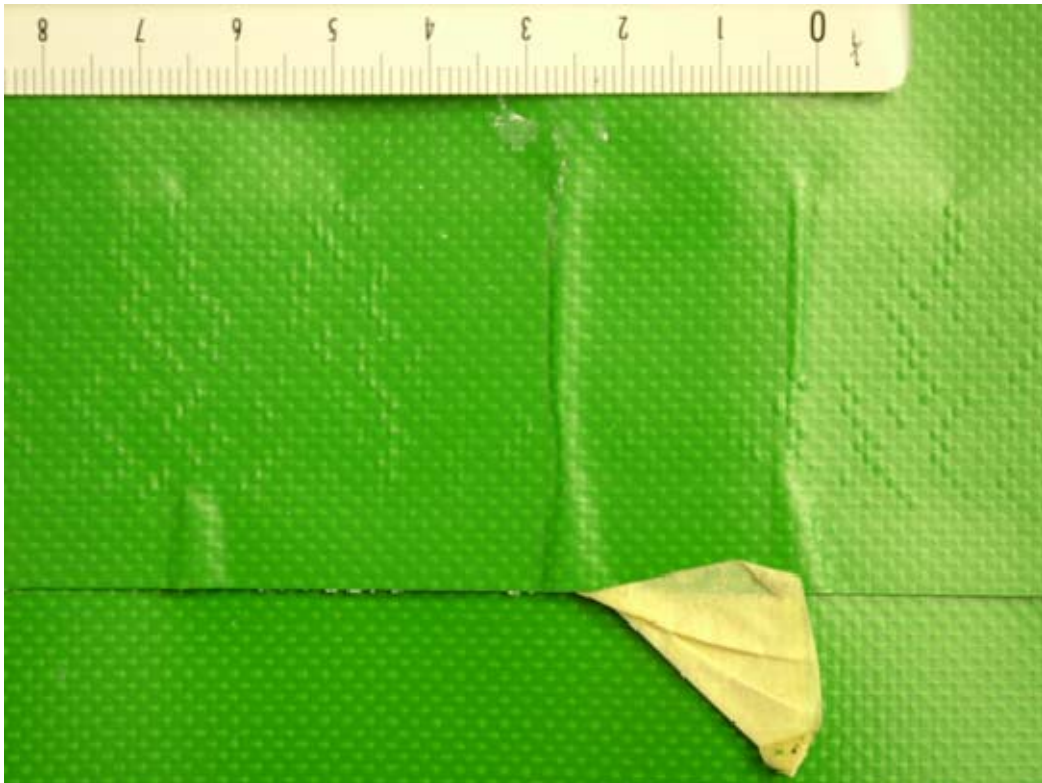


Abb. III.1.1 Prüfmuster Leister AG, Foto Defekt Nr. 1.

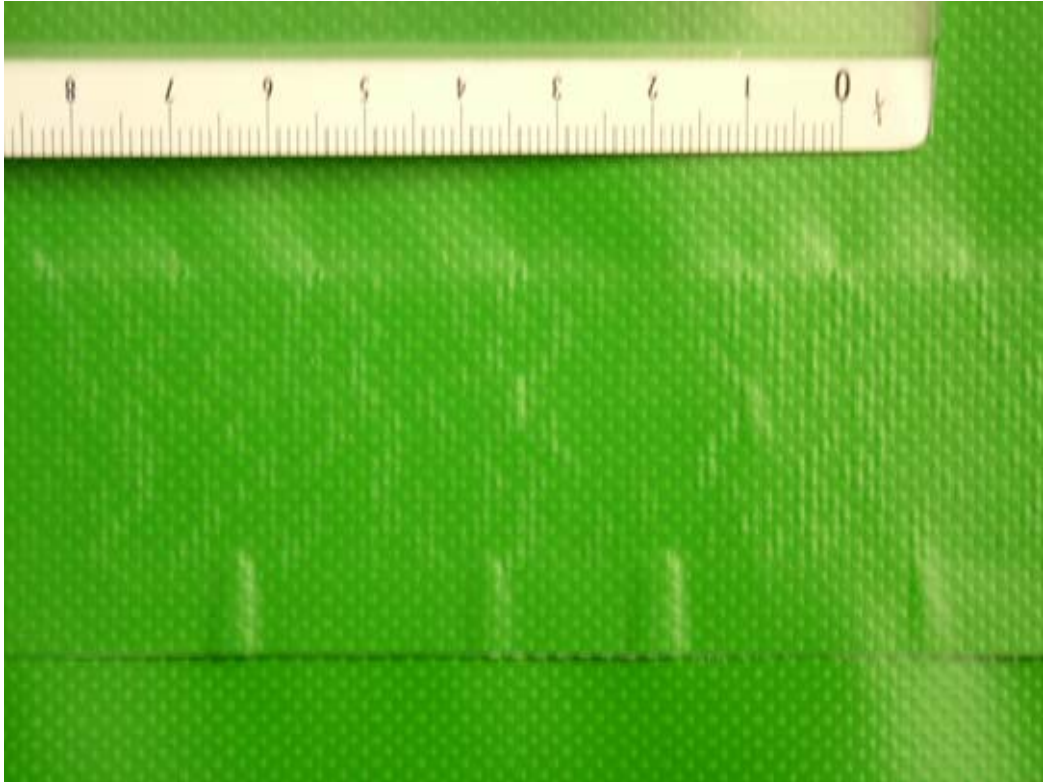


Abb. III.1.2 Prüfmuster Leister AG, Foto Defekt Nr. 2.

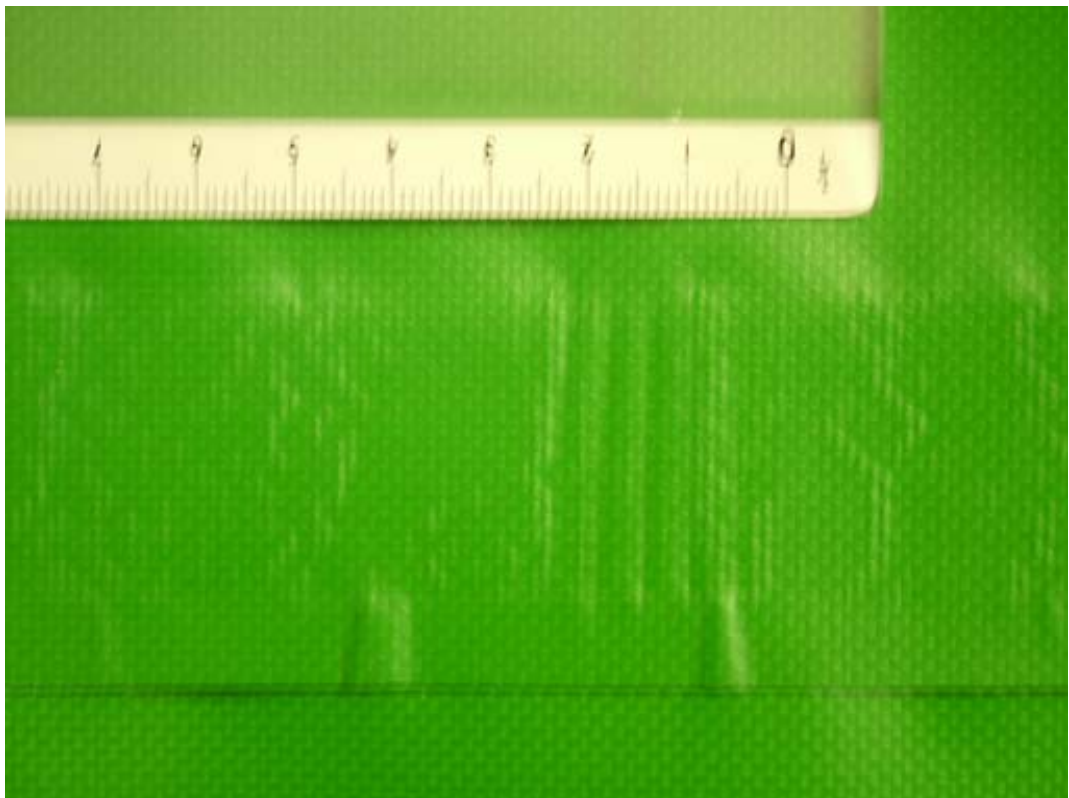


Abb. III.1.3 Prüfmuster Leister AG, Foto Defekt Nr. 3.

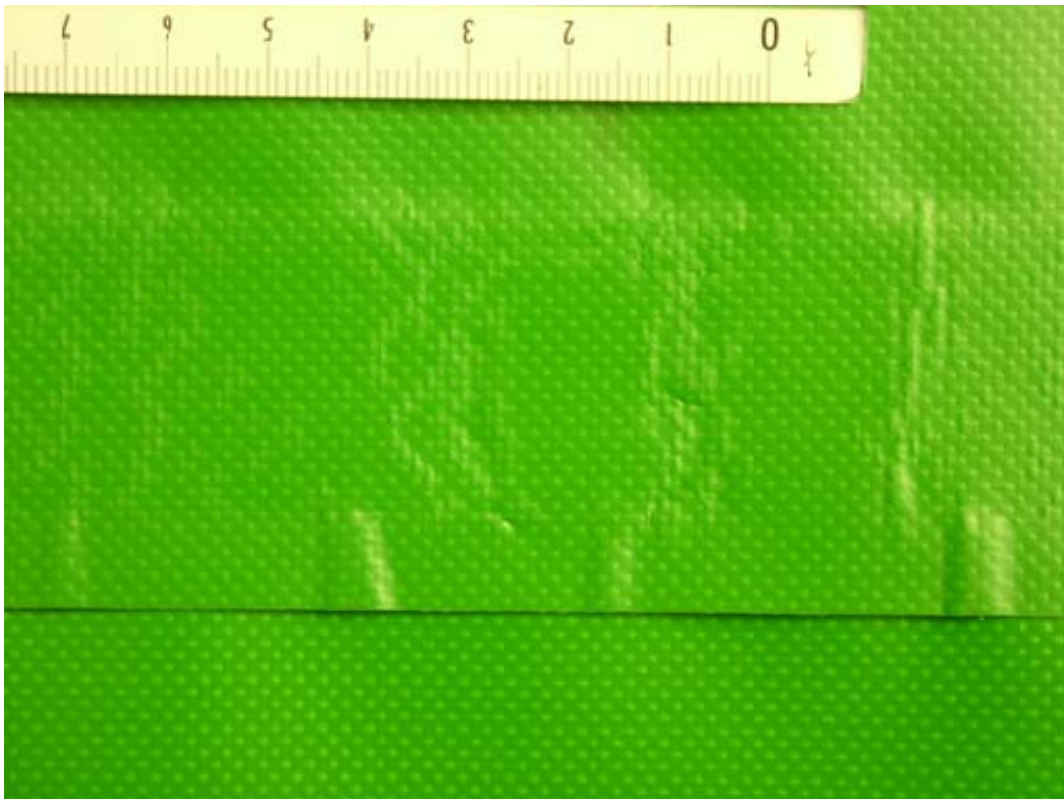


Abb. III.1.4 Prüfmuster Leister AG, Foto Defekt Nr. 4.

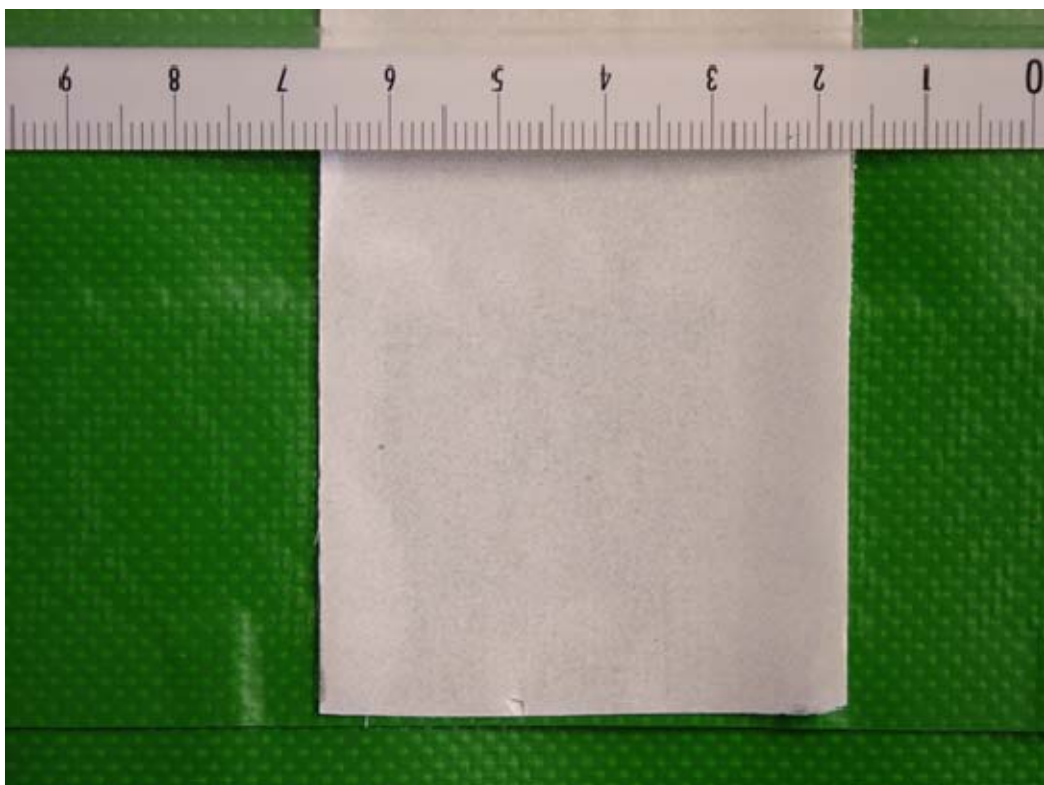


Abb. III.1.5 Prüfmuster Leister AG, Foto Defekt Nr. 5.

III.2 Ausgewählte Thermografie-Bilder des Prüfmusters der Firma Leister AG

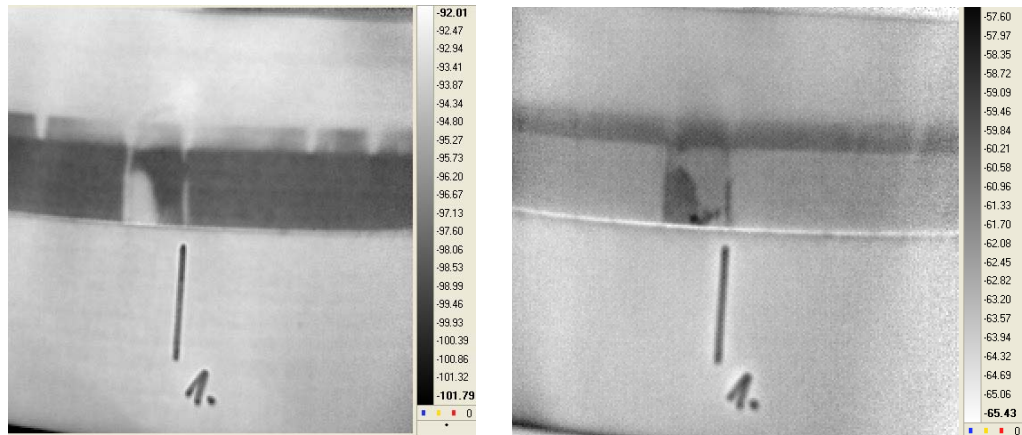


Abb. III.2.1 Prüfmuster Leister AG, Fehler 1: Lock-in Thermografie Phasenbilder mit (links) Frequenz 0.25 Hz, (rechts) 0.5 Hz.

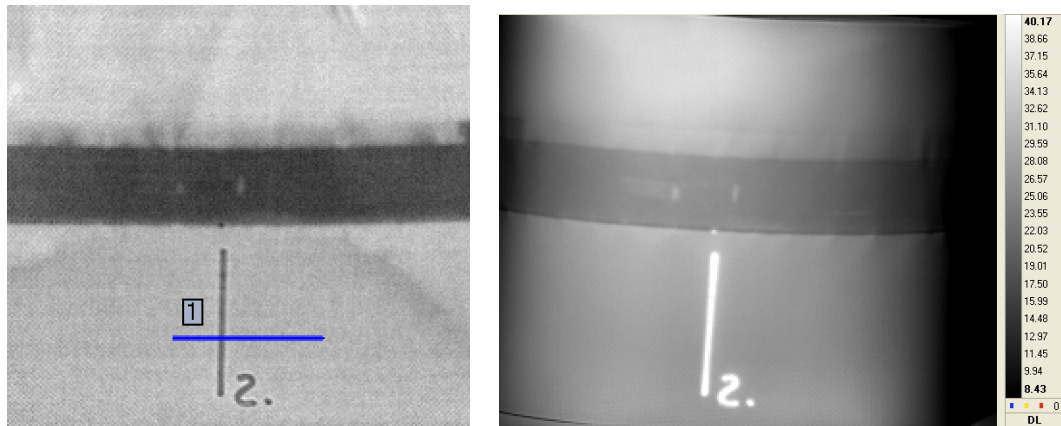


Abb. III.2.2 Prüfmuster Leister AG, Fehler 2: Impuls-Thermografie (links) Lock-in Thermografie (rechts, Frequenz 0.25 Hz).

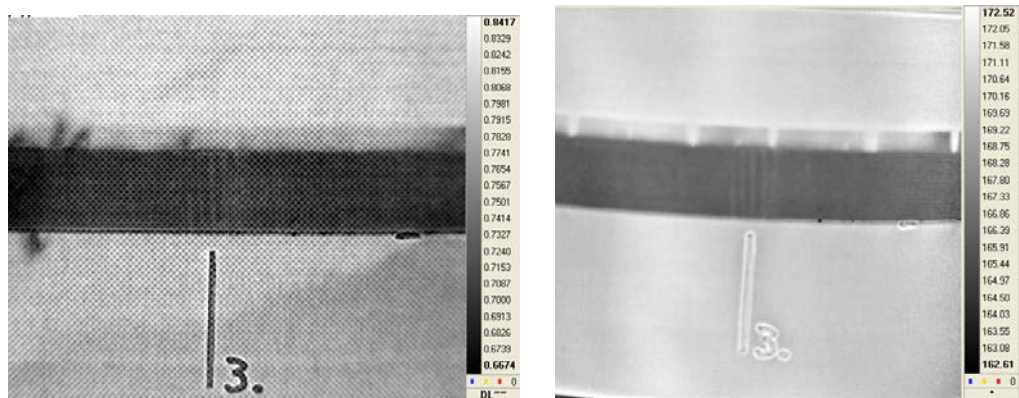


Abb. III.2.3 Prüfmuster Leister AG, Fehler 3: Impulsthermografie (links, 0.8 Sekunden) Phasenbild Lock-in Thermografie (rechts, Frequenz 1/6 Hz).

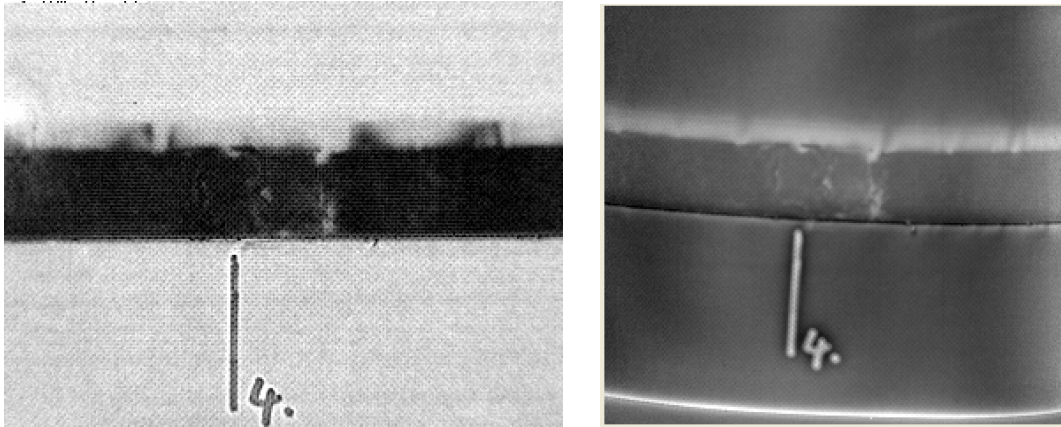


Abb. III.2.4 Prüfmuster Leister AG, Fehler 4: Impuls-Thermografie (links 0.96 Sekunden), Phasenbild Lock-in Thermografie (rechts, Frequenz 0.25 Hz).

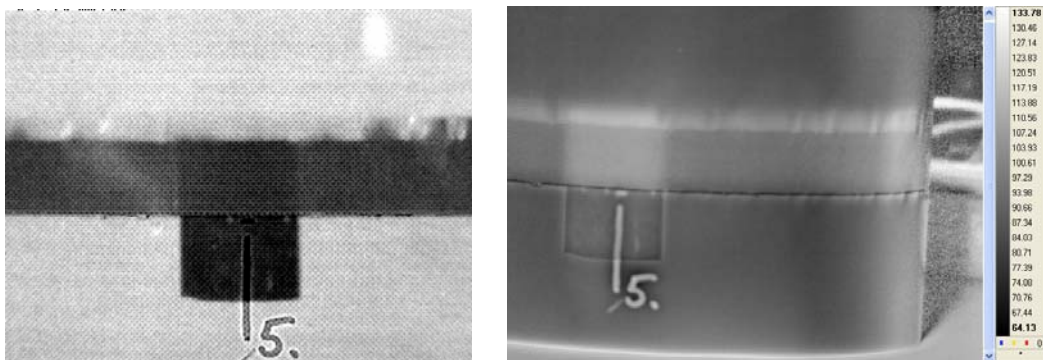
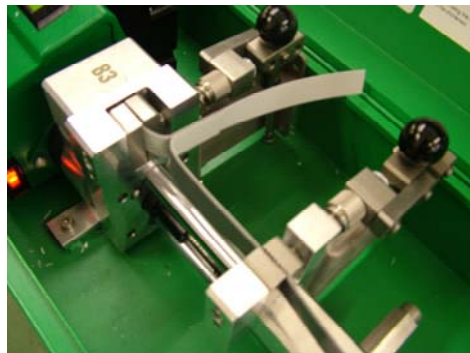
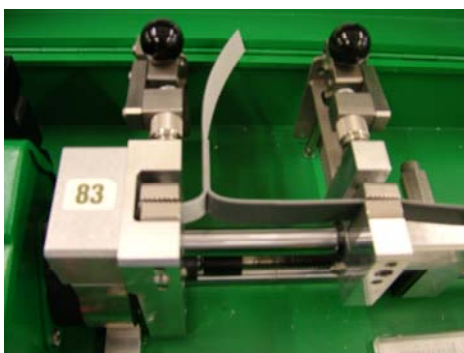


Abb. III.2.5 Prüfmuster Leister AG, Fehler 5: Impuls-Thermografie (links, 0.8 Sekunden), Phasenbild Lock-in Thermografie (rechts, Frequenz 0.25 Hz).

III.3 Ausgewählte Fotos der Zugversuche (Schälwiderstand und Scherwiderstand)



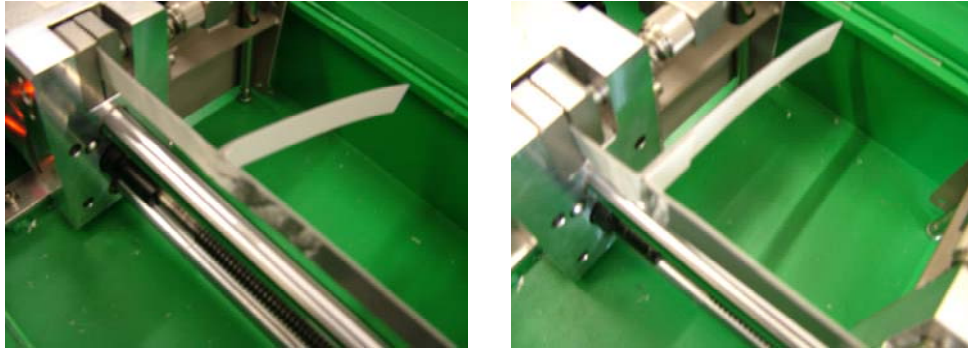


Abb. III.3.1 Empa-Prüfmuster Schweißnähte unterschiedlicher Qualität: Prüfmuster Nr. 1: Schälzugversuch

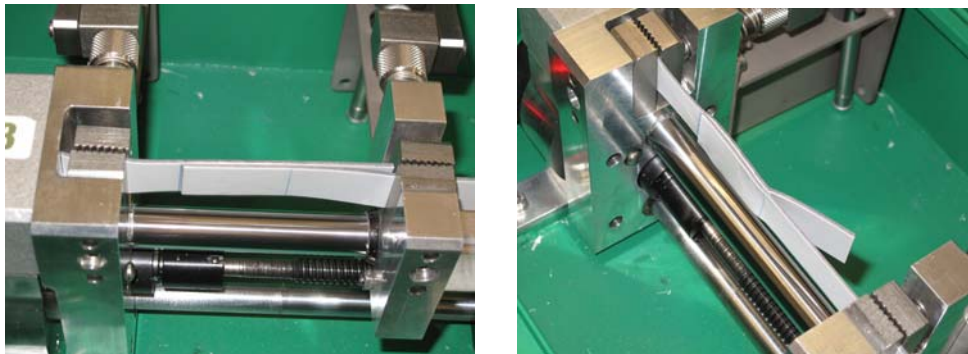


Abb. III.3.2 Empa-Prüfmuster Schweißnähte unterschiedlicher Qualität: Prüfmuster Nr. 1: Scherwiderstandsbestimmung (Zugversuch)

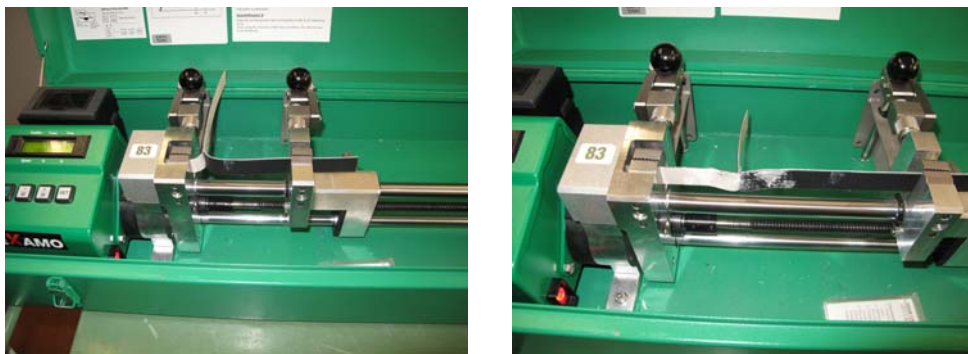


Abb. III.3.3 Empa-Prüfmuster Schweißnähte unterschiedlicher Qualität: Prüfmuster Nr. 2: Schälzugversuch

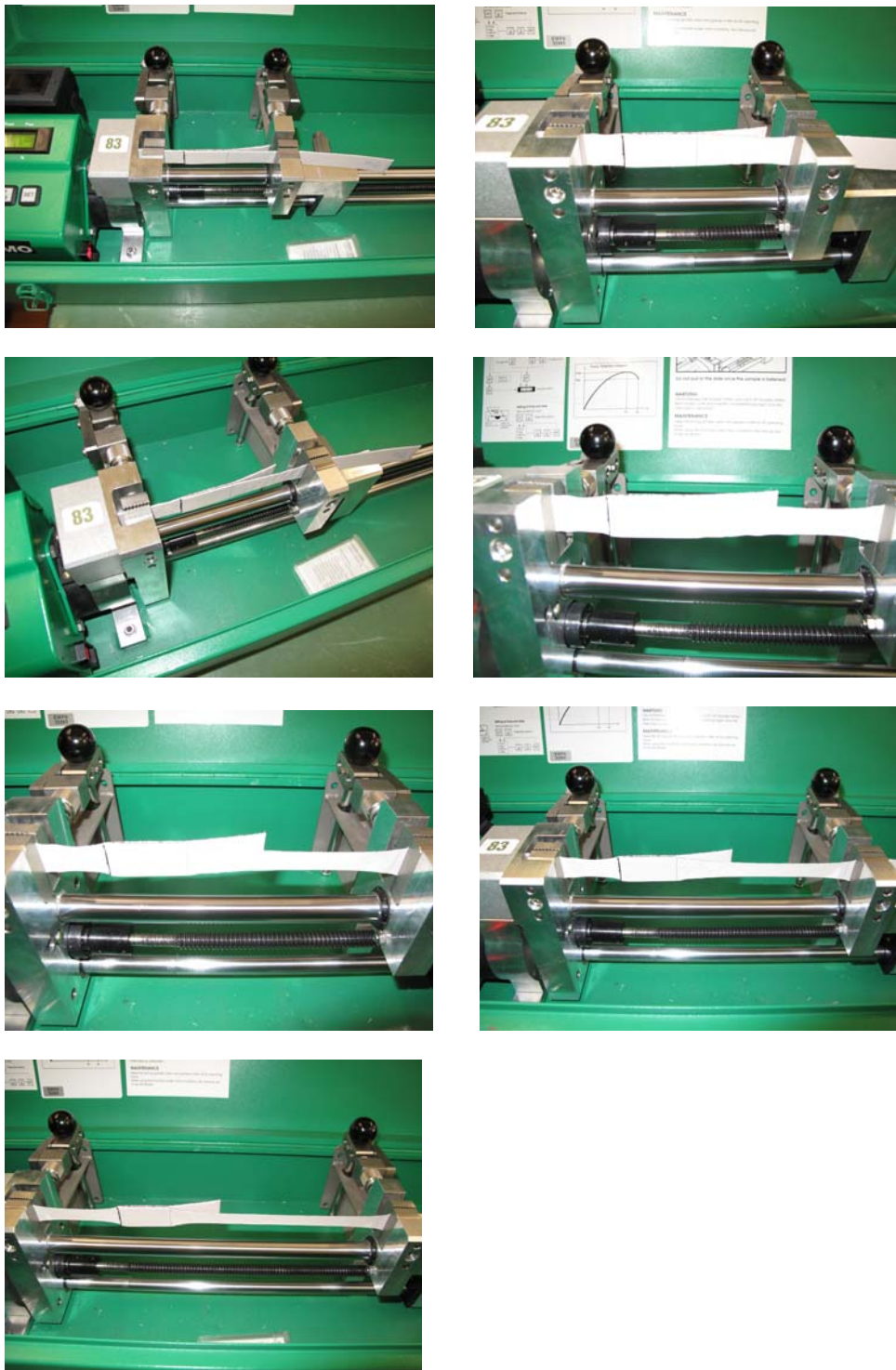


Abb. III.3.4 Empa-Prüfmuster Schweißnähte unterschiedlicher Qualität: Prüfmuster Nr. 2: Scherwiderstandsbestimmung (Zugversuch)



Abb. III.3.5 Empa-Prüfmuster Schweißnähte unterschiedlicher Qualität: Prüfmuster Nr. 3: Schälzugversuch

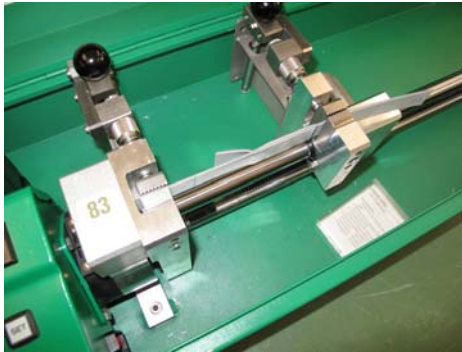


Abb. III.3.6 Empa-Prüfmuster Schweißnähte unterschiedlicher Qualität: Prüfmuster Nr. 3: Scherwiderstandsbestimmung (Zugversuch)





Abb. III.3.7 Empa-Prüfmuster Schweißnähte unterschiedlicher Qualität: Prüfmuster Nr. 4: Schälzugversuch



Abb. III.3.8 Empa-Prüfmuster Schweißnähte unterschiedlicher Qualität: Prüfmuster Nr. 4: Scherwiderstandsbestimmung (Zugversuch)

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
AG	Aktien-Gesellschaft
ASTRA	Bundesamt für Strassen
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Comité Européen de Normalisation
CFK	Kohlenstoff-Faserverstärkter Kunststoff
cm	Zentimeter
CNC	Computerized Numerical Control
DATEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EN	Europäische Norm
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
FGU	Fachgruppe Untertagbau
HDPE	High Density Poly-Ethylene
Hz	Hertz
KDB	Kunststoff-Dichtungs-Bahn(en)
PE-HD	Poly-Ethylene High Density
ESPI	Electronic Speckle Pattern Interferometry
MRI	Magnetic Resonance Imaging
mK	Milli-Kelvin
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
N	Newton
NEAT	Neue Eisenbahn Alpen-Transversalen
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
Nr.	Nummer
IIW	International Institute of Welding
InSb	Indium-Antimonid
ISO	International Organisation for Standardisation
PE	Poly Ethylen
PMMA	Poly Methyl Meth-Acrylat
PP	Poly-Propylen
PT	Penetration Testing
PVC	Poly-Vinyl-Chlorid
SBT	Strassen Brücken Tunnel
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
THz	Tera-Hertz
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute
WK	Work Item

Literaturverzeichnis

-
- [1] Peggs I. (1992) "Infrared thermography used to locate seam debonding", Geotechnical Fabrics Report, Vol. 10, No. 1, pp. 35
-
- [2] Müller W.W. (2007) "HDPE Geomembranes in Geotechnics", ISBN 978-3-540-37286-B, Springer
-
- [3] Corbet S.P., M. Peters (1996) "First Germany/USA Geomembrane Workshop", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 14, No. 12, pp. 647-726
-
- [4] Komiya T., H. Nakayama, T. Shimaoka, K. Inoue (2006) „Non-destructive test for geomembranes by visible near-infrared spectroscopy“ Geosynthetics, Vol. 1-4, pp. 373-377
-
- [5] Nakayama H., T. Shimaoka, T. Komiya, T. Sannou (2006) „Estimate of thermal stress of geomembrane using a thermal infrared imaging device“ Geosynthetics, Vol. 1-4, pp. 387-390
-
- [6] Nakayama H., T. Shimaoka, S. Ueda (2008) "Development of thermo-graph inspection for geomembrane seam evaluation" Proceedings of the 4th Asian-Regional Conference on Geosynthetics (Hsg. G.-X. Li, Y.-M. Gu, X.-W. Tang, ISBN 978-3-540-69312-3), Shanghai (China), pp. 110-113
-
- [7] Omar M., M. Hassan, K. Donohue, K. Saito, R. Alloo (2006) "Infrared thermography for inspecting the adhesion integrity of plastic welded joints" NDT&E International Vol. 39, No. 1, pp. 1-7
-
- [8] Brunner A.J., E. Hack, J. Neuenschwander (2004) „Nondestructive Testing“, Wiley Encyclopedia of Polymer Science and Technology, 3rd Edition (Hsg. Herman F. Mark), elektronische Version pp. 1-27
-
- [9] Brunner A.J., E. Hack, J. Neuenschwander (2007) „Nondestructive Testing“, Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Concise 3rd Edition (Hsg. Herman F. Mark), J. Wiley, pp. 747-751
-
- [10] Overmann L.K. (1990) "Geomembrane seam non-destructive tests: Construction quality control (CQC) perspective", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 9, No. 4-6, pp. 415-429
-
- [11] Koerner R.M., A.E. Lord Jr. (1990) „Nondestructive evaluation of geomembrane seams: Methods in development“, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 9, No. 4-6, pp. 431-443
-
- [12] Richardson G.N. (1990) "Nondestructive seam tests – a construction quality assurance (CQA) perspective", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 9, No. 4-6, pp. 445-450
-
- [13] Pfeleiderer K., J. Aufrecht, I. Solodov, G. Busse (2004) „Multi-frequency ultrasonic NDE for early defect recognition and imaging“, Ultrasonics Symposium, Vol. 1 (IEEE), pp. 693-696
-
- [14] Solodov I., D. Doering, K. Pfeleiderer, G. Busse (2006) „Linear and nonlinear NDE using air-coupled Lamb wave“, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vols. 25A and 25B (AIP Conference Proceedings, Vol. 820), p. 1492-1499
-
- [15] Menner P., H. Gerhard, G. Busse (2008) „New possibilities and applications of lockin-Speckle-interferometry for non-destructive testing of polymers“, in: Emerging Technologies in Non-Destructive Testing, Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences, pp. 45-51
-

-
- [16] Polimeno U., M. Meo, D.P. Almond (2009) "Smart nonlinear acoustic based structural health monitoring system", in: *Emboding intgelligence in structures and integrated systems* (Hsg. P. Vicenzini, F. Casciati), *Advances in Science and Technology*, Vol. 56, pp. 426-434
-
- [17] Ringermacher H.I. (2010) „NDE: Surfing the electromagnetic spectrum“, *Review of Progress in Quantittive Nondestructive Evaluation*, Vol. 29A and 29B (AIP Conference Proceedings, Vol. 1211), pp. 29-46
-
- [18] Zimdars D., J.S. White, G. Stuk, A. Chernovsky, G. Fichter, S. Williamson (2006) "Large area terahertz imaging and non-destructive evaluation applications", *Insight*, Vol. 48, No. 9, pp. 537-539
-
- [19] Zimdars D., G. Fichter, A. Chernovsky (2009) „Time domain terahertz computed axial tomography for non-destructive evaluation“, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 28A and 28B (AIP Conference Proceedings Vol. 1096), pp. 426-43
-
- [20] Madaras E.I., R.F. Anastasi, J.P. Seebo, G. Studor, D.L. McMakin, R. Nellums, W.P. Winfiree (2008) „The potential for imaging in situ damage in inflatable space structures“, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 27A and 27B (AIP Conference Proceedings Vol. 975), pp. 437-444
-
- [21] Wietzke S, C. Jördans, N. Krumbholz, B. Baudrit, M. Bastian, M. Koch (2007a) „Terahertz imagng: a new non-destructive technique for the quality control of plastic weld joints“, *Journal of the European Optical Society – Rapid Publications*, Vol. 2, Paper No. 07013
-
- [22] Wietzke S, N. Krumbholz, C. Jördans, B. Baudrit, M. Bastian, M. Koch (2007b) „Inspection of plastic weld joints with terahertz imaging“, *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, SPIE*, Vol. 6616, Part 1-2, pp. N6163 ff
-
- [23] Wietzke S, F. Rutz, C. Jördans, N. Krumbholz, N. Vieweg, C. Jansen, R. Wilk, M. Koch (2008) "Applications of terahertz spectroscopy in the plastics industry", *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, SPIE*, Vol. 6840, pp. V8400-V8400
-
- [24] Blumich B. (Bluemich), F. Casanova, A. Buda, K. Kremer, T. Wegener (2005) "Mobile NMR for analysis of polyethylene pipes", *Acta Physica Polonica A*, Vol. 108, No. 1, pp. 13-23
-
- [25] Blumich B. (Bluemich), J. Mauler, A. Haber, J. Perlo, E. Danieli, F. Casanova (2009) „Mobile NMR for geophysical analysis and materials testing“, *Petroleum Science* Vol. 6, No. 1, pp. 1-7
-
- [26] Nino G.F., T.J. Ahmed, H.E.N. Bersee, A. Beukers (2009) „Thermal NDI of resistance welded composite structures“, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 40, No. 3, pp. 237-248
-
- [27] Oba K., M.N. Partl (1998) "Adhesion of bituminous waterproofing membranes for bridging applications", *American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication*, No. 1334, pp. 251-267
-
- [28] Lin C.B., Wu L.C. (2000) "Friction welding of similar and dissimilar materials: PMMA and PVC", *Polymer Engineering and Science* Vol. 40, No. 8, pp. 1931-1941
-
- [29] Schmachtenberg E., Tüchert C. (2003) "Long-term properties of butt-welded poly(propylene)", *Macromolecular Materials Engineering*, Vol. 289, No. 4, pp. 291-300
-
- [30] Wool R.P., K.M. O'Connor (1981) „A theory of crack healing in polymers“, *Journal of Applied Physics*, Vol. 52, No. 10, pp. 5953-5963
-
- [31] Scheirs J. (2009) "A guide to polymeric geomembranes: A practical approach", *John Wiley*, p. 460 ff
-
- [32] Yan D., B.W. Drinkwater, S.A. Neild (2009) "Measurement of the ultrasonic nonlinearity of kissing bonds in adhesive joints" *NDT&E International*, Vol. 42, No. 5, pp. 459-466
-
- [33] Yesiller N., S. Sungur (2001) "Evaluation of geomembranes using an ultrasonic method", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, No. 3, pp. 273-287
-

-
- [34] Rothenfusser M., R. Schiel (2001) "Nonlinear ultrasonic effects in adhesive joints" Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 557, pp. 1253-1260
-
- [35] Blaiszik B.J., S.L.B. Kramer, S.C. Olugebefola, J.S. Moore, N.R. Sottos, S.R. White (2010) "Self-healing polymers and composites", Annual Review of Materials Research, Vol. 40, pp. 179-211
-
- [36] Syrett J.A., C. Remzi Becer, D.M. Haddleton (2010) "Self-healing and self-mendable polymers", Polymer Chemistry, Vol. 1, No. 7, pp. 978-987
-
- [37] Rampf M., O. Speck, Th. Speck, R.H.Luchsinger (2011) "Self-repairing membranes for inflatable structures inspired by a rapid wound sealing process of climbing plants", Journal of Bionic Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 242-250
-
- [38] Gleiter A., G. Riegert, T. Zweschper, G. Busse (2007) „Ultrasound lock-in thermography for advanced depth resolved defect selective imaging“, Insight, Vol. 49, No. 5, pp. 272-274
-
- [39] Ibarra-Castanedo C, J.-M. Piau, S. Guilbert, N.P. Avelidis, M. Genest, A. Bedada, X.P. Maldague (2010) "Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures", Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 20, No. 1, pp. 1-31
-
- [40] Chatterjee K, S. Tuli, S.G. Pickering, D.P. Almond (2011) „A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques“, NDT&E International, Vol. 44, No. 7, pp. 665-667
-
- [41] Meola C, G.M. Carlomagno, L. Giorleo (2004) "The use of infrared thermography for materials characterization", Journal of Materials Processing Technology, Vol. , 5-156, pp. 1132-1137
-
- [42] Liu J., Y. Wang, J. Dai (2010) „Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT“, Infrared Physics & Technology, Vol. 53, No. 5, pp. 348-357
-
- [43] Liu H., J. Liu, Y. Wang (2010) "Quantitative detection of defect using ultrasound infrared lock-in thermography", Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, SPIE, Vol. 7656, pp. 76566E-1 - 7656E-6
-
- [44] Liu H., J. Liu, Y. Wang (2010) "Detection of unbonds in honeycomb sandwich structure using lock-in thermography", Advanced Materials Research, Vol. 97-101, pp. 4363-4366
-
- [45] Mulaveesala R., S. Tuli (2008) "Applications of frequency modulated thermal wave imaging for non-destructive characterization", in: Thermophysical Properties of Materials and Devices (AIP Conference Proceedings), pp. 15-22
-
- [46] Ghali V.S., R. Mulaveesala, M. Takei (2011) "Frequency-modulated thermal wave imaging for non.-destructive testing of carbon fiber-reinforced plastic materials", Measurement Science and Technology, Vol. 22, No. 10, paper no. 104018, 4 pp
-
- [47] Nagatsuma T. (2011) "Terahertz technologies: present and future", IEICE Electronics Express, Vol. 8, No. 14, pp. 1127-1142
-
- [48] Heinz E., T. May, G. Zieger, D. Born, S. Anders, G. Thorwirth, V. Zakosarenko, M. Schubert, T. Krause, M. Starkloff, A. Krüger, M. Schulz, F. Bauer, H.-G. Meyer (2010) "Passive submillimeter-wave stand-off video camera for security applications", Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, Vol. 31, No. 11, pp. 1355-1369
-
- [49] Zimdars D, G. Fichter, C. Megdanof, M. Murdock, I. Duling, J. White, S.L. Williamson (2010) "Portable video rate time domain terahertz line imager for security and aerospace non destructive examination" in: Terahertz physics, devices, and systems IV: Advanced applications in industry and defense (Hsg. M. Anwar, N.K. Dhar, T.W Crowe), Proceedings of SPIE, Vol. 7671, paper No. 76710K
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Strassen, Brücken, Tunnel

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 24.07.2012

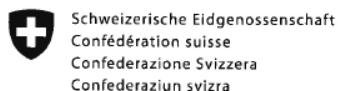
Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU-2004-003
 Projekttitel: Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von Kunststoff-Dichtungsbahnen (Machbarkeitsstudie)
 Enddatum: 31/03/2012

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Laborversuche zur Machbarkeit der Nutzung von Impuls- oder Lock-in Thermografie für die Beurteilung der Güte von Handschweissnähten von Kunststoff-Dichtungsbahnen im Tunnelbau haben gezeigt, dass durch Einlegen von Fremdkörpern simulierte Defekte sowie die Nahtbreite regulärer Dichtungsbahnen bestimmt und haftende Schweissnähte von lose aufliegenden, überlappenden Dichtungsbahnen unterschieden werden können. Für die Versuche wurden Dichtungsbahnen aus PVC und Polyethylen genutzt, die unterschiedliche Farben aufwiesen. Es konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Messergebnis und Werkstoff bzw. Farbe der Kunststoff-Dichtungsbahn nachgewiesen werden. Ob ein Nachweis sogenannter „kissing bonds“, d.h. lokal nicht verbundener aber kontinuierlich aufliegender Dichtungsbahnen möglich ist, konnte mangels geeigneter Prüfmuster nicht geklärt werden. Die Versuche haben keine Hinweise darauf ergeben, dass Unterschiede in der Haftung der Schweissnaht, die z.B. in Schälzug- oder Scherwiderstandsversuchen zerstörend quantitativ ermittelt werden kann, mit Lock-in Thermografie nachgewiesen werden können. Im Weiteren wurde im Rahmen des Projekts ein Verfahren zur Herstellung von Schweissnähten mit unterschiedlicher Haftung entwickelt und validiert. Es dabei zeigte sich, dass mit diesem Verfahren hergestellte Schweissnähte von PVC-Dichtungsbahnen typisch eine deutlich höhere Streuung der Haftung aufweisen (Standardabweichung 50%) als jene von Polyethylen-Dichtungsbahnen (Standardabweichung 16%).



Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Zwar konnten in Laborversuchen gewisse Eigenschaften von Handschweisssnähten von Kunststoff-Dichtungsbahnen mittels Impuls- oder Lock-in Thermografie bestimmt werden, aber eine qualitative oder quantitative Bestimmung der Haftfestigkeit war nicht möglich. Damit ist eine wichtige Voraussetzung für weiterführende Untersuchungen zum Einfluss von Baustellenbedingungen nicht gegeben.

Folgerungen und Empfehlungen:

Für weitere Versuche zu zerstörungsfreier Prüfung von Handschweisssnähten, die eventuell eine qualitative oder quantitative Bewertung der Haftung ermöglichen, stehen auf Grund aktueller Literatur entweder Terahertz-Spektrometrie oder Kernspinresonanz im Vordergrund. Für beide Verfahren sind mobile Geräte entwickelt worden (eventuell kommerziell noch nicht verfügbar) und in ähnlichen, aber nicht direkt vergleichbaren Anwendungsbeispielen untersucht worden. Die Perspektiven für Terahertz-Spektrometrie werden tendenziell besser beurteilt, weil diese durch Bedarf für neue Technologie für sicherheitsrelevante Prüfungen in nächster Zeit geräte-technisch, wie auch bezüglich Datenauswertung und Prüfkosten deutliche Fortschritte verzeichnen sollte. Für die Evaluation der Machbarkeit solcher Methoden für die Anwendung auf Handschweisssnähten wird das im vorliegenden Projekt realisierte zwei-stufige Verfahren von Laborversuchen an Prüfmustern unterschiedlicher Güte vor dem Einsatz unter Baustellenbedingungen empfohlen.

Publikationen:

Abschlussbericht (2012)

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

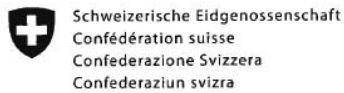
Name: Brunner

Vorname: Andreas J.

Amt, Firma, Institut: Empa., Abteilung Mechanical Systems Engineering

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:





Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK Strassen, Brücken, Tunnel

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die BK ist mit der Beurteilung der Forschungsstelle betreffend Wertung Resultate und Zielerreichung einverstanden.

Umsetzung:

Noch nicht praxisreif.

weitergehender Forschungsbedarf:

Der Bedarf ist gegeben, die Erfolgchancen (z.B. der Terahertz-Spektrometrie) müssten jedoch näher untersucht werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Keiner.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Amberg

Vorname: Felix

Amt, Firma, Institut: Amberg Technologies

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Forschungsberichte seit 2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an ? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen <i>Transports de l'avenir ?</i> <i>Moteurs et carburants pour la mobilité de demain</i> <i>What drives us on ?</i> <i>Drives and fuels for the mobility of tomorrow</i>	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärm mindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im labormasstab <i>Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de roulement sous sollicitation de roulement en laboratoire</i> <i>Stripping of Low Noise Surface Courses during Laboratory Scaled Wheel Tracking</i>	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors <i>SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermodalen Verkehrs auf Alpenkorridoren</i> <i>SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport intermodal sur les axes transalpins</i>	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts- Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten <i>Fonctions de résistance pour des tronçons routiers urbains en dehors de la zone d'influence de carrefours</i> <i>Capacity restraint functions for urban road sections not affected by intersection delays</i>	2010
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. <i>Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt. Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8 Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden</i> <i>Characteristic indices of a Bike City. Method of evaluation of cycling policies in 8 indices for small and medium-sized communes</i>	2010

1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology <i>Temps de parcours en réseau urbain</i> <i>Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen Strassennetz</i>	2011
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière</i> <i>Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety</i>	2009
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge</i> <i>Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes</i>	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers</i> <i>Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr <i>L'agressivité au volant</i> <i>Aggressive Driving</i>	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" <i>Projet initial pour le paquet de recherche "Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route"</i> <i>Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"</i>	2011
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen <i>Application areas of various means of transportation in agglomerations</i> <i>Domaine d'application de different moyen de transport dans les agglomérations</i>	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren <i>Investigations of the ice-wall grow and frost heave in artificial ground freezing</i> <i>Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement au gel pendant la procédure de congélation</i>	2010

647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges <i>Qualitätsprüfung und Überwachung elektrisch isolierter Spannglieder in Brücken</i> <i>Contrôle de la qualité et surveillance des câbles de précontrainte isolés électriquement dans les ponts</i>	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammen-treffen von Strassen mit der Schiene <i>Sécurité en cas de tracés rail-route parallèles ou rapprochés</i> <i>Safety measures to manage risk of roads mee-ting or running close to railways</i>	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen <i>On-site runoff experiments on roads</i> <i>Essai d'écoulements pour l'évacuation des eaux des autoroutes</i>	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik <i>IT-Security pour la télématique des transports</i> <i>IT-Security for Transport and Telematics</i>	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen) <i>Passage pour piétons (les bases)</i> <i>Pedestrian crossing (basics)</i>	2011
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauch-absaugung <i>Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels with concentrated exhaust systems</i> <i>Quantification des fuites des canaux d'extraction dans des tunnels routiers à extraction con-centrée de fumée</i>	2010
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels <i>Entwicklung einer besten Praxis-Methode zur Risikomodellierung für Strassentunnelanlagen</i> <i>Développement d'une méthode de meilleures pratiques pour l'analyse des risques dans les tunnels routiers</i>	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhand D: Anwendbarkeit und Rele-vanz für die Praxis <i>Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1, Annexe D: Applicabilité et im-portance pour la pratique</i> <i>Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1, appendix D: applicability and re-levance for use in practice</i>	2011

1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs Activity oriented analysis of induced travel demand Analyse orientée aux activités du trafic induit	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung Approches innovantes de la gestion du stationnement Innovative approaches to parking management	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars? L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?	2012