

# Untersuchung zur zerstörungsfreien Prüfung von Fugenbandstößen

**T 2761**

T 2761

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen -BMVBW- geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2007

ISBN 978-3-8167-

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)



**Untersuchung  
zur  
zerstörungsfreien Prüfung  
von  
Fugenbandstößen**

**Schlußbericht**

**Dezember 1996**

Studiengesellschaft  
für unterirdische  
Verkehrsanlagen e.V.  
STUVA  
Mathias-Brüggen-Str. 41  
50827 Köln  
Telefon 02 21/59 79 50  
Telefax 02 21/5 97 95-50

**FFB-SC05**

## **Das Forschungsvorhaben**

### **"Zerstörungsfreie Prüfung von Fugenbandstößen"**

wurde von der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.

- STUVA -, Köln, im Auftrag

- der Deutschen Bahn AG, München
- des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt), Berlin
- der Senatsverwaltung Bauen Wohnen und Verkehr, Berlin und
- dem Wupperverband, Wuppertal

durchgeführt.

Bearbeitung: Dr.-Ing. Jörg Schreyer

Dipl.-Phys. Gunther Jackel

Die Forschungsarbeit wurde im projektbegleitenden Arbeitskreis beraten. Diesem Arbeitskreis gehörten an:

- Dr. Bielak, Tricosal GmbH, Illertissen
- Bundesbahndirektor Dipl.-Ing. Gerlich, Deutsche Bahn AG, München
- Prof. Dr. Haack, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. - STUVA -, Köln
- Herrn Dipl.-Ing. Halter, Senatsverwaltung Bauen Wohnen und Verkehr, Berlin
- Dipl.-Phys. Jackel, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. - STUVA -, Köln
- Ltd. Baudirektor Dipl.-Ing. Manleitner, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin
- Dr.-Ing. Schreyer, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. - STUVA -, Köln
- Herr Schwatlo, Deutsche Bahn AG, München
- Dr. Dipl.-Phys. Wiggerhauser, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM, Berlin

Die mit Fehlstellen präparierten elastomeren und thermoplastischen Fugenbandstöße wurden von der Firma Tricosal, Illertissen, zur Verfügung gestellt.

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>	
1.	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Stand der Technik bei der Untersuchung von Fugenbandstößen	1
1.3	Ziel der Untersuchung	2
1.4	Anforderungen an ein zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Untersuchung von Fugenbandstößen	3
2.	Das TV-Shearografie-Verfahren	5
2.1	Allgemeines	5
2.2	Funktionsbeschreibung	5
2.3	TV-Shearografie zur Prüfung von Fugenbandstößen	7
3.	Laborversuche mit einer Glas-Saugglocke	9
3.1	Allgemeines	9
3.2	Versuchseinrichtung	9
3.3	Vorversuche mit elastomeren und thermoplastischen Fugenbändern	10
3.4	Ziel der Laborversuche mit einer Glas-Saugglocke	12
3.5	Versuche mit elastomeren Fugenbändern	13
3.5.1	Allgemeines	13
3.5.2	Präparation von Fehlstellen an elastomeren Fugenbändern	13
3.5.3	Ergebnisse der Untersuchungen an elastomeren Fugenbändern	15
3.6	Versuche mit thermoplastischen Fugenbändern	20
3.6.1	Allgemeines	20
3.6.2	Präparation von Fehlstellen an thermoplastischen Fugenbändern	21
3.6.3	Ergebnisse der Untersuchungen an thermoplastischen Fugenband- stößen	21
4.	Laborversuche mit einer Alu-Saugglocke	26
4.1	Allgemeines	26
4.2	Ziel der Laborversuche mit der Alu-Saugglocke	27

	<b>Seite</b>	
4.3	Anforderungen an die Alu-Saugglocke	28
4.4	Funktionsprüfung der Alu-Saugglocke	30
4.5	Prüfung von elastomeren und thermoplastischen Fugenbandstößen mit der Alu-Saugglocke	32
4.5.1	Probenpräparation	32
4.5.2	Versuchsergebnisse	33
4.5.3	Spezielle Versuchsreihen zur Unterdrückung von Störsignalen	36
5.	Baustellenversuch mit der Alu-Saugglocke	41
5.1	Allgemeines	41
5.2	Durchführung und Ergebnisse der Fugenbandprüfung	42
6.	Laborversuche mit einer Saugglocke für den Baustelleneinsatz	44
6.1	Allgemeines	44
6.2	Anforderungen an die Baustellen-Saugglocke	44
6.3	Konstruktion der Baustellen-Saugglocke	46
6.4	Erprobung der Baustellen-Saugglocke in Verbindung mit der Labormeßtechnik	47
6.5	Erprobung der Baustellen-Saugglocke unter Verwendung einer speziellen Meßtechnik	49
7.	Zusammenfassung	54
	Literaturverzeichnis	
	Tabellenanhang	
	Bildanhang	

## **1. Einleitung**

### **1.1 Ausgangssituation**

Auf zahlreichen Baustellen im Bereich des Tunnelbaus (offene sowie geschlossene Bauweise), bei Brücken, Widerlagerwänden und Stützwänden, bei Behältern, insbesondere auch zum Auffangen kontaminierter Löschwässer oder das Grundwasser gefährdender Flüssigkeiten, bei Talsperren und Massivbauteilen in Deponien sowie auch bei anderen Ingenieurbauwerken werden im größeren Umfang Fugenbänder auf elastomerer bzw. thermoplastischer Basis eingesetzt [1, 2, 3]. Sie müssen in vielen Fällen im Labor des Fugenbandherstellers oder auf der Baustelle gestoßen werden. Hierbei kommt es auf eine zuverlässige, wasserdichte Fügetechnik an. Zur Zeit lassen sich im Werk des Fugenbandherstellers und auf der Baustelle gefertigte Fugenbandstöße lediglich durch Inaugenscheinnahme oder durch Betasten mit den Fingerspitzen, d. h. subjektiv überprüfen [4, 5, 6, 7]. Auch die bei thermoplastischen Fugenbändern zuweilen eingesetzte elektrische Hochspannungsprüfung ist in vielen Fällen unbefriedigend und ist bei elastomeren Fugenbändern nicht anwendbar. Es fehlt bisher eine reproduzierbare, zerstörungsfreie und objektive sowie dokumentierbare Prüfmethode (Kapitel 1.2).

Während z.B. durch die Neufassung der DS 835 der Deutschen Bundesbahn die Fragen der Handhabung derartiger Fugenbänder auf den Baustellen bereits geregelt wurden, bleibt die Frage der Überprüfung von Baustellen- und Werksfügen nach wie vor offen. Damit fehlt ein entscheidendes Instrument der Qualitätssicherung bei der Erstellung hochwertiger und zum Teil auch sicherheitsrelevanter Ingenieurbauwerke [8, 9].

### **1.2 Stand der Technik bei der Untersuchung von Fugenbandstößen**

Bei derzeitigen Prüfungen von Fugenbandstößen werden folgende Methoden angewandt:

- (1) Augenscheinliche Betrachtung zur Überprüfung der Oberflächenstruktur
- (2) Biegen des Fugenbandstoßes zum Aufzeigen von Rissen
- (3) Druckprüfung des Stoßes mit der Fingerspitze zum Aufspüren poriger Strukturen und großer Lufteinschlüsse

- (4) Zerstörende Untersuchungen an speziellen Proben, um die Funktionstüchtigkeit der Schweiß- bzw. Vulkanisiergeräte zu überprüfen.
- (5) Bei thermoplastischen Fugenbändern Überprüfung mit einem elektrischen Hochspannungsgerät zur Ortung von Undichtigkeitsstellen

Die Ortung von Undichtigkeitsstellen ist nur an thermoplastischen Fugenbändern mit dem Hochspannungsgerät möglich. Dabei wird der Fugenbandstoß mit einer Hochspannungselektrode (45 kV) überstrichen. An durchgehenden Materialstörungen (offenen Wegen) kommt es zu einem Funkendurchschlag. Bei elastomeren Fugenbändern kann das Hochspannungsgerät nicht eingesetzt werden, da hier die relativ hohe elektrische Leitfähigkeit des Materials zu einer elektrischen Entladung an undichten und dichten Stellen des Fugenbandes führt.

Bei den genannten zerstörungsfreien Prüfmethoden ist die subjektive Erfahrung des jeweiligen Prüfers von großer Bedeutung. Es fehlt in allen Fällen eine objektive Dokumentation des Prüfvorganges. Ferner eignen sich diese Prüfungen nicht zum Orten kleinerer Lufteinschlüsse. Hier besteht ein erheblicher Mangel in der Prüfmethodik, da auch eine Anhäufung kleiner Lufteinschlüsse die Zugfestigkeit des Fugenbandstoßes erheblich schwächen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß eine reproduzierbare, zerstörungsfreie, objektive und dokumentierbare Prüfung von Fugenbandstößen zur Zeit noch nicht möglich ist. Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Qualität der Bauwerksabdichtung ist ein zuverlässiges Prüfverfahren für Fugenbandstöße dringend notwendig. Dies ist vor allem bei sicherheitsrelevanten Bauwerken wie Talsperren, Chemiebau, Tanktassen, Behälterbau etc. oder bei sonstigen hohen Anforderungen an den Umweltschutz erforderlich.

### **1.3 Ziel der Untersuchung**

Mit Hilfe der TV-Shearografie, die bereits z.B. bei der Reifenherstellung zur Kontrolle eingesetzt wird, sollen durch Laborversuche die Machbarkeit und Anwendungsgrenzen dieses Verfahrens zur Überprüfung von Fugenbandstößen aufgezeigt werden. Diese Methode läßt nach den Erkenntnissen aus ersten Pilotversuchen eindeutige, aussagekräftige und aufzeichnungsfähige Auswertungen von etwaigen Fehlstellen an Fugenbandstößen zu.

Auch Werkstöße in Fugenbandsystemen haben in der Vergangenheit häufig erheblichen Anlaß zur Beanstandung gegeben. Quer zur Verbindungsnaht aufgeschnittene Fügstellen von Werkstößen haben ähnlich gravierende Fehler erkennen lassen,

wie die auf der Baustelle ausgeführten Fügebereiche. Daher soll dieser Komplex ebenfalls in die Untersuchung näher einbezogen werden. Es soll deshalb eine Prüfeinrichtung nicht nur für den Einsatz auf der Baustelle, sondern auch im Herstellerwerk geplant, dimensioniert und erprobt werden.

Die Untersuchung dient vor allem auch dazu, die behördlichen Bauaufsichten künftig umfassender und effektiver in Fragen der Fugenbandstöße beraten sowie in ihrer Überwachungsaufgabe unterstützen zu können. Bei später eventuell an einem Bauwerk auftretenden Undichtigkeiten ermöglicht das angestrebte Prüfverfahren durch erneute Einsicht in die Bauakte eine rasche und unmißverständliche Klärung der Frage, ob ein bestimmter Baustellen- bzw. Werkstoß ursächlich den Schaden bewirkt hat.

#### **1.4 Anforderungen an ein zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Untersuchung von Fugenbandstößen**

Ein Prüfverfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Fugenbandstößen sollte möglichst folgende Anforderungen erfüllen:

- (1) Mit Hilfe des Verfahrens sollen alle die Funktion beeinträchtigenden Fehlstellen im Fugenbandstoßbereich geortet werden können. Hierzu zählen insbesondere:
  - Lufteinschlüsse jeglicher Art (z.B. poröse Bereiche, Lunker, Doppelungen)
  - Nicht haftende Bandagen bei Elastomer-Fugenbändern
  - Schweißfehler bei thermoplastischen Fugenbändern
- (2) Mit dem Verfahren sollen Fugenbandstöße aus Elastomeren und Thermoplasten untersucht werden können. Dies bedeutet, daß geschweißte und vulkanisierte Fugenbandstöße prüfbar sein müssen.
- (3) Der Zeitaufwand für die Untersuchung eines Fugenbandstoßes soll möglichst gering sein.
- (4) Das Prüfgerät muß so variabel sein, daß es ohne großen Aufwand an allen Fugenbandformen nach DIN 7865 bzw. DIN 18 541 eingesetzt werden kann [10, 11].

- (5) Das Verfahren muß in Fertigungsbetrieben und auch auf Baustellen einsetzbar sein. Das Verfahren muß daher erschütterungsfest, unempfindlich gegen Temperaturschwankungen (im Bereich von etwa +5°C bis +35°C) und gegenüber Nässe und Staub (Kapselung) sein.
- (6) Das Verfahren muß anwendungsfreundlich sein:
  - Das Gerät darf das Bedienungspersonal nicht gefährden.
  - Das Gerät muß weitgehend wartungsfrei sein.
  - Die Bedienung muß durch angeleitetes Fachpersonal erfolgen können.
  - Die Prüfeinrichtung muß mobil und vom Gewicht her möglichst leicht sein.
  - Der Meßaufbau muß gegen Stromschwankungen unempfindlich sein oder eine unabhängige Stromversorgung besitzen.
- (7) Die Prüfergebnisse müssen vor Ort kurzfristig auswertbar sein, damit umgehend eine Entscheidung über z.B. eine erforderliche Reparatur des Fugenbandstoßes getroffen werden kann.
- (8) Das Verfahren muß reproduzierbar und objektiv sein.
- (9) Die Ergebnisdarstellung muß für Dokumentationszwecke geeignet sein, damit der Einbauzustand der untersuchten Fugenbandstöße auch zu jedem beliebigen späteren Zeitpunkt nachgewiesen werden kann.
- (10) Mit dem Verfahren sollen auch Fugenbandstöße verschiedener Formstücke untersucht werden können. Dazu gehören z.B. in einer Ebene liegende Fugenbandstöße in T-, L- und Kreuzform. Anzustreben ist auch die Prüfung von räumlichen Fugenbandstößen.
- (11) Es sollten möglichst viele Komponenten von Standardgeräten für das Meßgerät eingesetzt werden, um die Gerätekosten insgesamt gering zu halten.

Auf der Grundlage obiger Anforderungen wurde als zerstörungsfreies Prüfverfahren die TV-Shearografie ausgewählt (Kapitel 2 bis 6).

## **2. Das TV-Shearografie-Verfahren**

### **2.1 Allgemeines**

Die TV-Shearografie ist ein relativ neues optisches Verfahren zur Messung von Oberflächenverformungen beliebiger Bauteile [12, 13, 14, 15, 16].

Das Verfahren wird inzwischen in der Werkstoffprüfung bei folgenden Anwendungen eingesetzt:

- Prüfung von Lufteinschlüssen in Reifen und geschäumten Bauteilen
- Prüfung des Verbundes von mehrschichtigen Bauteilen z.B. im Fahrzeug- und Flugzeugbau und
- Überprüfung von Rohrdicken im Leitungsbau bei Verdacht von Lochfraß

Die TV-Shearografie kann immer dann erfolgreich eingesetzt werden, wenn den Fehlstellen im Bauteil (z.B. Lufteinschlüsse) bei einer Bauteilbelastung eine durch die Fehlstelle hervorgerufene Oberflächenverformung zugeordnet werden kann. Mögliche Belastungen zur Erzeugung von Oberflächenverformungen bei Shearografie-Untersuchungen sind z.B. Über- und Unterdruck sowie Wärmestrahlung.

### **2.2 Funktionsbeschreibung**

Die TV-Shearografie ist ein optisches Verfahren zur Erfassung von lokalen Oberflächenverformungen, die mit bloßem Auge nicht sichtbar sind [12 bis 16].

Lokale Oberflächenverformungen können beispielsweise unmittelbar über eingeschlossene Hohlstellen in elastischen Bauteilen auftreten, wenn in den Hohlstellen ein Luftüberdruck im Vergleich zum äußeren Luftumgebungsdruck herrscht. Dieses Prinzip kann genutzt werden, um z.B. Hohlstellen in Autoreifen zu orten. Der Reifen wird in eine Unterdruckkammer gelegt und ein Unterdruck von z.B. 250 mbar erzeugt. Wenn die Hohlstelle luftdicht im Reifen eingeschlossen ist, wirkt in der Hohlstelle auch nach dem Absenken des Luftumgebungsdrucks der normale Luftdruck. Da der Luftdruck in der Hohlstelle größer als der abgesenkte äußere Luftumgebungsdruck ist, kommt es an der Reifenoberfläche direkt über der Hohlstelle zu einer mit der TV-Shearografie feststellbaren Oberflächenverformung. Die Verfor-

mungsmessung kann Auskunft über die Größe und Lage der Fehlstelle geben. In der hier vorliegenden Untersuchung soll geprüft werden, ob auch Fehlstellen in Fugenbandstößen mit der TV-Shearografie geortet werden können.

Bei der TV-Shearografie wird das zu untersuchende Bauteil mit einem aufgeweiteten Laserstrahl beleuchtet und das reflektierte Licht mit einer Videokamera aufgenommen. Die erforderliche Laserleistung hängt von der Größe und vom Reflektionsvermögen der zu untersuchenden Oberfläche ab. Die notwendige Strahlungsleistung pro Quadratzentimeter des erleuchteten Prüffeldes variiert daher zwischen 0,1 mW und 2,0 mW [14, 15]. Durch ein Biprisma oder einen Strahlteilerwürfel (Scherement) werden alle Punkte der Objektoberfläche, die einen bestimmten Betrag - den sogenannten Scherbetrag - in einer bestimmten Richtung - der sogenannten Scherrichtung - auseinanderliegen, in einem einzigen Punkt auf dem CCD-Sensor der Videokamera abgebildet (Bild 1).

Bei dieser überlagerten Abbildung kommt es aufgrund der unterschiedlichen Weglängen des Lichtes zu einem Phasenversatz der Lichtwellen. Dadurch wird die Lichtintensität je nach Betrag des Wegunterschiedes stellenweise verstärkt oder abgeschwächt. Auf dem CCD-Sensor entsteht so ein Hell/Dunkel-Muster (Speckle-Muster), das alle Informationen über die Lage der einzelnen Objektpunkte an der Oberfläche zueinander sowie zum Laser und zur Kamera enthält. Das Muster wird im Speicher des Bildverarbeitungsrechners gespeichert.

Bei einer lokalen Verformung der Bauteiloberfläche z.B. durch einen Luftüberdruck in einer Hohlstelle wird die Phasenbeziehung der an dieser Stelle befindlichen korrespondierenden Punktpaare verändert (Bild 1). An den entsprechenden Stellen auf dem CCD-Sensor entsteht ein neues Hell/Dunkel-Muster. Durch Subtraktion der beiden Bilder (belasteter minus unbelasteter Zustand des Bauteils) bleiben nur die zur Verformung gehörigen Interferenzlinien übrig. Die Verformungsbereiche (Fehlstellenbereiche) werden vom Rechner erfaßt und anschaulich als helle Flächen auf dunklem Untergrund am Bildschirm bzw. im Druckbild dargestellt.

Bei der Shearografie ist zu beachten, daß nur Verformungsunterschiede in Scherrichtung wahrgenommen werden können. Verformungen senkrecht zur Scherrichtung können nicht geortet werden.

Ferner hängt die Empfindlichkeit des Verfahrens vom Scherbetrag ab. Je größer dieser Betrag ist, desto kleinere Steigerungsänderungen einer lokalen Oberflächen-

verformung können erfaßt werden. Jedoch wird mit wachsendem Scherbetrag auch die Empfindlichkeit des Verfahrens gegenüber Störsignalen größer. Bei modernen TV-Shearografie-Kameras können die Scherrichtung und auch der Scherbetrag variiert werden [17, 18, 19, 20, 21, 22].

### **2.3 TV-Shearografie zur Prüfung von Fugenbandstößen**

Im Fall der Überprüfung von Fugenbandstößen mit Hilfe der TV-Shearografie sollte die Belastung durch Unterdruck und nicht durch Wärmestrahlung erzeugt werden. Eine Belastung durch Wärmestrahlung oder Heißluft ist prinzipiell denkbar. Die Materialerwärmung führt zu einer Erwärmung der eingeschlossenen Luft und damit zu einem Überdruck in der Fehlstelle. Der auf diese Weise erzeugte Druckunterschied ist jedoch nicht so groß wie bei der Belastung durch Unterdruck. Ferner ist durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Fugenbandmaterials eine relativ lange Erwärmungszeit erforderlich. Aus den genannten Nachteilen wurde eine Belastung durch Wärmeeinwirkung im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Der Fugenbandstoß wird in eine speziell angefertigte Unterdruckkammer gelegt, um die Belastung durch Absenken des äußeren Luftumgebungsdruckes aufbringen zu können. An der Außenseite der Unterdruckkammer ist die optische Meßtechnik befestigt. Diese Unterdruckkammer, auch Saugglocke genannt, muß im Übergangsbereich Unterdruck/Normaldruck der Fugenbandkontur so angepaßt sein, daß ein luftdichter Anschluß möglich ist. Es wird dann eine Aufnahme des Fugenbandstoßbereichs bei atmosphärischem Normaldruck und eine weitere bei Unterdruck ausgeführt. Durch den an der Fugenband-Oberfläche eingestellten Luft-Unterdruck kann der nun in den Luftporen des Fugenbandes vorliegende Luftüberdruck zu Aufwölbungen an der Fugenband-Oberfläche führen. Diese Oberflächenverformungen müssen mit dem TV-Shearografie-Verfahren festgestellt werden können.

Die Ortung von Fehlstellen wird um so schwieriger, je tiefer die Fehlstellen unter der Prüfoberfläche liegen. Ferner können bei Fugenbändern leicht verformbare Teile (z.B. Ankerrippen) eventuell zu Störsignalen führen. Auch könnte der normale Luftdruck im Hohlkörper (Mittelschlauch) des Fugenbandes Verformungen an der Fugenbandoberfläche hervorrufen, wenn nur der äußere Luftumgebungsdruck abgesenkt wird. In den genannten Fällen könnten Störsignale die Ortung von Fehlstellen erschweren.

Das Untersuchungsergebnis ist u.a. abhängig von den Geräteeinstellungen (z.B. Scherbetrag, Scherrichtung, Unterdruck), von der Größe und Lage der Fehlstelle, von der Größe des Prüffeldes (z.B. Breite des Fugenbandes), von der Leistungsfä-

higkeit des Lasers und der Vakuumpumpe sowie von der Dichtheit am Übergang Unterdruckkammer/Fugenband und der Steifigkeit der Prüfeinrichtung.

Es waren daher spezielle Versuche erforderlich, um die bei der Prüfung von Fugenbandstößen aufgeworfenen Fragen zu beantworten.

Zunächst waren Vorversuche (Kapitel 3.3) erforderlich, um optimale Grundeinstellungen (z.B. Unterdruck, Scherbetrag) festlegen zu können. Anschließend wurden verschiedene Laborversuche und abschließend eine Erprobung des Verfahrens auf einer Baustelle durchgeführt (Kapitel 5). Mit Hilfe der Versuchsergebnisse wurde eine Prüfeinrichtung für den Einsatz im Herstellerwerk und eine weitere für den Einsatz auf der Baustelle konstruiert, gebaut und erprobt.

### **3. Laborversuche mit einer Glas-Saugglocke**

#### **3.1 Allgemeines**

In Vorversuchen (Kapitel 3.2) sollten zunächst optimale Grundeinstellungen wie z.B. Größe des Unterdruckes und Scherrichtung für die nachfolgenden Versuche mit der TV-Shearografie zur Ortung von Fehlstellen in Fugenbändern festgelegt werden. Die sich anschließenden Laborversuche sollten zunächst noch mit der bereits vorhandenen Glas-Saugglocke (Unterdruckraum) durchgeführt werden (Bild 2), um weitere gesicherte Erkenntnisse zu erhalten. Aus Kostengründen sollten erst nach positivem Abschluß dieser Versuchsreihen spezielle Saugglocken für die Prüfung von Stößen in langen Fugenbändern konstruiert, hergestellt und gebaut werden (Kapitel 3, 4 und 6).

Zu beachten ist, daß die Prüfstücke bei Verwendung der Glas-Saugglocke anders als bei der Prüfung eines Baustellen-Fugenbandstoßes komplett in den Unterdruckraum (Glas-Saugglocke) gelegt werden müssen. Ein "durchlaufen" des Unterdruckraumes von langen Fugenbändern ist nicht möglich, da die zylindrische Glas-Saugglocke nur einen Durchmesser von ca. 30 cm hat und keine Vorrichtungen besitzt, um lange Fugenbänder am Übergang vom normalen Luftdruck zum Luftunterdruck luftdicht anzuschließen. Hierfür sind spezielle Saugglocken erforderlich (vgl. Kapitel 3, 4 und 6).

#### **3.2 Versuchseinrichtung**

Für die Versuchsdurchführung im Labor stand folgende Einrichtung zur Verfügung (Bild 3):

- Shearografie Meßkopf mit einem Strahlteilerwürfel zur Erzeugung und Aufnahme der gescherten Abbildung
- Diodengepumpter Festkörperlaser (Typ: Nd: YAG, Länge ca. 35 cm, Leistung 100 mW, Wellenlänge 532 nm) zur Ausleuchtung der Objektoberfläche mit kohärentem Licht
- Auswerterechner mit Bildschirm inklusive spezieller Software zur Berechnung und Darstellung der Shearografieaufnahmen

- Zylindrische Glasglocke (Durchmesser ca. 30 cm, Höhe ca. 60 cm) als Teil der Unterdruckraumbegrenzung, in die die Fugenbandprobe komplett eingelegt und ein Unterdruck erzeugt werden kann (Bilder 2 und 3)
- Hochleistungsfähige Vakuumpumpe zur Erzeugung des Unterdruckes in der Glasglocke (Saugleistung ca. 16 m<sup>3</sup>/h)

Falls andere Geräte als die oben genannten eingesetzt wurden, wird im folgenden darauf hingewiesen.

### **3.3 Vorversuche mit elastomeren und thermoplastischen Fugenbändern**

Die Vorversuche wurden mit einer elastomeren und einer thermoplastischen Fugenbandprobe durchgeführt, die komplett in die Glas-Saugglocke (Unterdruckraum) gelegt wurden. Diese Proben enthalten zylindrische Hohlstellen mit einem Durchmesser von ca. 3 mm. Die Vorversuche dienen dazu, optimale Grundeinstellungen von z.B. Unterdruck, Scherbetrag und Scherrichtung für die nachfolgenden Versuche festzulegen. Folgende Versuchsreihen waren hierzu erforderlich:

#### **(1) Ermittlung des erforderlichen Unterdruckes**

Bei der Belastung des Fugenbandstoßes durch Unterdruck spielt die Höhe des Unterdruckes eine maßgebliche Rolle für die Stärke der auftretenden Verformungen und damit für die Ortung der Fehlstellen.

An einem Fugenbandstoß, der kleine ortbare Fehlstellen enthält, wurde der optimale Unterdruck für die Ortung der Fehlstellen ermittelt, indem der Unterdruck in 10 mbar-Stufen schrittweise gesteigert und zu jeder Druckstufe ein Shearografiebild erstellt wird. Dies mußte getrennt für elastomere und thermoplastische Fugenbänder durchgeführt werden, da diese Materialien sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Steifigkeit anders verformen.

Der maximal erforderliche Unterdruck betrug bei der elastomeren Probe ca. 150 mbar und bei thermoplastischen Probe nur ca. 50 mbar. Ursache für den geringeren Unterdruck ist, daß sich das thermoplastische Fugenband aufgrund seiner geringeren Steifigkeit (weicherer Material) leichter verformt als das elastomere Fugenband.

Die Erzeugung des Unterdrucks von etwa 150 mbar dauerte mit der verwendeten Vakuumpumpe nur etwa 5 Sekunden. In dieser Zeit wurden etwa 20 Bilder

von der Objektoberfläche vom Rechner aufgenommen und miteinander verrechnet.

(2) Ermittlung des optimalen Scherbetrages und der optimalen Scherrichtung

Bei großem Scherbetrag hat man eine hohe Auflösung bei der Messung der Steigung jedoch eine geringe laterale Auflösung (Auflösung parallel zum CCD-Sensor). Deshalb muß hier ein Kompromiß gefunden werden, mit dem eine Ortung typischer Fehlstellen am besten möglich ist.

An den ausgewählten Fugenbandstößen mit ortbaren Fehlstellen wurde bei gleichbleibendem Unterdruck der Scherbetrag variiert. Die Versuche ergaben, daß ein Scherbetrag zwischen ca. 5 mm und ca. 10 mm bei der Prüfung von elastomeren und thermoplastischen Fugenbandproben den besten Kompromiß zwischen Auflösungsvermögen des Verfahrens und Empfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen darstellt.

Die Scherrichtung ist von der Lage der Fehlstelle abhängig. Bei Fugenbandstößen kann davon ausgegangen werden, daß der größte Teil der Fehlstellen im Stoß und damit senkrecht zur Fugenbandlängsrichtung liegen. Wenn dies der Fall ist, sollte vorrangig als Scherrichtung die Fugenbandlängsrichtung gewählt werden.

(3) Ermittlung der erforderlichen Laserleistung in Abhängigkeit von der Prüffeldgröße

Nach Möglichkeit sollte die Laserleistung groß genug sein, damit ein Fugenbandstoß mit einer einzigen Aufnahme erfaßt werden kann. Allerdings steigen die Kosten für das Prüfgerät mit der Laserleistung drastisch in die Höhe. Erschwerend kommt hinzu, daß die schwarze Fugenbandoberfläche das Laserlicht nur schwach und ungleichmäßig reflektiert.

Experimente mit verschiedenen Laserleistungen und Prüffeldgrößen sollten die Grundlage zur Entwicklung eines Prüfgerätes liefern (Kapitel 4).

Generell kann jedoch die Laserleistung niedrig gehalten werden, wenn die Oberfläche des Fugenbandes weiß eingefärbt wird. Hierdurch bedingt wird das Laserlicht stärker und gleichmäßiger reflektiert. Zur Aufhellung der Prüfoberfläche wurde ein aufsprühbares Pulver (Developer D70 von Firma Helling) verwendet.

(4) Einfluß von Erschütterungen

Um störende Einflüsse durch Erschütterungen bzw. Vibrationen zu unterbinden, die ebenfalls zu Oberflächenverformungen führen können, muß die Probe im Unterdruckraum (Saugglocke) befestigt werden.

Auf der Grundlage der Vorversuche wurden die oben genannten Festlegungen für die weitere Versuchsdurchführung getroffen.

### **3.4 Ziel der Laborversuche mit einer Glas-Saugglocke**

Anhand gezielter Versuche sollten die Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen der TV-Shearografie im Bereich der Fugenband-Untersuchungen deutlich aufgezeigt werden.

Es wurden folgende Prüfungen durchgeführt werden:

(1) Untersuchung des Einflusses von Art, Größe und Tiefenlage der Fehlstelle

An verschiedenen elastomeren und thermoplastischen Fugenbandproben wurden verschiedene Fehlstellen (zylinderförmige, flächige usw.) jeweils in unterschiedlichen Tiefen angeordnet. Von jeder Probe wurden Shearogramme zunächst bei Raumtemperatur (ca. +20°C) aufgenommen.

(2) Ermittlung des Materialeinflusses

Thermoplastische Fugenbänder sind weicher und lassen sich leichter verformen als elastomere. Dies bedeutet, daß bei thermoplastischen Fugenbändern eventuell durch die stärkere Verformungswilligkeit z.B. der Ankerrippen Störsignale hervorgerufen werden, die eine Ortung von Fehlstellen erschweren.

(3) Untersuchung des Temperatureinflusses auf die Fehlstellenortung

Die bei Raumtemperatur (ca. 20°C) durchgeführten Versuche wurden in einem temperierten Raum bei +5°C und +35°C wiederholt, um den Temperatureinfluß auf elastomere und thermoplastische Fugenbänder ermitteln zu können.

(4) Erprobung einer leicht tragbaren Vakuumpumpe

Die in den Vorversuchen verwendete Vakuumpumpe ist z.B. für einen Baustelleneinsatz zu schwer und unhandlich. Es sollte deshalb eine leicht tragbare Vakuumpumpe erprobt werden.

(5) Überprüfung der Laserleistung

Es wurde geprüft, ob Lasergeräte verwendet werden können, die eine schwächere Leistung als der im Vorversuch eingesetzte Laser (Leistung 100 mW) haben.

Die zerstörungsfreien Prüfungen wurden an elastomeren (Kapitel 3.5) und thermoplastischen Fugenbandproben (Kapitel 3.6) durchgeführt.

### **3.5 Versuche mit elastomeren Fugenbändern**

#### **3.5.1 Allgemeines**

Die Versuche an elastomeren Fugenbandproben wurden mit der in Kapitel 3.2 genannten Versuchseinrichtung und den Grundeinstellungen gemäß Kapitel 3.3 durchgeführt. Zu beachten ist, daß bei den Versuchen mit der Glas-Saugglocke die Fugenbandproben komplett in den Unterdruckraum (Glas-Saugglocke) eingelegt wurden. Der Luftdruck im Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) in der Nähe des Stoßbereiches entsprach daher während des Prüfvorganges dem Unterdruck in der Glas-Saugglocke. Störsignal durch einen Überdruck (Normaldruck) im Hohlkörper traten deshalb in diesen Versuchsreihen nicht auf (vgl. Kapitel 4.5.3). Die Versuche mit der Glas-Saugglocke wurden durch gezielte Versuche mit einer Alu-Saugglocke (Kapitel 4 und 5) und einer Baustellen-Saugglocke (Kapitel 6) ergänzt.

#### **3.5.2 Präparation von Fehlstellen an elastomeren Fugenbändern**

Für die Versuche mit der Glas-Saugglocke wurden elastomere Fugenbänder (Fugenband Typ FM 350 nach DIN 7865) (Tabelle 1) und Elastomer-Quader mit künstlichen Fehlstellen präpariert:

##### **(1) Elastomere Fugenbandabschnitte**

###### **a) Herstellung von flächigen Hohlstellen in den Proben Nr. 1 bis Nr. 5**

Mit einem Messer wurde in die Stirnfläche der Fugenbandabschnitte Schlitze eingeschnitten (Tabelle 1). In die Schlitze wurde eine ca. 1 cm x 1 cm große doppelagige Aluminiumfolie eingelegt, um künstliche Hohlräume zu erzeugen. Die Öffnungen der Schlitze im Fugenband wurden verschlossen, indem die Öffnungen zusammengeklemmt und mit einer Heizlösung (verschiedene Kautschuke in Benzin gelöst) bei einer Temperatur von +160°C vulkanisiert wurden.

- b) Herstellung von zylinderförmigen Hohlstellen in den Proben Nr. 6, Nr. 7a und Nr. 7b

Von der Stirnfläche der Fugenbandabschnitte wurden mit Bohrern zylinderförmige Hohlräume parallel zur Fugenbandlängsrichtung in das Fugenbandmaterial gebohrt. Die zylinderförmigen Hohlräume hatten einen Durchmesser von ca. 0,5 mm bzw. ca. 3 mm (Tabelle 1). In die Hohlräume wurden kleine ca. 35 mm lange Röllchen aus Aluminiumfolie eingelegt. Nachfolgend wurden die Öffnungen der Hohlräume mit Rohkautschuk verstopft und bei +160°C vulkanisiert.

- c) Herstellung von flächigen Hohlstellen unter einer Bandage, Proben Nr. 8 bis Nr. 10

Die Fugenbänder wurden auf ihrer Oberseite aufgeraut und bandagiert. Um einen flächigen Hohlraum zwischen der Bandage und dem Fugenband sicherzustellen, wurde jeweils eine ca. 1 cm x 1 cm große doppelagige Aluminiumfolie zwischen Bandage und Fugenband gelegt (Tabelle 1). Die Bandage selbst wurde mit einer Matrize aufgedrückt und vulkanisiert. Bei Probekörper Nr. 10 liegt die doppelagige Aluminiumfolie so am Rand der Bandage, daß der Hohlraum eine Luftverbindung nach außen hat.

- d) Herstellung einer porösen Struktur in einem Fugenbandstoß der Probe Nr. 11

Eine poröse Struktur im Stoßbereich (Tabelle 1) kann nicht wie die zuvor genannten Hohlstellen in ein Fugenband eingebaut werden, sondern muß sich bei der Herstellung eines Fugenbandstoßes von selbst ausbilden. Die Entstehung einer porösen Struktur wird durch bestimmte Fehler bei der Herstellung des Fugenbandstoßes (z.B. unzureichende Einspannung der Fugenbandenden) begünstigt. Der Fugenbandstoß wurde bei dieser Probe ohne die Verwendung von Spannern hergestellt, um günstige Voraussetzungen für die Bildung von porösen Strukturen zu schaffen. Vor der Versuchsdurchführung konnte jedoch nicht geprüft werden, ob tatsächlich eine poröse Struktur zwischen den Fugenbandenden entstanden war.

## (2) Fugenbandstöße (Tabelle 2)

Für die Herstellung der Fehlstellen in den Proben Nr. 12 bis Nr. 16 wurden entweder von den Stoßflanken ausgehend etwa  $1 \text{ cm}^2$  große Schlitze eingeschnitten oder aber zylinderförmige Hohlräume eingebohrt. Damit die flächigen und zylinderförmigen Hohlräume bei der Fugenband-Stoßherstellung nicht verkleben oder verfüllt werden, wurden in die Fehlstellen doppelagige Aluminiumfolienstücke lose eingesteckt.

Die Materialüberdeckung bei den zylinderförmigen Hohlstellen der elastomeren Fugenbandstöße variiert, da die Dicke der Bandagen von 2 mm an den Bandagenrändern bis zu 6 mm in Bandagenmitte reicht. Der gesamte Bereich wird von den langgestreckten Hohlstellen unterlaufen. Manche zylinderförmige Hohlstellen ragen sogar über den Bandagenrand hinaus, so daß die Fehlstellen nur noch durch das Fugenbandmaterial selbst überdeckt werden (Bild 4).

## (3) Quader aus Elastomer nach DIN 7865

Die Abmessungen der Quader betragen jeweils 260 mm x 130 mm x 40 mm. Jeder Quader erhielt zehn zylinderförmige Hohlstellen in Tiefen (Materialüberdeckung) von 2 mm bis 20 mm (Bild 5). In ein und demselben Quader hatten die Fehlstellen stets den gleichen Durchmesser. Von Quader zu Quader variierte jedoch der Fehlstellendurchmesser (1 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm und 7 mm).

Die Hohlstellen im Quader wurden mit Bohrern entsprechender Durchmesser hergestellt. In die Bohrungen wurden dann Aluminiumfolienstücke eingelegt, um ein Verschließen der Fehlstellen zu verhindern. Nachfolgend wurden an den Quaderstirnseiten die Öffnungen zuvulkanisiert.

Um die Ortung der Fehlstellen in möglichst vielen verschiedenen Tiefenlagen vornehmen zu können, wurden die Proben teilweise von beiden Seiten untersucht. Dadurch konnte die Anzahl der Proben halbiert werden.

### 3.5.3 Ergebnisse der Untersuchungen an elastomeren Fugenbändern

Die Versuchsergebnisse der ersten Laborversuche mit elastomeren Fugenbändern lassen sich wie folgt zusammenfassen:

#### (1) Nicht ortbare Fehlstellen

In folgenden Fällen konnten die Hohlstellen nicht bzw. nur sehr undeutlich erkannt werden (vgl. Tabelle 3):

- a) Wenn die Hohlstellen vom Fugenbandmaterial nicht vollkommen luftdicht eingeschlossen sind (Proben Nr. 1, Nr. 3, Nr. 10; vgl. Tabellen 1 und 3), kann zwischen Hohlstelle und der Umgebungsluft des Fugenbandes ein Druckausgleich stattfinden. Obwohl eine Hochleistungs-Vakuumpumpe eingesetzt wurde, geschah der Druckausgleich so schnell, daß sich kein Überdruck in der Fehlstelle für eine erkennbare Verformung an der Oberfläche einstellte und deshalb die Hohlstelle nicht geortet werden konnte.
- b) Hohlstellen im Bereich der Ankerrippen in den Proben Nr. 6 und Nr. 7a (Tabellen 1 und 3) bei einer Materialüberdeckung von  $t = 12$  mm konnten nicht geortet werden. Bei der Erzeugung des Unterdrucks verformte sich die Ankerrippe. Die Signale, hervorgerufen durch die Rippenverformung und die im Rippenbereich liegende Fehlstelle überlagerten sich derart, daß die Fehlstelle nicht erkannt werden konnte (Bild 6).
- c) Zylinderförmige Hohlstellen (Länge ca. 20 mm) mit einem Durchmesser von ca. 2 mm oder kleiner waren bei einer Überdeckung des Fugenbandmaterials ab ca. 5 mm nicht oder nur schwach ortbar (Proben Nr. 7b, Nr. 14 bis Nr. 16) (Bild 18) (Tabellen 1, 2 und 3).

#### (2) Einfluß der Form, Lage und Größe der Fehlstellen

Folgende Hohlstellen konnten geortet werden, falls sie vom Fugenbandmaterial luftdicht umschlossen waren:

- a) Flächige Hohlstellen (Proben Nr. 2 und 4; vgl. Tabelle 1) mit einer Größe von ca. 10 mm x 10 mm parallel zur Fugenbandebene bei Materialüberdeckungen von bis zu ca. 5 mm im Dehn-, Schlauch- und Labyrinthbereich (Bilder 7, 8 und 9) sowie unter einer Bandage (Proben Nr. 8 und Nr. 9) (Bilder 12 und 13) konnten erkannt werden. Auch flächige Hohlstel-

len (Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm) parallel zur Fugenbandebene (Proben Nr. 12 und Nr. 13; vgl. Tabellen 2 und 3) konnten bis zu einer Materialüberdeckung von 15 mm geortet werden (Bilder 14 bis 16).

- b) Hohlstellen im Bereich der Ankerrippen (Probe Nr. 5; vgl. Tabelle 1) waren nicht immer eindeutig ortbar (Bild 10).
- c) Zylinderförmige Hohlstellen mit einem Durchmesser von ca. 3 mm bzw. 5 mm (Länge ca. 20 mm) in ca. 5 mm bzw. bis zu maximal 9 mm Tiefe unter der Prüfoberfläche konnten im Dehn- und Labyrinthbereich geortet werden (Proben Nr. 15 und Nr. 16; Tabellen 2 und 3) (Bilder 18 bis 20). Bei ergänzenden systematischen Versuchen an quaderförmigen Elastomerproben konnte in den vorliegenden Untersuchungsgrenzen festgestellt werden, daß eine Fehlstelle nur geortet werden kann, wenn die Materialüberdeckung (Tiefenlage) der Fehlstelle nicht mehr als etwa das Doppelte des Fehlstellendurchmessers beträgt (vgl. Tabelle 4 sowie Bilder 21 bis 25).

### (3) Einfluß der Scherrichtung

In Bereichen mit glatten Oberflächen (Dehnbereich) ist die Ortung von flächigen Hohlstellen, die keine besondere Ausrichtung und Form (quadratisch oder rund) haben, unabhängig von der Scherrichtung (Bilder 7, 8 und 9). Dagegen können Hohlstellen mit einer länglichen Form (Längsachse in Fugenbandstoßrichtung) am besten geortet werden, wenn die Scherrichtung senkrecht zur Längsrichtung der Hohlstelle eingestellt wird.

Die flächige, senkrecht in der Ankerrippe angeordnete Fehlstelle in der Probe Nr. 5 (vgl. Tabelle 3 und Bild 10) konnte trotz Änderung der Scherrichtung nicht eindeutig geortet werden.

Im Bereich der Labyrinthrippen können die Fehlstellen (Proben Nr. 7a; vgl. Tabelle 1) unabhängig von ihrer Art und ihrem Verlauf am besten geortet werden, wenn die Scherrichtung parallel zur Fugenbandlängsrichtung bzw. parallel zum Rippenverlauf gewählt wird (Bild 11).

Da in der Praxis längliche Hohlstellen im Stumpfstoßbereich häufig senkrecht zur Fugenbandlängsrichtung liegen, ist die Scherrichtung parallel zur Fugenbandlängsrichtung von Vorteil.

#### (4) Fehlstellen im Bereich von Bandagen

Die flächigen Hohlstellen unter der Bandage (Proben Nr. 8 bis 9; vgl. Tabellen 1 und 3) konnten gut geortet werden (Bilder 12 und 13).

In den Proben Nr. 10 und Nr. 11 (Tabelle 1 und 3) konnten keine Fehlstellen ermittelt werden. Die Fehlstelle in Probe Nr. 10 hatte eine Verbindung zum Luftdruck in der Saugglocke. Es fand somit ein Druckausgleich zwischen dem Luftdruck in der Fehlstelle und dem Unterdruck in der Saugglocke statt. Eine Fehlstellenortung ist in einem solchen Fall mit der TV-Shearografie generell nicht möglich.

Es wurde aufgrund der besonderen Herstellung vermutet, daß die Probe Nr. 11 eine poröse Struktur im Stoßbereich besitzt. Mit Hilfe der TV-Shearografie konnte jedoch keine Fehlstelle im Stoßbereich geortet werden. Durch das nachträgliche Aufschneiden der Probe wurde das Prüfergebnis der TV-Shearografie bestätigt.

#### (5) Einfluß der Stoßherstellung

Zusätzlich zu den gezielt präparierten Fehlstellen wurden weitere Fehlstellen geortet, die nicht planmäßig bei der Herstellung der Stöße entstanden sind:

- a) Bei Probe Nr. 14 sind die Stoßflanken am Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) um etwa 1 mm auseinander gedrückt worden. Dabei entstand ein Hohlraum mit einer Querschnittsfläche von etwa 1 mm x 3 mm (Höhe x Breite) und einer Länge von ca. 20 mm. Dieser Hohlraum wurde trotz der aufliegenden 6 mm dicken Bandage geortet (Bild 17).
- b) Bei Probe Nr. 15 war am Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) ein typisches Signal sichtbar, das auf eine Fehlstelle schließen ließ (Bild 19). Beim Aufschneiden der Probe konnte unter der Bandage (Materialüberdeckung 5 mm bis 6 mm) eine flächige Hohlstelle von der Größe ca. 10 mm x 5 mm x 1 mm entdeckt werden.

Die Ortung dieser nicht präparierten Fehlstelle bestätigt noch einmal, daß nicht nur künstlich mit Aluminiumfolie präparierte, sondern auch natürliche Fehlstellen mit der TV-Shearografie geortet werden können.

## (6) Unterdruck

Bei den Versuchen mit elastomeren Fugenbändern hat sich ein Unterdruck von maximal ca. 150 mbar bewährt, wenn die Fugenbandprobe komplett in die Saugglocke (Unterdruckraum) eingelegt wird. Beispielsweise konnten bei der Probe Nr. 13 (vgl. Tabellen 2 und 3) Fehlstellen im Dehn- und Labyrinthbereich bei einem Unterdruck von 150 mbar geortet werden (Bild 15). Eine Erhöhung des Unterdrucks führte in der Regel zu stärkeren Störsignalen.

## (7) Einsatz einer kleineren Vakuumpumpe

Bei den Versuchen mit der Glas-Saugglocke wurde alternativ zur Hochleistungs-Vakuumpumpe (Leistung 16 m<sup>3</sup>/h) eine kleine, leicht tragbare Vakuumpumpe (Saugleistung 4 m<sup>3</sup>/h) erfolgreich erprobt. Die Abpumpzeiten waren nur unwesentlich länger. Die Frage stellt sich jedoch, ob die Abpumpzeiten auch bei größeren Saugglocken (Kapitel 4) noch ausreichen.

## (8) Temperatureinfluß auf die Fehlstellenortung

Im untersuchten Temperaturbereich zwischen +5°C und +20°C hatte die Temperatur bei den elastomeren Probekörpern keinen großen Einfluß auf die Ortung der Fehlstellen (Probe Nr. 16; Tabellen 2 und 3 sowie Bild 20) (Einfluß höherer Temperaturen siehe Kapitel 4.5.2 Punkt (4)).

## (9) Erprobung eines preiswerteren Lasers

Der 100 mW starke Festkörperlaser (Neupreis ca. DM 35.000,--) wurde durch einen 10 mW starken Gaslaser (Helium-Neon-Laser, Neupreis ca. DM 2.000,--) ersetzt.

Mit dem ca. 40 cm langen Gaslaser (Helium-Neon-Laser) konnte jedoch nur eine Fläche von ca. 7 cm x 7 cm ausgeleuchtet werden. Somit sind zur Untersuchung eines beispielsweise 40 cm breiten Fugenbandstoßes etwa sechs Aufnahmen erforderlich. Dagegen kann mit dem wesentlich leistungsfähigeren Festkörperlaser der gesamte Stoß mit nur zwei Aufnahmen erfaßt werden. Wenn die Strahlaufweitung durch eine Zylinderlinse in Richtung der Stoßflanken gestreckt wird (Ausleuchtungsfläche beispielsweise 7 cm x 40 cm) kann mit dem leistungsstarken Festkörperlaser eventuell sogar der gesamte Stoß ausgeleuchtet werden, so daß nur noch eine einzige Aufnahme pro Stoß erforderlich ist.

Ein Gaslaser (Helium-Neon-Laser), der die Leistungsfähigkeit des genannten Festkörperlaser erreicht, ist aber entsprechend länger und deshalb in einem Baustellenprüfgerät nicht so gut verwendbar. Alternativ können eventuell Halbleiterlaser eingesetzt werden. Halbleiterlaser sind ebenfalls preiswerter als der Festkörperlaser und bieten trotz kompakter Bauweise eine ausreichende Laserleistung. Jedoch sind ihre optischen Eigenschaften (Kohärenzlänge, Kohärenzzeit und Frequenzspektrum) nicht so gut wie die des Festkörper- oder des Gaslasers.

Es wurde deshalb in den nachfolgenden Versuchen weiterhin der Festkörperlaser eingesetzt, wenn nicht ausdrücklich auf einen anderen Laser hingewiesen wird (vgl. Kapitel 6.4 und 6.5).

Nachfolgend wurden Versuche an thermoplastischen Fugenbändern durchgeführt (Kapitel 3.6).

### **3.6 Versuche mit thermoplastischen Fugenbändern**

#### **3.6.1 Allgemeines**

Der Versuchsaufbau für die Versuche mit thermoplastischen Fugenbandstößen war der gleiche wie bei den Versuchen mit elastomeren Fugenbandstößen (Bild 3).

Zu beachten ist, daß auch bei den Versuchen mit thermoplastischen Fugenbändern und der Glas-Saugglocke die Fugenbandproben komplett in den Unterdruckraum (Glas-Saugglocke) eingelegt wurden. Der Luftdruck im Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) in der Nähe des Stoßbereiches entsprach daher während des Prüfvorganges dem Unterdruck in der Glas-Saugglocke. Störsignal durch einen Überdruck (Normaldruck) im Hohlkörper traten deshalb in diesen Versuchsreihen nicht auf (vgl. Kapitel 4.5.3).

Die optimalen Versuchsparameter (z.B. Unterdruck) wurden jedoch aufgrund der Vorversuche (Kapitel 3.3) dem Thermoplast entsprechend angepaßt (Kapitel 3.6.3).

Sonstige Versuchsparameter (z.B. Laserleuchtstärke, Aufhellung der Probenoberfläche, Größe der Untersuchungsfläche) wurden gegenüber den Versuchen mit elastomeren Fugenbändern nicht verändert (vgl. Kapitel 3.3).

### **3.6.2 Präparation von Fehlstellen an thermoplastischen Fugenbändern**

Für die Versuche wurden zehn Fugenbandstöße aus dem thermoplastischen Fugenband "Tricomer D320/9" nach DIN 18541 (Tabellen 5 und 6) mit Fehlstellen präpariert und fünf Quader mit zylindrischen Fehlstellen aus thermoplastischem Fugenbandmaterial hergestellt (Bild 5).

Für die Herstellung von flächigen Hohlstellen (Proben Nr. 17 bis Nr. 21; vgl. Tabelle 5) wurde mit einem Messer in die Stirnfläche von ca. 10 cm langen Fugenbandabschnitten Schlitzze eingeschnitten. In die Schlitzze wurde eine ca. 1 cm x 1 cm große doppellagige Aluminiumfolie eingelegt, um künstliche Hohlräume zu erzeugen.

Für die Herstellung von zylinderförmigen Hohlstellen (Proben Nr. 22 und Nr. 23; vgl. Tabelle 5) wurden an weiteren Fugenbandabschnitten von der Stirnfläche her mit Bohrern zylinderförmige Hohlräume parallel zur Fugenbandrichtung in das Fugenbandmaterial gebohrt. Die zylinderförmigen Hohlräume hatten einen Durchmesser von ca. 1 mm bzw. ca. 3,5 mm.

Die Hohlräume wurden verschlossen, indem an die präparierten Fugenbandabschnitte jeweils ein Fugenbandabschnitt gleicher Länge (10 cm) angeschweißt wurde.

Die Abmessungen der Quader betragen jeweils 260 mm x 130 mm x 40 mm. Jeder Quader erhielt 10 zylinderförmige Hohlstellen in den Tiefen (Materialüberdeckung) 2 mm bis 20 mm (Bild 5). In einem Quader hatten die Fehlstellen jeweils den gleichen Durchmesser. Von Quader zu Quader variierte jedoch der Fehlstellendurchmesser (1 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm und 7 mm).

### **3.6.3 Ergebnisse der Untersuchungen an thermoplastischen Fugenbandstößen**

Die in den thermoplastischen Fugenbandstößen georteten bzw. nicht georteten Fehlstellen sind in den Tabellen 7 und 8 aufgelistet und in den Bildern 26 bis 41 dokumentiert.

Die Versuchsergebnisse der Versuche an den thermoplastischen Fugenbändern lassen sich wie folgt zusammenfassen:

(1) Nicht ortbare Fehlstellen

Folgende Hohlstellen konnten nicht bzw. nur sehr undeutlich erkannt werden:

- a) Zylinderförmige Hohlstellen mit einem Durchmesser von 2 mm konnten bei einer Materialüberdeckung von über ca. 6 mm nicht mehr geortet werden (Proben Nr. 25 und Nr. 26; vgl. Tabellen 7 bis 8) (Bilder 35 und 36).
- b) Die flächige Fehlstelle, die senkrecht zur Fugenbandebene in einer Ankerrippe angeordnet war, konnte trotz Variation der Versuchsparameter (Scherbetrag und Unterdruck) nicht geortet werden (Tabelle 7, Probe Nr. 21).

(2) Einfluß der Form, Lage und Größe der Fehlstellen

Folgende Fehlstellen konnten geortet werden (Tabelle 7):

- a) Flächige, parallel zur Fugenbandebene ausgerichtete Hohlstellen (Größe ca. 1 cm x 1 cm) bei einer Materialüberdeckung bis zu ca. 11 mm (Tabelle 7, Proben Nr. 17 bis Nr. 20 und Bilder 26 bis 29). Eine flächige Hohlstelle im Hohlkörper der Probe Nr. 24 (Fehlstelle C nach Tabelle 6) konnte erwartungsgemäß nur bei der Shearografie-Aufnahme von der Oberseite (Materialüberdeckung 2 mm) und nicht bei der Aufnahme von der Unterseite (Materialüberdeckung 34 mm) geortet werden (Bilder 33 und 34).
- b) Hohlstellen im Bereich der Ankerrippen sind nur ortbar, wenn die flächige Fehlstelle parallel zur Fugenbandoberfläche verläuft. Bei senkrechter Position konnte die Fehlstelle nicht erkannt werden (Probe Nr. 24; vgl. Tabellen 6 und 7 sowie Bild 33).
- c) Zylinderförmige Hohlstellen ab einem Durchmesser von 1 mm und bis zu einer Materialüberdeckung von maximal 4 mm (Tabelle 7, Proben Nr. 22 und Nr. 23 sowie Bilder 30 und 32). Bei ergänzenden systematischen Versuchen an thermoplastischen Quaderproben konnte in den vorliegenden Untersuchungsgrenzen festgestellt werden, daß eine Fehlstelle mit einem Durchmesser größer als 2 mm nur geortet werden kann, wenn die Materialüberdeckung (Tiefenlage) der Fehlstelle nicht mehr als etwa das

Doppelte des Fehlstellendurchmessers beträgt (Tabelle 8 sowie Bilder 37 bis 41).

(3) Einfluß von Scherrichtung und Scherbetrag

a) Scherrichtung

Bei der Scherrichtung parallel zur Fugenbandlängsrichtung werden die Störsignale, die durch die Ankerrippen und die Riffelung des Fugenbandes hervorgerufen werden - wie bei den Versuchen mit elastomeren Fugenbandstößen - am besten unterdrückt. Im Gegensatz zu den Versuchen mit elastomeren Fugenbändern waren diese Störsignale bei den thermoplastischen Fugenbändern jedoch so gering, daß hier auch Fehlstellen im Bereich der Ankerrippen geortet werden konnten.

b) Scherbetrag

Ein Scherbetrag zwischen 5 mm und 10 mm erwies sich für die Fehlstellenortung am günstigsten. Bei größerem Scherbetrag wird zwar die Auflösung des Verfahrens besser, jedoch treten verstärkt Störsignale auf, die die Fehlstellenortung erschweren.

(4) Unterdruck

Bei den Versuchen mit thermoplastischen Fugenbändern war maximal ein Unterdruck von ca. 50 mbar erforderlich, wenn die Fugenbandprobe komplett in die Saugglocke (Unterdruckraum) eingelegt wird. Eine Erhöhung des Unterdrucks führte in der Regel zu stärkeren Störsignalen (Probe Nr. 26; vgl. Tabellen 6 und 7 sowie Bild 36). Der erforderliche Unterdruck ist damit deutlich niedriger als bei den elastomeren Fugenbändern (maximaler Unterdruck ca. 150 mbar).

(5) Einsatz einer kleineren Vakuumpumpe

Bei den Versuchen mit der Glas-Saugglocke wurde alternativ zur Hochleistungs-Vakuumpumpe (Leistung 16 m<sup>3</sup>/h) eine kleine, leicht tragbare Vakuumpumpe (Saugleistung 4 m<sup>3</sup>/h) erfolgreich erprobt. Die Abpumpzeiten waren nur unwesentlich länger. Die Frage stellt sich, ob die Abpumpzeiten auch bei größeren Saugglocken (Kapitel 4) noch ausreichen.

(6) Temperatureinfluß auf die Fehlstellenortung

Bei den thermoplastischen Fugenbändern erschwerten niedrige Temperaturen (unter etwa +15°C) die Ortung der Fehlstellen.

Bei einer Temperatur von ca. 13°C waren kleine zylinderförmige Hohlstellen (Durchmesser ca. 1 mm) nicht mehr ortbar, obwohl der Unterdruck bis zu 250 mbar gesteigert wurde. Bei einer Temperatur von ca. 17°C traten die Fehlstellen jedoch bereits bei einem Unterdruck von 100 mbar in Erscheinung (Probe Nr. 22; vgl. Tabellen 6 und 7 sowie Bild 31). Bei +23°C konnte der Unterdruck auf ca. 50 mbar gesenkt werden und die Fehlstellen konnten gut geortet werden (Probe Nr. 22; vgl. Tabellen 6 und 7 sowie Bild 30) (Einfluß höherer Temperaturen siehe Kapitel 4.5.2 (Punkt (4))).

(7) Erprobung eines preiswerteren Lasers

Der 100 mW starke Festkörperlaser (Neupreis ca. DM 35.000,--) wurde durch einen 10 mW starken Gaslaser (Helium-Neon-Laser, Neupreis ca. DM 2.000,--) ersetzt.

Mit dem ca. 40 cm langen Gaslaser (Helium-Neon-Laser) konnte jedoch nur eine Fläche von ca. 7 cm x 7 cm ausgeleuchtet werden. Somit sind zur Untersuchung eines beispielsweise 40 cm breiten Fugenbandstoßes etwa sechs Aufnahmen erforderlich. Dagegen kann mit dem wesentlich leistungsfähigeren Festkörperlaser der gesamte Stoß mit nur zwei Aufnahmen erfaßt werden.

Es wurde daher beschlossen, in den nachfolgenden Versuchsreihen weiterhin einen Festkörperlaser einzusetzen, wenn nicht ausdrücklich auf einen anderen Laser hingewiesen wird (vgl. Kapitel 6.4 und 6.5).

(8) Einspannung der Fugenbänder

Hohlstellen im Bereich der Ankerrippen konnten geortet werden, wenn die Schraubklemmen zur Befestigung der Proben am Stahlwinkel nur noch leicht angezogen wurden. Das Fugenband war hierdurch bedingt geringeren Zwängungen ausgesetzt. Dadurch konnten Kriechbewegungen des Materials, die sich besonders an den Ankerrippen und der Riffelung durch Störsignale bemerkbar machen, reduziert werden. Aufgrund der geringeren Störsignale waren Fehlstellen in den Ankerrippen und im Bereich der Riffelung des Fugenbandes

fast genauso gut ortbar, wie in der ungeriffelten Bodenplatte des Dehnbereichs (Probe Nr. 25; vgl. Tabellen 6 und 7 sowie Bild 35).

Beim Vergleich der Versuchsergebnisse läßt sich feststellen, daß kleine Fehlstellen im thermoplastischen Fugenband leichter ortbar sind als im elastomeren Fugenband. Beispielsweise konnten zylinderförmige Hohlstellen mit einem Durchmesser von 2 mm bei einer Materialüberdeckung von 5 mm nur in den thermoplastischen Fugenbändern geortet werden (vgl. Tabellen 4 und 7).

## 4. Laborversuche mit einer Alu-Saugglocke

### 4.1 Allgemeines

Nach positivem Abschluß der Versuche mit der Glas-Saugglocke (Kapitel 3) sollte eine spezielle Saugglocke konstruiert und hergestellt werden, mit der Prüfungen von ebenen Stumpf-, Kreuz-, L- und T-Stößen möglich sein sollten.

Die Forderung, auch Kreuz-Fugenbandstöße untersuchen zu können, machte es wegen der Größe der Saugglocke erforderlich, diese aus Aluminium und nicht aus Kunststoff herzustellen. Es war nach ersten Überlegungen zu befürchten, daß bei einer großen Saugglocke aus Kunststoff zur Prüfung von Kreuzstößen sich der Abstand zwischen Meßkopf und Oberfläche des Fugenbandes während der Messung aufgrund der Druckänderungen um mehr als 1  $\mu\text{m}$  geändert hätte. In einem solchen Fall stellen sich Fehlsignale durch die Relativbewegungen von Meßkopf und Fugenband ein und machen eine Fehlstellenortung unmöglich.

Eine Saugglocke aus Aluminium hingegen ist steifer als eine Baustellen-Saugglocke. Eine Alu-Saugglocke kann daher zur Prüfung von z.B. Kreuzstößen ausreichend groß hergestellt werden, ohne daß Störsignale, hervorgerufen durch eine Verformung der Saugglocke, auftreten. Es wurde deshalb beschlossen, eine Alu-Saugglocke herzustellen, um im Labor (z.B. Herstellerwerk) lange Fugenbänder mit ebenen Stumpf-, Kreuz-, L- und T-Stößen prüfen zu können. Die Alu-Saugglocke sollte so konstruiert werden, daß mit ihr trotz des relativ großen Gewichtes auch ein Baustelleneinsatz möglich ist (Kapitel 5). Auf der Grundlage der gesammelten Erfahrungen mit der Alu-Saugglocke im Labor und auf der Baustelle sollten dann Vorschläge für ein Baustellenprüfgerät erarbeitet werden (z.B. Software, Meßtechnik, Saugglocke) (Kapitel 6). Bei den Laborversuchen mit der Alu-Saugglocke kam nach wie vor die bereits verwendete Labormeßtechnik zum Einsatz (vgl. Kapitel 3).

Um die Baustellenverhältnisse simulieren zu können, waren lange Fugenbandabschnitte von mindestens etwa 80 cm (vgl. Tabelle 9) erforderlich, deren beide Enden aus der Alu-Saugglocke herausragten und somit im normalen Luftdruckbereich lagen (Kapitel 4.5.2).

## 4.2 Ziel der Laborversuche mit der Alu-Saugglocke

Ziele der Laborversuche mit der Alu-Saugglocke waren:

- (1) Prüfung verschiedener Abdichtungsmaterialien zur Abdichtung zwischen Saugglocke und "durchlaufendem" Fugenband sowie der Dichtigkeit der Saugglocke
- (2) Testen einer speziellen Halterung (bzw. Fugenbandabstützung), die eine möglichst spannungs- und erschütterungsfreie Lage des Fugenbandes in der Saugglocke ermöglicht, um Störsignale beim Aufbringen des Unterdruckes zu vermeiden.

- (3) Erprobung der optischen Meßtechnik

Der Abstand zwischen Meßkopf und Fugenband ist bei dem neuen Prüfgerät nur etwa halb so groß wie bei den Versuchen mit der Glasglocke. Die Aufnahme­fläche muß deshalb neu ermittelt werden.

- (4) Untersuchung von langen Fugenbandabschnitten

Bei den vorlaufenden Versuchsreihen mit der Glas-Saugglocke (Kapitel 3) wurden die Fugenbandabschnitte komplett in die Saugglocke (Unterdruckraum) gelegt. Eine Verbindung der Fugenbänder zum außerhalb der Glocke herrschenden Normalluftdruck bestand nicht. Bei der Prüfung z.B. eines Baustellenstumpstoßes "durchlaufen" die langen Fugenbänder jedoch das Prüfgerät. Es sollten daher mit der Alu-Saugglocke auch Versuche mit langen Fugenbandabschnitten durchgeführt werden, deren Enden außerhalb der Alu-Saugglocke im Bereich des atmosphärischen Normaldruckes liegen. Wenn in der Saugglocke nun ein Unterdruck erzeugt wird, bleibt im Hohlkörper (Dehnteil) des Fugenbandes der Normalluftdruck erhalten. Deshalb werden vermutlich Störsignale vom Hohlkörper verursacht. Diese müssen durch geeignete Maßnahmen unterdrückt werden, damit im Labor (z.B. Herstellerwerk) und auf der Baustelle auch Stöße mit langen Fugenbandabschnitten geprüft werden können.

- (5) Ermittlung des Einflusses hoher Lufttemperaturen auf die Fehlstellenortung  
Bei den bisher durchgeführten Versuchen mit der Glas-Saugglocke (Kapitel 3) wurden nur Temperaturen bis zu ca. +20°C untersucht. Um auch Bedingungen

im Sommer erfassen zu können, wurden ergänzende Versuche bei ca. +35°C mit der Alu-Saugglocke durchgeführt.

### **4.3 Anforderungen an die Alu-Saugglocke**

Damit auch lange Fugenbänder und verschiedenartige Fugenbandstöße geprüft werden können, war eine neue Saugglocke aus Aluminium erforderlich. An die Alu-Saugglocke wurden u.a. folgende nennenswerte Anforderungen gestellt:

#### **(1) Abmessungen der zu prüfenden Fugenbänder**

Die Saugglocke soll zur Prüfung von elastomeren und thermoplastischen Fugenbändern mit einer Breite zwischen 150 mm und 520 mm eingesetzt werden können. Die Höhe der Fugenbänder beträgt maximal 50 mm.

#### **(2) Stoßformen**

Mit der Saugglocke sollen ebene Stumpf-, T-, L- und Kreuzstöße getestet werden können (Bild 42).

#### **(3) Prüfung von langen Fugenbandabschnitten**

Da mit der Saugglocke u.a. bereits ausgeführte Fugenbandstöße auf der Baustelle geprüft werden sollen, muß die Saugglocke auch bei Einsatz langer Fugenbandabschnitte verwendet werden können. Die Saugglocke muß daher die Möglichkeit bieten, daß Fugenbänder die Saugglocke "durchlaufen" können. Hierzu muß die Saugglocke in zwei Teile zerlegt werden können, zwischen denen das Fugenband eingeklemmt wird. An den Eintritts- bzw. Austrittsöffnungen für die Fugenbänder muß ein luftdichter Abschluß mit der Saugglocke hergestellt werden (vgl. Punkt (4)).

#### **(4) Anpassung an verschiedene Fugenbandprofile**

Die Anpassung an verschiedene Fugenbandprofile erfolgt durch luftdicht mit der Alu-Saugglocke verschraubbare Klemmprofile, die Aussparungen zur Durchführung des zu prüfenden Fugenbandes z.B. im Bereich der Dichtrippen besitzen. Diese Aussparungen sollen grob dem jeweiligen Fugenbandprofil folgen (Bild 43). Verbleibende Zwischenräume zwischen Fugenband und Klemmprofil werden durch eine Dichtungsmasse (z.B. Knetgummi oder Moosgummi) luftdicht verschlossen.

Für die Prüfung eines Kreuzstoßes sind am Ober- und Unterteil der Saugglocke jeweils vier Klemmprofile (insgesamt 8 Stück) erforderlich (Bild 42d).

Bei der Prüfung von ebenen Stumpf-, L- bzw. T-Stößen sollen die Seiten, die nicht von dem Fugenband durchlaufen werden, mit Abdichtungsblöcken ohne Aussparungen verschlossen werden (Bilder 42a bis 42c).

#### (5) Maximaler Unterdruck

Die Laborversuche mit der Glasglocke zeigten, daß Unterdrücke von ca. 150 mbar für die Ortung der Fehlstellen ausreichen. Aus Sicherheitsgründen soll jedoch die Saugglocke für einen Unterdruck von 500 mbar ausgelegt werden, der in etwa 5 Sekunden aufgebracht werden muß.

#### (6) Steifigkeit der Saugglocke

Der Abstand zwischen Meßkopf und Oberfläche des Prüflings darf maximal 400 mm betragen und darf sich während der Messung aufgrund der Druckänderungen nur geringfügig ändern ( $<1 \mu\text{m}$ ), da sonst die Relativbewegungen von Meßkopf und Fugenband zu Fehlsignalen führen können.

(7) Das Gewicht des Ober- bzw. Unterteils der Saugglocke darf maximal je ca. 50 kg betragen, damit die Saugglocke auch von Personen transportiert werden kann.

(8) Für den Transport der Saugglocke soll diese mit Handgriffen ausgestattet werden.

Gemäß diesen Anforderungen wurde eine aus folgenden Komponenten bestehende Saugglocke angefertigt (Bilder 44 und 45):

- Quadratisches Unterteil zur Aufnahme des Fugenbandes

Die Außenabmessungen betragen ca. 710 mm x 710 mm x 200 mm. Der Boden besteht aus einer verformungsarmen, ca. 20 mm dicken Aluminiumplatte. Auf diese Grundplatte werden Halterungen und Klemmleisten für die Fugenband-Klemmprofile aufgeschraubt. Nach dem Einlegen des Fugenbandes werden die Klemmprofile eingesetzt und festgeschraubt.

- Pyramidenförmiges Oberteil

Das Oberteil aus ca. 5 mm dickem Aluminium wird auf das quadratische Unterteil mit Fugenband aufgeschraubt. Nach oben hin schließt das ca. 300 mm hohe Oberteil mit einem horizontalen Tableau ab, an dem der Laser-Meßkopf

festgeschraubt wird. Ferner sind am Oberteil das Unterdruck-Manometer und der Anschlußstutzen für die Vakuumpumpe angebracht. Um mögliche Verformungen des Oberteils beim Aufbringen des Unterdrucks gering zu halten, wurden jedoch keine größeren Aussparungen für Sichtfenster in die trapezförmigen Aluminium-Seitenteile eingeschnitten.

Vier Abstandshülsen in den Ecken der Grundplatte des Unterteils sorgen für einen definierten Abstand zwischen Saugglockenober- und -unterteil. Durch die Abstandshülsen verläuft jeweils ein Gewindestab für die Verschraubung der beiden Saugglockenteile.

Die für den Einbau der Fugenbänder benötigten Klemmprofile wurden aus Polyamid gefertigt. Von den insgesamt 16 Klemmprofilen erhielten 8 Stück Aussparungen zum Einlegen von Fugenbändern. Die übrigen 8 Kunststoffblöcke erhielten keine Aussparungen, um auch z.B. bei Stumpfstoßen nicht benötigte Durchführungen im Grundrahmen luftdicht verschließen zu können. Ferner können bei Verwendung der profillosen Kunststoffblöcke auch Unterdruckuntersuchungen an der Saugglocke selbst durchgeführt werden.

#### **4.4 Funktionsprüfung der Alu-Saugglocke**

Zur Erprobung der Alu-Saugglocke wurden folgende Versuche durchgeführt:

##### **(1) Dichtigkeit der Saugglocke**

In die Saugglocke wurde der thermoplastische Stumpfstoß eingelegt. Zur Abdichtung zwischen Saugglocke und Fugenband wurde ein handelsüblicher Knetgummi verwendet. Es zeigten sich keine Undichtigkeiten, so daß ein Unterdruck von 300 mbar eingestellt werden konnte. Bei weiterer Erhöhung des Unterdrucks wurde der Knetgummi zwischen den Klemmprofilen und dem Fugenband in die Saugglocke gesogen.

Die vorlaufenden Laborversuche mit der Glas-Saugglocke haben jedoch gezeigt, daß ein Unterdruck von 150 mbar für die Fehlstellenortung genügt. Deshalb ist die Dichtwirkung des Knetgummis ausreichend.

##### **(2) Zeitbedarf zum Aufbringen des Unterdruckes**

Bei den vorlaufenden Laborversuchen mit der Glas-Saugglocke konnte mit der kleinen Vakuumpumpe (Saugleistung 4 m<sup>3</sup>/h) der Unterdruck von 150 mbar in

etwa 6 Sekunden erzeugt werden. Bei der neuen Saugglocke mit etwa 3-fachem Volumen mußte die Zeit zur Aufbringung des festgelegten Unterdruckes jedoch auf etwa 20 Sekunden verlängert werden. Da bei einer einzigen Shearografieaufnahme fortlaufend mit der Luftdruckabsenkung mehrere Bildaufnahmen vom Fugenband bis zum Erreichen des maximal festgelegten Unterdruckes mit der Videokamera aufgezeichnet werden müssen, mußte die Gesamtaufnahmezeit verlängert werden, um sie der größeren Zeitspanne zur Aufbringung des Unterdruckes anzupassen.

Es zeigte sich allerdings, daß bei längeren Aufnahmezeiten und größerem Unterdruck (150 mbar) die Fehlstellen wegen starker Störsignale nicht mehr erkannt werden konnten (Probe Nr. 30; vgl. Bild 50 und Tabelle 10). Um eine schnellere Unterdruckerzeugung und damit kurze Aufnahmezeiten bei gleichzeitig vorliegendem hohem Unterdruck zu ermöglichen, sind konstruktive Änderungen an den Zuleitungen erforderlich. Falls diese Maßnahme nicht ausreicht, muß das Saugglockenvolumen verkleinert oder eine Vakuumpumpe mit stärkerer Saugleistung gewählt werden.

### (3) Halterung des Fugenbandes in der Saugglocke

Zur Unterstützung des Fugenbandes im Stoßbereich wurden auf der Grundplatte der Saugglocke neben dem Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) zwei Aluminiumblöcke (Abmessungen Länge x Breite x Höhe ca. 100 mm x 50 mm x 50 mm) gelegt. Dadurch konnten Durchbiegungen des Fugenbandes in der Saugglocke nahezu vermieden werden. Um den Einfluß der Unterstützung auf die Fehlstellenortung zu ermitteln, wurden auch Versuche ohne Unterstützung des Fugenbandes durchgeführt. Wider Erwarten waren zwischen den Aufnahmen mit und ohne Unterstützung keine gravierenden Unterschiede zu erkennen (Probe Nr. 30; vgl. Bild 51 und Tabelle 10). Um optische Verzerrungen durch eine unebene Lage des Fugenbandes möglichst gering zu halten, wird jedoch eine Unterstützung des Fugenbandes empfohlen.

### (4) Erprobung der optischen Geräte

Es zeigte sich, daß die optischen Geräte, die bei den Laborversuchen mit der Glas-Saugglocke verwendet wurden, auch in Verbindung mit der neuen Aluminium-Saugglocke einsetzbar sind. Für die zur Verfügung stehende Laboroptik war das Fenster zum Durchlaß der Laserstrahlen zu klein, so daß der Meßbereich auf eine Fugenbandoberfläche mit einem Durchmesser von etwa 10 cm beschränkt

blieb. Deshalb mußten die Spiegel am Strahlteilerwürfel verstellt werden, um abschnittsweise den gesamten Fugenbandstoß aufnehmen zu können. Mit einer speziell entwickelten Meßoptik, die erst später zur Verfügung stand (Kapitel 6), kann der gewünschte Meßbereich bei der gewählten Fenstergröße auch mit einer einzigen Aufnahme erfaßt werden. Für die nachfolgenden Versuche mit der Laboroptik wurde jedoch ein größeres Fenster in die Alu-Glocke eingebaut, um den gesamten Fugenbandstoß mit einer einzigen Einstellung erfassen zu können.

#### (5) Handhabung der Saugglocke

Der Einsatz des Prüfgerätes ist insbesondere wegen des relativ hohen Gewichtes noch sehr unhandlich (Dauer für das Einrichten für einen Fugenbandstoß ca. 1 Stunde).

Das Prüfgerät hat einschließlich des Meßkopfes ein Gesamtgewicht von etwa 110 kg. Davon entfallen etwa 10 kg auf den Meßkopf, etwa je 50 kg auf das Saugglockenunterteil und das Saugglockenoberteil. Deshalb kann das Oberteil der Saugglocke mit dem Meßkopf nur mühsam von zwei Personen angehoben werden. Durch kassettenförmige Ausfräsungen in den Bauteilen großer Dicke und durch Austausch der Stahlteile gegen Aluminiumteile kann das Gewicht eventuell um etwa 20 kg reduziert werden. Für regelmäßige Einsätze z.B. im Labor des Fugenbandherstellers ist jedoch das verbleibende Gewicht von ca. 90 kg immer noch relativ groß. Weitere Gewichtseinsparungen sind jedoch nur möglich, wenn die Saugglocke statt für einen Unterdruck von 500 mbar nur für einen Unterdruck von ca. 200 mbar ausgelegt und leichtere Spezialwerkstoffe verwendet werden.

### **4.5 Prüfung von elastomeren und thermoplastischen Fugenbandstößen mit der Alu-Saugglocke**

#### **4.5.1 Probenpräparation**

Für die Laborversuche mit der Alu-Saugglocke wurden aus dem thermoplastischen Fugenband "Tricomer D320/9" drei Fugenbandstöße (jeweils ein Stumpf-, T- und Kreuzstoß) und aus dem elastomeren Fugenband "Elastomer FM350" ein Stumpfstoß hergestellt.

Die Fugenbandabschnitte mit dem jeweils mittig angeordneten Stoß hatten je eine Länge von ca. 80 cm. Dies bedeutet, daß die Fugenbandproben nicht komplett in den Unterdruckraum (Alu-Saugglocke) gelegt werden konnten, sondern daß beide Fugenbandenden aus der Saugglocke herausragten und damit im normalen Luftdruckbereich lagen. Durch den Einsatz dieser längeren Fugenbandabschnitte sollten die Bedingungen eines Baustellen-Fugenbandstoßes simuliert werden. Die bei den Shearogrammen eingestellten Versuchparameter sind aus den Tabellen 10, 11 und 12 ersichtlich.

Die Fugenbandstöße erhielten die in Tabelle 9 dargestellten Fehlstellen. Für den Einbau der Fehlstellen in die Stöße wurden von den Stoßflanken ausgehend etwa  $1 \text{ cm}^2$  große Schlitz in die Fugenbänder eingeschnitten und zylinderförmige Hohlräume eingebohrt. Damit diese Hohlräume bei der Stoßherstellung nicht verkleben oder verfüllt werden, wurden in die Fehlstellen doppellagige Aluminiumfolienstücke eingesteckt. Für die flächigen Hohlstellen unter der Bandage wurde vor der Stoßherstellung lediglich jeweils eine doppellagige Aluminiumfolie (ca.  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ) zwischen Fugenband und Bandage gelegt.

#### **4.5.2 Versuchsergebnisse**

Die Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

(1) Prüfung von langen thermoplastischen und elastomeren Fugenbändern mit Stumpfstößen

Die langen Fugenbandproben wurden so in die Alu-Glocke eingebaut, daß die Enden der Fugenbandabschnitte außerhalb und der Fugenbandstoß selbst innerhalb der Prüfglocke lagen. Hierdurch bedingt kann bei Aufbringen des Unterdruckes die Luft im Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes), der eine Verbindung zur Außenluft (normaler Luftdruck) hat, nicht mit abgesaugt werden. Dadurch dehnt der Luftüberdruck (normaler Luftdruck) im Hohlkörper den Hohlkörper und verformt den im Unterdruck liegenden Fugenbandbereich ähnlich wie eine Fehlstelle. Unerwünschte Störsignale durch die Dehnung des Hohlkörpers sind die Folge.

Bei den Stumpfstößen bewirkte jedoch die Ausdehnung des Hohlkörpers (Mittelschlauch des Fugenbandes) bei der richtigen Wahl des Unterdruckes (vgl.

Punkt (3)) im wesentlichen nur Verformungen senkrecht zur Fugenbandlängsrichtung und damit auch senkrecht zur Scherrichtung (Bild 58a). Da das Shearografieverfahren gegen Bewegungen senkrecht zur Scherrichtung relativ unempfindlich ist, wirken sich die Fugenbandbewegungen durch die Hohlkörperausdehnung nicht so stark aus (Proben Nr. 27 und Nr. 30; vgl. Tabellen 9 und 10 sowie Bilder 46 und 52).

(2) Prüfung von langen thermoplastischen Fugenbändern mit T- und Kreuzstößen

Bei der Prüfung der langen thermoplastischen Fugenbänder mit T- und Kreuzstößen waren die Störsignale auf Grund der Dehnung des Hohlkörpers (Mittelschlauch des Fugenbandes) so groß, daß fast der gesamte Bildausschnitt als Fehlstelle in Erscheinung trat (Bilder 62 und 63). Die Störsignale konnten auch bei verschiedenen Unterdrücken (Tabellen 10 und 11) nicht eliminiert werden. Der Grund hierfür ist, daß anders als bei Stumpfstoßen bei den T- und Kreuzstößen durch die Hohlkörperausdehnungen das Fugenband sowohl parallel als auch senkrecht zur Scherrichtung verformt wird (Bild 58b). Dadurch werden Störsignale im gesamten Aufnahmebereich hervorgerufen. Durch eine beliebige Drehung der Scherrichtung können die Störungen nicht gemindert werden, da stets Verformungen in Scherrichtung auftreten. Der Unterdruck sollte jedoch in jedem Fall nicht zu groß gewählt werden (vgl. Punkt (3)).

Für die Prüfung von T- und Kreuzstößen im Werk empfiehlt sich eine Saugglocke, die den gesamten Stoß einschließlich aller Fugenbandteile vollkommen umschließt. Bei einer solchen Saugglocke wird die Luft auch aus dem Hohlkörper abgesaugt. Der Hohlkörper dehnt sich dann nicht aus, da stets der gleiche Luftdruck wie im Innenraum der Saugglocke herrscht. Die Anschlußabschnitte sind dann später auf der Baustelle als Stumpfstoß auszuführen und zu prüfen.

Bei T- und Kreuzstößen, die auf der Baustelle an langen Fugenbändern hergestellt werden, ist diese Vorgehensweise jedoch nicht möglich. Deshalb sollte untersucht werden, ob beispielsweise durch Klemmen in der Saugglocke das Fugenband so eingespannt werden kann, daß sich der Hohlkörper nicht mehr seitlich ausdehnt (Bild 59, vgl. Kapitel 4.5.4).

### (3) Unterdruck

Bei den Versuchen mit der Glas-Saugglocke (Kapitel 3) wurden die Fugenbandabschnitte komplett in den Unterdruckraum (Saugglocke) gelegt. Hierdurch stellte sich während der Versuchsdurchführung im Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) und in der Glas-Saugglocke stets der gleiche Unterdruck ein. Höhere Unterdrücke waren daher möglich, ohne zu Störsignalen zu führen. Bei der Prüfung von Fugenbandstößen in langen Fugenbändern ohne optimalen Druckausgleich zwischen Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) und Saugglocke konnte festgestellt werden, daß zur Reduzierung der Störsignale durch den Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) geringere Unterdrücke als bei den Versuchen mit der Glas-Saugglocke (Kapitel 3) vorteilhaft waren. Bei der Prüfung von Fugenbandstößen in langen elastomeren bzw. thermoplastischen Fugenbändern sollte deshalb in der Regel ein Unterdruck von ca. 50 mbar bzw. 25 mbar eingestellt werden.

### (4) Temperatureinfluß

Zur Simulation heißer Sommertage wurden in einem klimatisierten Raum Versuche bei einer Lufttemperatur von +35°C durchgeführt. Die Proben wurden bei dieser Temperatur mindestens zwei Stunden gelagert, damit das Probenmaterial vollständig die Umgebungstemperatur annehmen konnte. Die Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a) Durch die hohe Temperatur kam es zu Aussetzern bei der Spannungsversorgung des Lasers. Die Spannungsversorgungskästen wurden deshalb mit einem kleinen Ventilator gekühlt, so daß keine Aussetzer mehr auftraten.
- b) Beim thermoplastischen Stumpfstoß (Probe Nr. 27; vgl. Tabellen 9 und 10) traten bei einer Temperatur von +35°C etwas mehr Störsignale auf als bei +20°C (Bilder 46 und 47). Versuche an thermoplastischen Quadern mit zylindrischen Hohlstellen zeigten, daß das Fehlstellensignal bei einer Materialüberdeckung der Fehlstelle von 4 mm bei +35°C nahezu gleich wie bei +20°C war (Bild 56).

Beim elastomeren Stumpfstoß (Probe Nr. 30; vgl. Tabellen 9 und 10) waren die Fehlstellen bei einer Temperatur von +35°C nicht mehr so deutlich sichtbar wie bei +20°C (Bilder 52, 55 und 57).

Durch die höhere Temperatur werden beide Fugenbandmaterialien weicher, so daß sich das Fugenband insgesamt leichter verformt und dadurch mehr Störsignale hervorgerufen werden. Ferner wirken sich die lokalen Verformungen durch eine Fehlstelle auf einer größeren Fläche aus, so daß das Fehlstellensignal etwas unscharf auf den Aufnahmen erscheint.

Probleme bereiteten die Störsignale, die durch die Dehnung des Hohlkörpers (Mittelschlauch des Fugenbandes) hervorgerufen wurden. Hierzu waren spezielle Versuchsreihen erforderlich (Kapitel 4.5.3).

### **4.5.3 Spezielle Versuchsreihen zur Unterdrückung von Störsignalen**

Bei den vorherigen Prüfungen (vgl. Kapitel 4.5.2) waren bei T- und Kreuzstößen die Störsignale aufgrund der Dehnung des Hohlkörpers zu groß, um Fehlstellen mit der TV-Shearografie erkennen zu können. Die Störsignale treten nur auf, wenn trotz der Erzeugung des Unterdrucks in der Saugglocke im Hohlkörper des Fugenbandes der normale Luftdruck erhalten bleibt. Um Störsignale zu vermeiden, wird deshalb vorgeschlagen, verzweigte Fugenbandstöße (T-, L- und Kreuzstöße), wenn möglich, nur im Herstellerwerk mit der TV-Shearografie-Aufnahme prüfen zu lassen. Bei dieser Prüfung im Herstellerwerk sollte der Fugenbandstoß komplett in die Saugglocke gelegt werden. Hierdurch werden keine Zusatzmaßnahmen (z.B. Bohrungen) am Fugenband erforderlich. Die an den verzweigten Fugenbandstoß angrenzenden Stumpfstöße können dann auf der Baustelle ohne spezielle Maßnahmen geprüft werden (Kapitel 6).

Falls dennoch auf der Baustelle ein verzweigter Fugenbandstoß mit langen Fugenbändern mit Hilfe der TV-Shearografie geprüft werden soll, müssen Lösungen gefunden werden, um die Entstehung der Störsignale durch geeignete Maßnahmen zu verhindern.

Ziel der weiteren Laborversuche mit der Alu-Saugglocke war es daher, folgende Maßnahmen zur Reduktion der Störsignale, hervorgerufen durch den Hohlkörper des Fugenbandes, eingehender zu untersuchen:

- a) Änderung der meßtechnischen Versuchsparameter, so daß die Empfindlichkeit des Meßverfahrens reduziert wird
- b) Erzeugung des Unterdrucks auch im Hohlkörper
- c) Einklemmung des Hohlkörpers und damit Behinderung seiner ungewünschten Ausdehnung

Die nachfolgend beschriebenen Laborversuche wurden überwiegend am vorhandenen thermoplastischen Kreuzstoß durchgeführt, da bei diesem Fugenbandstoß durch die zweifache Abzweigung und der gegenüber den Elastomerfugenbändern dünneren Hohlkörperwandung die stärksten Verformungen bzw. Störsignale zu erwarten sind.

Der thermoplastische Kreuzstoß (Probe Nr. 29; vgl. Tabellen 9 und 12) besitzt im Dehnbereich zylinderförmige Fehlstellen mit einem Durchmesser von ca. 2 mm bis 3 mm (Bild 60). Die Shearogramme der nachfolgenden Bilder zeigen jeweils den in Bild 60 dargestellten Bildausschnitt.

Die wesentlichen Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

(1) Veränderung der Grundeinstellung

Es wurde zunächst versucht, die Störsignale allein durch Variation der Versuchsparameter so zu unterdrücken, daß die Fehlstellen ortbar sind. Dazu wurden Versuche mit Grundeinstellung und mit veränderten Versuchsparametern, die die Empfindlichkeit des Meßverfahrens herabsetzen, durchgeführt (Tabelle 11).

Bei allen Einstellungen überdeckten jedoch Störsignale das Signal der Fehlstelle, so daß keine Fehlstellenortung möglich war (Tabelle 12, Bild 63).

(2) Unterdruckerzeugung in den Hohlkörpern

Die Hohlkörper wurden über die Fugenbandenden durch ein Leitungssystem mit der Vakuumpumpe verbunden, so daß der Unterdruck in der Sauglocke und in den Hohlkörpern gleichzeitig erzeugt werden konnte.

Es wurden Versuche mit der Grundeinstellung der Versuchsparameter und mit veränderten Versuchsparametern, die die Empfindlichkeit des Meßverfahrens herabsetzen, durchgeführt (Tabelle 11).

Bei der gewählten Grundeinstellung der Versuchsparameter überwogen immer noch die Störsignale, so daß keine Fehlstellenortung möglich war (Tabelle 12, Bild 64). Die günstigste Einstellung wurde durch Halbierung des Unterdrucks erreicht. Mit der Halbierung des Unterdrucks reduzierte sich automatisch entsprechend die Aufnahmezeit und die Bildanzahl, die für eine Shearografieaufnahme verrechnet werden. Bei dieser Einstellung konnte die Fehlstelle im Dehnbereich geortet werden. Jedoch blieben Störsignale, die eine weitere Fehlstelle vortäuschten (Tabelle 12, Bild 65).

### (3) Einklemmung der Hohlkörper

Damit die Ausdehnung des Hohlkörpers beim Aufbringen des Unterdrucks im Saugglockenbereich eingeschränkt wird, wurden die Hohlkörper durch U-Profile an der Ober- und Unterseite des Fugenbandes im Glockenbereich (Unterdruckraum) eingeklemmt. Mit Hilfe von quadratischen Stahl-Hohlprofilen werden die U-Profile auf das Fugenband gedrückt (Tabelle 12, Bild 61).

Durch die Einklemmung des Hohlkörpers ohne Unterdruck im Hohlkörper konnte mit reduziertem Scherbetrag ein ähnlich gutes Ergebnis wie durch die Unterdruckerzeugung im Hohlkörper erzielt werden (Tabelle 12, Bild 66). Die Störsignale konnten soweit reduziert werden, daß die Fehlstelle im Dehnbereich wiederum ortbar war.

Verbleibende Störsignale täuschten jedoch weitere Fehlstellen vor. Ferner zeigte sich, daß die Sicht auf die Fehlstelle durch die Klemmkonstruktion teilweise behindert wird.

### (4) Kombination von Hohlkörpereinklemmung mit Unterdruckerzeugung im Hohlkörper

Wenn die Hohlkörper im Saugglockenbereich eingeklemmt und zusätzlich auch ein Unterdruck im Hohlkörper erzeugt wird, lassen sich die Störsignale fast vollständig unterdrücken. Die Fehlstelle im Dehnbereich tritt deutlich in Erscheinung (Tabelle 12, Bild 67).

Alternativ wurden Versuche an einem thermoplastischen und elastomeren Stumpfstoß durchgeführt, um mit einem geeigneten Abschottsystem und einseitigen Bohrungen im Hohlkörper in Fugenbandstoßnähe den Luftdruck im Dehnteil abzusenken.

Beim thermoplastischen Stumpfstoß reichte eine einzige Bohrung mit einem Durchmesser von 5 mm im Abstand von ca. 7 cm vom Stoß aus, um den erforderlichen Druckausgleich sicherzustellen.

Beim elastomeren Stumpfstoß hingegen mußten zwei Bohrungen mit je einem Durchmesser von 5 mm jeweils ca. 7 cm rechts und links vom Stoß angeordnet werden, weil eine für die Herstellung des Stoßes erforderliche Schaumstoffeinlage im Stoßbereich den Hohlkörper luftdicht unterteilte.

Damit über die Fugenbandenden keine Luft in den Saugglockeninnenraum nachströmen kann, wurde der Hohlkörper durch Schraubklemmen außerhalb der Saugglocke eingeklemmt oder es wurden in den Hohlkörper von den freien Enden der Fugenbänder her ca. 40 mm lange Moosgummizylinder mit einem Durchmesser von ca. 25 mm eingeschoben.

Die Lage dieser Abschottungen hatte folgenden Einfluß auf die Fehlstellenortung:

a) Beim thermoplastischen Stumpfstoß

Wenn die Abschottungen im Hohlkörper beidseitig ca. 20 cm bis 40 cm vom Stoß entfernt angeordnet waren, traten weniger Störsignale auf als bei einer Abschottung, die nur beidseitig ca. 10 cm vom Stoß entfernt angeordnet ist (Bilder 48 und 49).

Bei thermoplastischen Fugenbändern sollten deshalb die Abschottungen im Hohlkörper beidseitig ca. 20 cm bis 40 cm vom Stoß entfernt angeordnet werden.

b) Beim elastomeren Stumpfstoß

Beim elastomeren Stumpfstoß konnten bei allen gewählten Abschottungsorten (von 10 cm bis 40 cm vom Stoß entfernt) durch die Unterdruckerzeugung im Hohlkörper die Störsignale reduziert werden (vgl. Bilder 52, 53 und 54).

Abschottungen, die noch weiter als 40 cm vom Stoß lagen, wurden nicht untersucht.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, daß mit Hilfe von einseitigen Bohrungen in der Hohlkörperwandung und Abschottungen im Hohlkörper der Luftdruck im Hohlkörper gleichzeitig mit dem Luftdruck in der Saugglocke reduziert werden kann, so daß weniger Verformungen und damit weniger Störsignale durch den Hohlkörper verursacht werden. Dabei ist zu beachten, daß die Abschottungen bei

den elastomeren bzw. bei den thermoplastischen Fugenbändern beidseitig einen Mindestabstand von ca. 10 cm bzw. 20 cm vom Stoß haben. Der maximale Abstand der Abschottung vom Stoß sollte bei beiden Fugenbandarten ca. 1 m betragen, damit die aus dem Hohlkörper abzusaugende Luftmenge nicht zu groß wird.

Folgende Abschottungsvarianten sind bei den thermoplastischen und elastomeren Fugenbändern möglich:

- a) Abschottung durch Moosgummipropfen, die vor der Herstellung des Stoßes in die Hohlkörper eingeschoben werden.
- b) Dünne Trennwände, die schon bei der Herstellung des Fugenbandes in regelmäßigen Abständen (z.B. 1 m) in den Hohlkörper eingebaut werden.  
Bei der Stoßherstellung ist jedoch darauf zu achten, daß Trennwände durchstoßen werden, die zu nah am Stoß liegen.
- c) Zusammendrücken des Hohlkörpers mittels Klemmeinrichtungen außerhalb der Saugglocke.

Bei allen genannten Abschottungsvarianten muß stets der Hohlkörper des Fugenbandes in der Nähe des Fugenbandstoßes einseitig durchbohrt werden, damit im Hohlkörper auch der erforderliche Unterdruck erzeugt werden kann.

Die im Hohlkörper angebrachten Bohrungen müssen nach der Prüfung des Stoßes wieder verschlossen werden, damit die Dichtigkeit des Fugenbandes nicht beeinträchtigt wird.

## 5. Baustellenversuch mit der Alu-Saugglocke

### 5.1 Allgemeines

Im Anschluß an die Laborversuche sollte die Prüftechnik auch auf einer Baustelle erprobt werden, um z.B. den Einfluß von

- Baustellenbedingungen (z.B. Erschütterungen durch Baumaschinen, Witterung) und
- die Handhabung der Geräte auf der Baustelle (z.B. Transport und Aufstellung der Geräte)

eingehender untersuchen zu können.

Die Erprobung der TV-Shearografie wurde auf der Baustelle "Klärwerk Düsseldorf Süd" durchgeführt.

Auf dieser Baustelle wurden die Dehnfugen eines in offener Bauweise erstellten Wasserstollens mit dem Fugenband Tricomer D320 von Tricosal abgedichtet. Der zu prüfende Stumpfstoß wurde mit einem Schweißgerät hergestellt. Der Stoß befand sich auf der Deckenschalung in horizontaler Lage. In etwa 15 m Entfernung vom Fugenbandstoß waren Wasserpumpen im Einsatz.

Zur Zeit der Prüfung betrug die Lufttemperatur etwa 28°C bei sonniger Wetterlage.

Für die Baustellenstoßprüfung wurden folgende Laborgeräte eingesetzt:

- Laborsaugglocke aus Aluminium (Gesamtgewicht ca. 120 kg),
- Vakuumpumpe,
- Meßkopf mit Laborlaser (Kapitel 2) und
- Rechner mit zwei Bildschirmen und Zubehör.

Auf der Grundlage aller Erkenntnisse (Laborversuche und Baustellenerprobung) sollte ein für die Baustelle geeignetes Prüfgerät zur Ortung von Fehlstellen in Stumpfstoßen geplant und dimensioniert werden (Kapitel 6).

## 5.2 Durchführung und Ergebnisse der Fugenbandprüfung

Ein Baustellenkran erleichterte den Transport der schweren Laborgeräte auf die Schalungsdecke. Da das Fugenband durch ein senkrecht stehendes Schalungsbrett etwa 30 cm über der horizontalen Deckenschalung lag, mußte die Saugglocke mit einem Unterbau aus Holzbalken abgestützt werden. Die Abdichtung zwischen Fugenband und der Saugglocke erfolgte mittels einer Knetmasse.

Zusätzlich zum Baustellenstoß wurde ein mit Fehlstellen präparierter Stumpfstoß geprüft, um einen direkten Vergleich zwischen der Prüfung auf der Baustelle und im Labor zu erhalten (Tabelle 9, Probe 27). Die bei den Shearografie-Aufnahmen eingestellten Versuchparameter sind aus Tabelle 13 ersichtlich. Die Ergebnisse der Fugenbandstoßprüfungen lassen sich wie folgt zusammenfassen (vgl. Tabelle 13):

- Beim Baustellenstoß traten Störsignale im Bereich der Ankerrippen auf, die eine Fehlstellenortung an diesen Stellen beeinträchtigte. In den Bereichen des Baustellenstoßes mit geringen Störsignalen konnten keine Fehlstellen geortet werden (Bild 68). Der Fugenbandstoß war also fachgerecht hergestellt worden.
- Beim mit Fehlstellen präparierten Stumpfstoß traten im Vergleich zu der Aufnahme im Labor auf der Baustelle stärkere Störsignale auf (Bild 69). Diese Störsignale verhinderten bei der Baustellenaufnahme die Ortung der Fehlstelle C in der Hohlkörperwandung. Die Störsignale sind vermutlich auf Vibrationen zurückzuführen, die durch in der Nähe des Prüfortes betriebene Wasserpumpen verursacht wurden. Da die Pumpen jedoch ständig in Betrieb bleiben mußten, konnte die Vermutung nicht belegt werden.

Der Meßkopf sollte beim in der Entwicklung befindlichen Baustellenprüfgerät steifer konstruiert werden als der Labormeßkopf, um die Störsignale durch geringe Vibrationen der Prüfeinrichtung zu reduzieren.

Weitere Anforderungen an das Baustellenprüfgerät sind:

- a) Damit die Saugglocke für Baustelleneinsätze noch von zwei Personen getragen werden kann, dürfen Teile der Saugglocke maximal ca. 40 kg wiegen. Dies kann erreicht werden, indem die Baustellensaugglocke nur für Stumpfstoße konstruiert wird (geringere Abmessungen) und teilweise leichtere Materialien eingesetzt werden (Kapitel 6).

- b) Die zum Prüfgerät zugehörige Bildschirmanzahl muß von zwei auf eins reduziert werden, um den Aufwand beim Auf- und Abbau des Prüfgerätes (Verkabelung) sowie das Gesamtgewicht der Prüfeinrichtung zu mindern. Das für das Betriebssystem DOS entwickelte Auswerteprogramm erforderte zwei Monitore, einen für die Darstellung der Shearogramme und einen zur Unterstützung der Programmbedienung. Das für den Baustelleneinsatz neu konzipierte Auswerteprogramm wird nur einen einzigen Monitor benötigen und wird unter dem Betriebssystem Windows 95 laufen (Kapitel 6).
- c) Der Bildschirm muß einen scharfen Kontrast und eine hohe Helligkeit aufweisen, damit das Monitorbild auch bei hellem Tageslicht noch gut sichtbar ist.
- d) Alle Komponenten des Prüfgerätes, insbesondere der Auswerterechner und Monitor, müssen staub- und spritzwassergeschützt sein.

Auf der Grundlage aller bisher gesammelten Erfahrungen wurde ein spezielles Prüfgerät für den Baustelleneinsatz entwickelt, gebaut und im Labor erprobt (Kapitel 6).

## **6. Laborversuche mit einer Saugglocke für den Baustelleneinsatz**

### **6.1 Allgemeines**

Auf der Grundlage der gesammelten Erfahrungen im Labor und auf der Baustelle sollten ursprünglich, wie im Antrag des Forschungsvorhabens beschrieben, lediglich Vorschläge für ein Baustellenprüfgerät erarbeitet werden (Software, Meßtechnik, Saugglocke).

Es zeigte sich jedoch, daß ein Baustellengerät zur Prüfung von Stumpfstößen (ohne Rechner, Monitor und Drucker) inklusive Software und Meßtechnik wesentlich preiswerter hergestellt werden konnte als ein Gerät zur Prüfung beliebiger Fugenbandstöße inklusive Zubehör (z.B. Rechner). Deshalb wurde in Abstimmung mit den Auftraggebern eine Baustellen-Saugglocke zur Prüfung von ebenen Baustellen-Stumpfstößen inklusive Zubehör (Software, Meßtechnik usw.) geplant, konstruiert und hergestellt. Aus zeitlichen (insbesondere lange Lieferzeit für den Laser und lange Entwicklungszeit für die Erstellung der speziellen Software) und finanziellen Gründen konnte diese Baustellen-Saugglocke jedoch in der vereinbarten Laufzeit des Vorhabens nur noch im Labor erprobt werden. Auch steht z.Z. noch kein spezieller Rechner (z.B. spritzwasser- und staubgeschützt) für einen Baustelleneinsatz zur Verfügung. Es muß deshalb vorerst ein normaler, bereits vorhandener Bürorechner eingesetzt werden.

### **6.2 Anforderungen an die Baustellen-Saugglocke**

An die Saugglocke zur Prüfung von Fugenbandstößen auf Baustellen werden folgende Anforderungen gestellt:

- (1) Die Saugglocke soll zur Prüfung von elastomeren und thermoplastischen Fugenbändern mit einer Breite zwischen 150 mm und 520 mm eingesetzt werden können. Die Höhe der Fugenbänder beträgt maximal 50 mm.
- (2) Die Saugglocke soll so konzipiert sein, daß nur ebene Stumpfstöße getestet werden können, um das Gewicht der Saugglocke gering zu halten.
- (3) Da die Saugglocke an langen Fugenbändern auf der Baustelle eingesetzt werden soll, muß die Saugglocke in zwei Teile zerlegt werden können, zwischen

denen das Fugenband eingeklemmt werden kann. Die beiden Teile der Saugglocke müssen durch Flügelschrauben schnell zusammen- bzw. auseinandergeschraubt werden können.

- (4) Die Anpassung an verschiedene Fugenbandprofile erfolgt durch spezielle Klemmprofile, die Aussparungen zur Durchführung des zu prüfenden Fugenbandes besitzen. Diese Aussparungen sollen grob dem jeweiligen Fugenbandprofil folgen. Verbleibende Zwischenräume zwischen Fugenband und Klemmprofil sollen durch einen Zellgummi abgedichtet werden.

Insgesamt werden bei der Prüfung eines Stumpfstoßes für jedes Saugglockenteil zwei Klemmprofile (insgesamt 4 Stück) benötigt. Die Klemmprofile müssen luftdicht in die Saugglockenteile eingebaut werden können.

Da für jedes andere Fugenband neue Klemmprofile mit entsprechend angepaßter Aussparungsform erforderlich sind, müssen die Klemmprofile aus Kunststoff leicht austauschbar und preiswert herzustellen sein.

- (5) Der Meßkopf, der mit einem Laser und einer speziellen Aufnahmeoptik ausgestattet ist, benötigt in der Deckplatte zur Strahldurchführung eine Öffnung von 100 mm x 200 mm und entsprechende Bohrungen zur Befestigung. Die Bohrungen dürfen keine Verbindung zum Saugglockeninnenraum haben. Der Meßkopf muß luftdicht angeschlossen werden.
- (6) Zur Prüfung des Fugenbandstoßes soll mit der Meßoptik ein Fugenbandabschnitt mit einer Länge von 150 mm über die gesamte Breite des Fugenbandes (maximal 520 mm) aufgenommen werden. Die Saugglocke muß deshalb von der Aussparung im Deckel einen ungestörten Strahlverlauf auf den gesamten Fugenbandstoß ermöglichen.
- (7) Unterdrücke bis 500 mbar sollen die Funktionsweise der Saugglocke inklusive der Zusatzeinrichtungen (z.B. Klemmprofile) nicht beeinträchtigen. Ferner soll die Saugglocke einer schnellen Druckabsenkung von 300 mbar in 5 Sekunden standhalten.
- (8) Eine Zerstörung der Saugglocke durch einen zu großen Unterdruck soll durch ein Sicherheitsventil verhindert werden.
- (9) Für die Aufhebung des Unterdrucks in der Saugglocke nach einer Messung ist ein manuell zu betätigendes Belüftungsventil vorzusehen.

- (10) Der Abstand zwischen Meßkopf und Fugenbandoberfläche muß ca. 400 mm betragen.
- (11) Die Saugglocke muß sehr steif gestaltet werden, damit sich der Abstand zwischen Meßkopf und Oberfläche des Prüflings während der Messung aufgrund der Druckänderungen nicht ändert. Andernfalls führen die Relativbewegungen von Meßkopf und Fugenband zu Fehlsignalen.
- (12) Das Gewicht der Saugglocke mit Meßkopf darf maximal ca. 40 kg betragen, damit die Saugglocke von zwei Personen transportiert werden kann.
- (13) Für den Transport der Saugglocke soll diese mit Handgriffen ausgestattet werden, die am Saugglockendeckel befestigt werden.
- (14) Die Saugglocke muß aus einem steifen, schlagfesten, lichtundurchlässigen und UV-beständigen Kunststoff gefertigt werden.

Unter Berücksichtigung der obigen Anforderungen wurde eine Baustellen-Saugglocke konstruiert (Kapitel 6.3).

### **6.3 Konstruktion der Baustellen-Saugglocke**

Die Konstruktion der Baustellen-Saugglocke ist aus den Bildern 70 und 71 ersichtlich. Der Trichter des Saugglockenoberteils sowie die Deckplatte und die Bodenplatte wurden aus ca. 27 mm dicken Aluminium-Wabenplatten hergestellt (Bild 72). Der Vorteil dieses Materials ist eine hohe Steifigkeit bei sehr geringem Gewicht. (ca. 5,8 kg/m<sup>2</sup>). Die Rahmen zur Aufnahme der Klemmprofile und die Klemmprofile selbst wurden aus Kunststoff (Polyamid) hergestellt. Das Gesamtgewicht der Saugglocke inklusive Meßkopf beträgt ca. 40 kg.

Der Nachteil der Aluminium-Wabenplatten ist, daß es hohe lokale Kräfte, die beispielsweise beim Anspannen einer Schraube entstehen, nicht aufnehmen kann. Deshalb müssen für Bohrungen und Gewindebohrungen Metallteile in die Wabenplatten eingeklebt werden.

Die Baustellen-Saugglocke wurde mit den Fugenbandstößen Nr. 27 und Nr. 30 erprobt (Tabelle 14), die mit Hilfe der Aluminium-Saugglocke geortet werden konnten.

Bei der neuen Baustellen-Saugglocke bewirkte jedoch bereits ein Unterdruck von nur ca. 50 mbar, daß der Kunststoffrahmen mit den Kunststoff-Klemmprofilen über ca. 100 µm nach innen gedrückt wurde. Dadurch wurde das Fugenband leicht verformt. Hierdurch bedingt wurden Störsignale hervorgerufen, so daß die Fehlstellen der Proben Nr. 27 und Nr. 30 (Tabelle 14) mit der vorliegenden Baustellen-Saugglocke nicht geortet werden konnten. Dieses Untersuchungsergebnis zeigt sehr deutlich, daß eine leichte Saugglocke aus herkömmlichem Kunststoff nur sehr schwer die Anforderungen an die Steifigkeit der Konstruktion erfüllen kann.

Es war aufgrund der aufgetretenen Verformung eine Versteifung der Saugglocke erforderlich. Die Bauteile unterhalb des Trichters wurden versteift, indem die Saugglocken-Bodenplatte, die Rahmenteile und Klemmprofile durch Aluminium-Vollmaterial ersetzt wurden. Durch diese Versteifungen konnten die seitlichen Verformungen ausreichend reduziert werden, wie speziell durchgeführte Belastungsversuche zeigten.

Das Gewicht der versteiften Baustellen-Saugglocke beträgt inklusive Meßkopf etwa 70 kg.

Um das Saugglockenoberteil und das Saugglockenunterteil jeweils einzeln durch zwei Personen auf der Baustelle transportieren zu können, wurde auch das Saugglockenunterteil mit Tragegriffen ausgestattet (Bilder 70 und 71).

Die Klemmprofile für die neue Baustellen-Saugglocke wurden den Fugenbändern so angepaßt, daß zwischen Fugenband und Klemmprofil ein Spalt von 1,5 mm bis 2 mm besteht. Ein ca. 5 mm dickes und 15 mm breites Zellgummi, das auf die Klemmprofile aufgeklebt wurde, war zur Abdichtung zwischen Klemmprofil und Fugenband vorgesehen.

#### **6.4 Erprobung der Baustellen-Saugglocke in Verbindung mit der Labor-meßtechnik**

Für die Erprobung der neuen Baustellen-Saugglocke im Labor wurde zunächst noch die verfügbare Labormeißtechnik (Strahlenteiler, Software usw.) eingesetzt, da die spezielle Meißtechnik für einen Baustelleneinsatz wegen längerer Lieferfristen noch nicht zur Verfügung stand (Kapitel 6.5). Jedoch wurde anstatt des großen Nd:YAG-Laborlasers ein kleiner 50 mW-Industrielaser eingebaut.

Die Versuchsparameter sind aus Tabelle 15 ersichtlich.

Die ausgesteifte Baustellen-Saugglocke wurde mit vier Stumpfstößen getestet, die auch schon in der schweren Aluminiumsaugglocke eingesetzt worden waren (Tabelle 14).

Die Versuchsergebnisse mit der ausgesteiften Baustellen-Saugglocke lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a) In den Shearogrammen vom thermoplastischen Stumpfstoß Probe Nr. 27 (Tabelle 14) sind kaum Störsignale zu sehen (Bild 73). Bei der Prüfung des elastomeren Stumpfstößes Probe Nr. 30 (Tabelle 14) sind die Störsignale teilweise gleich stark wie das Fehlstellensignal selbst (Bild 74). Der Anteil von Störsignalen ist jedoch ähnlich hoch wie bei den Untersuchungen mit der schweren Aluminium-Saugglocke.

Es ist zu beachten, daß die Prüfungen der Stumpfstöße ohne Unterdruck im Mittelschlauch des Fugenbandes erfolgte. Durch den gleichen Unterdruck im Mittelschlauch wie in der Saugglocke lassen sich die Störsignale jedoch noch besser unterdrücken.

- b) Die in den Proben Nr. 31 und Nr. 32 (Tabelle 14) senkrecht zur Fugenbandebene eingebauten flächigen Hohlstellen konnten nicht gesichtet werden. Diese Fehlstellen waren allerdings auch mit Hilfe der schweren Alu-Saugglocke nicht ortbar.
- c) Durch den kleinen 50 mW-Industrielaser wurde die Ausleuchtungsfläche gegenüber der des 100 mW-Laborlasers reduziert. Qualitativ ergaben sich jedoch nur geringe Einbußen bei der Fehlstellenortung.
- d) Bei den thermoplastischen Fugenbändern konnte mit Hilfe des Zellgummis an den Klemmprofilen eine ausreichende Dichtwirkung erzeugt werden.

Bei den elastomeren Fugenbändern sind jedoch die Labyrinthrippen höher und die Kanten zwischen Ankerrippen und Bodenplatte eckiger. Das Zellgummi reichte nicht in die äußersten Ecken der Aussparungen für Bodenplatte und Ankerrippen hinein, so daß die Undichtigkeiten bei den elastomeren Fugenbändern zu groß waren. Nachdem diese Eckbereiche zusätzlich mit einer Knetmasse ausgefüllt wurden, war eine ausreichende Unterdruckerzeugung in der Saugglocke möglich.

Mit der Baustellen-Saugglocke unter Verwendung der Labormeißtechnik ist die Fehlstellenortung nahezu genauso gut möglich wie mit der schweren Alu-Saugglocke zur Prüfung verzweigter Fugenbandstöße. Es mußte nun noch die Baustellen-Saugglocke mit der neuen Meißtechnik, die speziell für die Fugenprüfung auf der Baustelle entwickelt worden war, erprobt werden (Kapitel 6.5).

### **6.5 Erprobung der Baustellen-Saugglocke unter Verwendung einer speziellen Meißtechnik**

Das speziell für den Baustelleneinsatz konzipierte Meißsystem besteht aus folgenden Komponenten:

#### **a) Meißkopf**

Der Meißkopf enthält:

- einen diodengepumpten frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser (Leistung 100 mW, Wellenlänge 532 nm) mit Aufweitungsoptik zur Fugenbandbeleuchtung,
- eine hochauflösende CCD-Videokamera (640 x 480 Pixel, 256 Graustufen),
- eine Interferometeranordnung zur Einstellung des Scherbetrags und
- eine Aufweitungsoptik zur Vergrößerung des Blickfeldes, so daß der Stoß eines ca. 50 cm breiten Fugenband mit nur zwei Aufnahmen erfaßt werden kann (Aufnahmefläche pro Aufnahme ca. 15 cm x 25 cm).

An der Unterseite des Meißkopfes befindet sich ein Fenster zur Beleuchtung des Meißobjektes durch den Laser. Die Bildscherung (Betrag und Richtung) läßt sich über Verstellerschrauben an der Außenseite des Meißkopfes einstellen.

#### **b) Kontrolleinheit**

Die elektrische Versorgung, Steuerung und Überwachung des Lasers erfolgt über die Kontrolleinheit. Die Kontrolleinheit ist in einem Gehäuse mit Tragegriffen untergebracht. Hier befinden sich die Anschlüsse für die zentrale Stromversorgung und die Anbindung des Meißkopfes an den Auswerte- und Bedienrechner. Die Verbindung zwischen Meißkopf und Kontrolleinheit erfolgt über am Meißkopf steckbare Kabel. Alle Kabel sind in Schutzschläuchen geführt.

c) Saugglockenadapter mit Schwenkeinheit

Mit Hilfe eines Adapters kann der Meßkopf auf der Saugglocke befestigt werden. Der Adapter verfügt über eine Schwenkeinheit ( $\pm 15^\circ$ ) für den Meßkopf und ein Fenster zum Inneren der Saugglocke. An der Unterseite befindet sich ein Sicherheitsschalter, um die Laserstrahlung nur dann austreten zu lassen, wenn der Meßkopf auf der Saugglocke befestigt ist.

d) Auswerte- und Bediensoftware

Die Steuerung des Prüfablaufs erfolgt über die Bedien- und Auswertesoftware. Das Programm ist so gestaltet, daß der gleiche Monitor sowohl für die Anzeige der Bedienoberfläche als auch für die Anzeige des Kamerabildes genutzt wird. Ein zweiter Monitor wie in früheren Softwareversionen ist nicht mehr notwendig. Dies ist insbesondere bei Baustelleneinsätzen von großem Vorteil. Das Programm ist menügeführt und arbeitet unter dem Betriebssystem Windows 95. Es verfügt über die folgenden Funktionen:

- Anzeige des Prüfobjektes durch die Kamera auf dem Bildschirm
- Einstellung der Kameraparameter (z.B. Belichtungszeit)
- Aufnahme von Bildsequenzen mit maximal 50 Bildern
- Speicherung und Auswertung einer gesamten Bildsequenz
- Einstellung der Auswerteparameter
- Speicherung der Ergebnisbilder
- Anzeige eines Ergebnisbildes in Graustufen- und Falschfarbendarstellung
- Einblenden von Datum und Uhrzeit in den Ergebnisbildern und eines Textes
- Ausdruck eines Bildes mit Standarddruckern in ein Protokollformular, das frei gestaltet werden kann (Kopf- und Fußzeile, Firmenlogo, erläuternde Texte)
- Die Bilder können im BMP- oder TIFF-Format gespeichert werden. Somit können die Bilder ohne Probleme in andere Windows-Applikationen (z.B. Word) eingebunden werden.

Die Auswertung kann mit einem Standard-PC durchgeführt werden.

Ein geeigneter Rechner für den Baustelleneinsatz steht noch nicht zur Verfügung. Er sollte jedoch folgenden Spezifikationen genügen:

- Prozessor: Pentium, 90 MHz,
- Speicher: mindestens 32 MByte RAM,
- Grafik: Auflösung: 1024 x 768 Pixel bei 256 Farben,
- Festplatte: 1 GByte,
- Steckplätze: mindestens 1 PCI-Steckplatz und
- Schnittstellen: eine serielle und eine parallele Schnittstelle.

Der Rechner sollte ferner der Schutzart IP54 (staub- und spritzwassergeschützt) genügen.

Der neue, kompakte Laser-Meßkopf wurde zusammen mit der Baustellen-Saugglocke zur Untersuchung von Fugenband-Stumpfstößen im Labor erprobt. Bei diesen Messungen, die bei einer Temperatur von ca. +20°C erfolgten, wurden die ca. 80 cm langen Fugenbandproben Nr. 27 (thermoplastischer Stumpfstoß) und Nr. 30 (elastomerer Stumpfstoß) mit den Fehlstellen gemäß Tabelle 14 verwendet. Für den Ausdruck der Shearogramme stand diesmal nicht der bei den früheren Versuchen eingesetzte hochauflösende Videoprinter zur Verfügung. Die stattdessen benutzten Bürodruker (z.B. 16-Farben-Drucker) konnten die auf dem Rechnerbildschirm sichtbaren Details nur mit Einschränkungen wiedergeben. Bei der Verwendung eines Druckers mit größerer Auflösung (z.B. 256-Farben-Drucker) können in den Shearografie-Aufnahmen die Fehlstellen entsprechend besser dargestellt werden. Dies ist in den Bildern 75 bis 77 zu berücksichtigen. Die Erprobung des Meßsystems erbrachte folgende Ergebnisse:

#### a) Meßtechnik

Das erweiterte Blickfeld der Laser-Optik ermöglicht es jetzt, ca. 50 cm breite Stumpfstöße mit nur zwei Aufnahmen zu erfassen (bisher: ca. 7 Aufnahmen erforderlich). Dies bedeutet u.a. eine große Zeitersparnis bei der Prüfung. Jedoch werden im Vergleich zur bisherigen Aufnahmetechnik die Fehlstellen im Bild etwas kleiner dargestellt.

- b) Thermoplastischer Stumpfstoß (Probe Nr. 27, vgl. Tabelle 14) im ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt

Die Untersuchungen wurden mit folgenden Einstellungen durchgeführt:

- Unterdruck: ca. 20 mbar
- Scherbetrag: ca. 3 mm
- Scherrichtung: in Fugenbandlängsrichtung
- Kein Unterdruck im Hohlkörper

Mit diesen Einstellungen konnten die flächigen Fehlstellen parallel zur Fugenbandoberfläche nachgewiesen werden (Bilder 75 und 76; Fehlstellenlage vgl. Tabelle 14, Probe Nr. 27). Es sind dies Fehlstellen in den Dehnbereichen mit einer Materialüberdeckung von  $t = 2$  mm bzw.  $t = 4$  mm, Fehlstellen im Hohlkörper- und Labyrinthbereich mit einer Materialüberdeckung von  $t = 2$  mm und eine Fehlstelle in der Ankerrippe mit einer Materialüberdeckung von  $t = 10$  mm. Die in der zweiten Ankerrippe senkrecht angeordnete flächige Fehlstelle (Materialüberdeckung 5 mm) konnte nicht geortet werden. Damit konnten alle mit der Alu-Saugglocke (Kapitel 6.5) aufgefundenen Fehlstellen auch bei Verwendung der Baustellen-Saugglocke und der Baustellen-Meßtechnik ebenfalls nachgewiesen werden.

Da für den Ausdruck der detailreichen Bildschirmdarstellungen diesmal kein Videoprinter mit hoher Graustufenauflösung verfügbar war, wurden normale Bürodrucker verwendet. Durch deren begrenzte Graustufen- bzw. Farbauflösung (z.B. nur 16 Farben darstellbar) konnten nicht alle Feinheiten der Fehlstellensignale dokumentiert werden. Dennoch blieben alle georteten Fehlstellen in den Schwarzweiß-Ausdrucken erkennbar.

- c) Elastomerer Stumpfstoß (Probe Nr. 30, vgl. Tabelle 14) im ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt

Die Untersuchungen wurden mit folgenden Einstellungen durchgeführt:

- Unterdruck: ca. 50 mbar
- Scherbetrag: ca. 3 mm
- Scherrichtung: in Fugenbandlängsrichtung

- Kein Unterdruck im Hohlkörper

Es konnten die unter der ca. 6 mm dicken Bandage liegenden flächigen Fehlstellen im Dehnbereich und im Hohlkörper-Bereich nachgewiesen werden (Bild 77), nicht jedoch die flächige Fehlstelle im Labyrinthbereich. Dies entspricht in etwa den Ergebnissen mit der Alu-Saugglocken-Prüfung (Kapitel 4.5, vgl. Bild 52). Die Störsignale sind jedoch etwas geringer (Bild 77a). In der Falschfarbenausgabe auf dem Bildschirm traten die Fehlstellen ebenfalls deutlich hervor. Der entsprechende Farbausdruck enthält durch die begrenzte Farbauflösung des Druckers (nur 16 Farben statt 256 darstellbar) jedoch nicht mehr alle Details (Bild 77b).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bei Verwendung der Baustellen-Saugglocke mit zugehöriger Baustellenmeßtechnik die gleichen Fehlstellen geortet werden konnten wie mit der Alu-Saugglocke und der Labormeßtechnik (Kapitel 6.5). Damit ist die neue Saugglocke mit zugehöriger Meßtechnik sowie Bediener- und Auswertesoftware für die Überprüfung von Stumpfstoßen auf Baustellen geeignet. Um die Dokumentation der Prüfergebnisse zu verbessern, sollten künftig Drucker mit höherer Farbauflösung (mindestens 256 Farben) bzw. besserer Graustufendarstellung eingesetzt werden.

## 7. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche (Kapitel 3 bis 6) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

### (1) Einfluß der Form, Lage und Größe der Fehlstellen

Folgende Hohlstellen können geortet werden, falls sie vom Fugenbandmaterial luftdicht umschlossen sind:

- a) Flächige Hohlstellen (Dicke ca. 0,1 mm bis 0,3 mm) mit einer Größe von ca. 10 mm x 10 mm parallel zur Fugenbandebene konnten bei elastomeren Fugenbändern bis zu einer Materialüberdeckung von ca. 5 mm und bei thermoplastischen Fugenbändern bis zu einer Materialüberdeckung von bis zu ca. 10 mm geortet werden.
- b) Hohlstellen im Bereich der Ankerrippen können nicht immer geortet werden, da von der Ankerrippe selbst häufig Störsignale ausgehen. Günstige Voraussetzungen für eine Fehlstellenerkennung sind gegeben, wenn die Fugenbandproben nicht zu fest im Prüfgerät eingespannt werden und der Unterdruck nicht zu hoch eingestellt wird.
- c) Zylinderförmige Hohlstellen mit einem Durchmesser ab ca. 2 mm können unabhängig vom Fugenbandmaterial (Elastomer oder Thermoplast) nur geortet werden, wenn die Materialüberdeckung (Tiefenlage) der Fehlstelle nicht mehr als etwa das Doppelte des Fehlstellendurchmessers beträgt.

Generell ist anzumerken, daß Fehlstellen in thermoplastischen Fugenbändern aufgrund des weicheren Materials in der Regel besser geortet werden können als in elastomeren Fugenbändern.

### (2) Einfluß der Scherrichtung

Wenn die Scherrichtung parallel zur Fugenbandlängsrichtung eingestellt wird, werden die Störsignale, die durch die Ankerrippen und die Riffelung des Fugenbandes hervorgerufen werden, bei den elastomeren und thermoplastischen Fugenbandstößen am besten unterdrückt.

Da in der Praxis längliche Hohlstellen im Stumpfstoßbereich überwiegend senkrecht zur Fugenbandlängsrichtung liegen, ist die Scherrichtung parallel zur Fugenbandlängsrichtung von Vorteil.

## (3) Scherbetrag

Ein Scherbetrag zwischen 5 mm und 10 mm erwies sich für die Fehlstellenortung in der Regel am günstigsten. Bei größeren Scherbeträgen wird zwar die Auflösung des Verfahrens besser, jedoch treten verstärkt Störsignale auf, die die Fehlstellenortung erschweren.

## (4) Unterdruck

Für die Fehlstellenortung in elastomeren bzw. thermoplastischen Fugenbändern sollte bei Raumtemperatur (ca. +20°C) ein maximaler Unterdruck von ca. 150 mbar bzw. ca. 50 mbar nicht überschritten werden, da sonst in der Regel zu starke Störsignale auftreten. Normalerweise reichen für elastomere bzw. thermoplastische Fugenbänder Unterdrücke von nur ca. 50 mbar bzw. 25 mbar aus. Mit sinkender (bis ca. +5°C) bzw. steigender (bis ca. +35°C) Materialtemperatur sind etwas höhere bzw. niedrigere Unterdrücke vorteilhaft. Eine Erhöhung des genannten maximalen Unterdrucks führte in der Regel zu stärkeren Störsignalen.

## (5) Temperatureinfluß auf die Fehlstellenortung

## a) Elastomere Fugenbänder

Im untersuchten Temperaturbereich zwischen +5°C und +20°C hatte die Temperatur bei den elastomeren Probekörpern keinen nennenswerten Einfluß auf die Ortung der Fehlstellen.

Bei einer Temperatur von +35°C waren die Fehlstellen auch ortbar, jedoch nicht mehr so deutlich zu erkennen wie bei +20°C.

## b) Thermoplastische Fugenbänder

Bei den thermoplastischen Fugenbändern erschwerten niedrige Temperaturen (unter etwa +15°C) die Ortung der Fehlstellen und bei einer Temperatur von +35°C traten geringfügig mehr Störsignale auf als bei +20°C.

Prüfungen an Fugenbandstößen sollten bei Temperaturen unter etwa +5°C generell nicht mehr durchgeführt werden.

## (6) Prüfung von Stumpfstoßen in langen Fugenbändern

Elastomere und thermoplastische Fugenbandstöße in langen Fugenbändern (z.B. Baustellenstoß) können nahezu ohne Einschränkungen geprüft werden,

auch wenn kein Unterdruck im Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) eingestellt wird, da die Störsignale, die durch die Ausdehnung des Hohlkörpers (Mittelschlauch des Fugenbandes) verursacht werden, im wesentlichen nur Verformungen senkrecht zur Fugenbandlängsrichtung und damit auch senkrecht zur Scherrichtung hervorrufen. Da das Shearografieverfahren gegen Bewegungen senkrecht zur Scherrichtung relativ unempfindlich ist, wirken sich die Fugenbandbewegungen durch die Hohlkörperausdehnung kaum negativ aus (Kapitel 4.5).

(7) Prüfung von Fugenbandstößen in langen Fugenbändern mit T- und Kreuzstößen

Bei der Prüfung von Fugenbandstößen in langen Fugenbändern mit T- und Kreuzstößen waren die Störsignale durch die Dehnungen der senkrecht aufeinanderstoßenden Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) so groß, daß fast der gesamte Bildausschnitt als Fehlstelle in Erscheinung trat.

Für die Prüfung von T- und Kreuzstößen im Labor (z.B. Herstellerwerk) empfiehlt sich eine Saugglocke (Unterdruckraum), die den gesamten Stoß einschließlich aller Fugenbandteile vollkommen umschließt. Bei einer solchen Saugglocke wird die Luft auch aus dem Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) abgesaugt. Der Hohlkörper dehnt sich dann während der Unterdruckerzeugung im Prüfgerät (Saugglocke) nicht aus, da im Hohlkörper stets der gleiche Luftdruck wie im Innenraum der Saugglocke herrscht. Die Fugenbandanschlüsse sind dann später auf der Baustelle als Stumpfstoß auszuführen und zu prüfen.

Bei T- und Kreuzstößen, die auf der Baustelle an langen Fugenbändern hergestellt werden, ist die für das Labor beschriebene Prüfweise jedoch nicht möglich. Die Störsignale können auch hier nur reduziert werden, wenn im Hohlkörper (Mittelschlauch des Fugenbandes) der gleiche Unterdruck wie in der Saugglocke eingestellt werden kann. Dies ist z.B. durch Abschottungen im Hohlkörper in Verbindung mit einseitigen Bohrungen im Fugenband möglich (Kapitel 4.5.3). Die Bohrungen müssen nach der Prüfung wieder fachgerecht geschlossen werden, um die Funktion des Fugenbandes nicht zu beeinträchtigen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß mit der TV-Shearografie Fehlstellen bestimmter Art und Größe in ebenen elastomeren und thermoplastischen Fugenband-Stumpfstößen geortet werden können (Kapitel 3 bis 6). Verzweigte Fugenbandstöße (Kreuzstoß, T- und L-Stöße) sollten jedoch vorrangig im Labor überprüft werden, um Zusatzmaßnahmen an den Fugenbändern zu vermeiden (Kapitel 4.5).

Im Rahmen der Untersuchung wurden ein Labor- und ein Baustellenprüfgerät entwickelt und gebaut. Mit dem Laborgerät können ebene Stumpf-, Kreuz-, T- und L-Stöße, mit dem Baustellengerät nur Stumpfstöße geprüft werden. Die weiter entwickelte Software ermöglicht eine einfache Handhabung des Prüfvorgangs und ein dokumentierbares Prüfergebnis in Form einer TV-Shearografieaufnahme (z.B. Falschfarbenbild). Mit den zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtungen ist es erstmals möglich, Fugenbänder reproduzierbar, zerstörungsfrei und objektiv zu prüfen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Riesenberg, W.: Abdichtung von Bauwerksfugen mit Fugenbändern; Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau 6/89, Seiten 357 - 360
- [2] Höck: Fugen in wasserundurchlässigem Beton. Elastomer-Fugenbänder: Gütesicherung auf der Baustelle - DS 835 Anhang V; Vortrag Tagung Seminar für Abdichtung von Ingenieurbauwerken (DS835) und ZTV-Riss, 02. - 05.02.1993 in Bad Homburg, 1993, Seiten 194 - 194e
- [3] Klawa, N./Haack, A.: Tiefbaufugen - Fugen und Fugenkonstruktionen im Beton- und Stahlbetonbau, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1989
- [4] Qualitätsüberwachung an Fugenbändern oft mangelhaft; Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau, 21 (1979) 3, Seiten 190 - 191
- [5] Schott, W.: Qualitätsüberwachung bei Fugenbändern; Tiefbau, Sonderdruck (1979)
- [6] Hansen, U./Weyer, P.: Prüfung von Werkstoffen für Fugenbänder im Brücken- und Ingenieurbau; Straße und Autobahn, (1982) 1, Seiten 20 - 22
- [7] Grunau, E. B.: Qualitätsnachweis von Fugenbändern; Straßen- und Tiefbau, 43 (1989) 10, Seiten 24 - 26
- [8] Rundschreiben der Deutschen Bahn AG: Elastomer-Fugenbänder nach DIN 7865, Gütesicherung auf der Baustelle; Herausgeber Bundesbahn-Zentralamt München (1994)
- [9] Richtlinie des Bund/Länder-Fachausschusses Brücken- und Ingenieurbau: Anforderungen an Fugenbänder und ihre Verbindungen; Herausgeber Bundesministerium für Verkehr, Abteilung StB (1994)

- [10] Deutsches Institut für Normung DIN; NA Kautschuktechnik FAKAU DIN 7865: Elastomer-Fugenbänder zur Abdichtung von Fugen in Beton
- Teil 1: Form und Maße
  - Teil 2: Werkstoff-Anforderungen und Prüfung
- Beuth Verlag GmbH, Berlin, Februar 1982
- [11] Deutsches Institut für Normung DIN; NA Bauwesen NABau DIN 18 541: Fugenbänder aus thermoplastischen Kunststoffen zur Abdichtung von Fugen in Ortbeton
- Teil 1: Begriffe, Formen, Maße
  - Teil 2: Anforderungen, Prüfung, Überwachung
- Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 1992
- [12] Ettemeyer, A.: Shearografie - ein optisches Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung; Technisches Messen 58 (1991) 6; Seiten 247 - 252
- [13] Ettemeyer, A.: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit TV-Shearografie; Technisches Messen 60 (1993) 7/8; Seiten 274 - 277
- [14] Noll, R./Krauhausen, M.: Laserlicht zeigt Fehler in Verbundwerkstoffen, Kunststoffe 83 (1993) 2, Seiten 116 - 120
- [15] Noll, R./Krauhausen, M.: Verbundmaterial mit Laserlicht prüfen, Materialprüfung 35 (1993) 10, Seiten 316 - 319
- [16] Donges, A./Noll, R.: Lasermeßtechnik, Grundlagen und Anwendungen, Müthig Buch Verlag, Heidelberg (1993)
- [17] Weck, M./Ostendarp, H./Sellhorst, M.: Schwingungsformanalyse mit holografischer Interferometrie und Modalanalyse; tm - Technisches Messen 60 (1993) 6, R. Oldenbourg Verlag, Seiten 228 - 234
- [18] Tiziani, H. J.: Kohärent-optische Verfahren in der Oberflächenmeßtechnik; tm - Technisches Messen 58 (1991) 6, R. Oldenbourg Verlag, Seiten 228 - 234
- [19] Noll, R./Krauhausen, M.: Sensor measures sub-surface flaws; OLE Mai 1993, Seiten 39 - 41

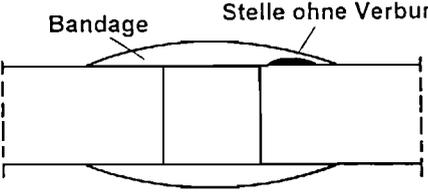
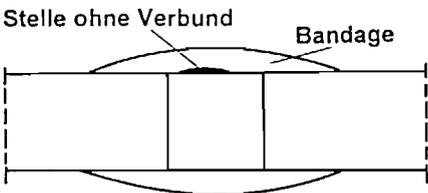
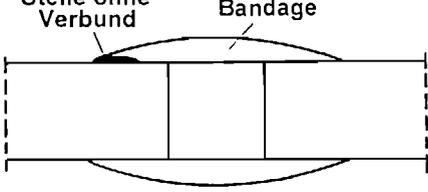
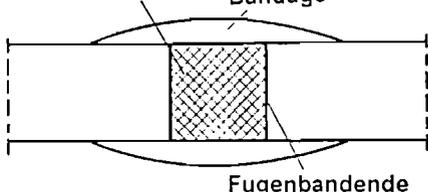
- [20] Noll, R./Krauhausen, M.: Formmessung und -prüfung mit Laserlicht; F & M 101 (1993), Carl Hanser Verlag, München, Seiten 14 - 17
- [21] Steinchen, W./Yang, L./Schuth, M./Kupfer, G.: Dehnungsmessung mit digitaler Shearografie; tm - Technisches Messen 62 (1995) 9, R. Oldenbourg Verlag, Seiten 337 - 341
- [22] Bauer, T./Ettemeyer, A.: Instrumententafeln shearografisch auf Lunker prüfen; QZ Qualität und Zuverlässigkeit 38 (1993) 2, Carl Hanser Verlag, München, Seiten 105 - 107

# **Tabellenanhang**

Probenbezeichnung	Fehlerbeschreibung	Fehlstelle im Fugenband
1	Flächiger Hohlraum im Labyrinthbereich	$t = 5 \text{ mm}$ 
2	Flächiger Hohlraum im Dehnbereich	$t = 5 \text{ mm}$ 
3	Flächiger Hohlraum im Bereich der Ankerrippe	$t = 15 \text{ mm}$ 
4	Flächiger Hohlraum im Schlauchbereich	$t = 5 \text{ mm}$ 
5	Flächiger Hohlraum senkrecht zum Fugenband in der Ankerrippe	$t = 5 \text{ mm}$ 
6	Zylindrischer Hohlraum $\varnothing 3 \text{ mm}$ in der Ankerrippe	$t = 12 \text{ mm}$ 
7a	Zylindrische Hohlräume $\varnothing 3 \text{ mm}$ in a) Dehnbereich b) Ankerrippe c) Labyrinthbereich	$t = 5 \text{ mm}$  a) b) c)
7b	Zylindrische Hohlräume $\varnothing 0,5 \text{ mm}$ , Anordnung wie bei Probe Nr. 7a	$t = 5 \text{ mm}$  a) b) c)

**Tabelle 1a:** Beschreibung und Darstellung der Fehlstellen in elastomeren Fugenbandabschnitten (Fugenbandtyp FM 350)

t = Materialüberdeckung

Probenbezeichnung	Fehlerbeschreibung	Fehlstelle im Fugenband
8	Flächiger Hohlraum unter der Bandage im Dehnbereich	 <p>The diagram shows a cross-section of a joint seal. The seal is shown as a curved line above a horizontal line representing the joint. A dashed line indicates the original position of the seal. A label 'Bandage' points to the seal, and another label 'Stelle ohne Verbund' points to a gap between the seal and the joint surface in the stretching area.</p>
9	Flächiger Hohlraum unter der Bandage im Schlauchbereich	 <p>The diagram shows a cross-section of a joint seal. The seal is shown as a curved line above a horizontal line representing the joint. A dashed line indicates the original position of the seal. A label 'Stelle ohne Verbund' points to a gap between the seal and the joint surface in the hose area, and another label 'Bandage' points to the seal.</p>
10	Flächiger Hohlraum mit direktem Kontakt zur Umgebung	 <p>The diagram shows a cross-section of a joint seal. The seal is shown as a curved line above a horizontal line representing the joint. A dashed line indicates the original position of the seal. A label 'Stelle ohne Verbund' points to a gap between the seal and the joint surface, and another label 'Bandage' points to the seal.</p>
11	Poröse Struktur im Stoßbereich vermutet	 <p>The diagram shows a cross-section of a joint seal. The seal is shown as a curved line above a horizontal line representing the joint. A dashed line indicates the original position of the seal. A label 'Poröse Struktur' points to a hatched area in the impact area, and another label 'Bandage' points to the seal. The label 'Fugenbandende' is located at the bottom of the diagram.</p>

**Tabelle 1b:** Beschreibung und Darstellung der Fehlstellen in elastomeren Fugenbandabschnitten (Fugenbandtyp FM 350)

Proben Nr.	Fehlstellenbeschreibung	Lage der Fehlstellen
12	Flächige Hohlstellen unter der Bandage, Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm	<p style="text-align: center;">Hohlstellen      Bandage ca. 6 mm dick</p> <p style="text-align: center;">Oberseite</p> <p style="text-align: center;">t = 17 mm      t = 18 mm</p> <p style="text-align: center;">Unterseite</p>
13	Flächige Hohlstellen im Fugenband, Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm	<p style="text-align: center;">Oberseite</p> <p style="text-align: center;">t = 12 mm    t = 12 mm    t = 10 mm    t = 8 mm    t = 20 mm</p> <p style="text-align: center;">Bandage ca. 6 mm dick</p> <p style="text-align: center;">t = 10 mm    t = 11 mm    t = 15 mm    t = 25 mm</p> <p style="text-align: center;">Unterseite</p>
14	Zylinderförmige Hohlstellen im Fugenband, Durchmesser 2 mm, Länge ca. 25 mm	<p style="text-align: center;">Oberseite</p> <p style="text-align: center;">t = 5 - 9 mm    t = 6 - 10 mm    t = 5 - 9 mm    t = 7 - 11 mm    t = 8 - 12 mm</p> <p style="text-align: center;">Bandage ca. 4 mm dick</p> <p style="text-align: center;">t = 11 - 16 mm    t = 12 - 16 mm    t = 10 - 14 mm    t = 30 - 34 mm</p> <p style="text-align: center;">Unterseite</p>

Tabelle 2a: Beschreibung und Darstellung der Fehlstellen in elastomeren Fugenbandstößen, Fugenbandtyp FM 350

t = Materialüberdeckung

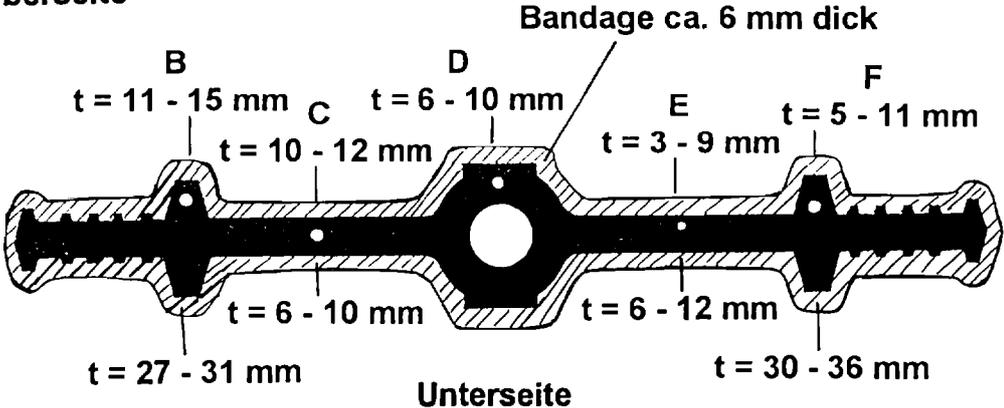
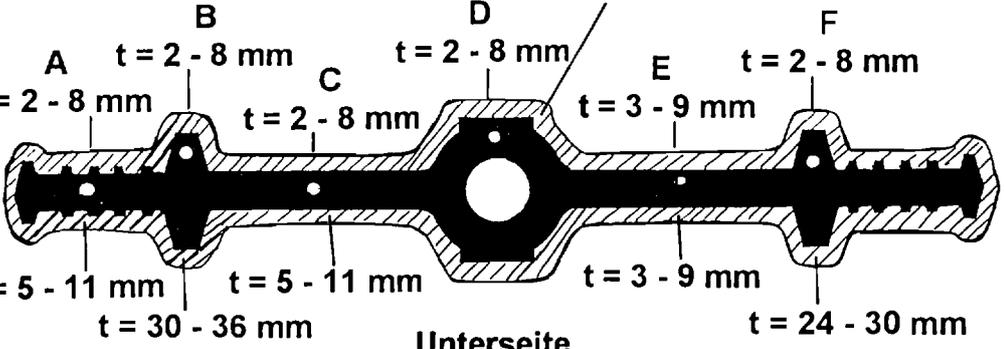
Proben Nr.	Fehlstellenbeschreibung	Lage der Fehlstellen
15	Zylinderförmige Hohlstellen im Fugenband, Durchmesser 3 mm, Länge ca. 25 mm bis 30 mm	<p><b>Oberseite</b></p> <p>Bandage ca. 6 mm dick</p>  <p><b>Unterseite</b></p>
16	Zylinderförmige Hohlstellen im Fugenband, Durchmesser 5 mm, Länge ca. 30 mm bis 40 mm	<p><b>Oberseite</b></p> <p>Bandage ca. 6 mm dick</p>  <p><b>Unterseite</b></p>

Tabelle 2b: Beschreibung und Darstellung der Fehlstellen in elastomeren Fugenbandstößen, Fugenbandtyp FM 350  
t = Materialüberdeckung

Probe Nr.	Bild-Nr.	Fehlstellenart	Materialüberdeckung	Fehlstellenort	Versuchsergebnis
1	-	Flächiger Hohlraum parallel zur Fugenbandebene	ca. 5 mm	Labyrinthbereich	Nicht ortbar, da Fehlstelle Verbindung zur Umgebungsluft hatte
2	7, 8	Flächiger Hohlraum parallel zur Fugenbandebene	ca. 5 mm	Dehnbereich	Gut ortbar
3	-	Flächiger Hohlraum parallel zur Fugenbandebene	ca. 15 mm	Im Bereich einer Ankerrippe	Nicht ortbar, da Fehlstelle Verbindung zur Umgebungsluft hatte
4	9	Flächiger Hohlraum parallel zur Fugenbandebene	ca. 5 mm	Im Schlauchbereich	Gut ortbar
5	10	Flächiger Hohlraum senkrecht zur Fugenbandebene	ca. 5 mm	Im Bereich einer Ankerrippe	Nicht eindeutig ortbar
6	-	Zylinderförmiger Hohlraum, Durchmesser ca. 3 mm	ca. 12 mm	In einer Ankerrippe	Nicht ortbar
7a	11	Zylinderförmige Hohlräume, Durchmesser ca. 3 mm	ca. 5 mm	a) Dehnbereich, b) in Ankerrippe, c) Labyrinthbereich	a) Gut ortbar, b) Nicht ortbar, c) Ortbar
7b	-	Zylinderförmige Hohlräume, Durchmesser ca. 0,5 mm	ca. 5 mm	wie bei Probe Nr. 7a	Nicht ortbar
8	12	Flächige Hohlstelle unter der Bandage	ca. 2 mm	Dehnbereich	Gut ortbar
9	13	Flächige Hohlstelle unter der Bandage	ca. 2 mm	Schlauchbereich	Gut ortbar
10	-	Flächige Hohlstelle unter der Bandage	ca. 5 mm	Dehnbereich	Nicht ortbar, da nicht luftdicht eingeschlossen
11	-	Poröse Struktur vermutet	ca. 5 mm	Im Stoß zwischen den Fugenbandenden	Nicht ortbar, da keine poröse Struktur vorlag (Nachweis durch zerstörende Prüfung)
12	14	Flächige Hohlstellen, Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm, parallel zur Fugenbandebene	bis ca. 18 mm	Unter der Bandage A: Labyrinthbereich, B: Dehnbereich, C: Schlauchbereich	bis t = ca. 15 mm: ortbar ab t = ca. 20 mm: nicht ortbar
13	15, 16	Flächige Hohlstellen, Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm, parallel zur Fugenbandebene	bis ca. 25 mm	Im Fugenband A: Labyrinthbereich, B und D: Dehnbereich, C: Schlauchbereich, E: Ankerrippe	bis t = ca. 15 mm: ortbar ab t = ca. 20 mm: nicht ortbar
14	17	Lunker, Durchmesser 2 mm	bis ca. 36 mm	A: Labyrinthbereich, B und F: Ankerrippe, C und E: Dehnbereich	bis t = 4 mm: nicht untersucht <sup>1)</sup> ab t = 5 mm: nicht ortbar; Fertigungsfehler ortbar
15	18, 19	Lunker, Durchmesser 3 mm	bis ca. 36 mm	A: Labyrinthbereich, B und F: Ankerrippe, C und E: Dehnbereich, D: Schlauchbereich	bis t = 5 mm: ortbar ab t = 6 mm: nicht ortbar; Fertigungsfehler ortbar
16	20	Lunker, Durchmesser 5 mm	bis ca. 36 mm	A: Labyrinthbereich, B und F: Ankerrippe, C und E: Dehnbereich, D: Schlauchbereich	bis t = 5 mm: ortbar t = 6 bis 9 mm: schwach ortbar ab t = 11 mm: nicht ortbar

1): Zylinderförmige Fehlstellen mit einer Materialüberdeckung kleiner als 5 mm konnten wegen der Bandage nicht hergestellt werden

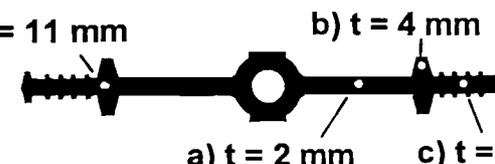
**Tabelle 3:** Versuchsergebnisse mit elastomeren Fugenbändern (Fehlstellenbeschreibung siehe Tabellen 1 und 2)

t = Materialüberdeckung

Materialüberdeckung der Fehlstelle	Durchmesser der Fehlstellen <sup>1)</sup>				
	1 mm	2 mm	3 mm	5 mm	7 mm
2 mm	+	+	+	+	+
4 mm	0	+	+	+	+
6 mm	-	-	+	+	+
8 mm	-	-	0	+	+
10 mm	-	-	-	+	+
12 mm	-	-	-	-	+
14 mm	-	-	-	-	+
16 mm	-	-	-	-	+
18 mm	-	-	-	-	-
20 mm	-	-	-	-	-

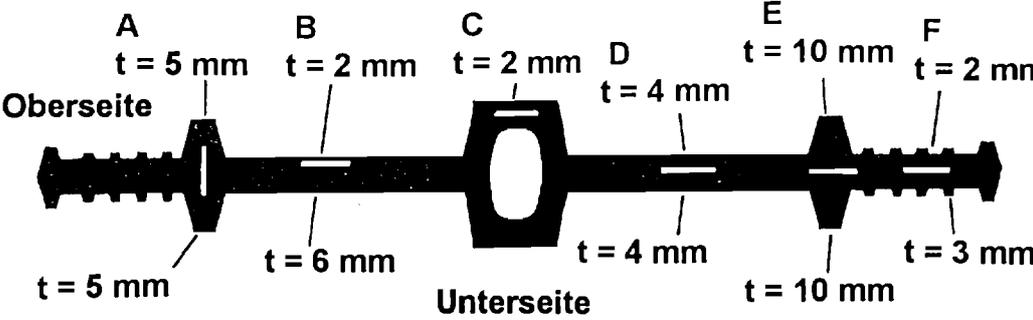
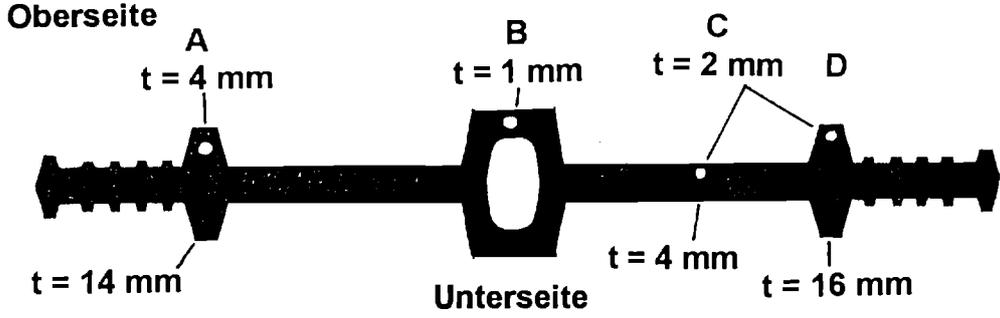
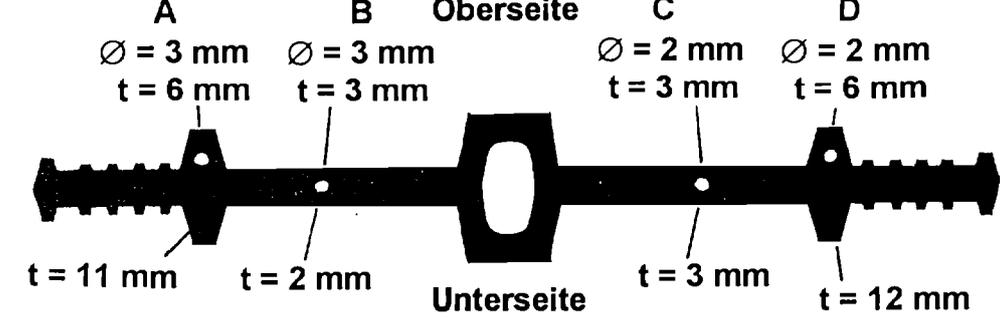
1): + = gut ortbar, 0 = schwach ortbar, - = nicht ortbar

Tabelle 4: Fehlerortung in elastomeren Quaderproben

Probenbezeichnung	Fehlerbeschreibung	Fehlstelle im Fugenband
17	Flächiger Hohlraum im Labyrinthbereich	$t = 2 \text{ mm}$ 
18	Flächiger Hohlraum im Dehnbereich	$t = 4 \text{ mm}$ 
19	Flächiger Hohlraum im Bereich der Ankerrippe	$t = 11 \text{ mm}$ 
20	Flächiger Hohlraum im Schlauchbereich	$t = 3 \text{ mm}$ 
21	Flächiger Hohlraum senkrecht zum Fugenband in der Ankerrippe	$t = 5 \text{ mm}$ 
22	Zylinderförmiger Hohlraum $\varnothing 1 \text{ mm}$ a) Dehnbereich b) In Ankerrippe c) Labyrinthbereich d) Unter Ankerrippe	$d) t = 11 \text{ mm}$ $b) t = 4 \text{ mm}$  $a) t = 2 \text{ mm}$ $c) t = 2 \text{ mm}$
23	Zylinderförmige Hohlräume $\varnothing 3,5 \text{ mm}$ a) Dehnbereich b) Ankerrippe c) Unter der Ankerrippe	$c) t = 10 \text{ mm}$ $a) t = 2 \text{ mm}$  $b) t = 4 \text{ mm}$

**Tabelle 5:** Beschreibung und Darstellung von Fehlstellen in thermoplastischen Fugenbandabschnitten (Fugenbandtyp Tricomer D 320/9)

$t$  = Materialüberdeckung

Proben Nr.	Fehlstellenbeschreibung	Lage der Fehlstellen
24	Flächige Hohlstellen, Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm	
25	Zylinderförmige Hohlstellen, Durchmesser 2 mm, Länge ca. 25 mm	
26	Zylinderförmige Hohlstellen, Durchmesser 2 mm und 3 mm, Länge ca. 25 mm	

**Tabelle 6:** Beschreibung und Darstellung von Fehlstellen in thermoplastischen Fugenbandstößen (Fugenbandtyp Tricomer D 320/9)

t = Materialüberdeckung, Ø = Durchmesser der Fehlstelle

Probe Nr.	Bild-Nr.	Fehlstellenart	Materialüberdeckung	Fehlstellenort	Versuchsergebnis
17	26	Flächiger Hohlraum parallel zur Fugenbandebene	ca. 2 mm	Labyrinthbereich	Gut ortbar
18	27	Flächiger Hohlraum parallel zur Fugenbandebene	ca. 4 mm	Dehnbereich	Gut ortbar
19	28	Flächiger Hohlraum parallel zur Fugenbandebene	ca. 11 mm	Im Bereich einer Ankerrippe	Gut ortbar
20	29	Flächiger Hohlraum parallel zur Fugenbandebene	ca. 3 mm	Im Schlauchbereich	Gut ortbar
21	-	Flächiger Hohlraum senkrecht zur Fugenbandebene	ca. 5 mm	Im Bereich einer Ankerrippe	Nicht ortbar
22	30, 31	Zylinderförmiger Hohlraum, Ø = ca. 1 mm	a) ca. 2 mm b) ca. 4 mm c) ca. 2 mm d) ca. 11 mm	a) Im Dehnbereich (Stelle a)) b) In einer Ankerrippe c) Labyrinthbereich d) Unter einer Ankerrippe	a) Gut ortbar b) Ortbar c) Ortbar d) Nicht ortbar
23	32	Zylinderförmige Hohlräume, Ø = ca. 3,5 mm	a) ca. 2 mm b) ca. 4 mm c) ca. 10 mm	a) Dehnbereich b) In Ankerrippe c) Unter einer Ankerrippe	a) Gut ortbar b) Ortbar c) Nicht ortbar
24	33, 34	Flächige Hohlstellen, Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm parallel zur Fugenbandebene	B: ca. 2 mm bzw. ca. 6 mm C: ca. 2 mm D: ca. 4 mm E: ca. 10 mm F: ca. 2 mm bzw. ca. 3 mm	B: Dehnbereich C: Schlauchbereich D: Dehnbereich E: In Ankerrippe F: Labyrinthbereich	ortbar
	-	Flächige Hohlstelle, Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm senkrecht zur Fugenbandebene	A: ca. 5 mm	In der Ankerrippe	nicht ortbar
25	35	Lunker, Durchmesser 2 mm, Länge ca. 25 mm	A: ca. 4 mm bzw. ca. 14 mm B: ca. 1 mm C: ca. 2 mm bzw. ca. 4 mm D: ca. 2 mm bzw. ca. 16 mm	A und D: Ankerrippe B: Schlauchbereich C: Dehnbereich	- bis t = 6 mm: ortbar - t = ca. 13 mm: nicht ortbar
26	36	Lunker, Länge ca. 25 mm, Durchmesser 3 mm	A: ca. 6 mm bzw. ca. 11 mm B: ca. 2 mm bzw. ca. 3 mm	A und D: Ankerrippe B und C: Dehnbereich	- bis t = 6 mm: ortbar - t = ca. 13 mm: nicht ortbar
		Lunker, Länge ca. 25 mm, Durchmesser 2 mm	C: ca. 3 mm D: ca. 6 mm bzw. ca. 12 mm	A und D: Ankerrippe B und C: Dehnbereich	- bis t = 6 mm: ortbar - t = ca. 13 mm: nicht ortbar

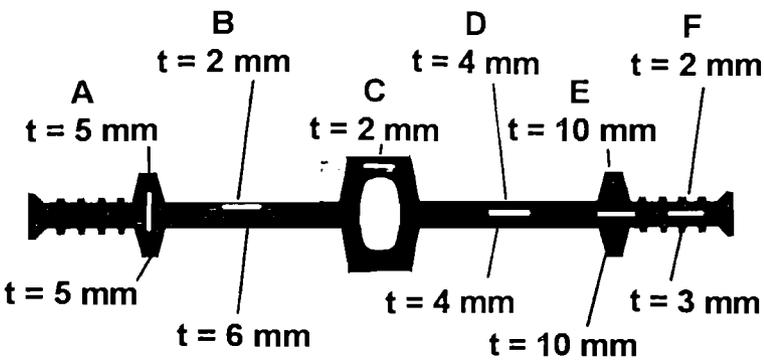
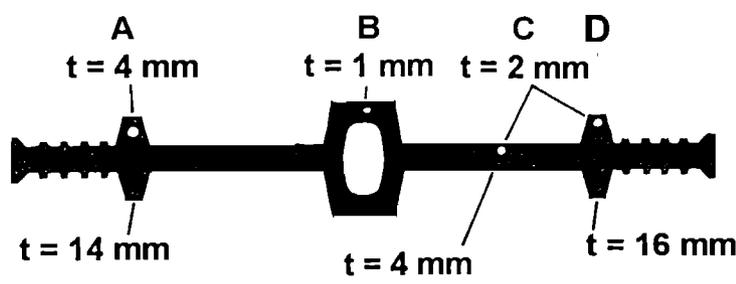
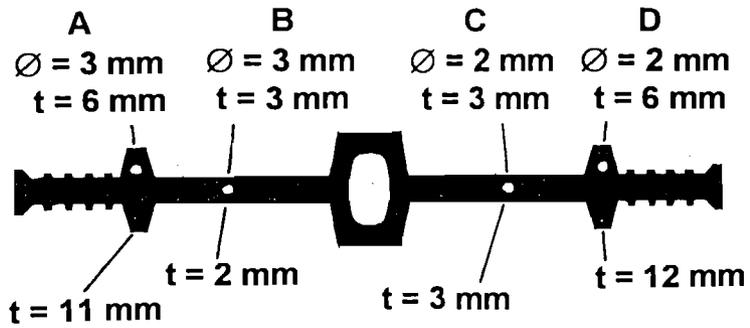
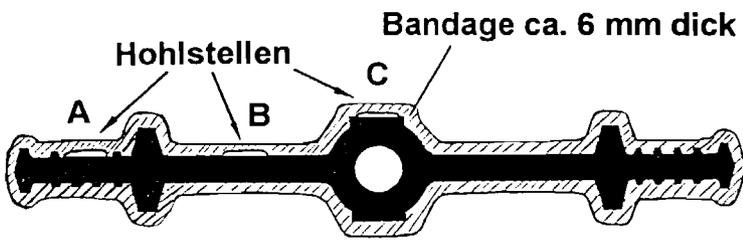
Tabelle 7: Versuchsergebnisse mit thermoplastischen Fugenbändern (Fugenbandtyp Tricomer D 320/9, Fehlstellenbeschreibung siehe Tabellen 5 und 6)

t = Materialüberdeckung

Materialüberdeckung der Fehlstelle	Durchmesser der Fehlstellen <sup>1)</sup>				
	1 mm	2 mm	3 mm	5 mm	7 mm
2 mm	+	+	+	+	+
4 mm	+	+	+	+	+
6 mm	-	+	+	+	+
8 mm	-	-	+	+	+
10 mm	-	-	+	+	+
12 mm	-	-	-	+	+
14 mm	-	-	-	+	+
16 mm	-	-	-	0	+
18 mm	-	-	-	-	+
20 mm	-	-	-	-	-

1): + = gut ortbar, 0 = schwach ortbar, - = nicht ortbar

Tabelle 8: Fehlerortung in thermoplastischen Quaderproben

Proben Nr.	Material- und Fehlstellenbeschreibung	Lage der Fehlstellen
27	Länge des Fugenbandes ca. 80 cm (Tricomer D 320/9) Thermoplastischer Stumpfstoß Flächige Hohlstellen, Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm	
28	Länge des Fugenbandes ca. 80 cm (Tricomer D 320/9) Thermoplastischer T-Stoß Zylinderförmige Hohlstellen, Durchmesser 2 mm, Länge ca. 25 mm	
29	Länge des Fugenbandes ca. 80 cm (Tricomer D 320/9) Thermoplastischer Kreuzstoß Zylinderförmige Hohlstellen, Durchmesser 2 mm und 3 mm, Länge ca. 25 mm	
30	Länge des Fugenbandes ca. 80 cm (FMS 350) Elastomer-Stumpfstoß Flächige Hohlstellen unter der Bandage, Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm	

**Tabelle 9:** Beschreibung und Darstellung der Fehlstellen in den Fugenbandstößen  
 t = Materialüberdeckung

Probe Nr.	Bild Nr.	Temperatur [+°C]	Bildausschnitt	Unterdruck im Hohlkörper	Abschöpfung Hohlkörper	Scherrichtung zur Stoßnaht	Scherbetrag [mm]	Unterdruck [mbar]	Aufnahmezeit [s]	Anzahl der Bilder	Sichtbare Fehlstellen	Bemerkungen
27	46a	20	Dehnbereich	nein	nein	senkrecht	5,0	20	2	10	B, C, D	starke Störsignale
	46b	20	Ankerrippe	nein	nein	senkrecht	5,0	20	2	10	D, E, F	gute Fehlerortung
	47a	35	Dehnbereich	nein	nein	senkrecht	5,0	20	2	10	B, C, D	mehr Störsignale als bei +20°C
	47b	35	Ankerrippe	nein	nein	senkrecht	5,0	20	2	10	D, E, F	mehr Störsignale als bei +20°C
	48a	20	Dehn- und Labyrinthbereich	ja	±10 cm vom Stoß	senkrecht	2,5	25	3	10	C, D, E, F	starke Störsignale
	48b	20	Dehn- und Labyrinthbereich	ja	±20 cm vom Stoß	senkrecht	2,5	25	3	10	C, D, E, F	wenig Störsignale
	49a	20	Dehn- und Labyrinthbereich	ja	±30 cm vom Stoß	senkrecht	2,5	25	3	10	C, D, E, F	wenig Störsignale
	49b	20	Dehn- und Labyrinthbereich	ja	±40 cm vom Stoß	senkrecht	2,5	25	3	10	C, D, E, F	wenig Störsignale
30	50a	20	Dehnbereich	nein	nein	senkrecht	5,0	150	21	20	keine	Störsignale im Meßbereich
	50b	20	Dehnbereich	nein	nein	senkrecht	5,0	50	4	14	Fehlstelle im Hohlkörper	Weniger Störsignale als bei Aufnahmezeit 21 Sekunden
	51a	20	Dehnbereich	nein	nein	senkrecht	5,0	50	4	14	Fehlstelle im Hohlkörper	Mit Unterstützung des Fugenbandes
	51b	20	Dehnbereich	nein	nein	senkrecht	5,0	20	4	14	Fehlstelle im Hohlkörper	Ohne Unterstützung des Fugenbandes
	52a	20	Hohlkörper	nein	nein	senkrecht	5,0	50	4	14	Fehlstelle im Hohlkörper	Störsignale vorhanden
	52b	20	Dehnbereich	nein	nein	senkrecht	5,0	50	4	14	B	Störsignale vorhanden
	53a	20	Ankerrippe	ja	±10 cm vom Stoß	senkrecht	5,0	25	3	10	D, E, F	Gute Fehlerortung
	53b	20	Ankerrippe	ja	±20 cm vom Stoß	senkrecht	5,0	25	3	10	D, E, F	Gute Fehlerortung
	54a	20	Ankerrippe	ja	±30 cm vom Stoß	senkrecht	5,0	25	3	10	D, E, F	Gute Fehlerortung
	54b	20	Ankerrippe	ja	±40 cm vom Stoß	senkrecht	5,0	25	3	10	D, E, F	Gute Fehlerortung
	55a	35	Hohlkörper	nein	nein	senkrecht	5,0	30	4	14	C, B	mehr Störsignale als bei +20°C
	55b	35	Dehnbereich	nein	nein	senkrecht	5,0	30	4	14	A, B	mehr Störsignale als bei +20°C

**Tabelle 10:** Übersicht der Versuchsparameter und Versuchsergebnisse mit thermoplastischem Stumpfstoß (Probe Nr. 27, vgl. Tabelle 9) und elastomerem Stumpfstoß (Probe Nr. 30, vgl. Tabelle 9) bei den Laborversuchen mit der Alu-Saugglocke (Länge der Fugenbandabschnitte je ca. 80 cm)

Versuchsparameter	Grundeinstellung	Veränderte Einstellungen
Unterdruck [mbar]	50	10; 25
Aufnahmezeit [s]	6	1,5; 3
Anzahl der Bilder <sup>1)</sup> [Stück]	20	5; 10
Scherbetrag [mm]	5	1,5; 2,5
Scherrichtung	parallel zum nicht gestoßenen Hohlkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>- senkrecht zum nicht gestoßenen Hohlkörper</li> <li>- parallel zur jeweiligen Stoßnaht</li> <li>- senkrecht zur jeweiligen Stoßnaht</li> </ul>

1): Anzahl der Bilder, die für eine Shearografieaufnahme miteinander verrechnet werden

**Tabelle 11:** Grundeinstellung der Versuchsparameter und geänderte Einstellungen zur Reduktion der Störsignale im Hohlkörperbereich des thermoplastischen Kreuzstoßes (Probe Nr. 29; vgl. Tabelle 9)

Bild Nr.	Unterdruckerzeugung im Hohlkörper	Einklemmung des Hohlkörpers im Saugglockenbereich	Scherrichtung <sup>1)</sup>	Scherbetrag [mm]	Unterdruck [mbar]	Anzahl der Bilder	Aufnahmezeit [s]	Versuchsergebnis
63a	nein	nein	p.z.H.	ca. 5	25	10	3	Starke Störsignale, keine Fehlstelle ortbar
63b	nein	nein	s.z.F.	ca. 2,5	25	10	3	Starke Störsignale, keine Fehlstelle ortbar
64	ja	nein	s.z.F..	ca. 5	50	20	6	Starke Störsignale, keine Fehlstelle ortbar
65	ja	nein	s.z.F..	ca. 5	25	10	3	Fehlstelle im Dehnbereich ortbar, Störsignale täuschen weitere Fehlstellen vor
66	nein	ja	s.z.F..	ca. 2,5	25	10	3	Fehlstelle im Dehnbereich ortbar, Störsignale täuschen weitere Fehlstellen vor
67	ja	ja	p.z.H.	ca. 2,5	25	10	3	Fehlstelle im Dehnbereich ortbar, kaum Störsignale

1): p.z.H. = parallel zum nicht gestoßenen Hohlkörper  
s.z.F.. = senkrecht zur Fehlstelle

Tabelle 12: Versuchsergebnisse mit dem thermoplastischen Kreuzstoß (Probe Nr. 29; vgl. Tabelle 9)

Bild Nr.	Prüfort	Stoß	Fugenbandabschnitt	Scher- richtung zur Stoßnaht	Scherbetrag [mm]	Unterdruck [mbar]	Aufnahme- zeit [s]	Anzahl der Bilder	Versuchsergebnis
68a	Baustelle	Thermoplastischer Baustellenstumpfstoß	Mittelschlauch bis Labyrinthbereich (nördliche Seite)	senkrecht	2,5	25	3	10	Keine Fehlstellen sichtbar, Störsignale
68b	Baustelle	Thermoplastischer Baustellenstumpfstoß	Mittelschlauch bis Labyrinthbereich (südliche Seite)	senkrecht	2,5	25	3	10	Störsignale an den Ankerrippen, keine Fehlstelle sichtbar
69a	Baustelle	Thermoplastischer Stumpfstoß mit präparierten Fehlstellen (Probe Nr. 27; Tabelle 9)	Dehnbereich	senkrecht	2,5	25	3	10	Fehlstelle in Bodenplatte Dehnbereich sichtbar, jedoch nicht die Fehlstelle im Schlauch, Störsignale
69b	Labor	Thermoplastischer Stumpfstoß mit präparierten Fehlstellen (Probe Nr. 27; Tabelle 9)	Dehnbereich	senkrecht	5	20	2	10	Alle im Blickfeld liegenden Fehlstellen sichtbar

**Tabelle 13:** Versuchsergebnisse des thermoplastischen Baustellenstumpfstoßes und zum Vergleich des präparierten thermoplastischen Stumpfstoßes (Probe Nr. 27; Tabelle 9)  
Alle Shearografie-Aufnahmen wurden auf der Baustelle durchgeführt.

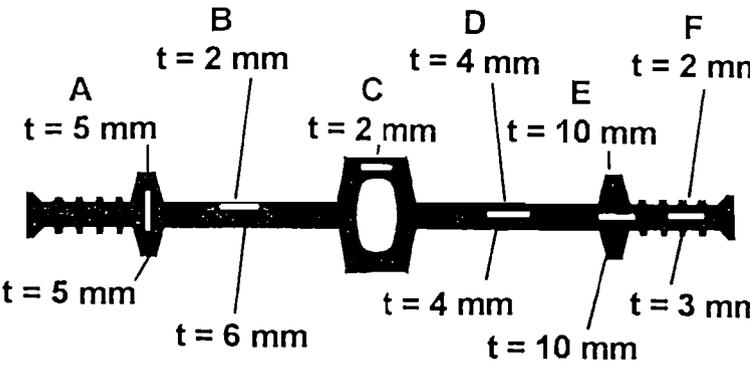
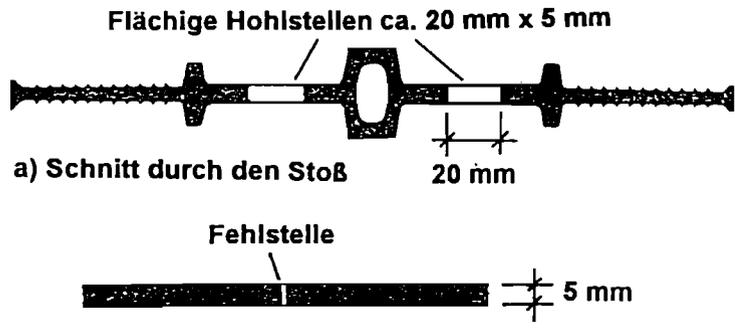
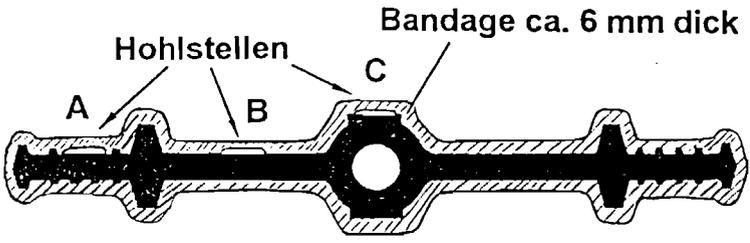
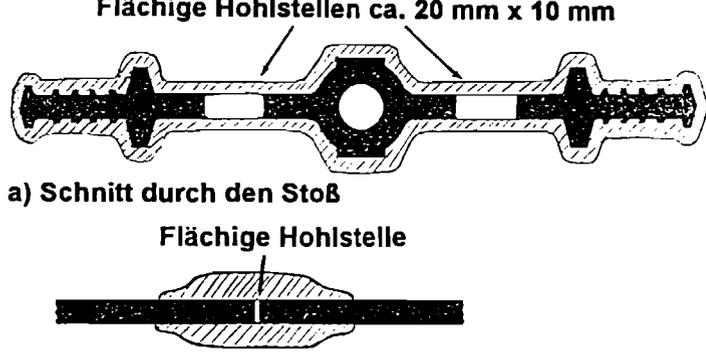
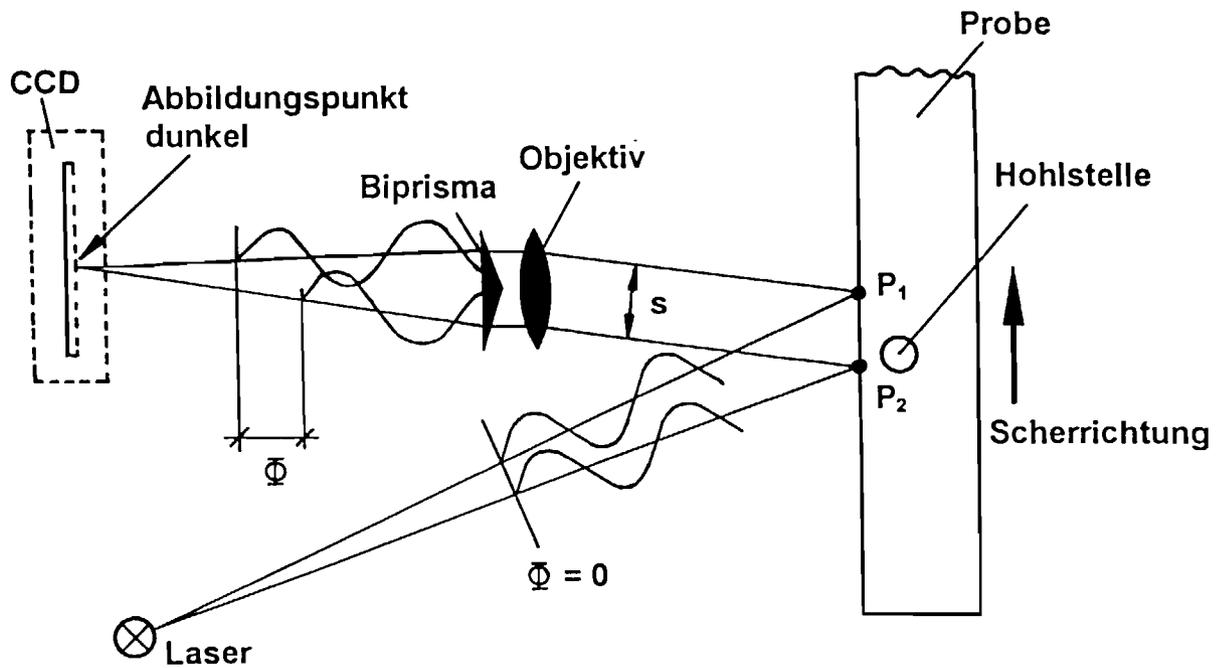
Proben Nr.	Material- und Fehlstellen- beschreibung	Lage der Fehlstellen
27	Länge des Fugenbandes ca. 80 cm (Tricomer D320/9) Flächige Hohlstellen, parallel zur Fugenbandebene Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm	
31	Länge des Fugenbandes ca. 100 cm (Tricomer D320/9) Flächige Hohlstellen, senkrecht zur Fugenbandebene Größe ca. 20 mm x 5 mm	
30	Länge des Fugenbandes ca. 80 cm (Elastomer FM 350) Flächige Hohlstellen unter der Bandage, parallel zur Fugen- bandebene Größe ca. 10 mm x 10 mm x 0,3 mm	
32	Länge des Fugenbandes ca. 100 cm (Elastomer FM 350) Flächige Hohlstellen, senkrecht zur Fugenbandebene Größe ca. 20 mm x 5 mm	

Tabelle 14: Beschreibung und Darstellung der Fehlstellen in den thermoplastischen und elastomeren Fugenbandstumpfstoßen  
 t = Materialüberdeckung

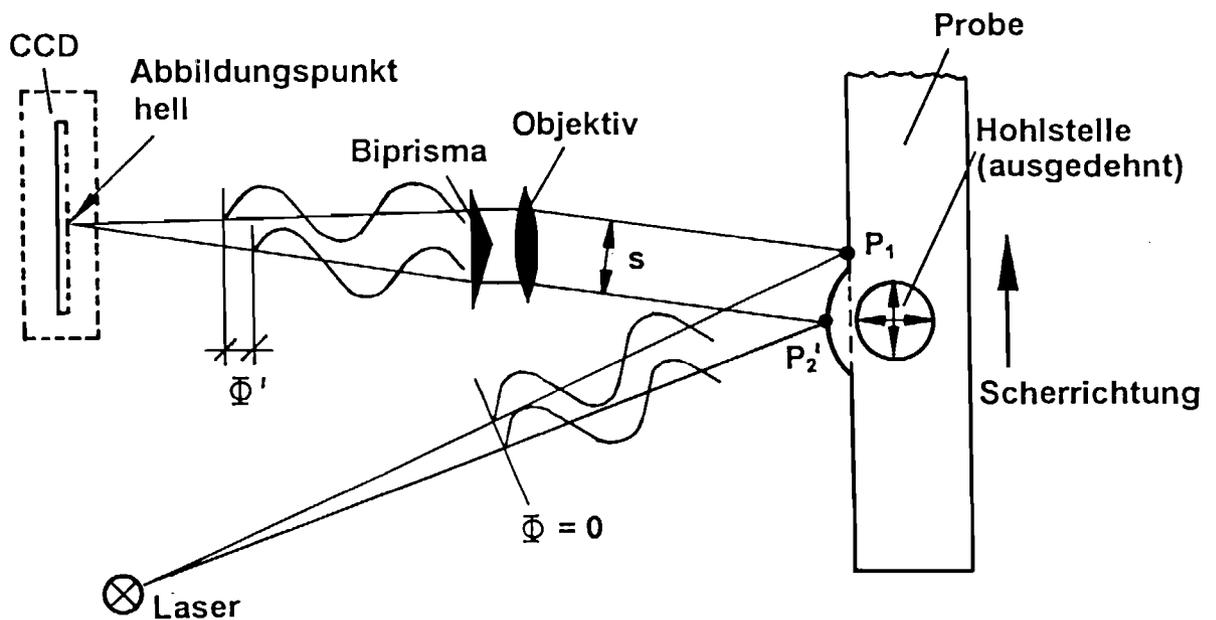
Proben	Thermoplastische Stumpfstöße (Proben Nr. 27 und Nr. 31)	Elastomere Stumpfstöße (Proben Nr. 30 und Nr. 32)
Unterdruck in der Saugglocke	ca. 20 mbar bis 30 mbar	ca. 50 mbar
Unterdruck im Mittelschlauch	0	0
Aufnahmezeit	ca. 3 Sekunden	ca. 3 Sekunden
Anzahl der Bilder pro Aufnahme	10 Stück	10 Stück
Scherbetrag	ca. 2,5 mm	ca. 5 mm
Scherrichtung	Senkrecht zur Stoßnaht	Senkrecht zur Stoßnaht

Tabelle 15: Versuchsparameter bei den Versuchen mit der Baustellen-Saugglocke zur Prüfung von Fugenbandstumpfstößen

# **Bildanhang**



a) Abbildung der unverformten Probenoberfläche



b) Abbildung der verformten Probenoberfläche

**Bild 1:** Prinzip der shearografischen Messung

$\Phi, \Phi'$  : Phasenverschiebung der Lichtwellen, hervorgerufen durch die unverformte bzw. verformte Fugenbandprobe  
 $s$  : Scherbetrag

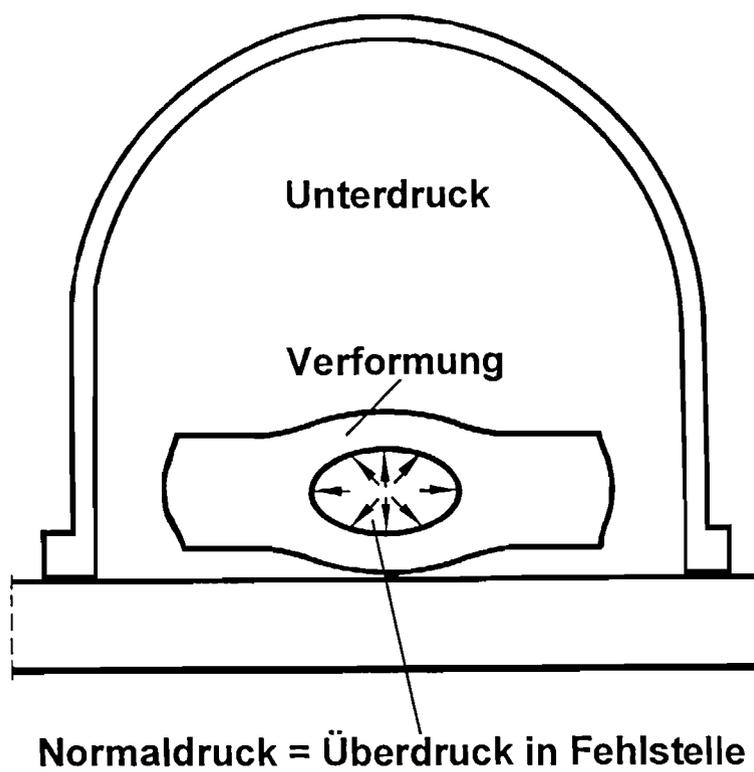
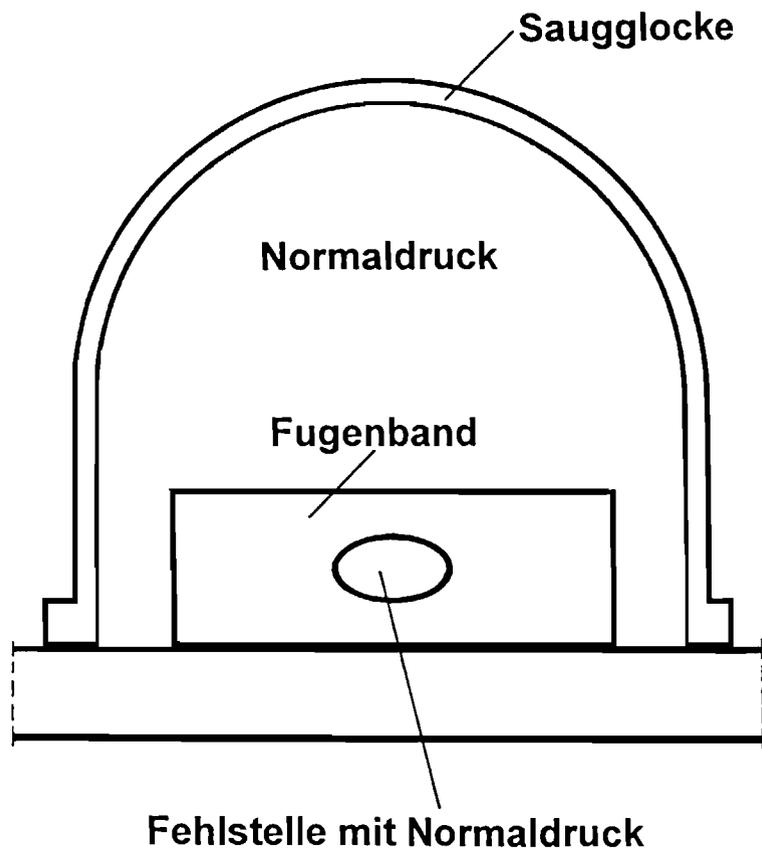
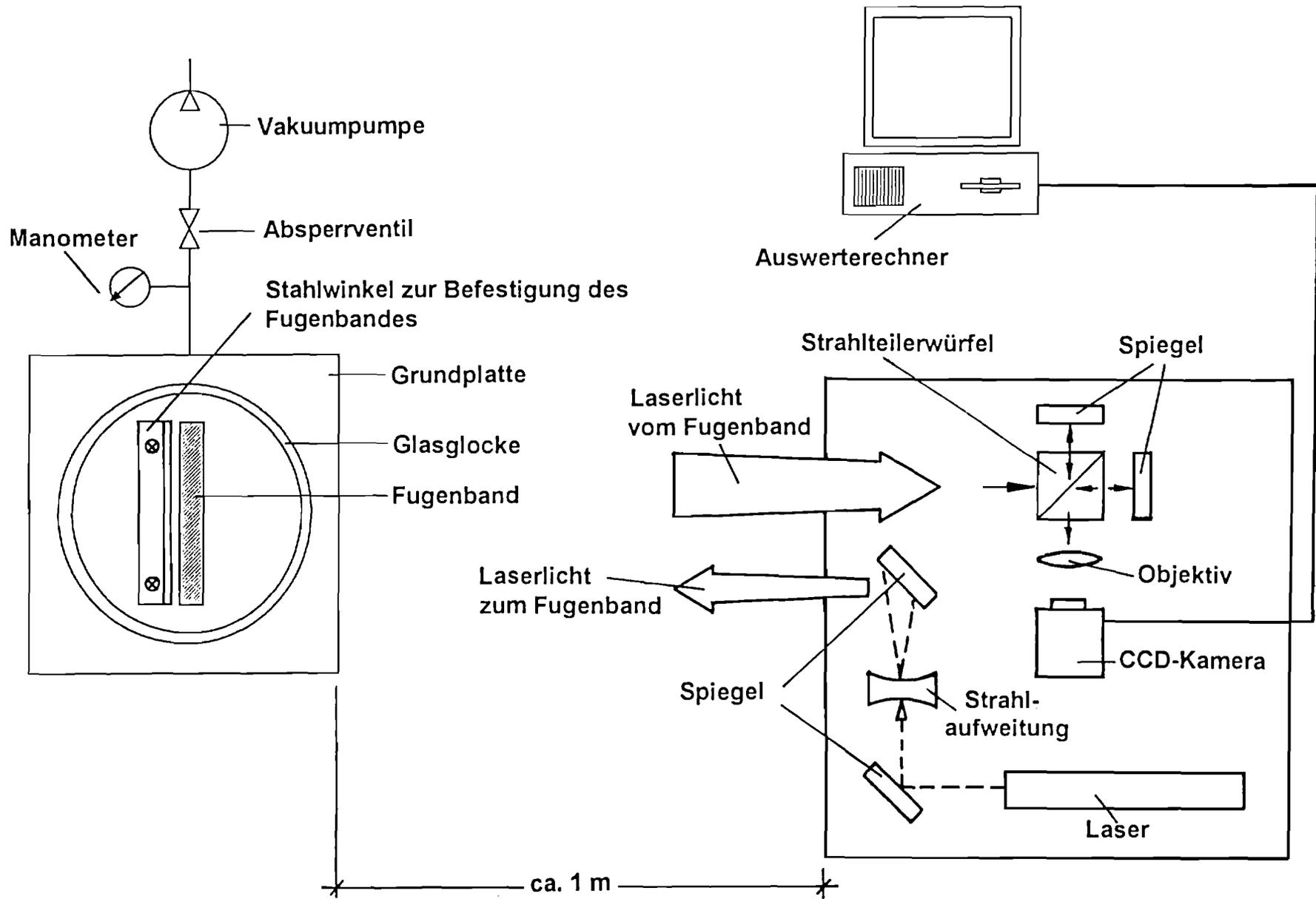
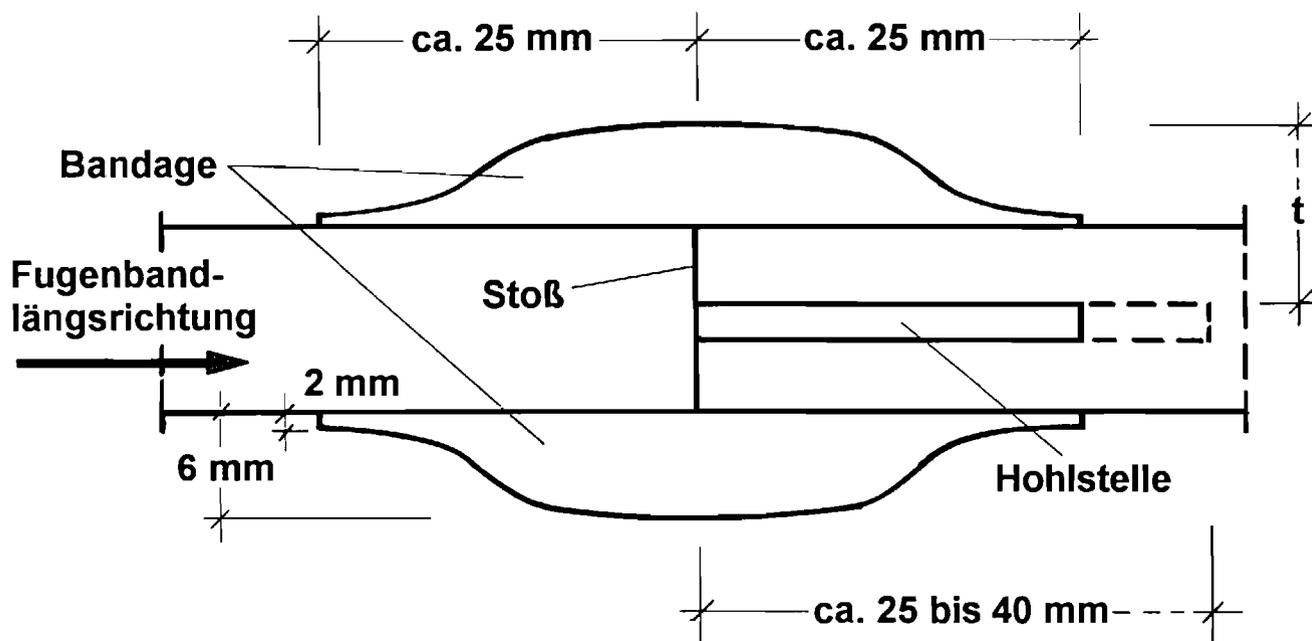


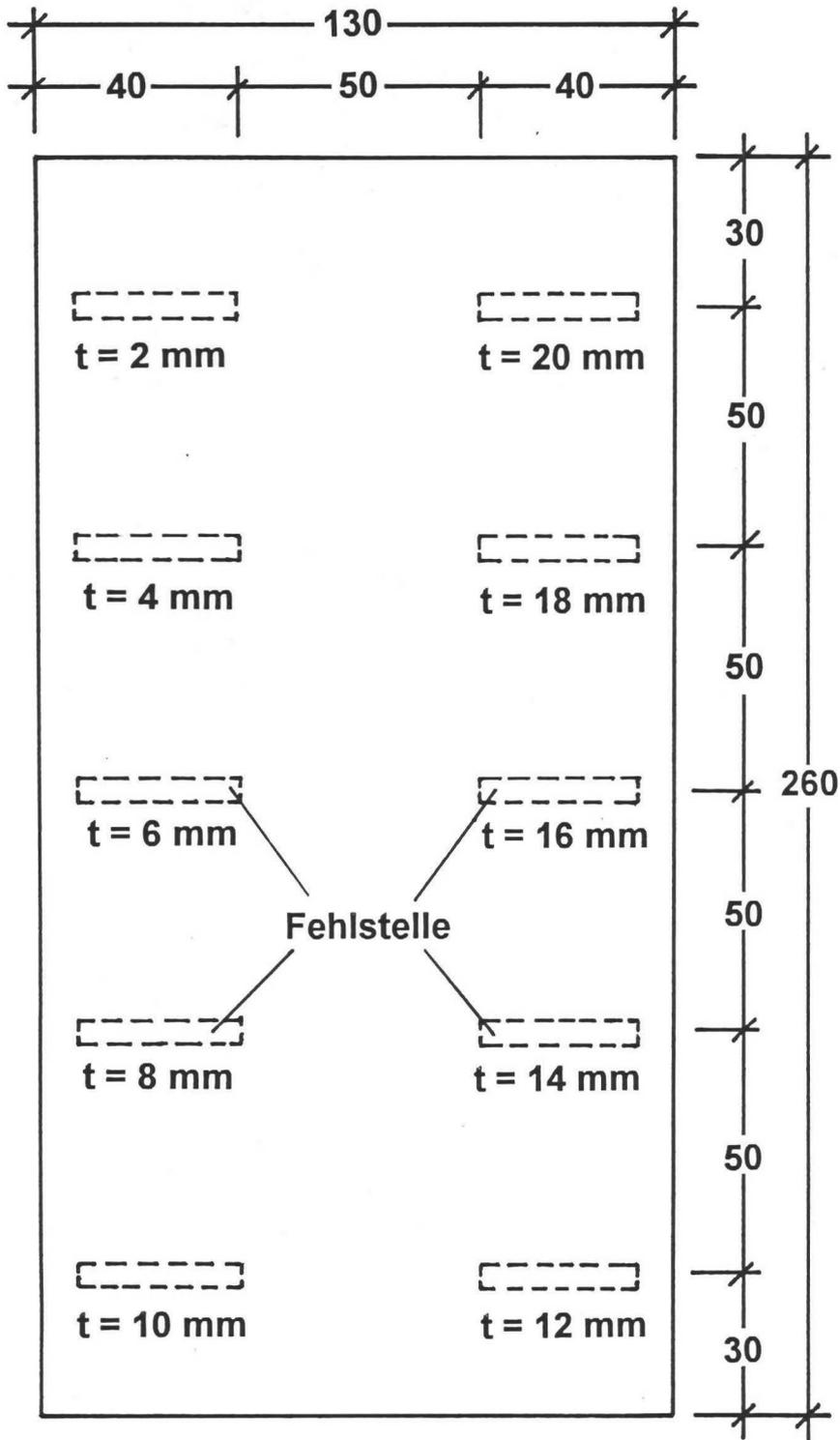
Bild 2: Glas-Saugglocke für Laborversuche (Prinzip)



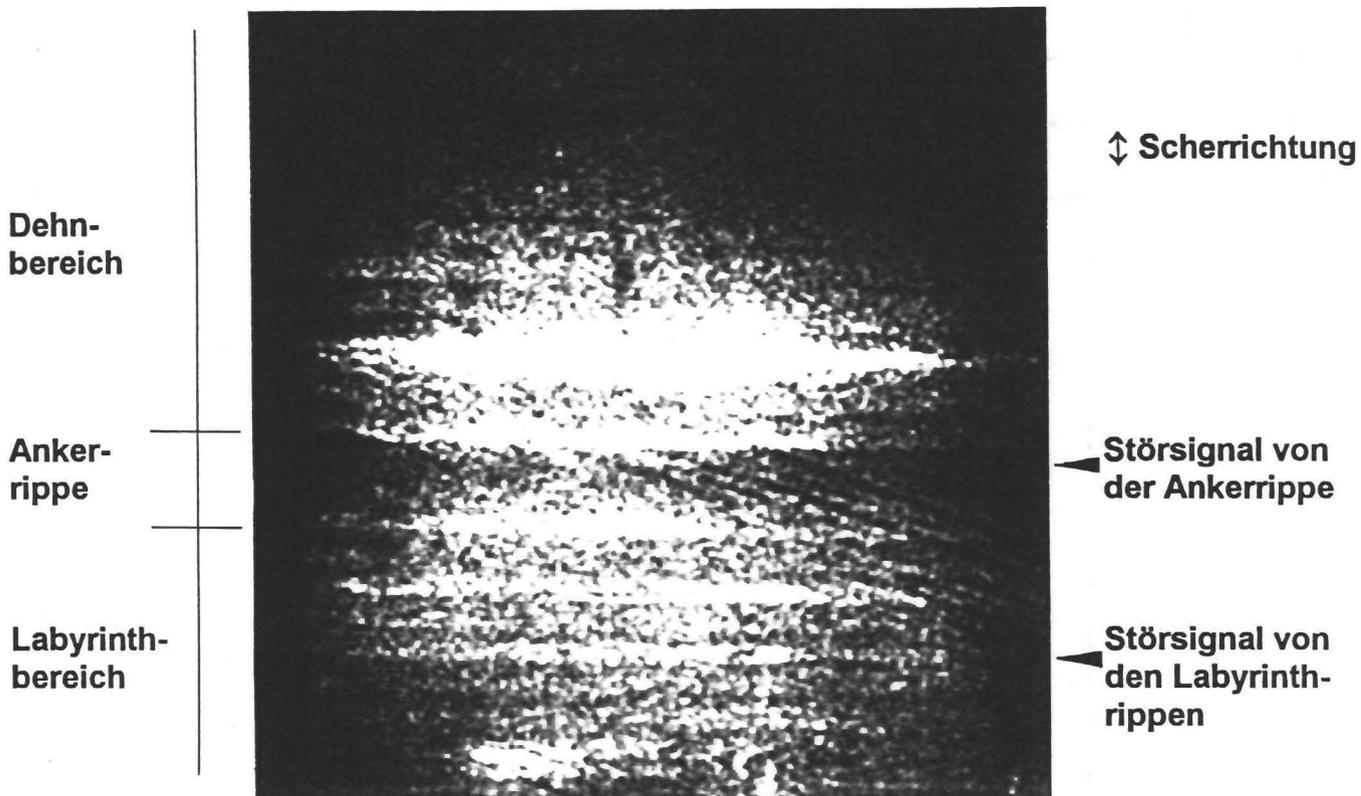
**Bild 3:** Darstellung des Versuchsaufbaus bei den Laborversuchen mit der Glas-Saugglocke



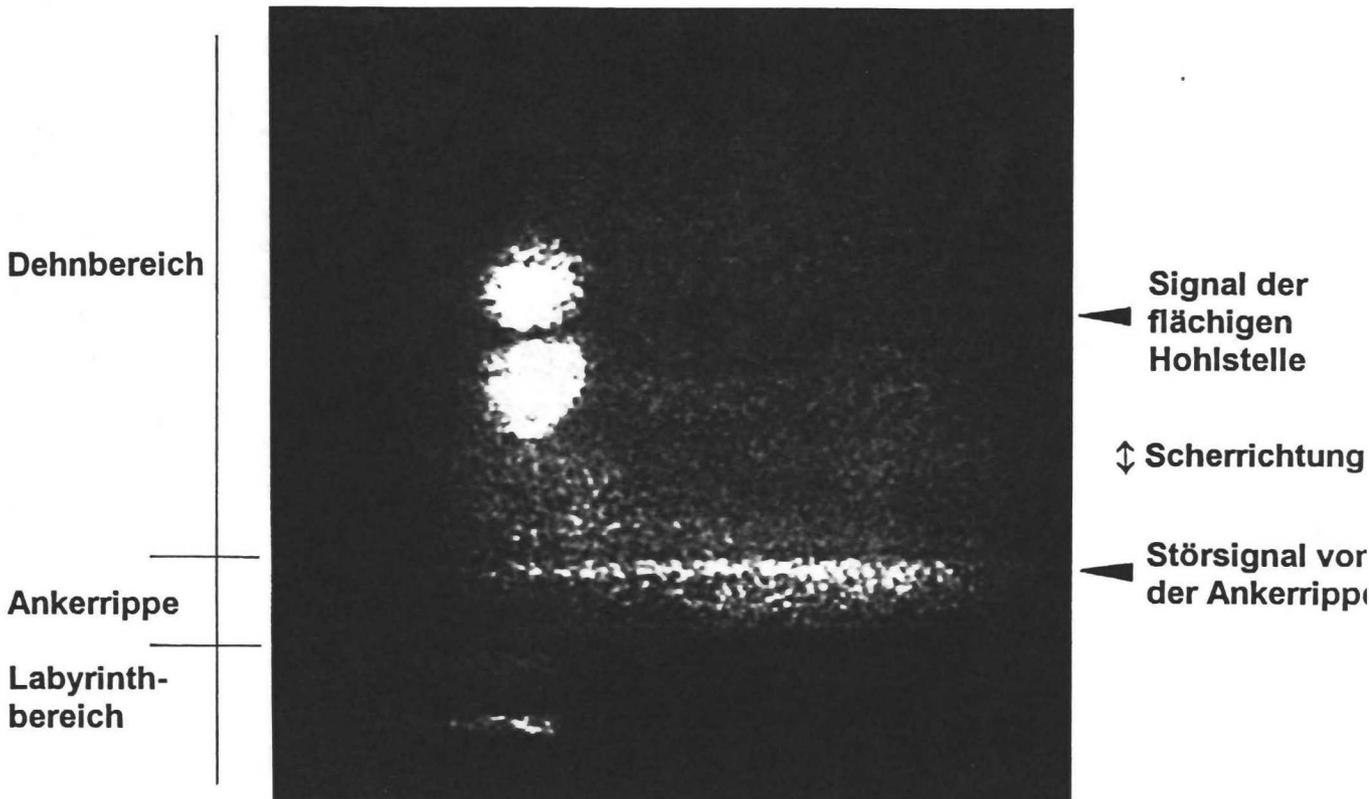
**Bild 4:** Zylinderförmige Hohlstelle in einem elastomeren Fugenbandstoß (Längsschnitt)  
 t = Materialüberdeckung



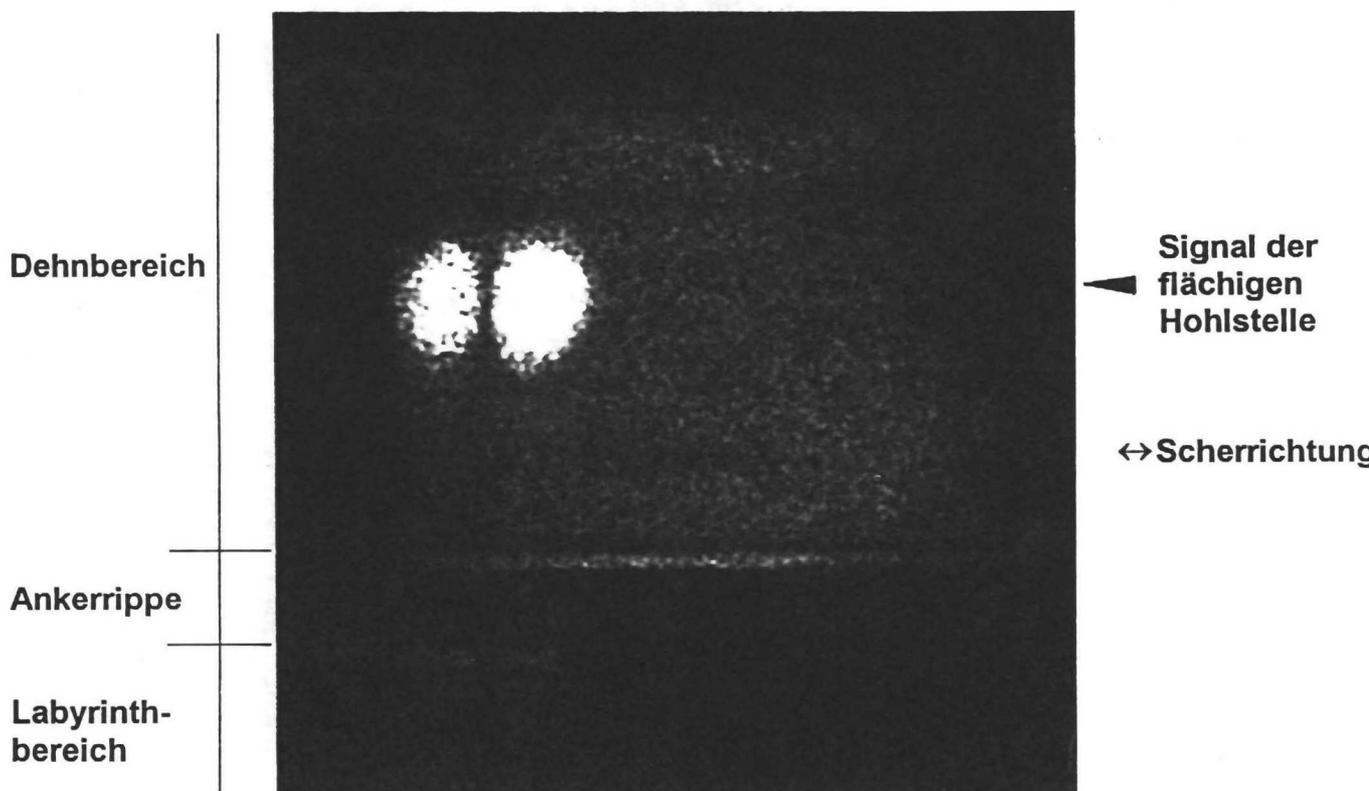
**Bild 5:** Abmessungen der Elastomer- und Thermoplast-Quader mit zylindrischen Fehlstellen unterschiedlicher Überdeckung  
 t = Materialüberdeckung



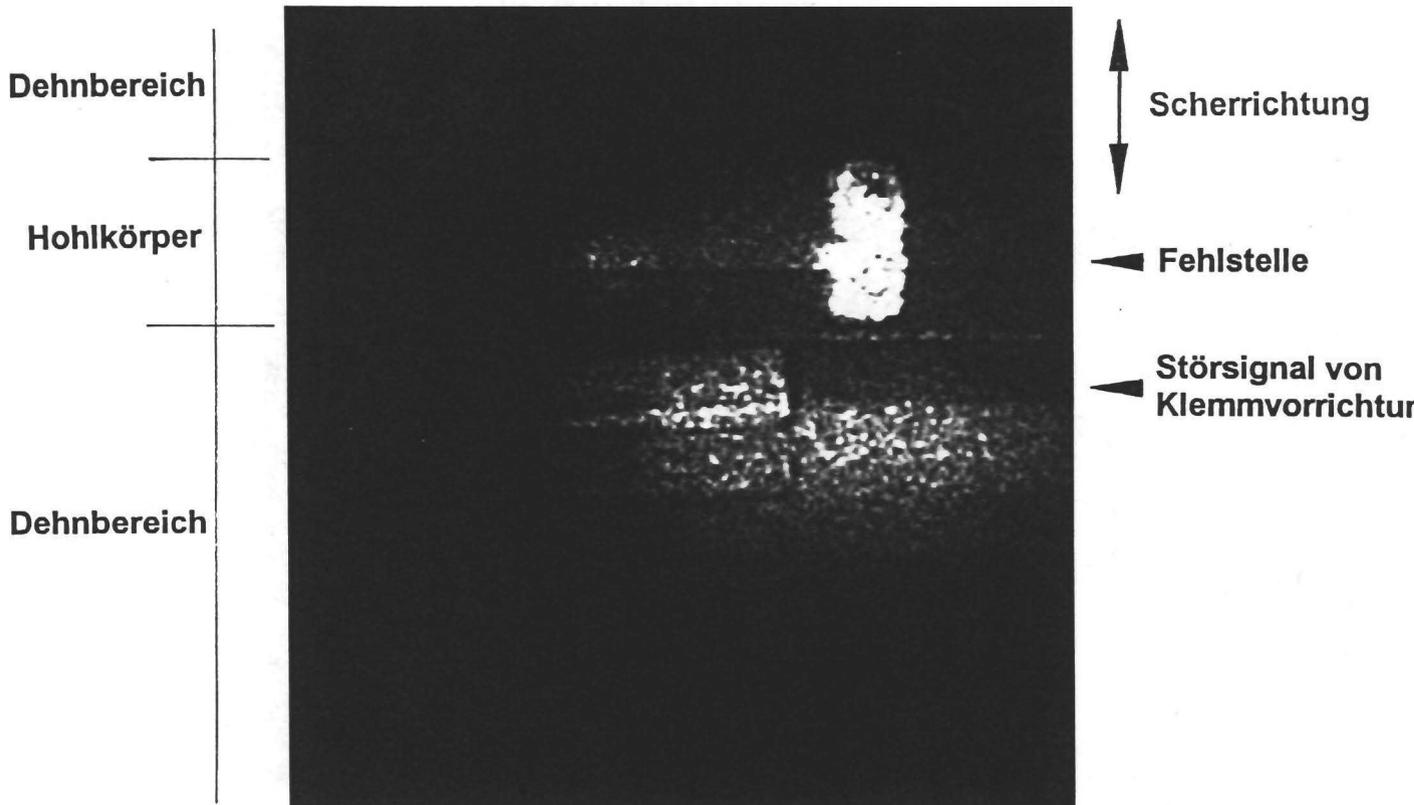
**Bild 6:** Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 7a (vgl. Tabelle 1a), mit Scherrichtung senkrecht zur Fugenbandlängsrichtung. Auf dem Bild sind nur die Störsignale von der Ankerrippe und von den Labyrinthrippen erkennbar.



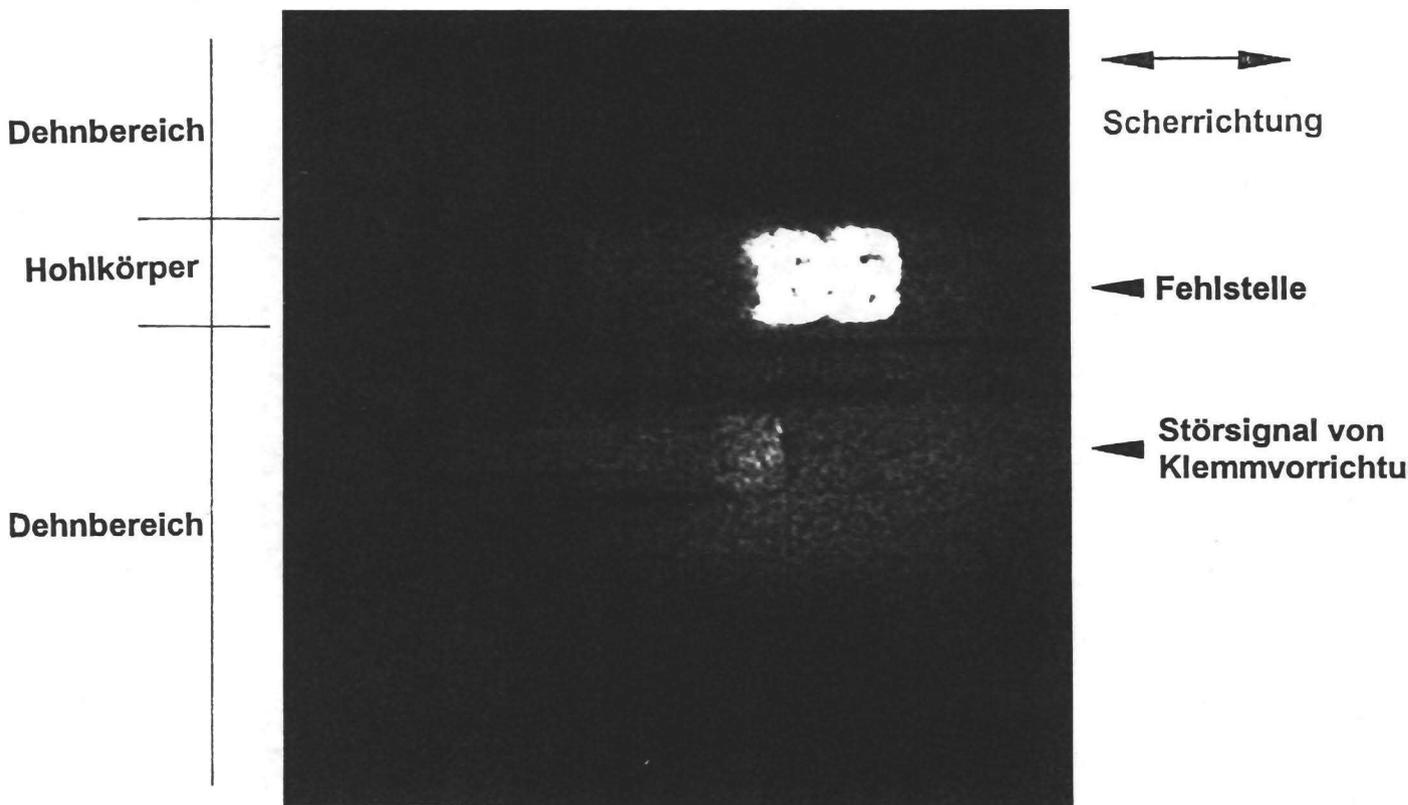
**Bild 7:** Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 2 (vgl. Tabelle 1a), Die flächige Fehlstelle ist deutlich sichtbar. Störsignale von der Ankerrippe sind ebenfalls deutlich erkennbar.



**Bild 8:** Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 2 (vgl. Tabelle 1a), Die flächige Fehlstelle ist deutlich sichtbar. Das Störsignal von der Ankerrippe ist im Gegensatz zu Bild 7 nur sehr schwach.

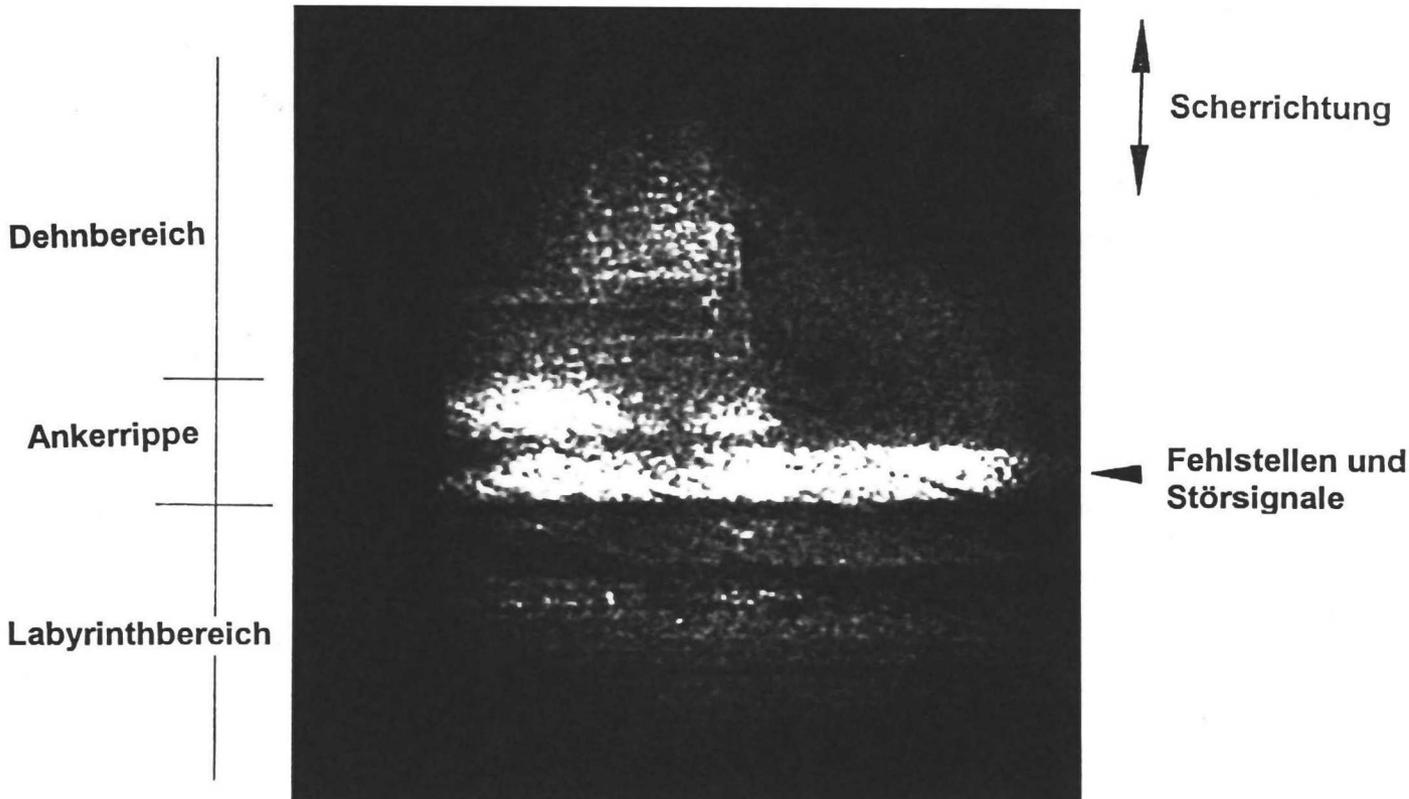


a) Scherrichtung quer zur Fugenbandlängsrichtung

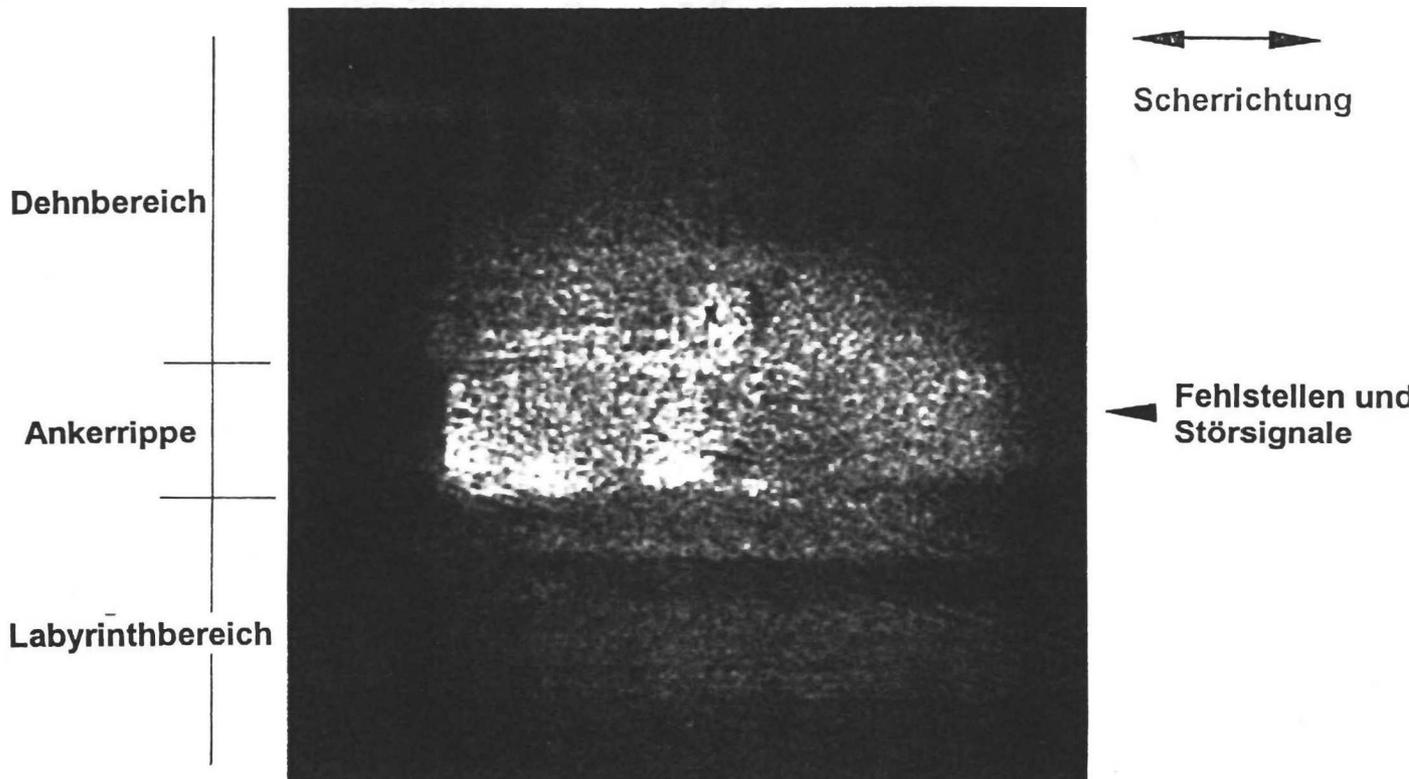


b) Scherrichtung parallel zur Fugenbandlängsrichtung

Bild 9: Shearogramme von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 4 (vgl. Tabelle 1a)  
 Die flächige Fehlstelle im Hohlkörper ist bei beiden Scherrichtungen deutlich sichtbar. Das Störsignal von der Klemmvorrichtung ist bei der Scherrichtung parallel zur Fugenbandlängsrichtung am schwächsten.

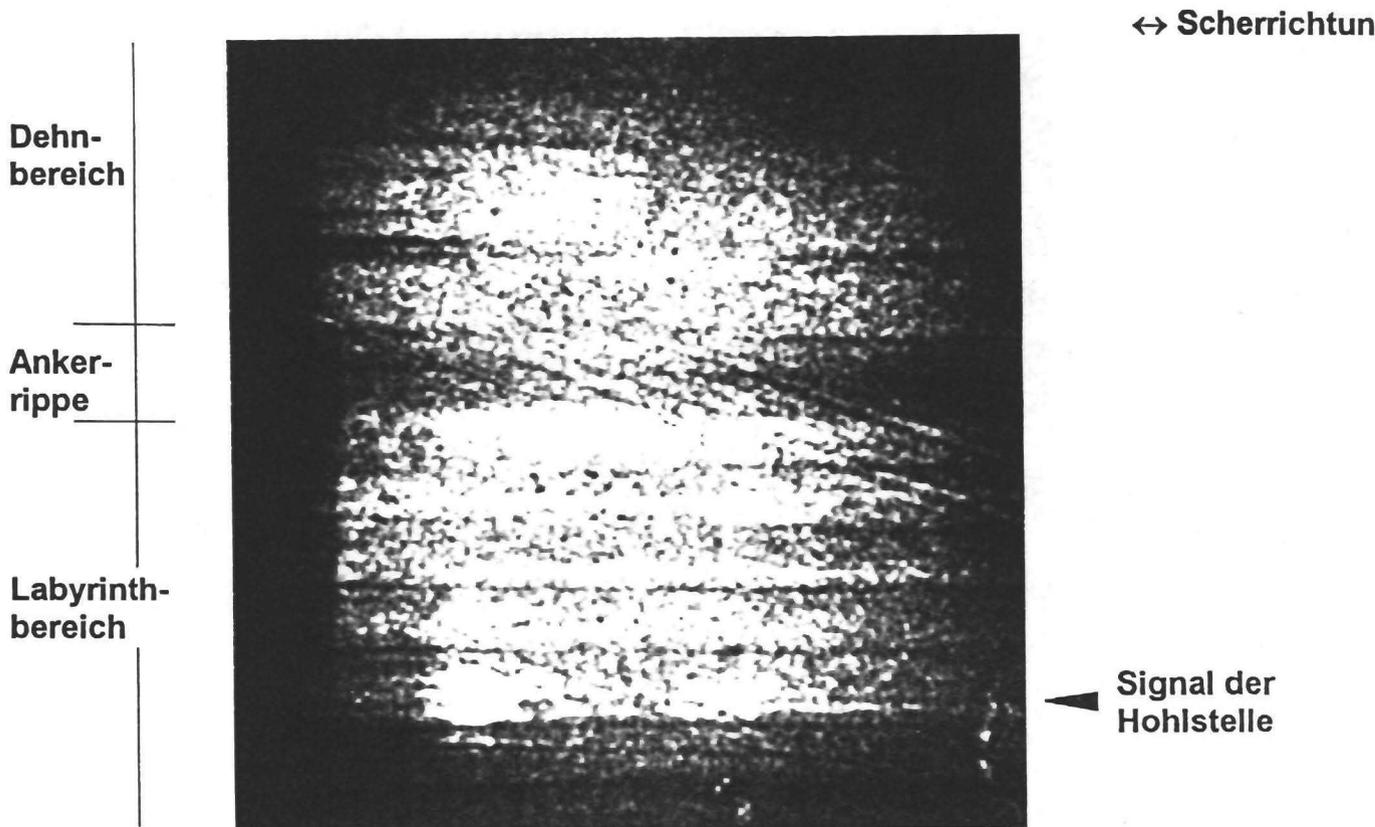


a) Scherrichtung quer zur Fugenbandlängsrichtung

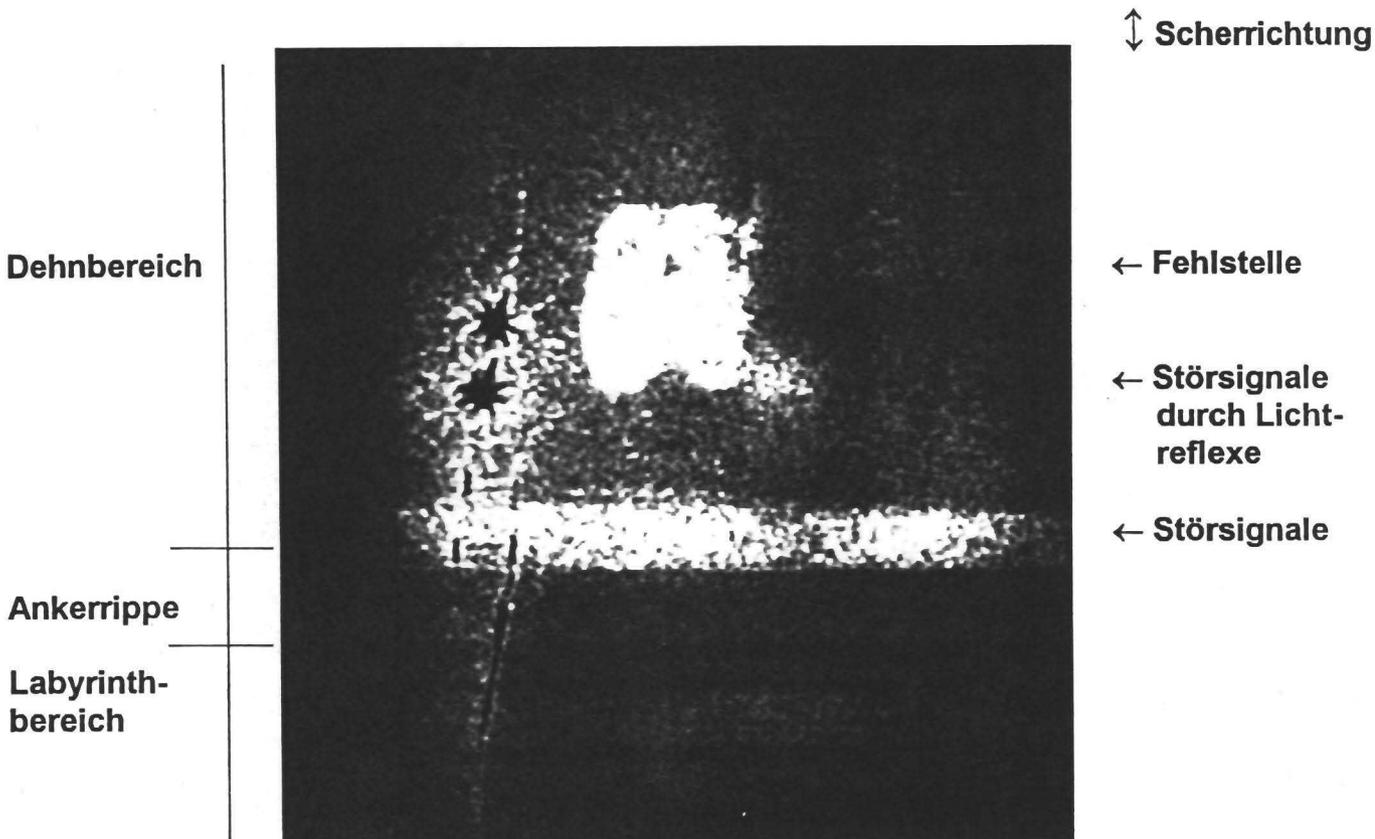


b) Scherrichtung parallel zur Fugenbandlängsrichtung

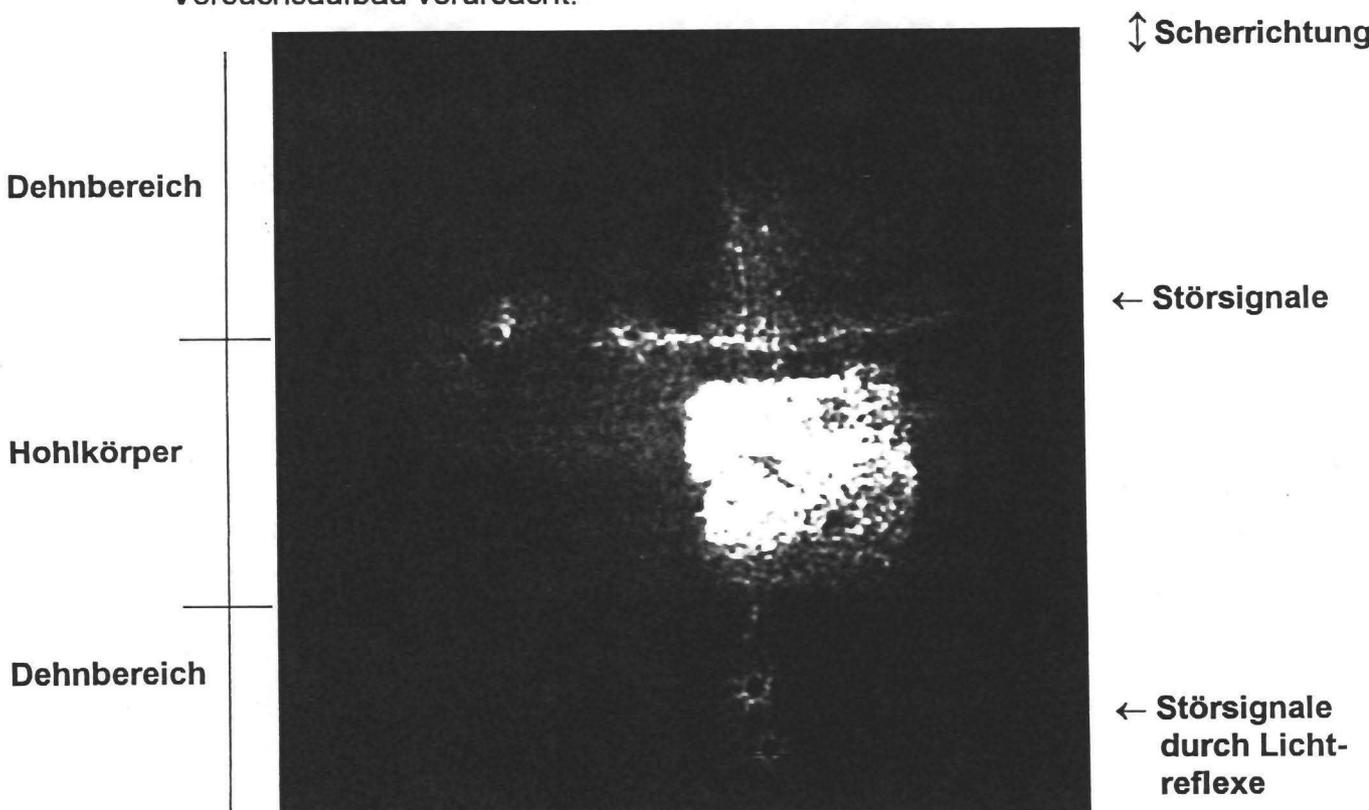
Bild 10: Shearogramme von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 5 (vgl. Tabelle 1a). Die flächige, senkrecht in der Ankerrippe angeordnete Fehlstelle ist durch Störsignale überlagert und damit nicht eindeutig ortbar.



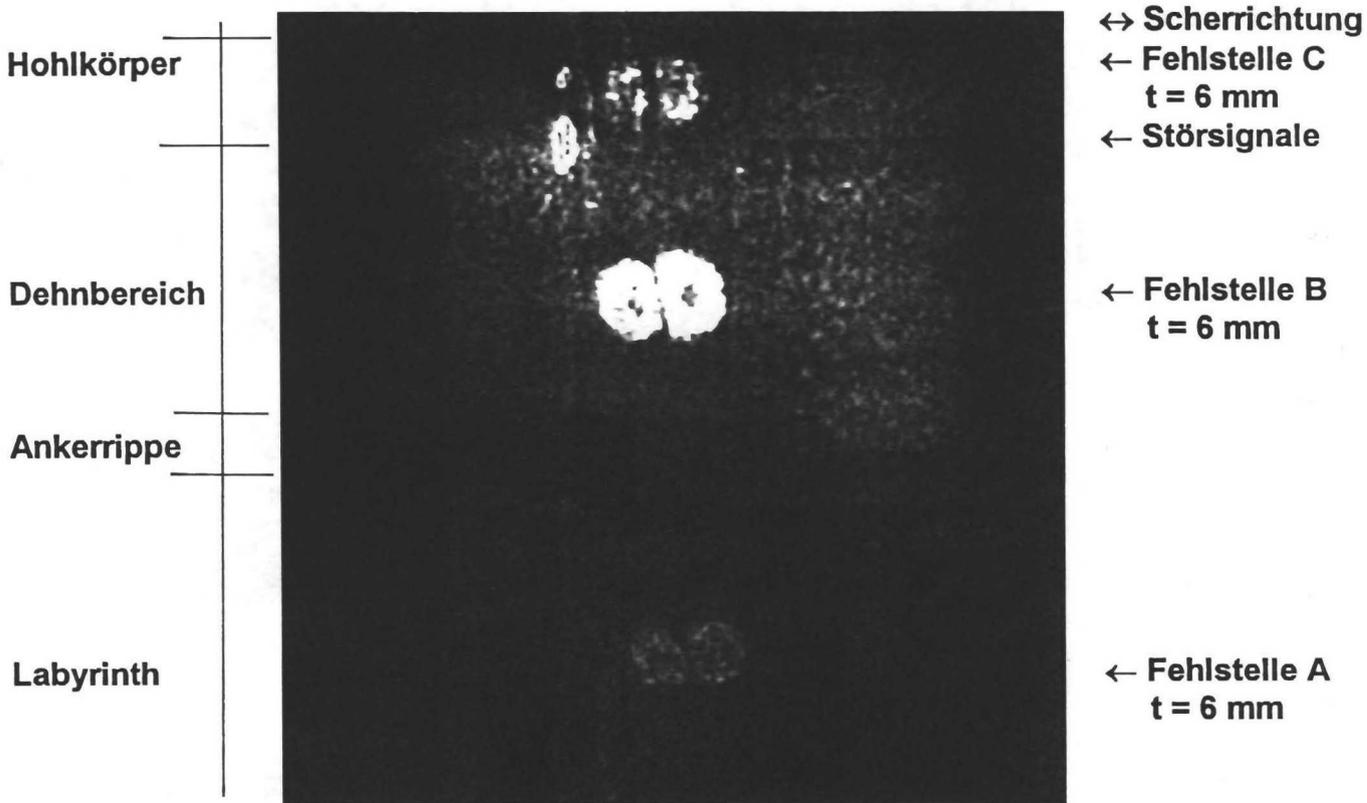
**Bild 11:** Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 7a (vgl. Tabelle 1a) mit Scherrichtung parallel zur Fugenbandlängsrichtung. Die zylinderförmige Fehlstelle im Bereich der Labyrinthrippen ist trotz der Störsignale durch die Ankerrippen und die Labyrinthrippen sichtbar.



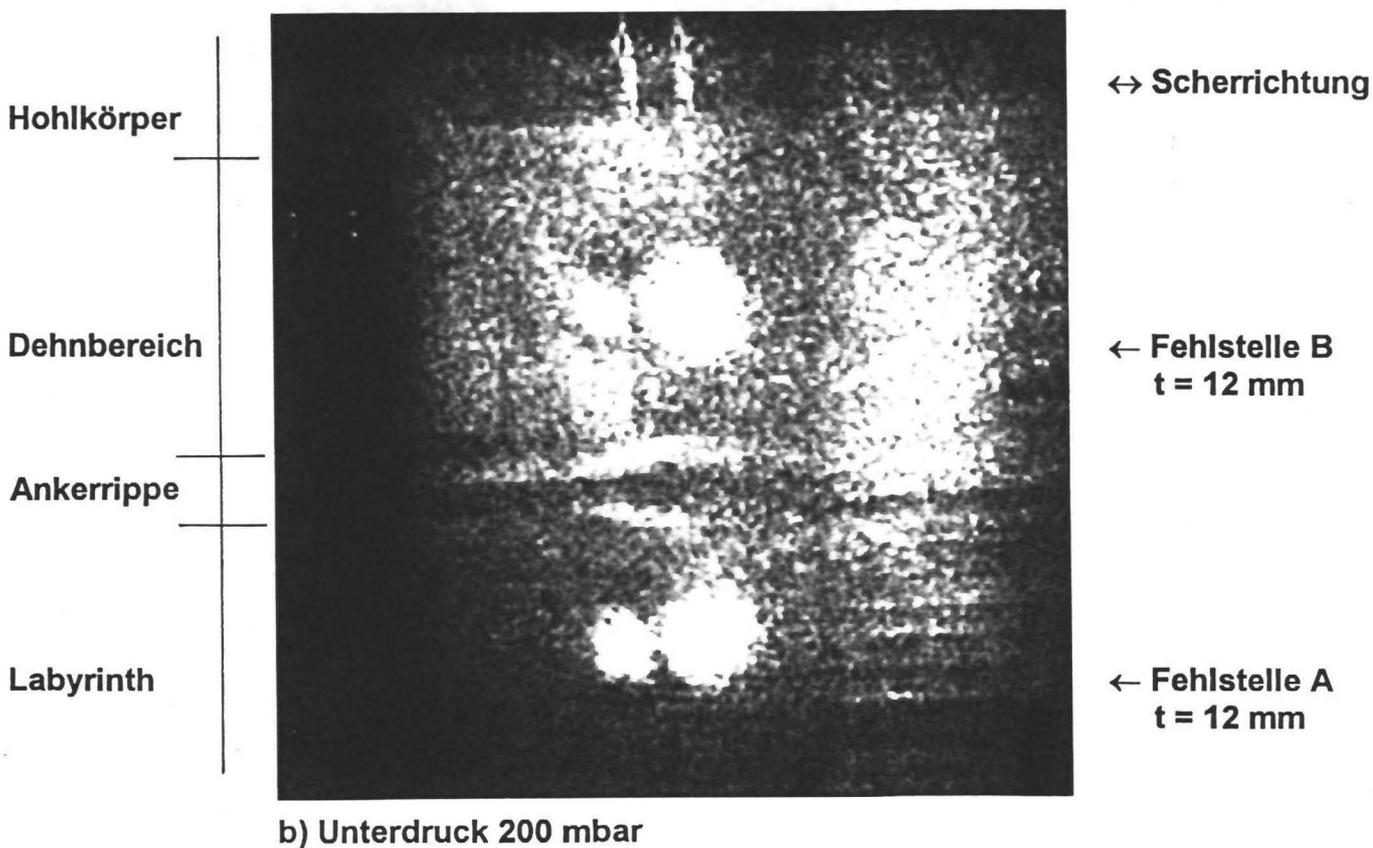
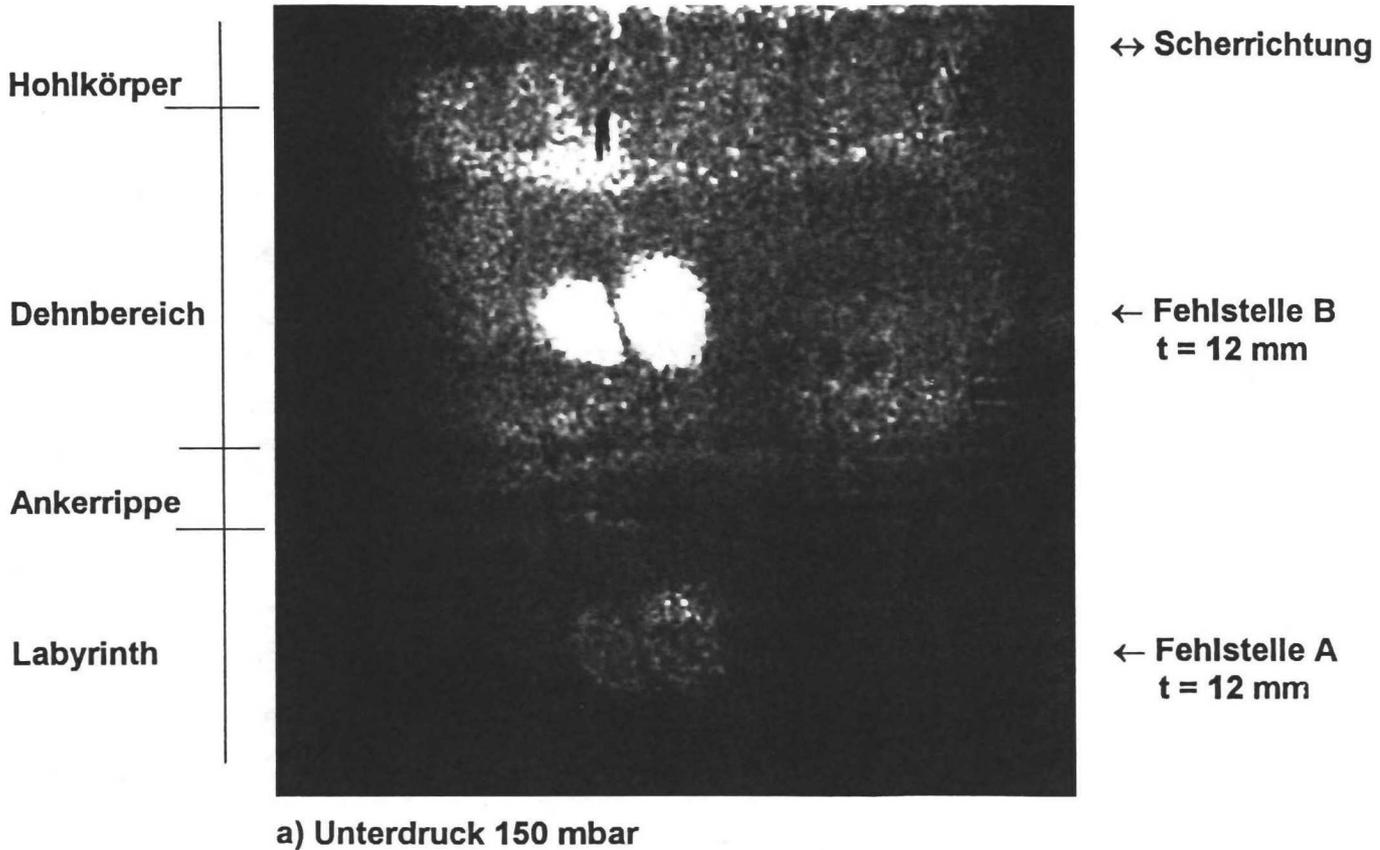
**Bild 12:** Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 8 (vgl. Tabelle 1b)  
Die flächige Fehlstelle unter der Bandage im Dehnbereich ist gut zu erkennen. Störsignale werden durch den Hohlkörper und Lichtreflexe im Versuchsaufbau verursacht.



**Bild 13:** Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 9 (vgl. Tabelle 1b)  
Die flächige Fehlstelle im Schlauchbereich unter der Bandage ist gut sichtbar. Störsignale sind nur schwach vorhanden.



**Bild 14:** Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 12 (vgl. Tabelle 2a). Die Aufnahme erfolgte von oben (Fehlstellenüberdeckung nur eine Bandagenlage). Die Fehlstellen sind sichtbar. Störsignale sind nur wenig vorhanden.



**Bild 15:** Shearogramme von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 13 (vgl. Tabelle 2a) Fugenbandoberseite. Die flächige Fehlstelle im Labyrinthbereich konnte beim Unterdruck von 200 mbar besser geortet werden.

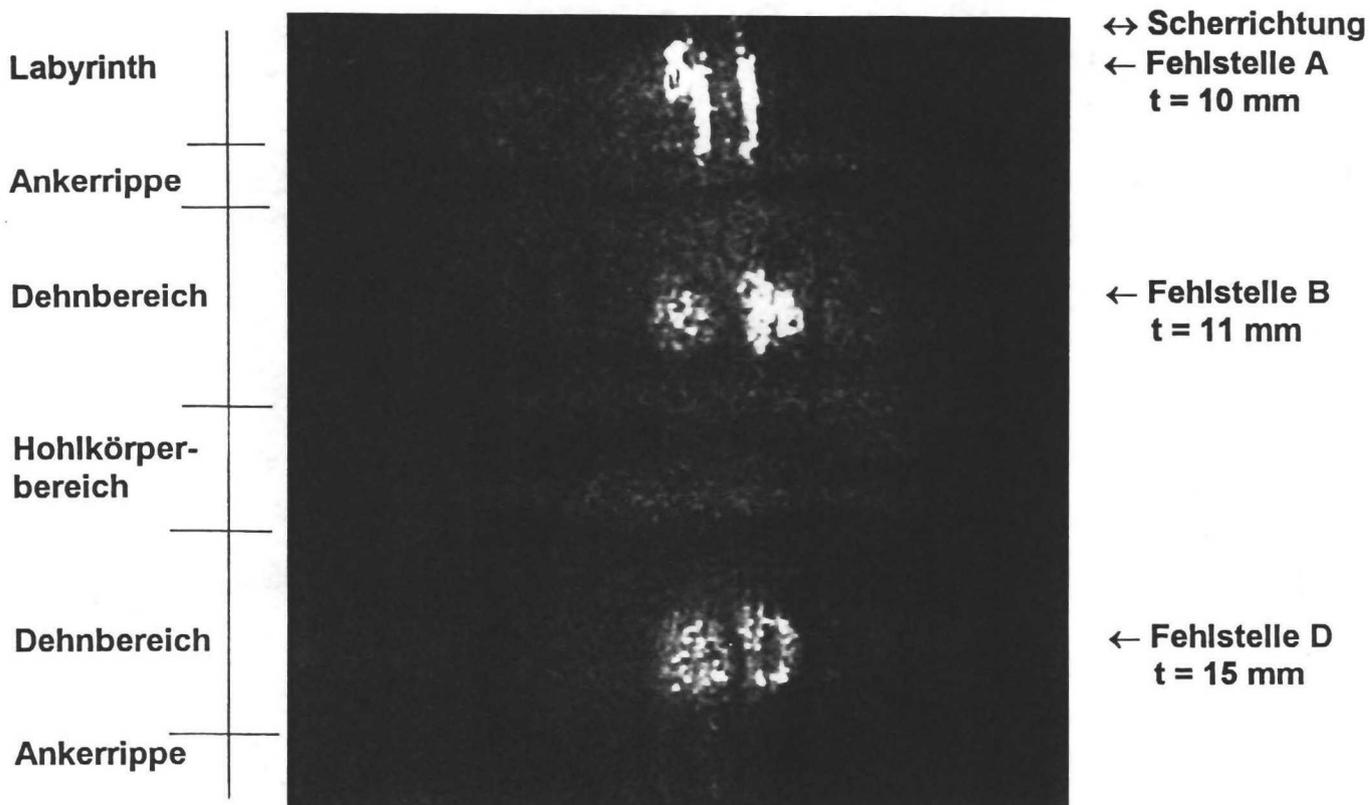
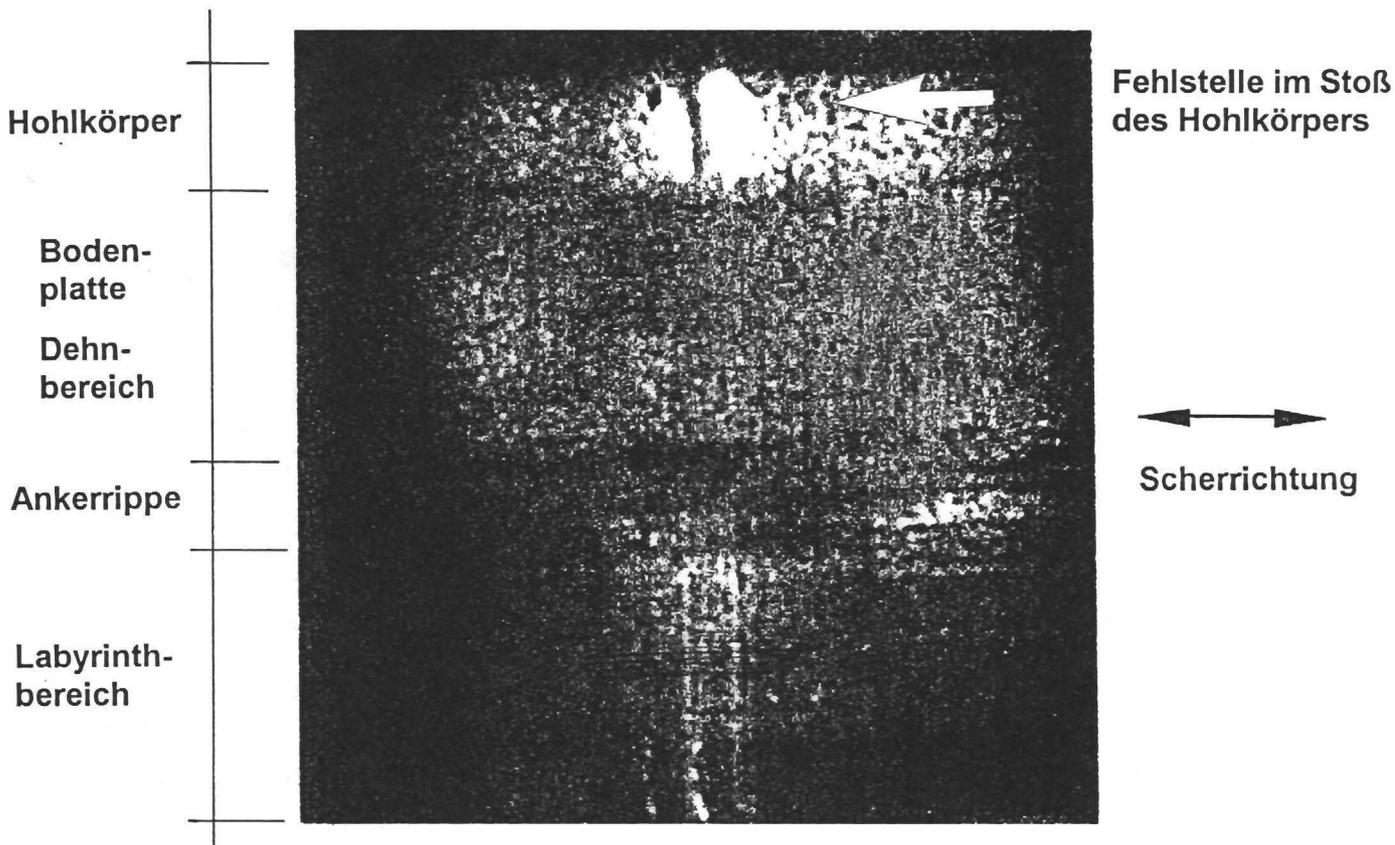
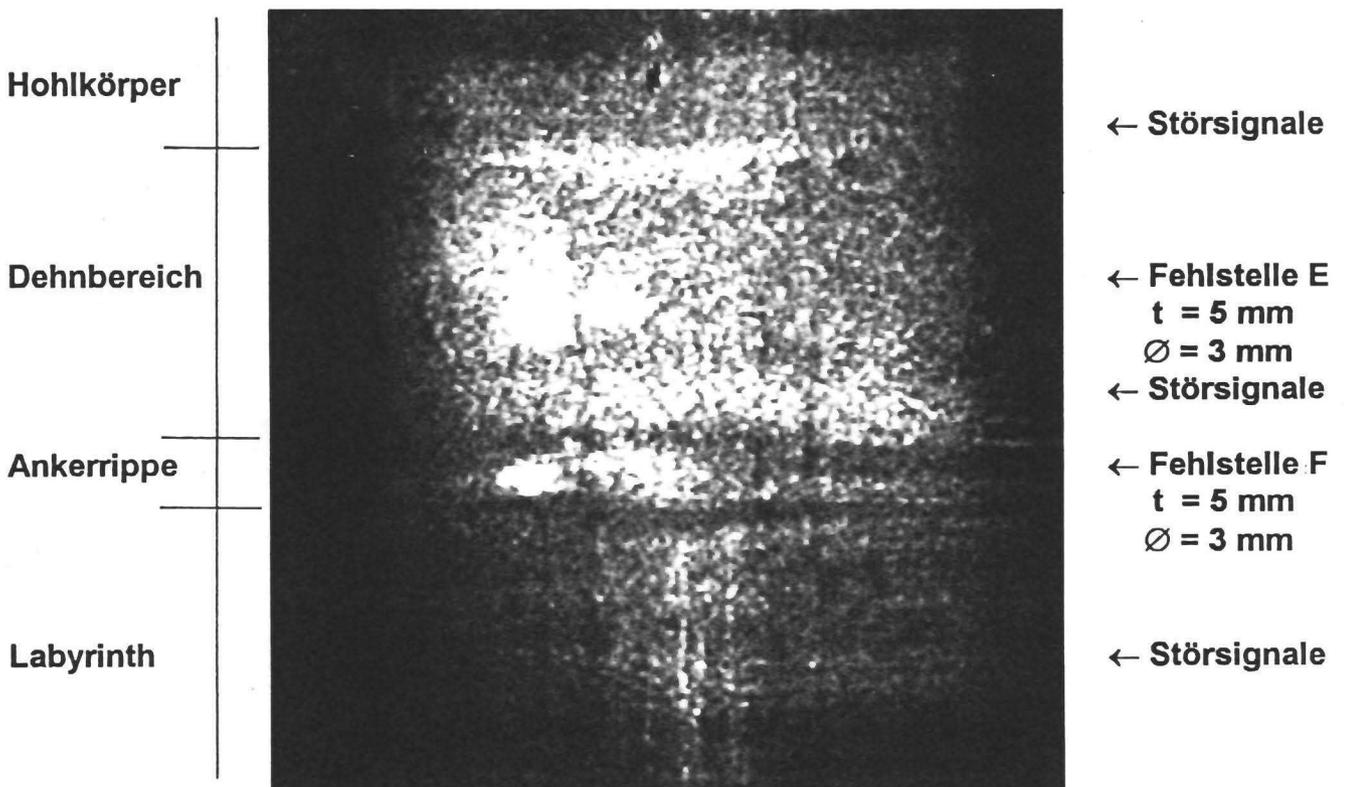


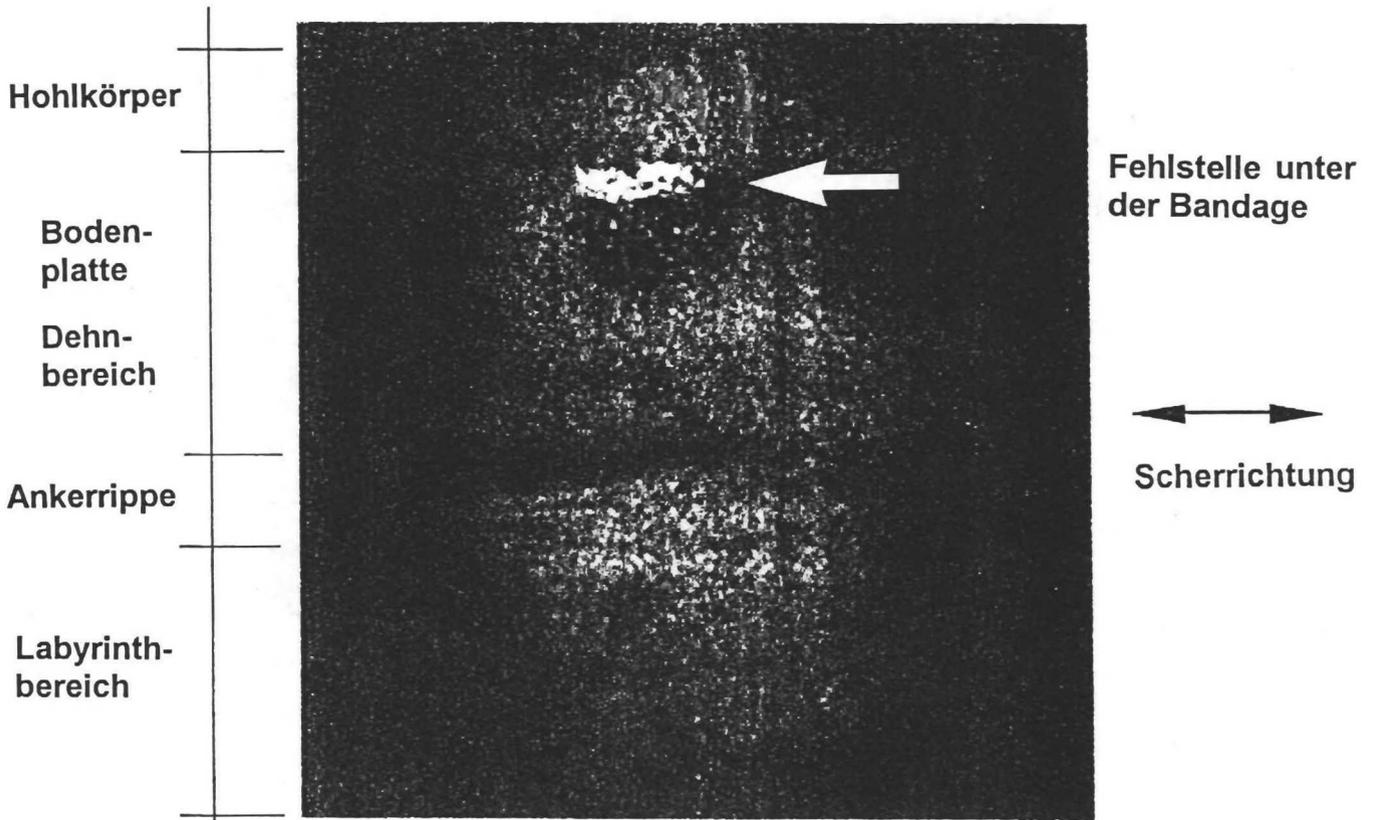
Bild 16: Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 13 (vgl. Tabelle 2a), Fugenbandunterseite, Unterdruck 150 mbar. Die Fehlstelle im Hohlkörperbereich liegt auf der vom Laser abgewandten Fugenbandseite und ist nicht ortbar. Die Fehlstellen im Labyrinth- und Dehnbereich sind gut erkennbar (kaum Störsignale vorhanden).



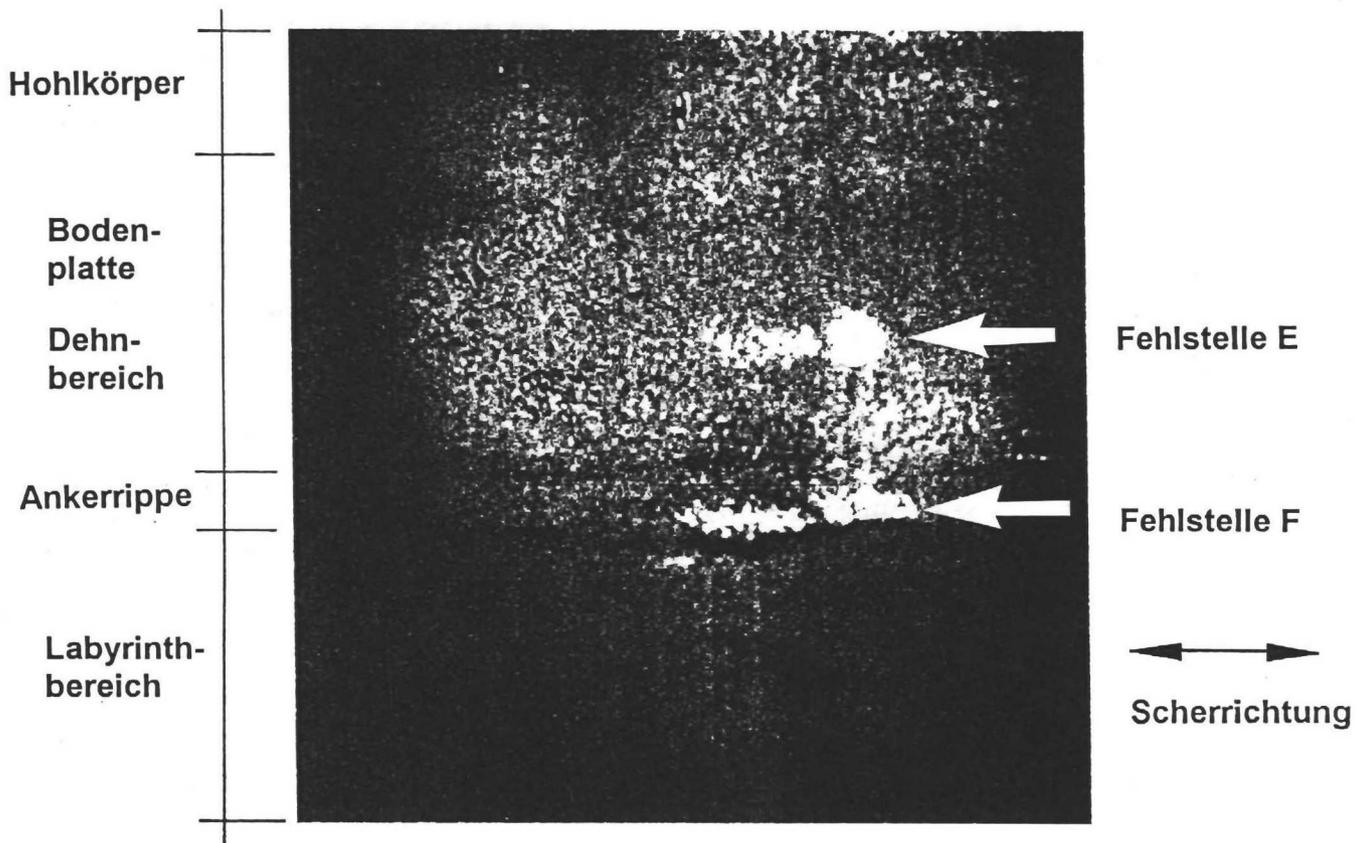
**Bild 17:** Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 14 (Vorderseite, vgl. Tabelle 2a). Im Hohlkörperbereich ist eine nicht geplante, bei der Stoßherstellung entstandene Fehlstelle sichtbar.



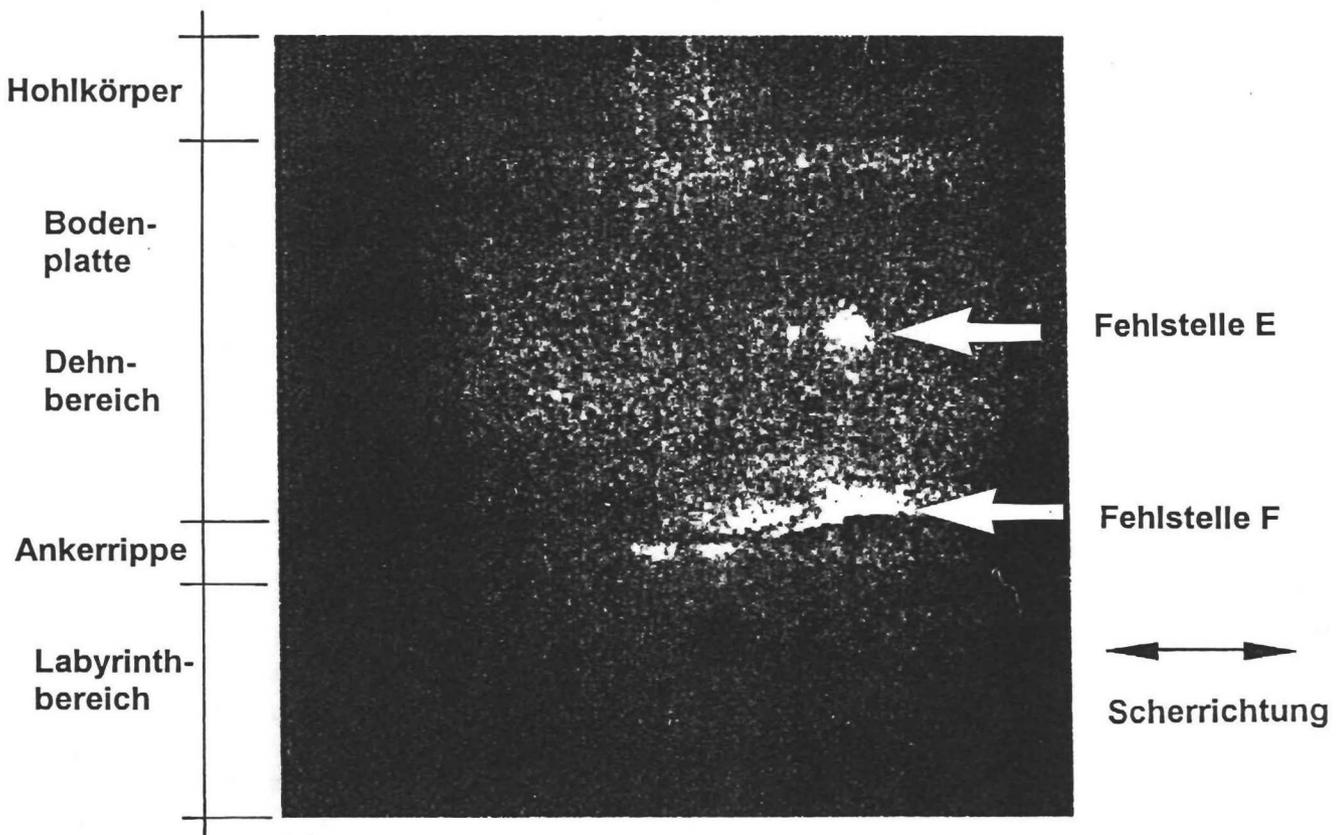
**Bild 18:** Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 15 (vgl. Tabelle 2b). Die Fehlstellen im Dehnbereich und in der Ankerrippe sind im Störsignaluntergrund noch erkennbar.



**Bild 19:** Shearogramm von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 15 (Unterseite, vgl. Tabelle 2b). Unter der Bandage ist eine nicht geplante, bei Stoßherstellung entstandene Fehlstelle sichtbar.

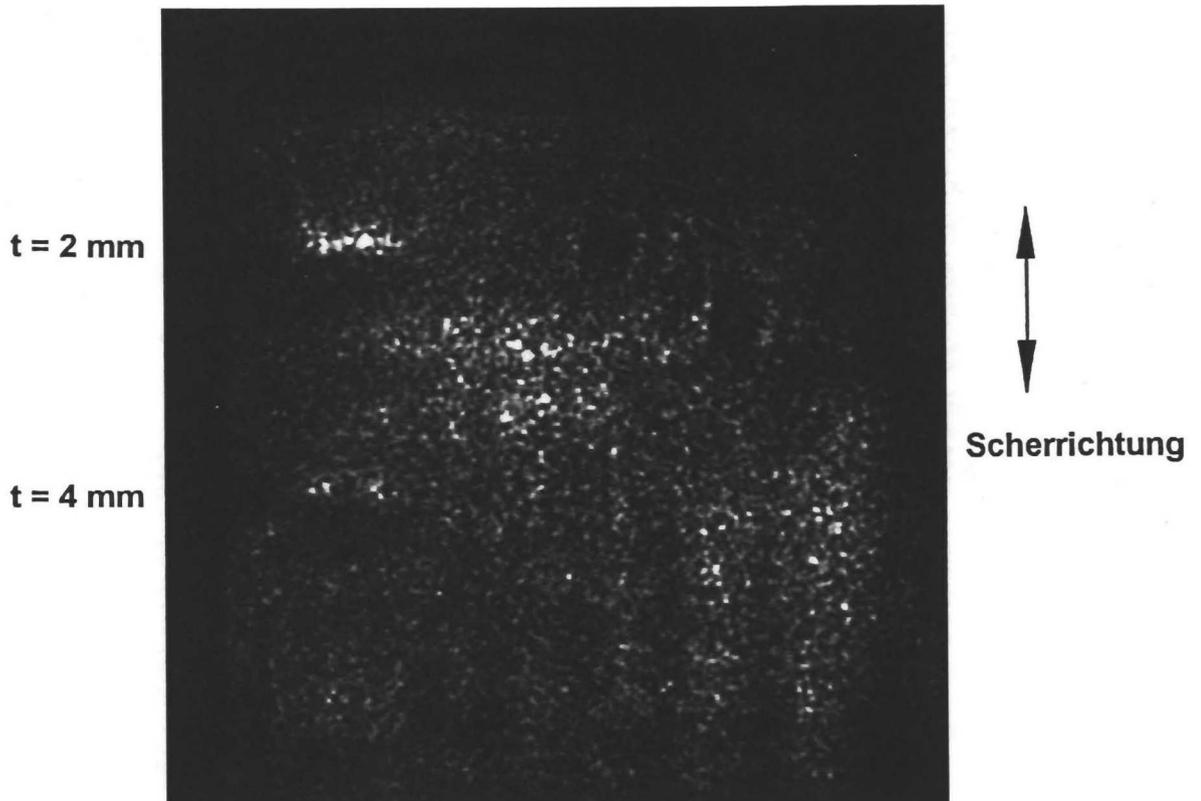


a) Aufnahme beim ca. +20°C

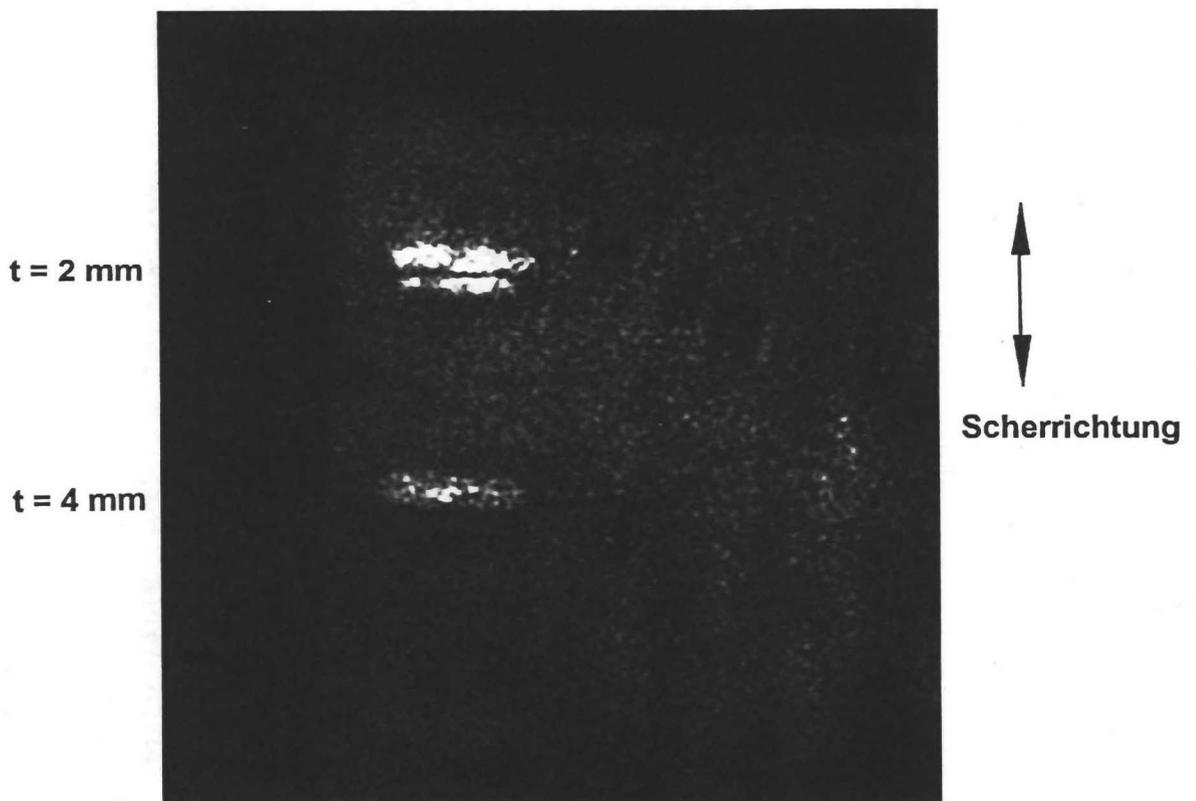


b) Aufnahme bei ca. +5°C

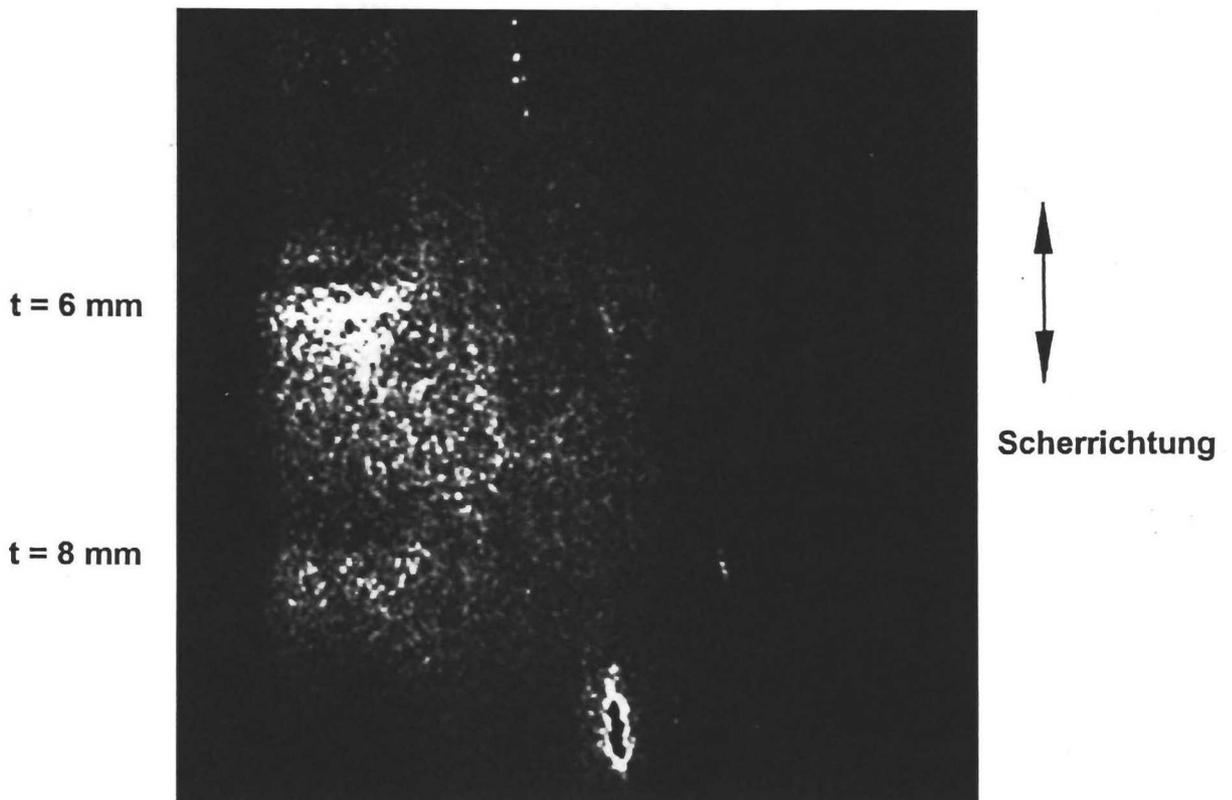
**Bild 20:** Shearogramme von der elastomeren Fugenbandprobe Nr. 16 (vgl. Tabelle 2b), aufgenommen bei +20°C und +5°C. Zylinderförmige Fehlstellen E und F sind sichtbar



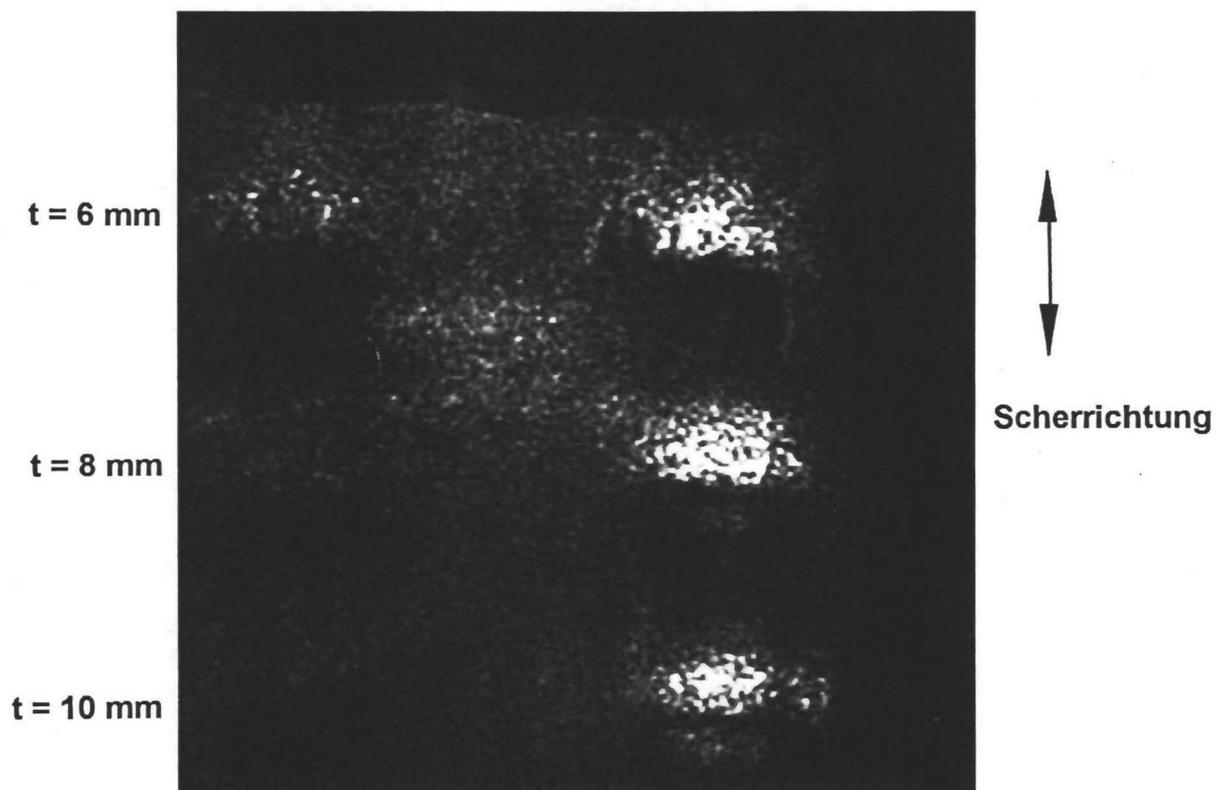
**Bild 21:** Shearogramm vom Elastomerquader mit Fehlstellen von 1 mm Durchmesser, Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung  $t = 2 \text{ mm}$  sind ortbar



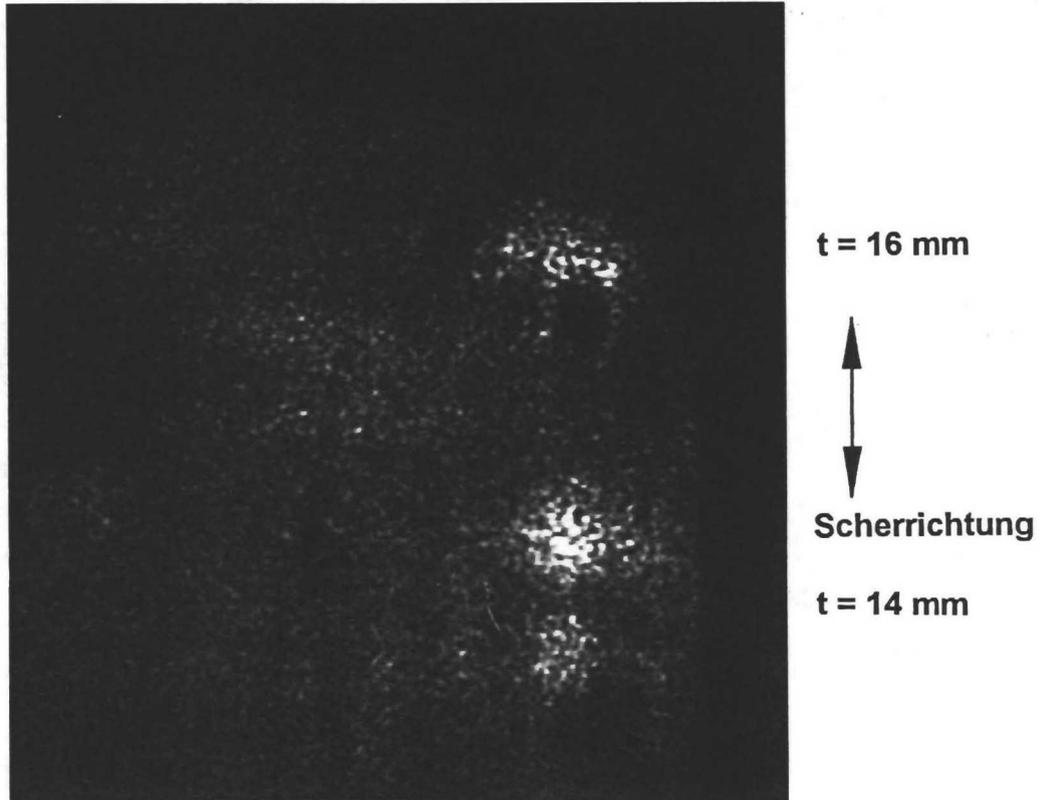
**Bild 22:** Shearogramm vom Elastomerquader mit Fehlstellen von 2 mm Durchmesser, Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung  $t = 4 \text{ mm}$  sind ortbar



**Bild 23:** Shearogramm vom Elastomerquader mit Fehlstellen von 3 mm Durchmesser  
Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung  $t = 6$  mm ortbar



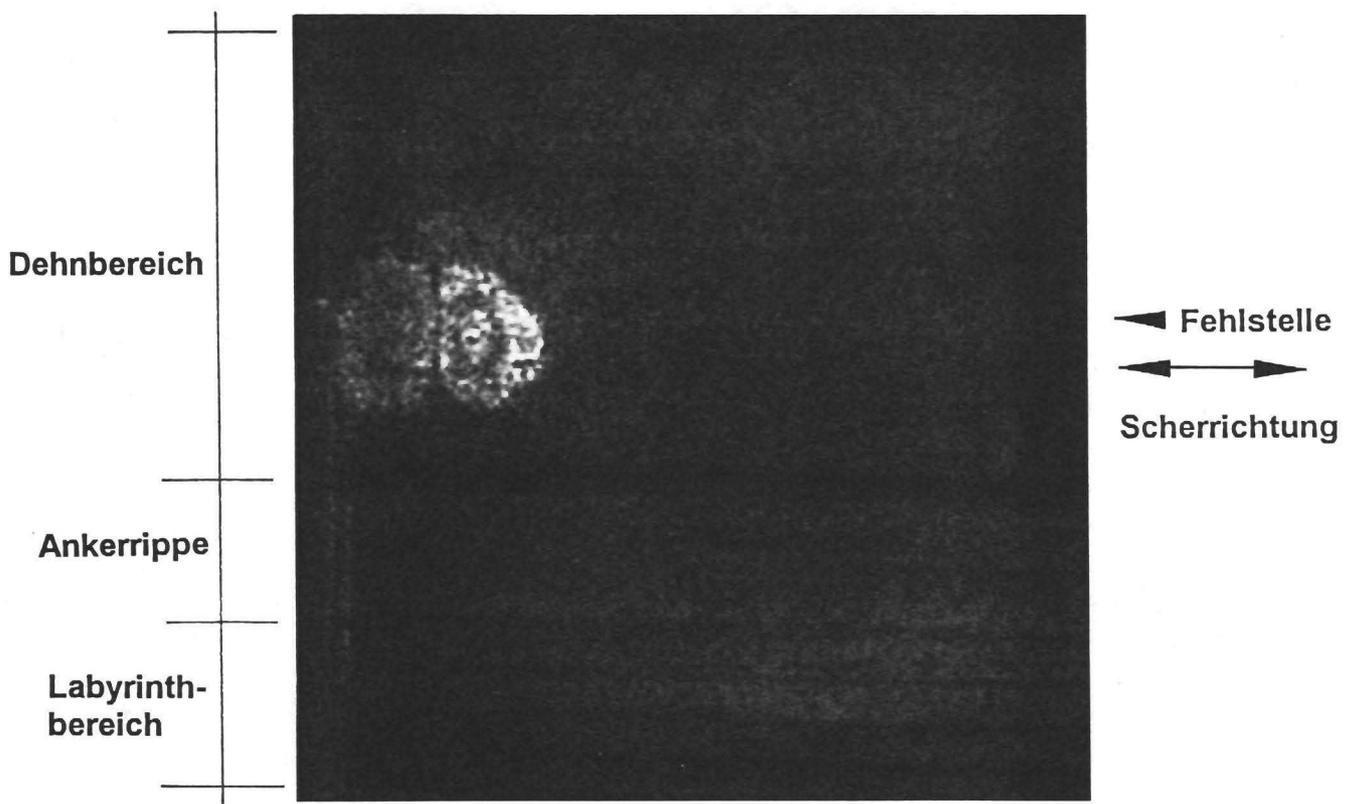
**Bild 24:** Shearogramm vom Elastomerquader mit Fehlstellen von 5 mm Durchmesser  
Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung  $t = 10$  mm ortbar



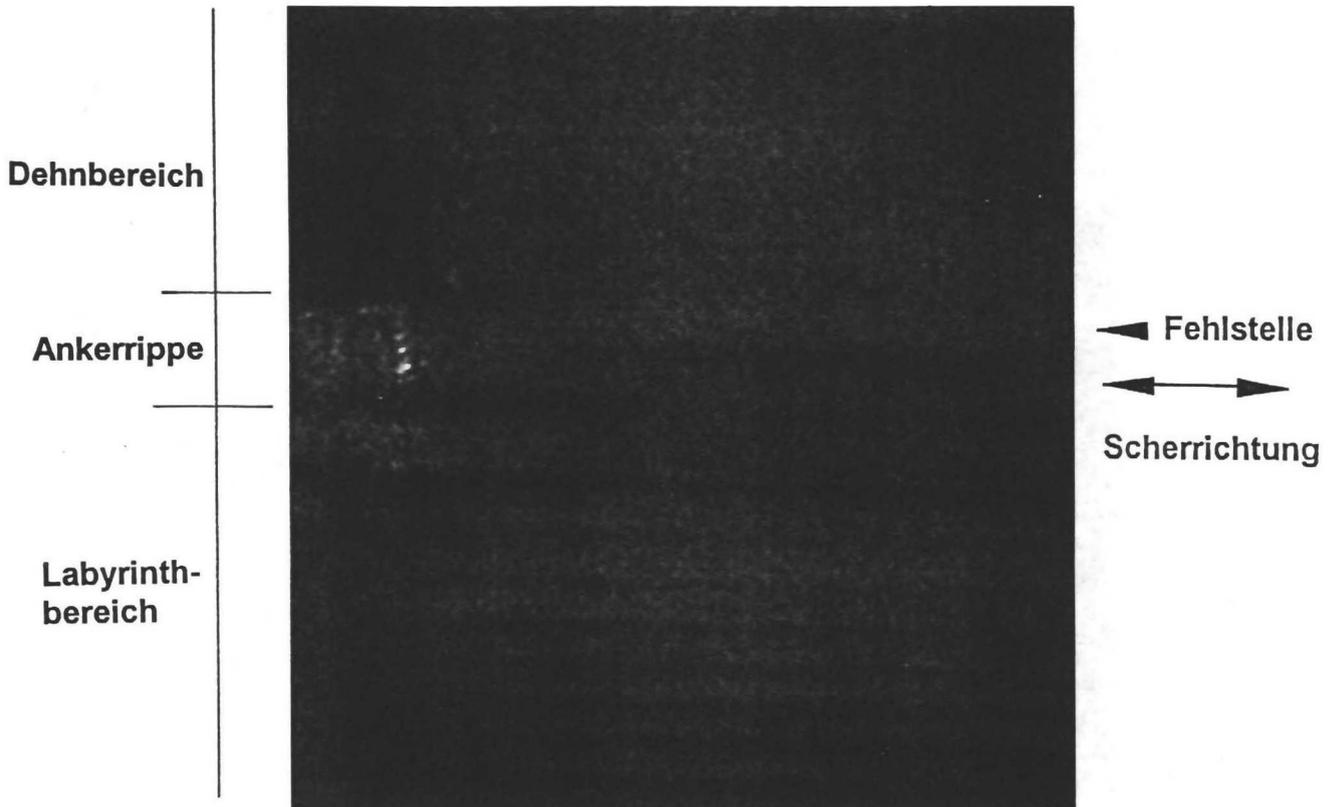
**Bild 25:** Shearogramm vom Elastomerquader mit Fehlstellen von 7 mm Durchmesser  
Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung  $t = 16$  mm ortbar



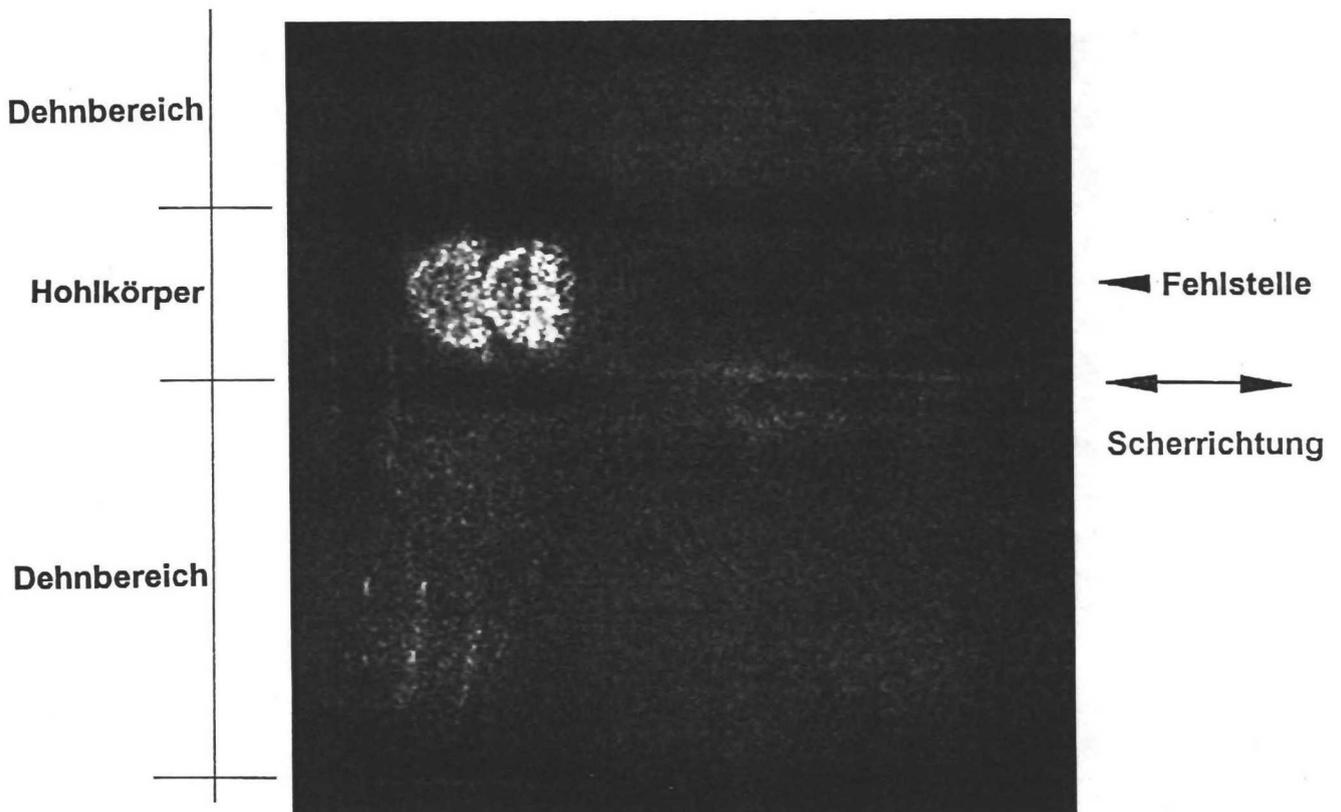
**Bild 26:** Shearogramm von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 17 (vgl. Tabelle 5)  
Flächige Fehlstelle im Labyrinthbereich ist sichtbar



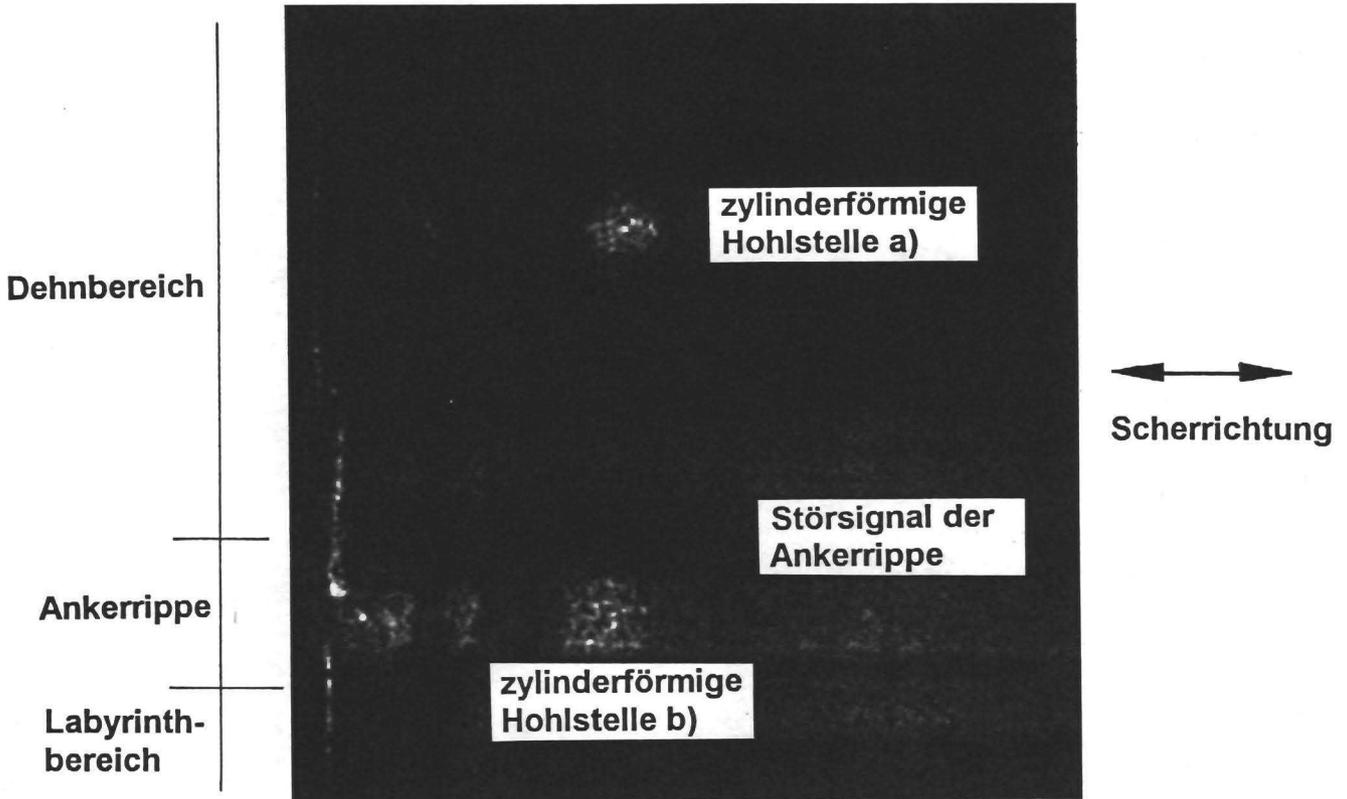
**Bild 27:** Shearogramm von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 18 (vgl. Tabelle 5)  
Flächige Fehlstelle im Dehnbereich ist sichtbar



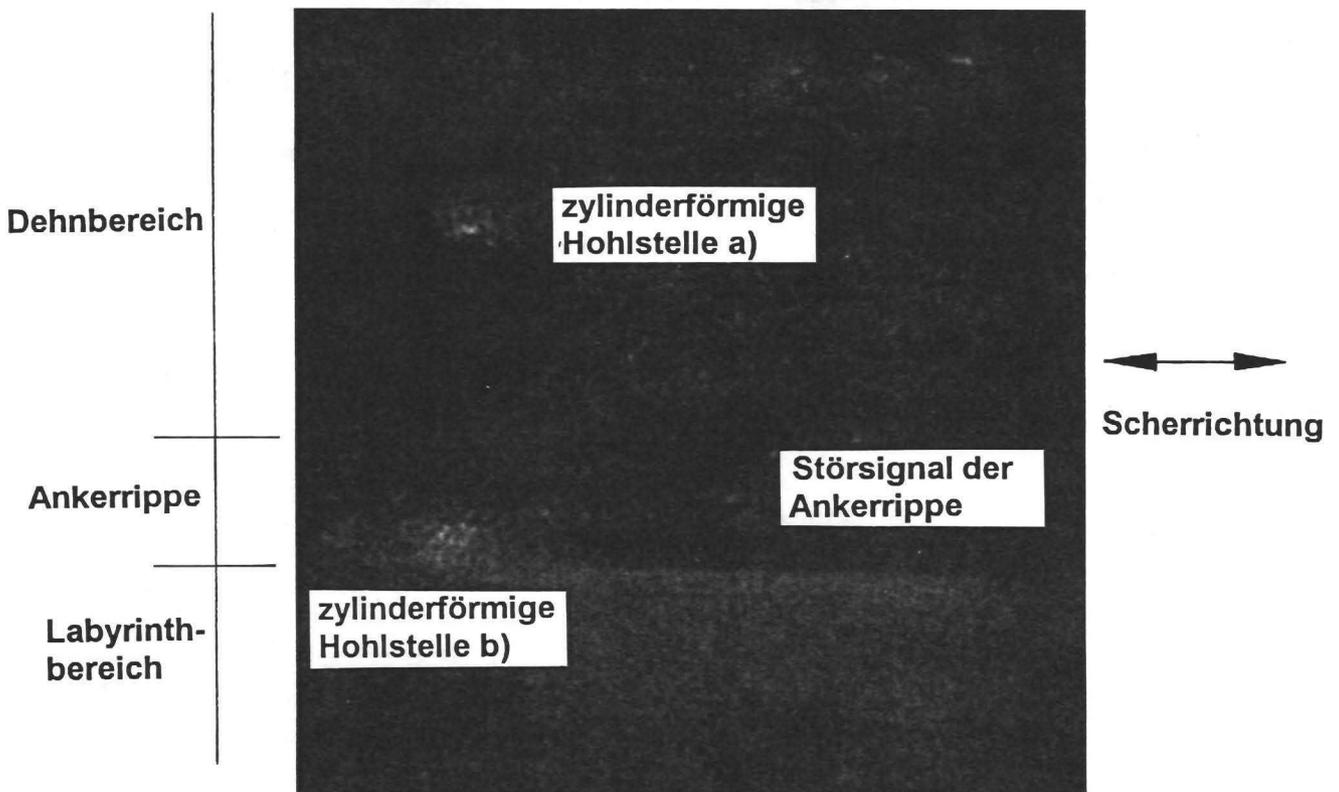
**Bild 28:** Shearogramm von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 19 (vgl. Tabelle 5)  
Flächige Hohlstelle im Bereich der Ankerrippe ist schwach erkennbar



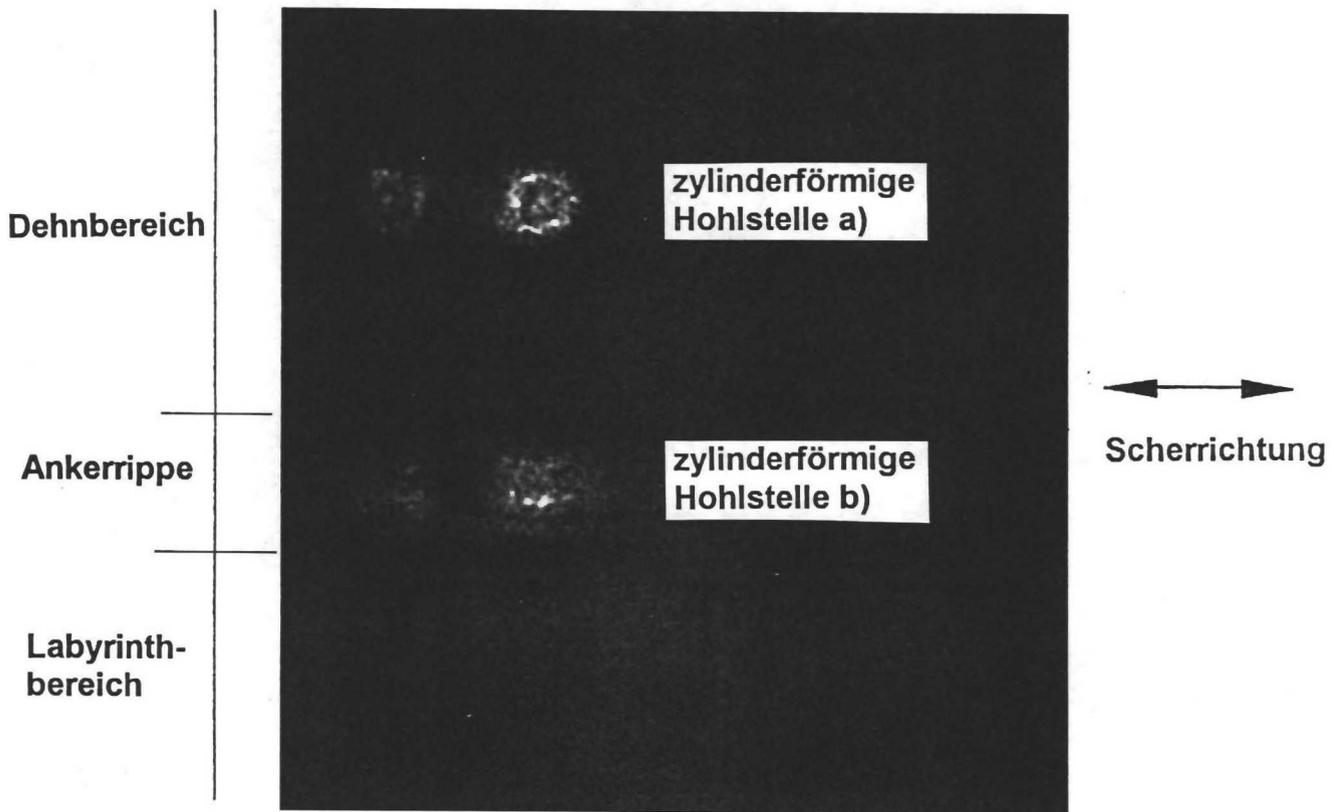
**Bild 29:** Shearogramm von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 20 (vgl. Tabelle 5)  
Flächige Hohlstelle im Schlauchbereich ist sichtbar



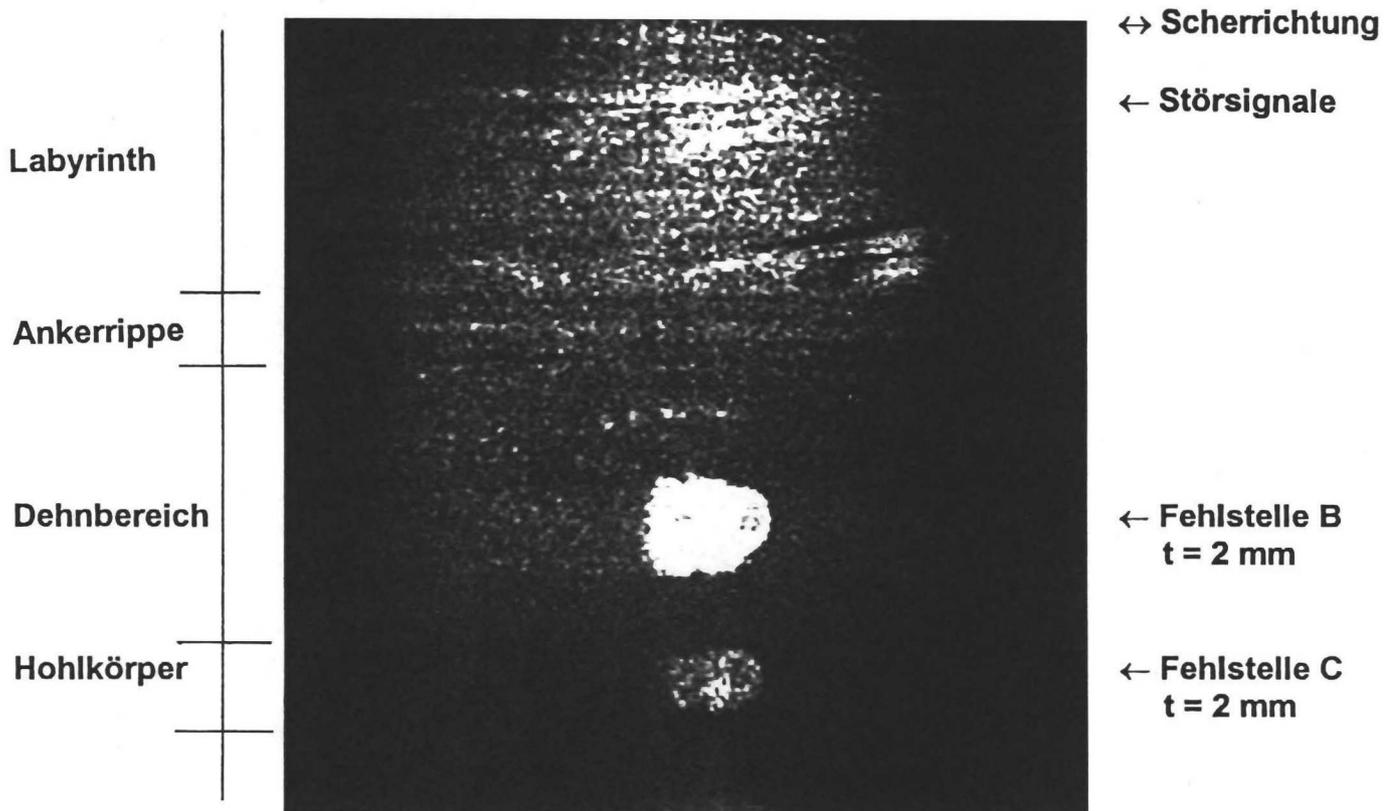
**Bild 30:** Shearogramm von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 22 (vgl. Tabelle 5) bei einer Proben­temperatur von 23°C  
Es sind nur die Fehlstellen im Dehnbereich (a) und in der Ankerrippe (b) sichtbar



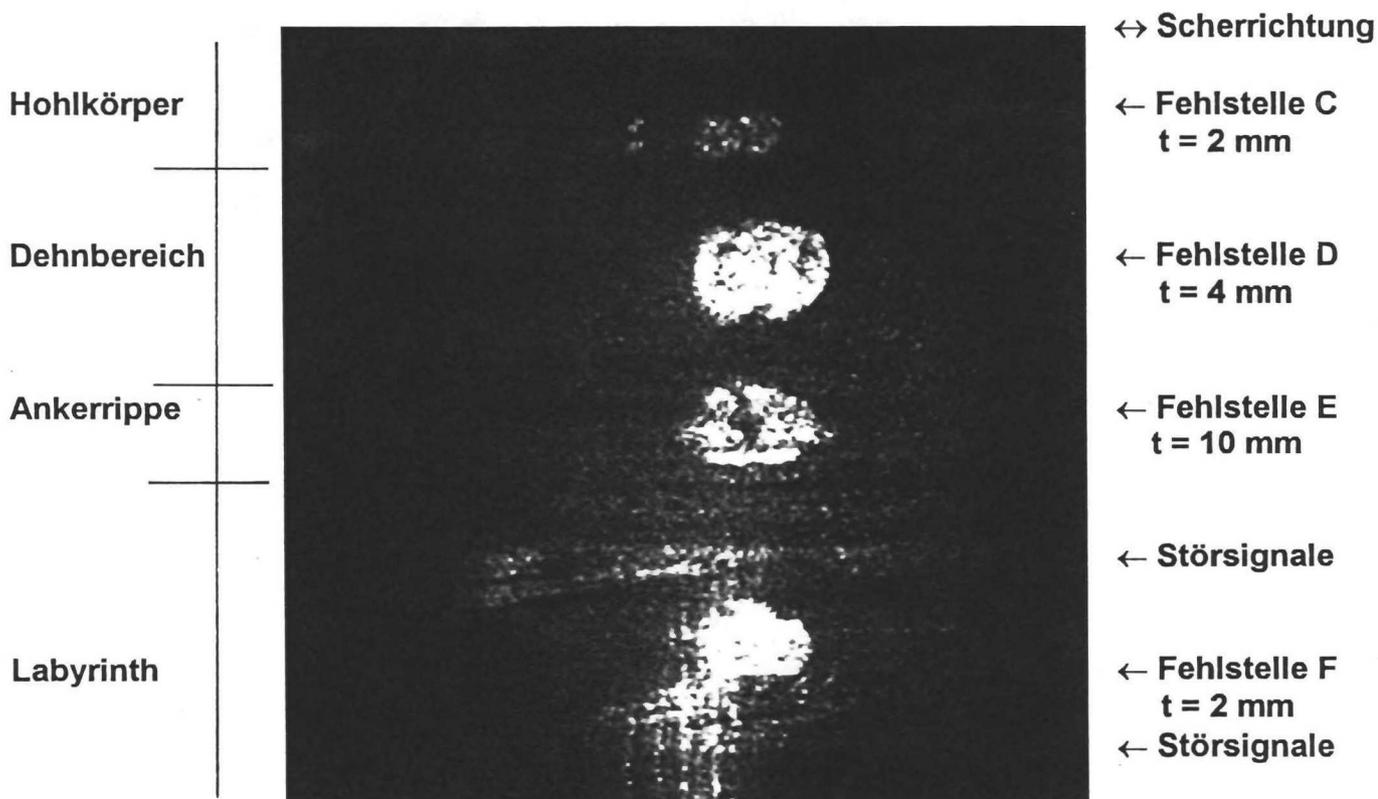
**Bild 31:** Shearogramm von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 22 (vgl. Tabelle 5) bei einer Proben­temperatur von 17°C  
Nur die Fehlstellen im Dehnbereich (a) und in der Ankerrippe (b) treten schwach in Erscheinung



**Bild 32:** Shearogramm von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 23 (vgl. Tabelle 5)  
Nur die Fehlstellen im Dehnbereich (a) und in der Ankerrippe (b) sind deutlich sichtbar



a) Fugenband-Ausschnitt Nr. 1

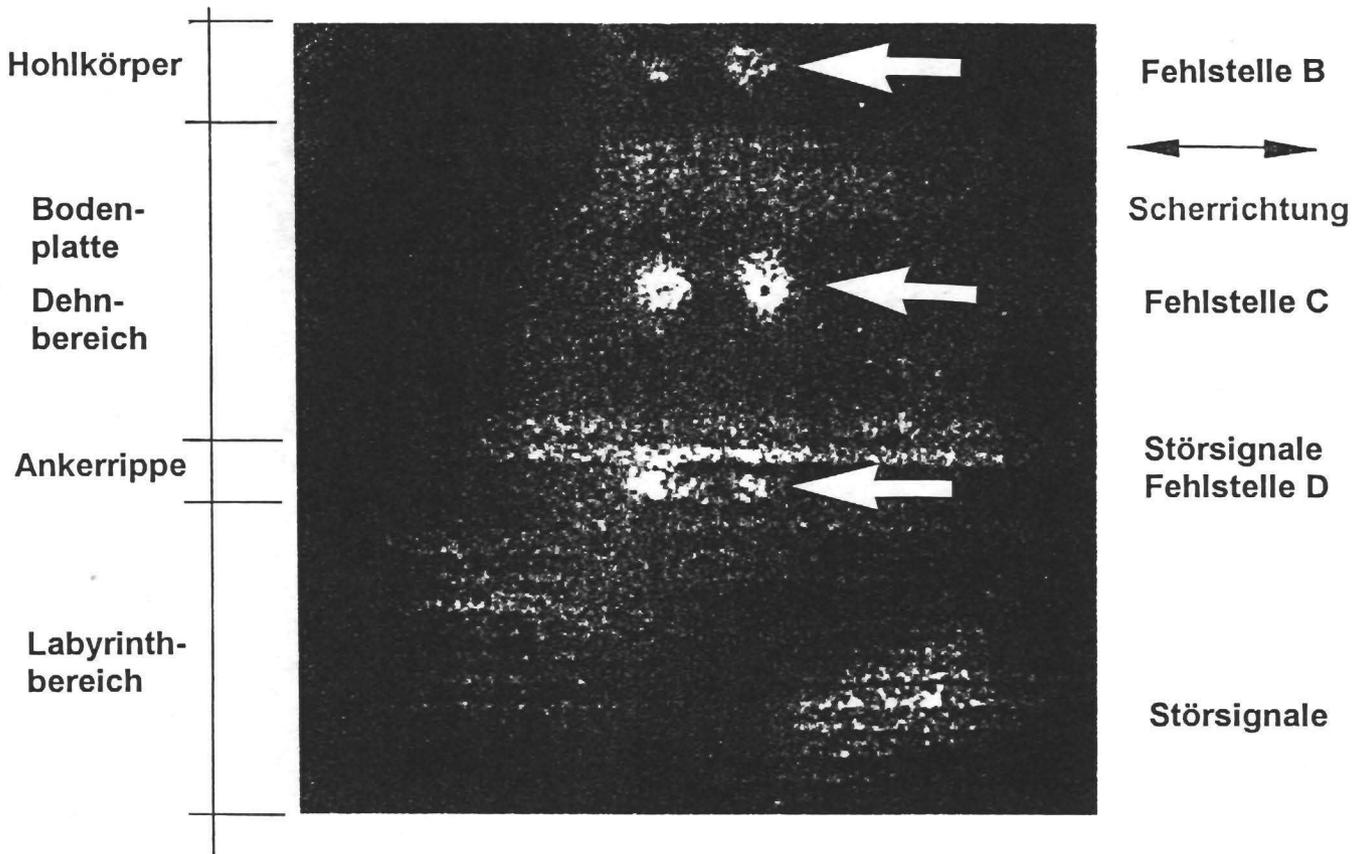


b) Fugenband-Ausschnitt Nr. 2

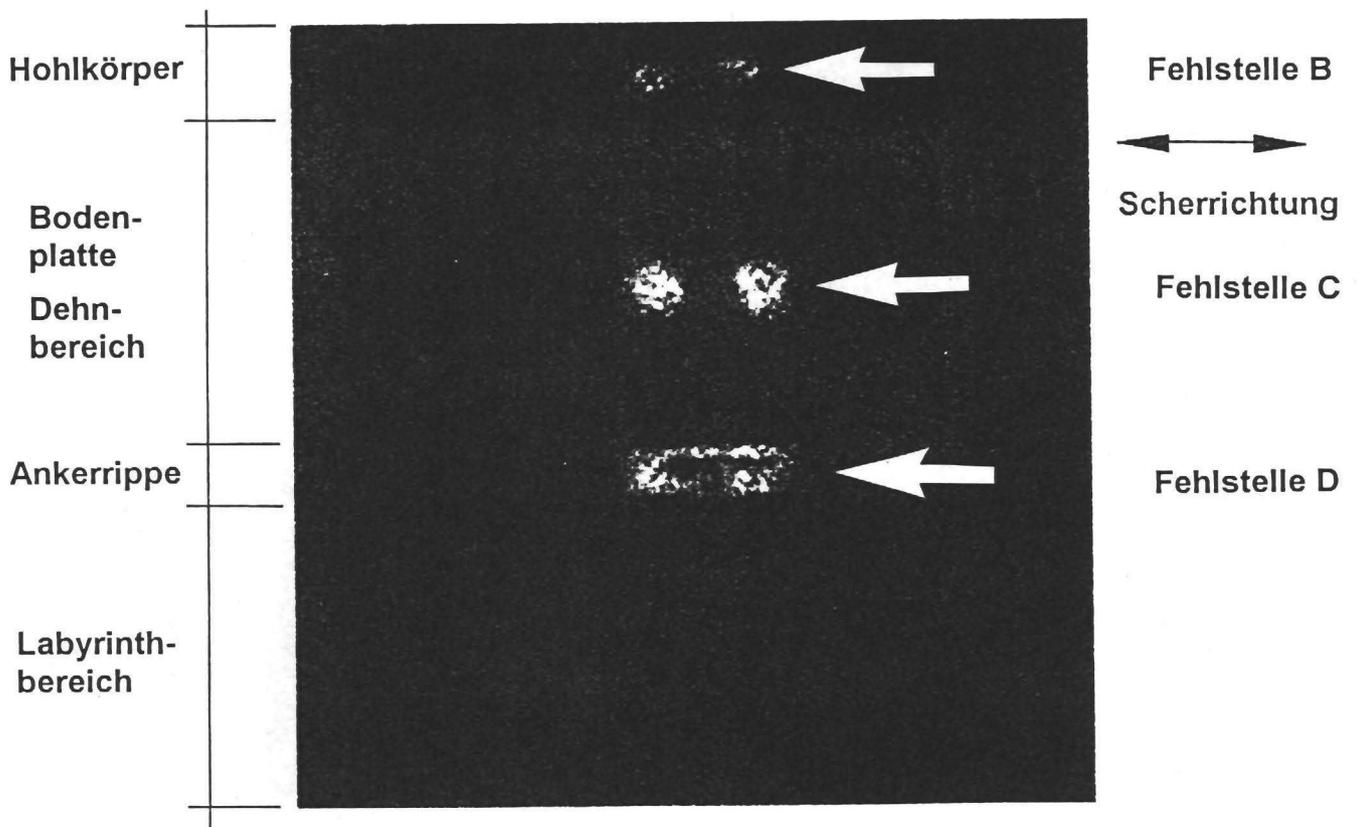
**Bild 33:** Shearogramme von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 24 (vgl. Tabelle 6), Fugenbandoberseite. Die flächigen Fehlstellen parallel zur Fugenbandebene sind sichtbar, nicht jedoch die senkrecht in der Ankerrippe angeordnete Fehlstelle A. Störsignale treten in den Labyrinthbereichen im Vergleich zu z.B. den Dehnbereichen stärker hervor.



**Bild 34:** Shearogramm von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 24 (vgl. Tabelle 6), Fugenbandunterseite. Im Vergleich zu Bild 33b ist die Fehlstelle im Hohlkörper bei dieser vom Laser abgewandten Lage nicht mehr erkennbar. Durch Störsignale treten die Fehlstellen im Vergleich zu Bild 33b nicht ganz so scharf umgrenzt hervor.

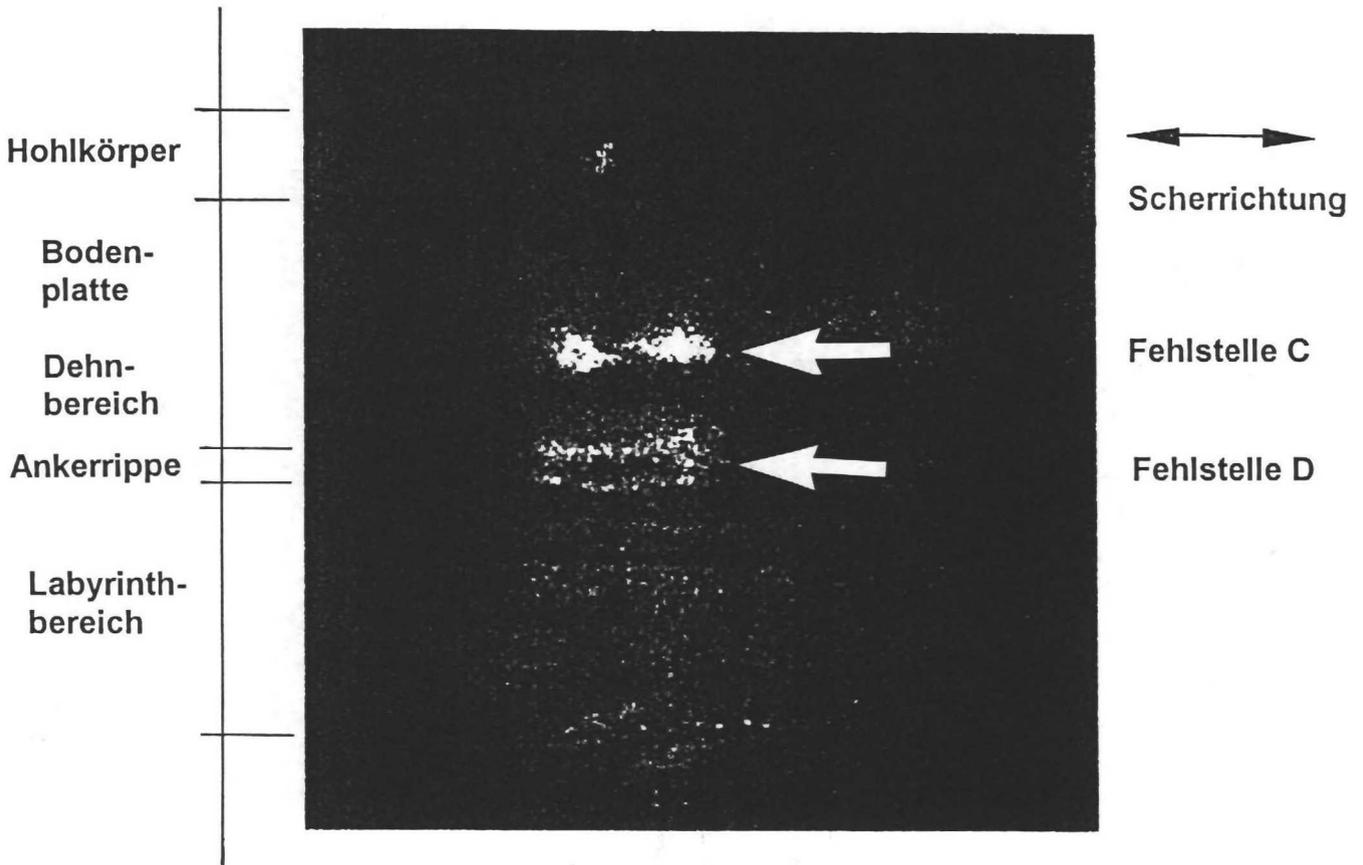


a) Probe fest eingespannt

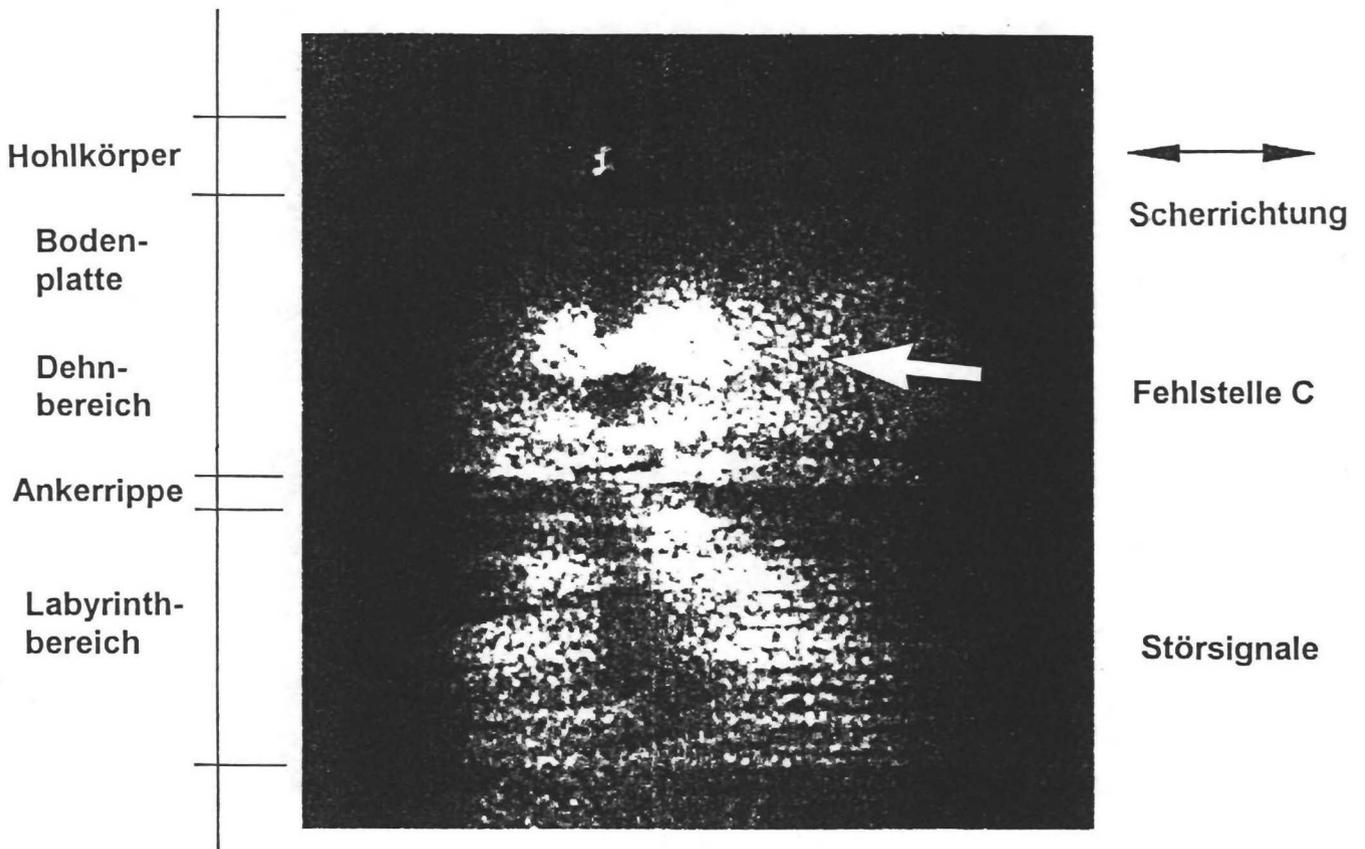


b) Probe leicht eingespannt

**Bild 35:** Shearogramme von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 25 (vgl. Tabelle 6), bei unterschiedlicher Einspannung. Störsignale an der Ankerrippe und im Labyrinthbereich treten bei fester Einspannung auf.

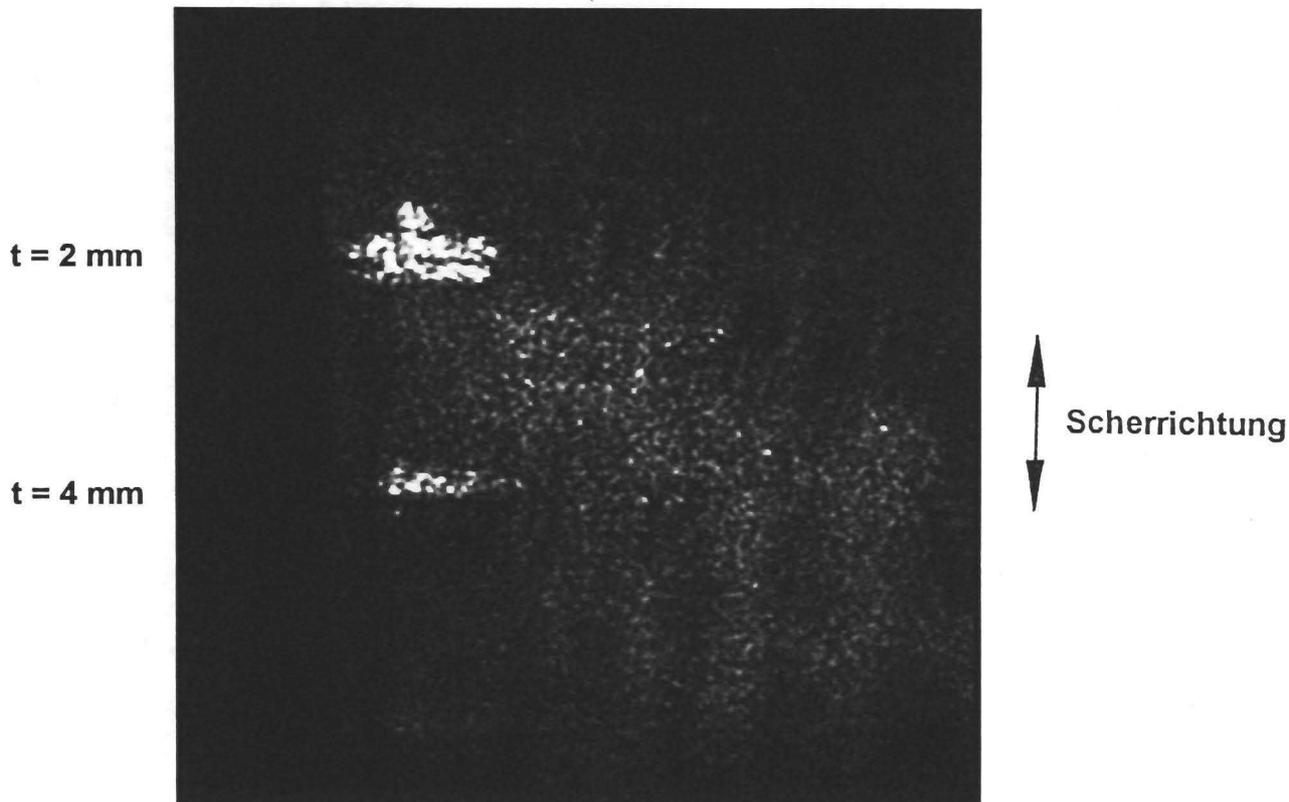


a) Unterdruck ca. 50 mbar

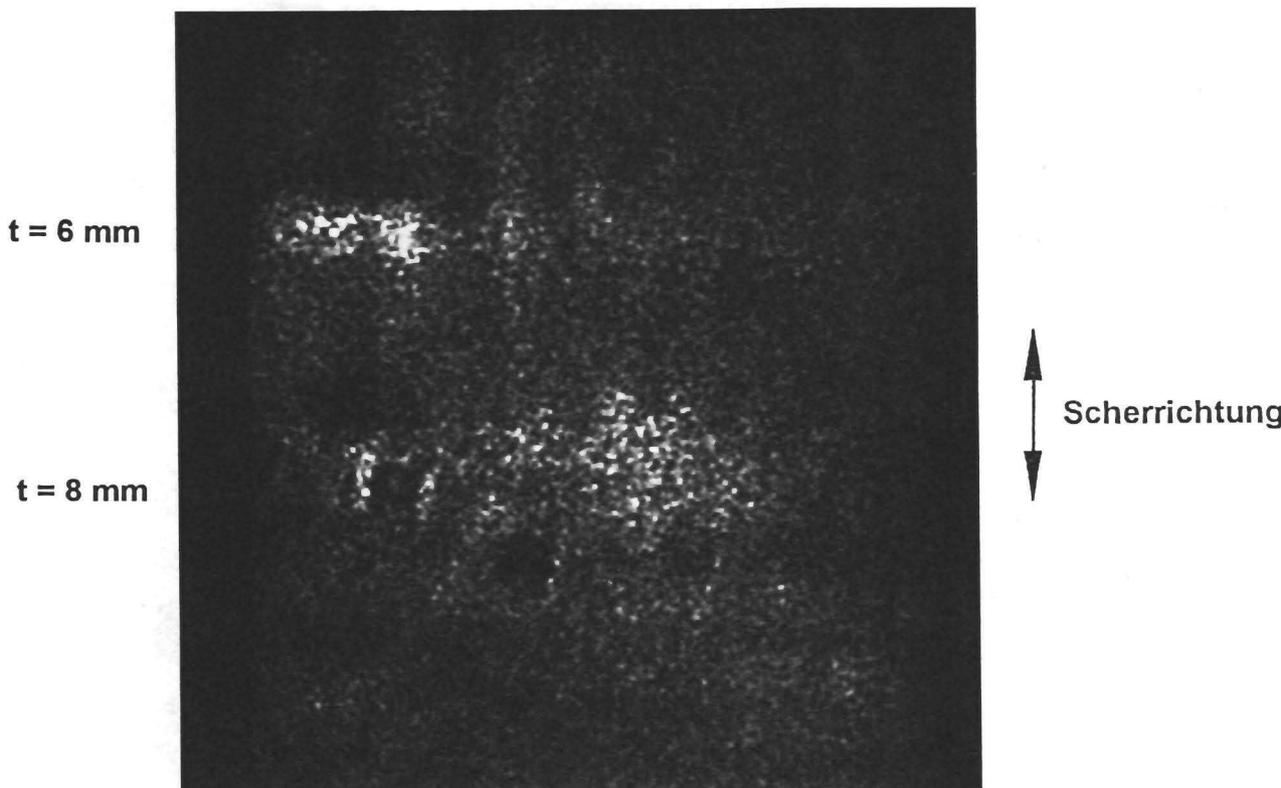


b) Unterdruck ca. 200 mbar

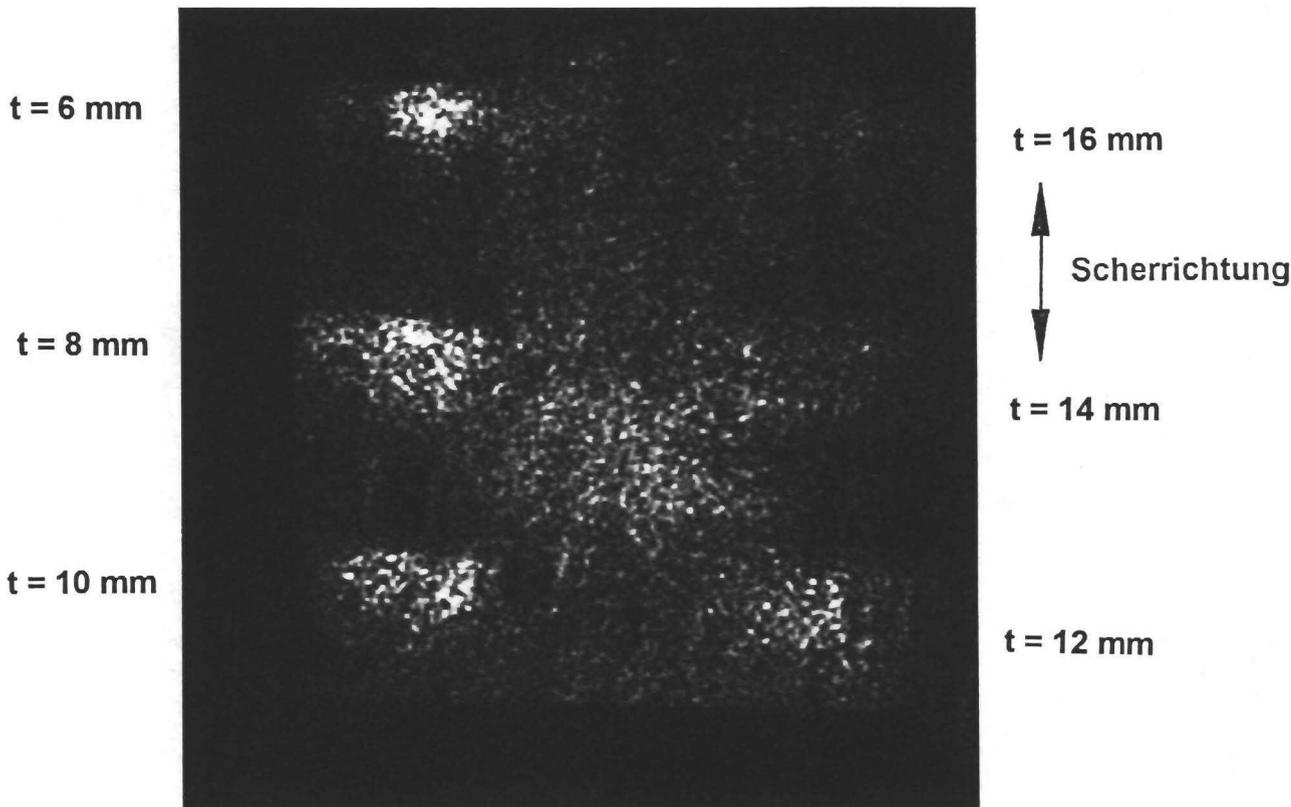
**Bild 36:** Shearogramme von der thermoplastischen Fugenbandprobe Nr. 26 (vgl. Tabelle 6) bei zwei verschiedenen Unterdrücken



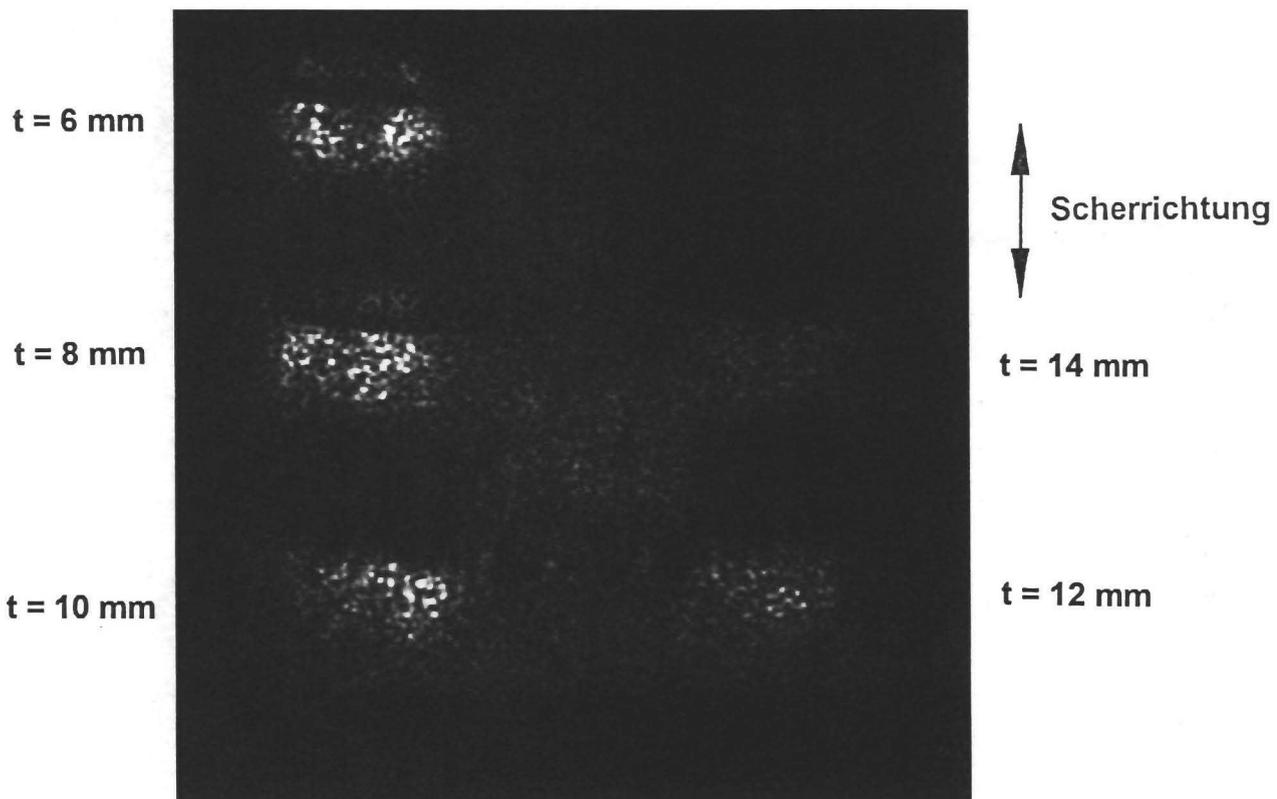
**Bild 37:** Shearogramm vom thermoplastischen Quader mit Fehlstellen von 1 mm Durchmesser  
 Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung  $t = 4 \text{ mm}$  sind ortbar



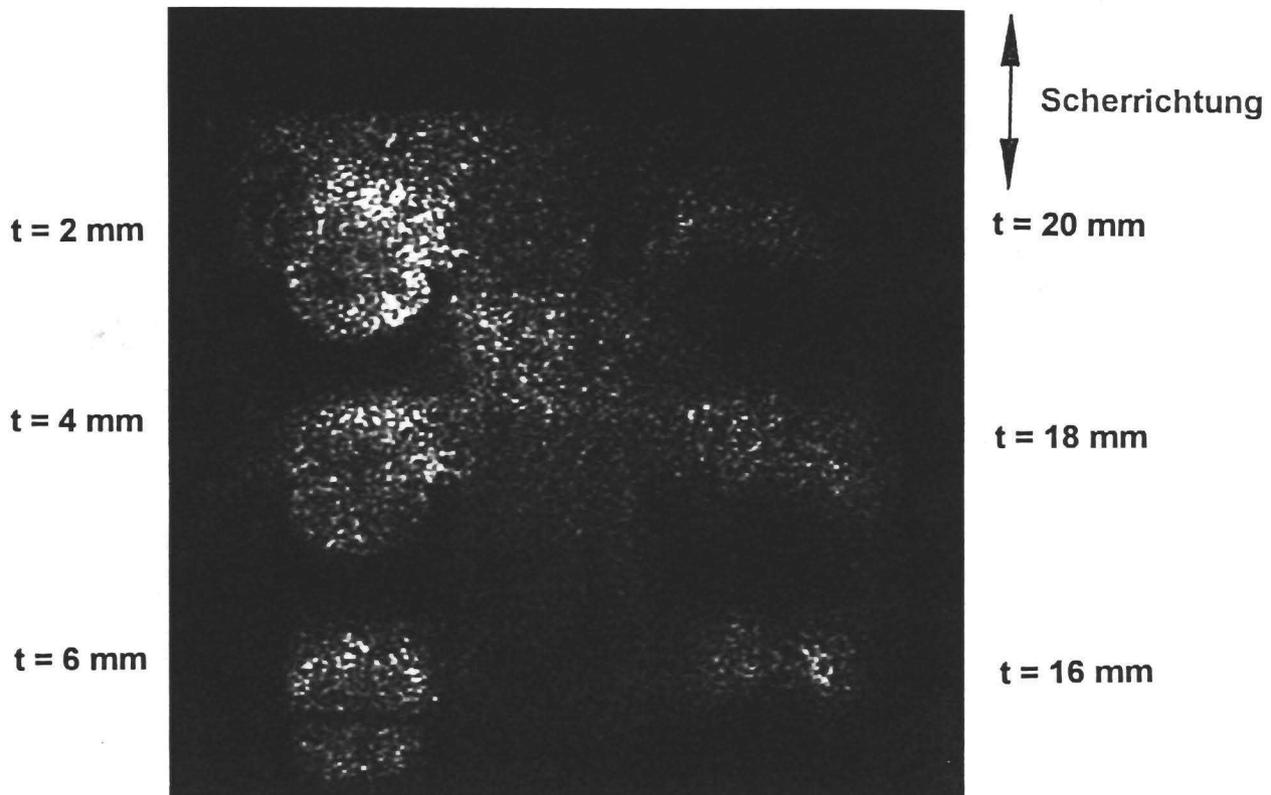
**Bild 38:** Shearogramm vom thermoplastischen Quader mit Fehlstellen von 2 mm Durchmesser  
 Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung  $t = 6 \text{ mm}$  sind ortbar



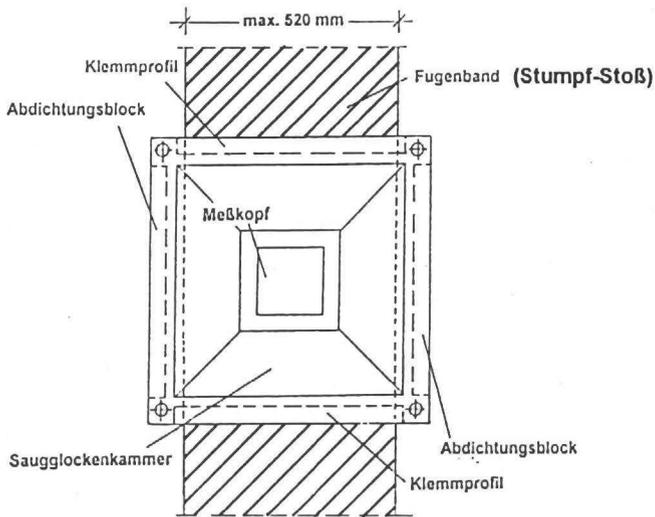
**Bild 39:** Shearogramm vom thermoplastischen Quader mit Fehlstellen von 3 mm Durchmesser  
 Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung  $t = 10 \text{ mm}$  sind ortbar



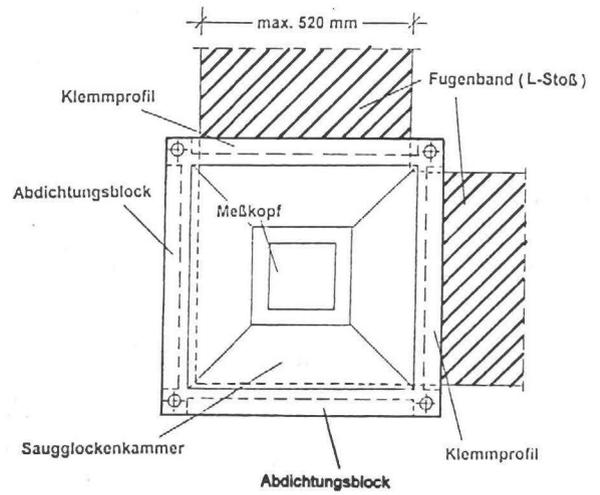
**Bild 40:** Shearogramm vom thermoplastischen Quader mit Fehlstellen von 5 mm Durchmesser  
 Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung  $t = 12 \text{ mm}$  sind ortbar



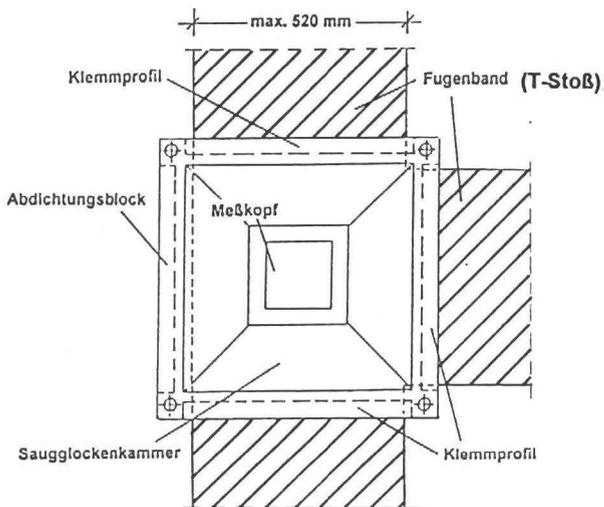
**Bild 41:** Shearogramm vom thermoplastischen Quader mit Fehlstellen von 7 mm Durchmesser  
 Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung  $t = 18$  mm sind ortbar



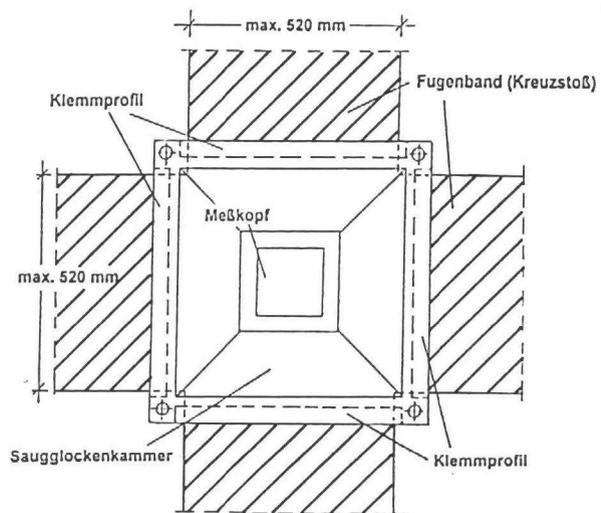
a) Prüfung eines Stumpfstoßes (Draufsicht)



b) Prüfung eines L-Stoßes (Draufsicht)



c) Prüfung eines T-Stoßes (Draufsicht)



d) Prüfung eines Kreuzstoßes (Draufsicht)

**Bild 42:** Alu-Saugglocke zur Prüfung von Stumpf-, L-, T- und Kreuz-Fugenbandstößen

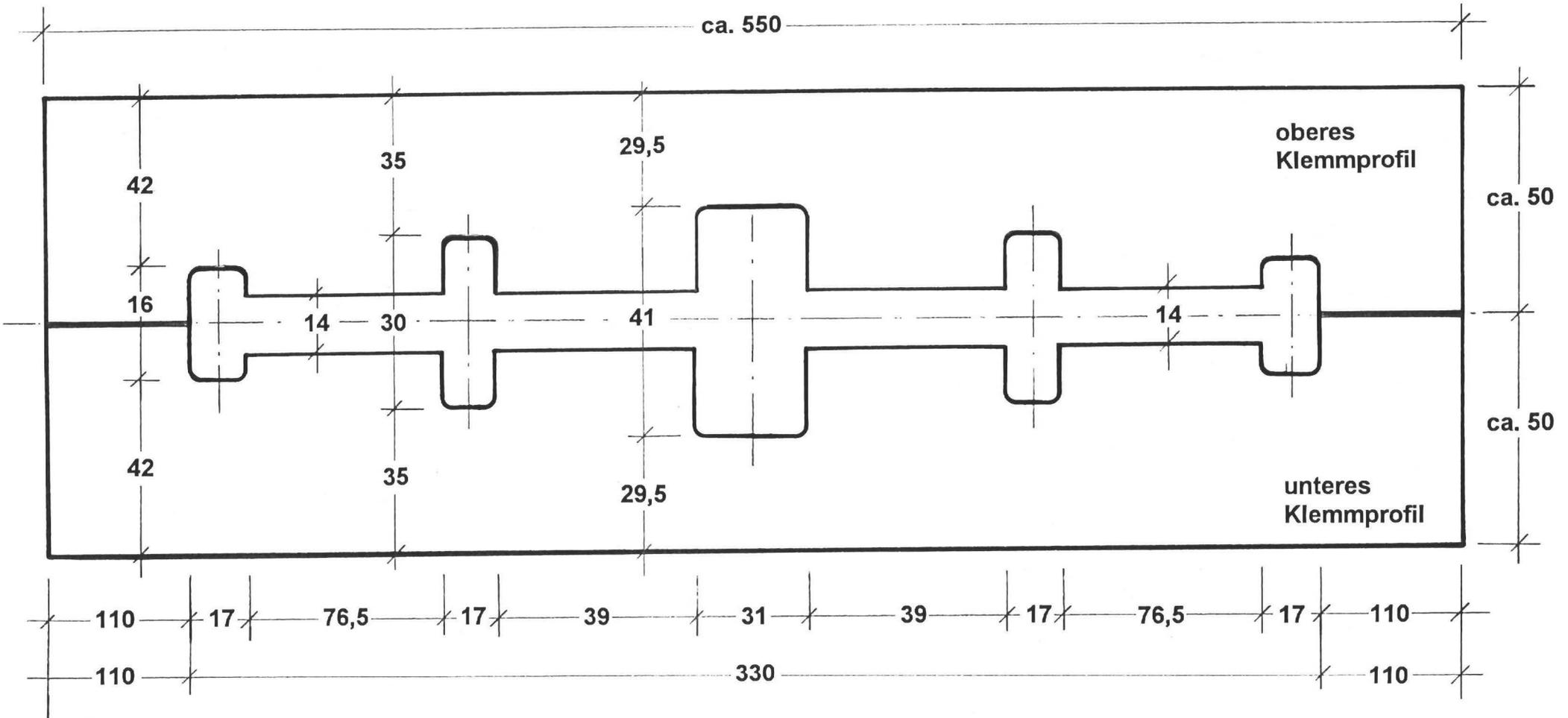


Bild 43: Prinzip der Klemmprofile für das Fugenband Tricomer D 320/9 (Beispiel)

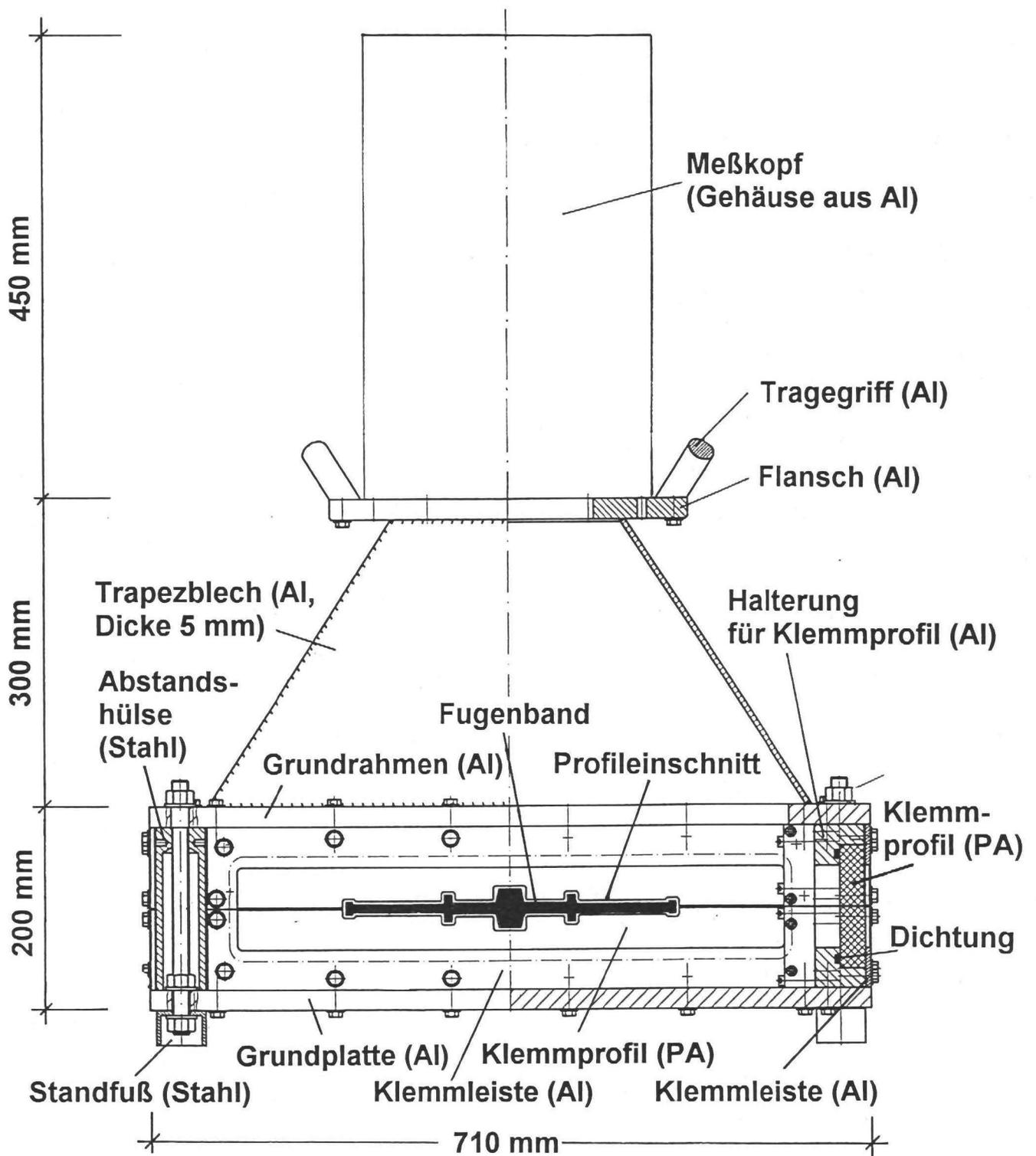


Bild 44: Seitenansicht der Alu-Sauglocke

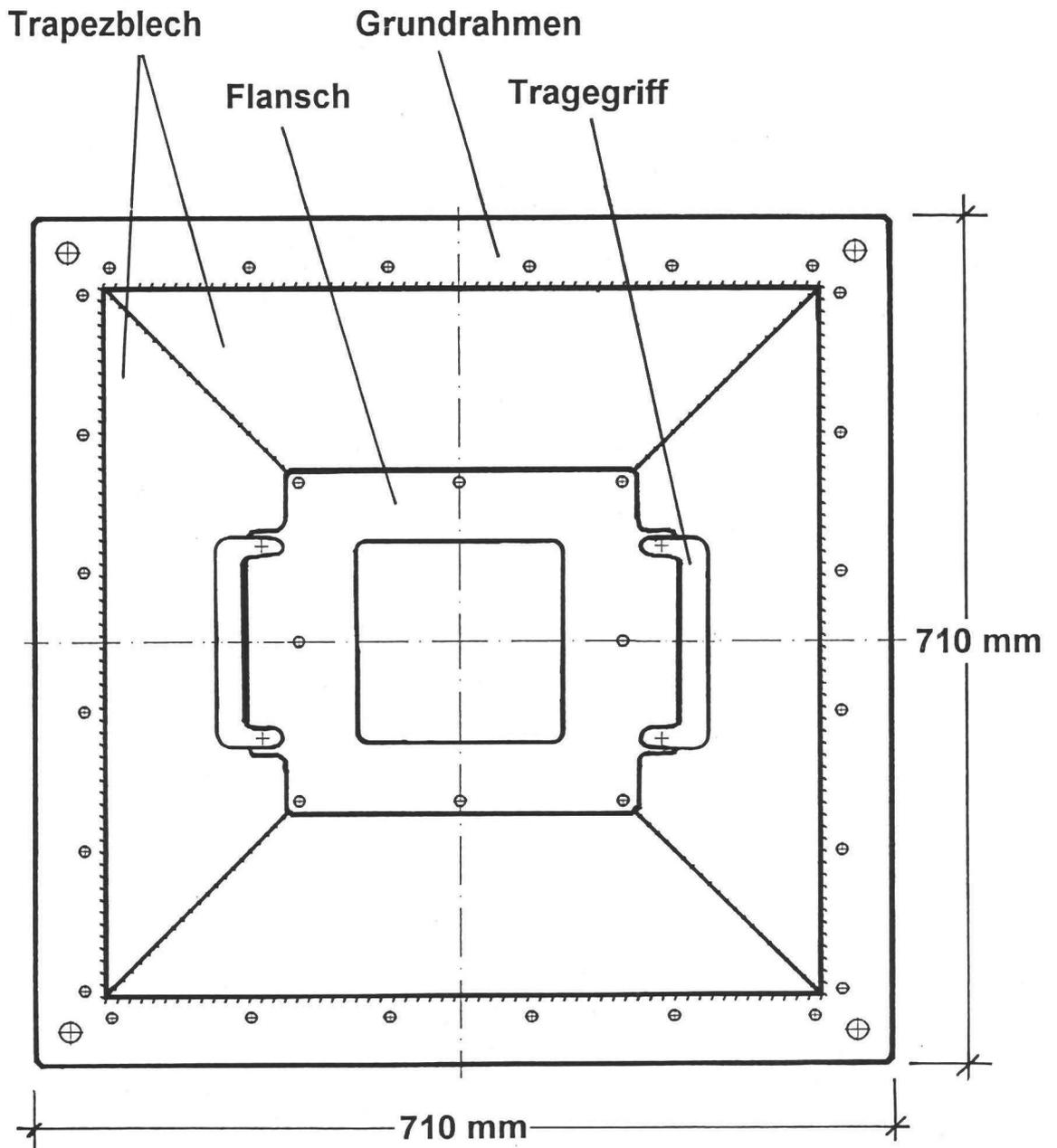
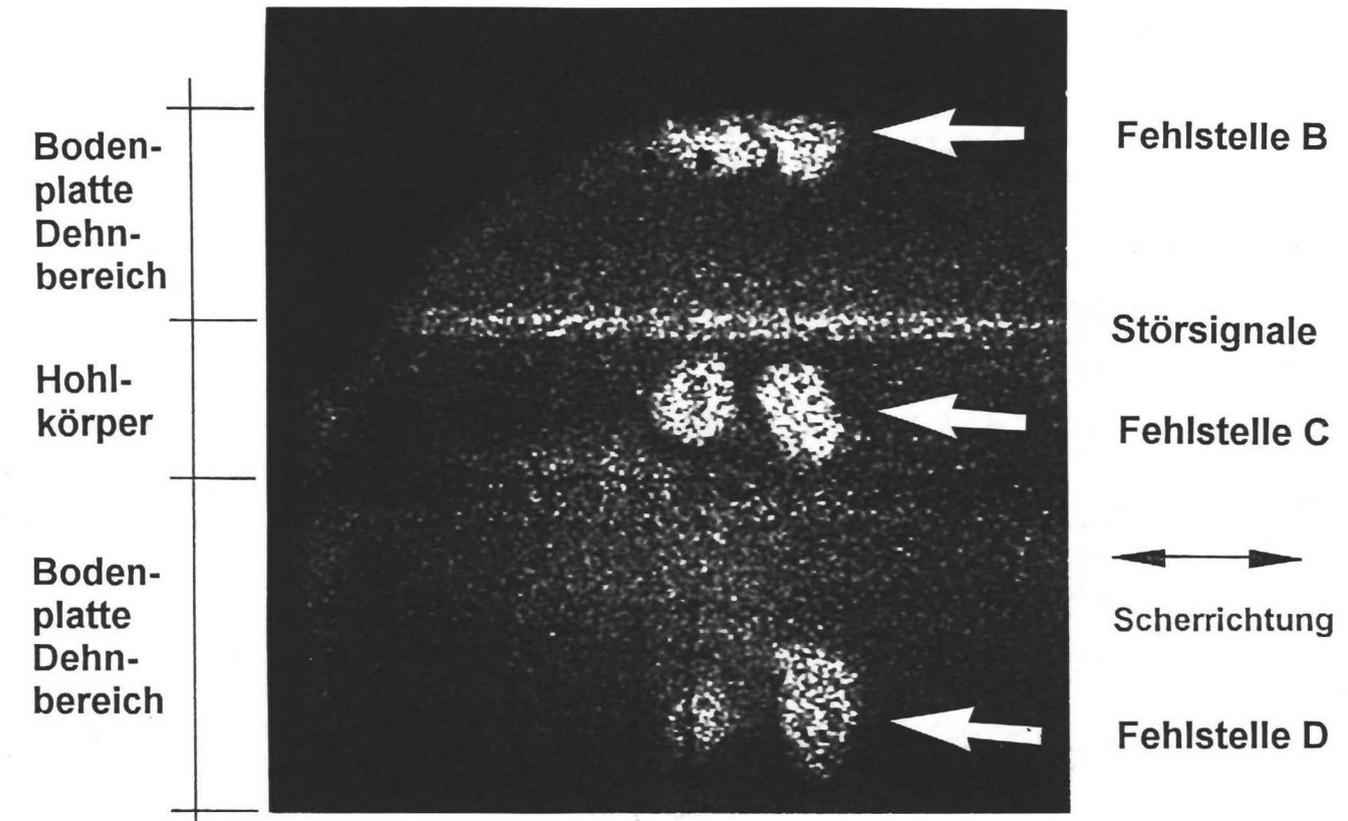
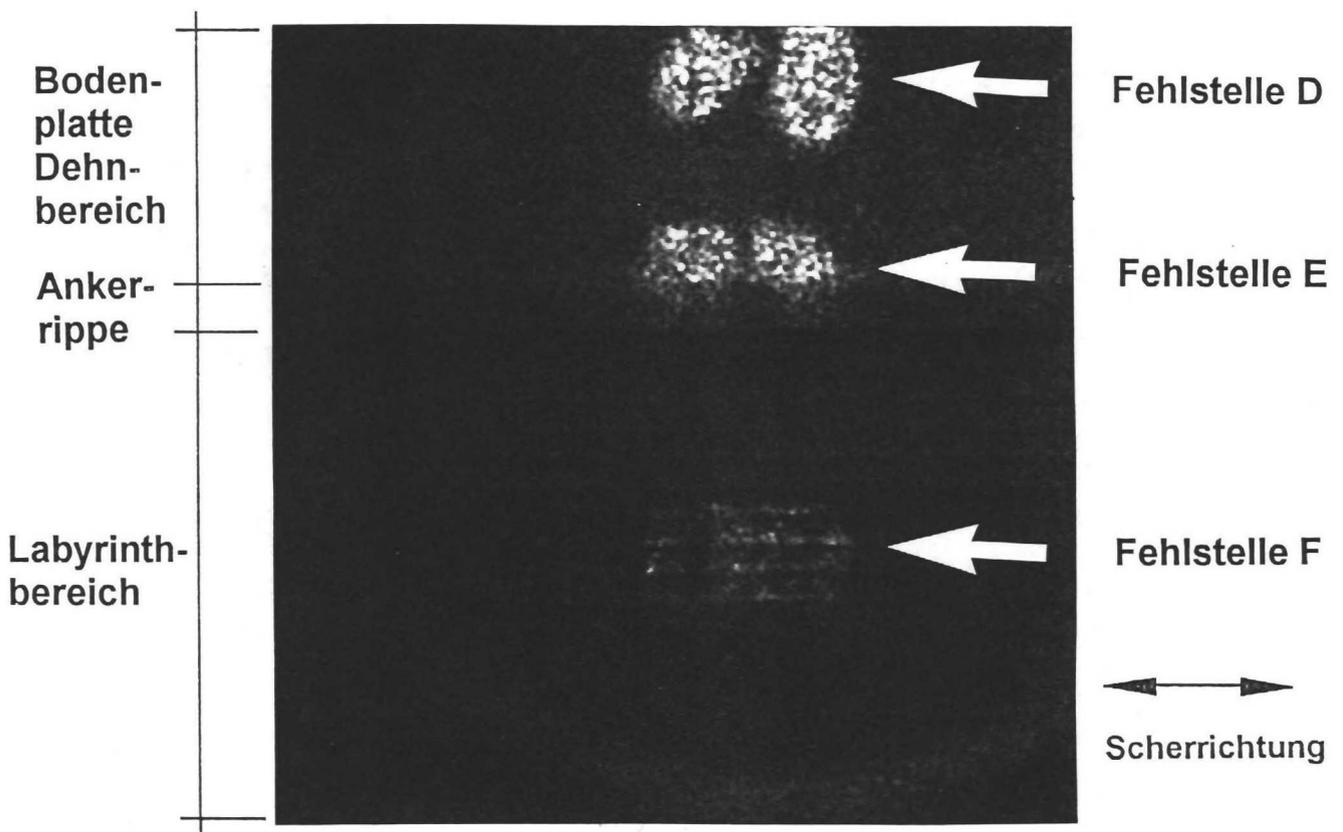


Bild 45: Draufsicht der Alu-Saugglocke

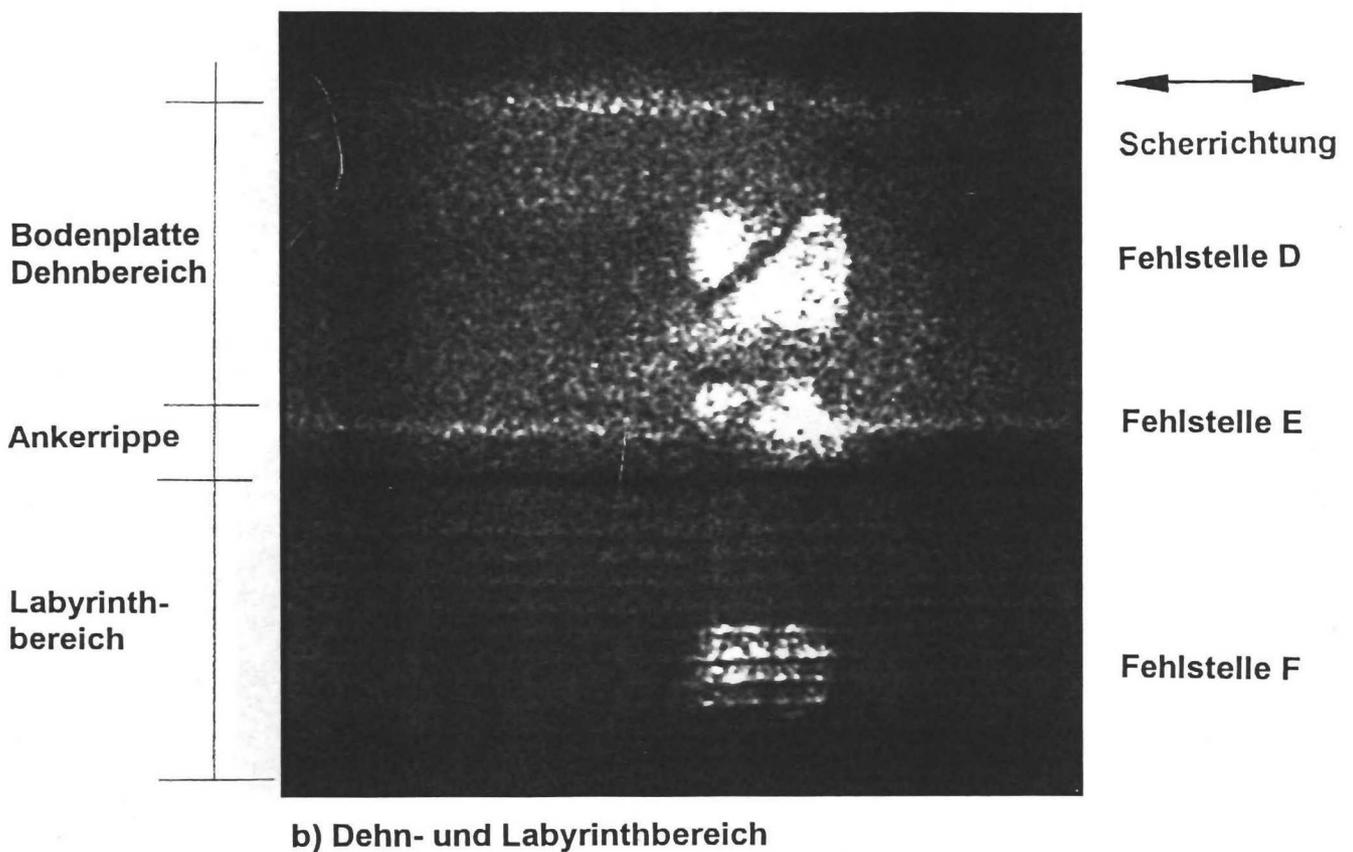
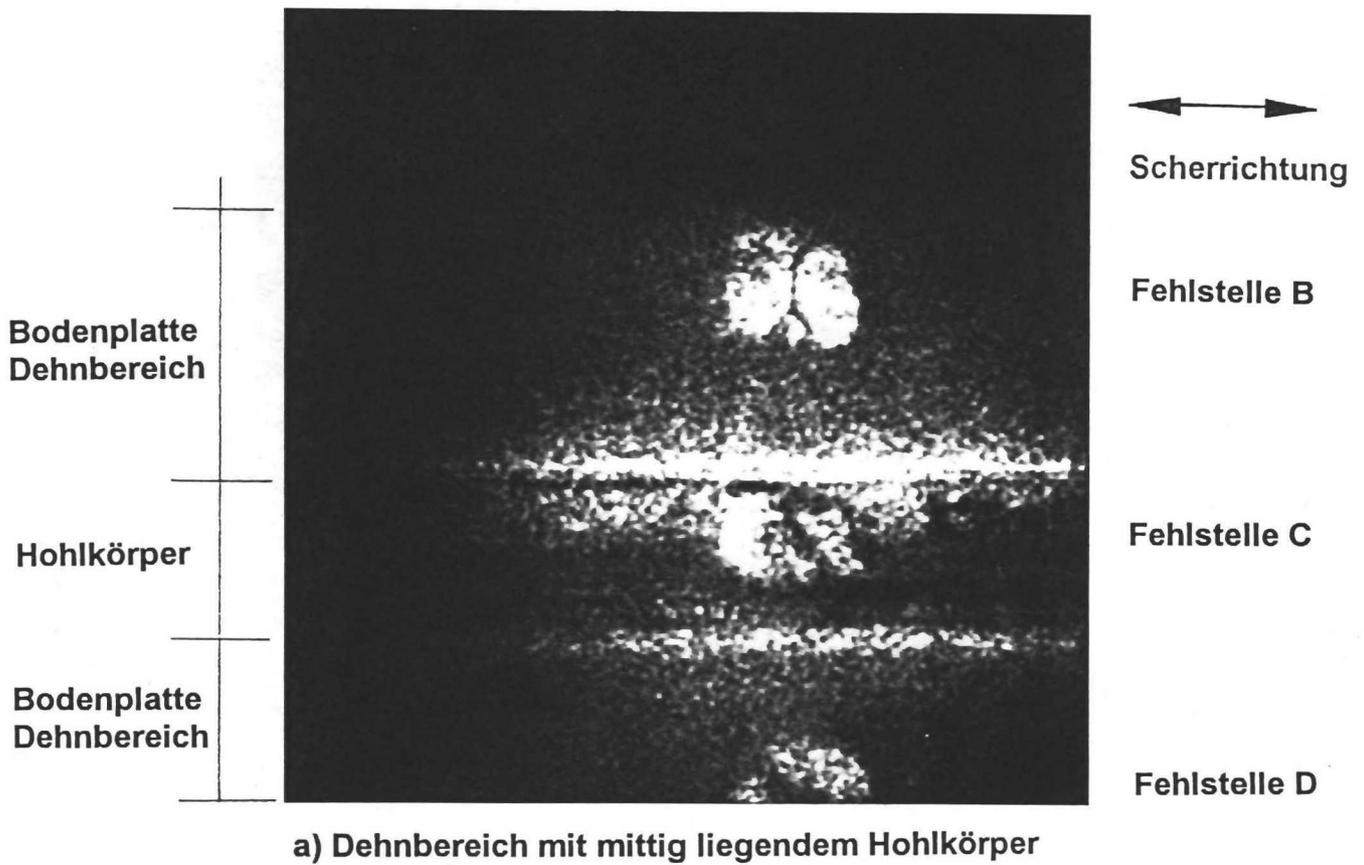


a) Dehnbereich mit mittig liegendem Hohlkörper

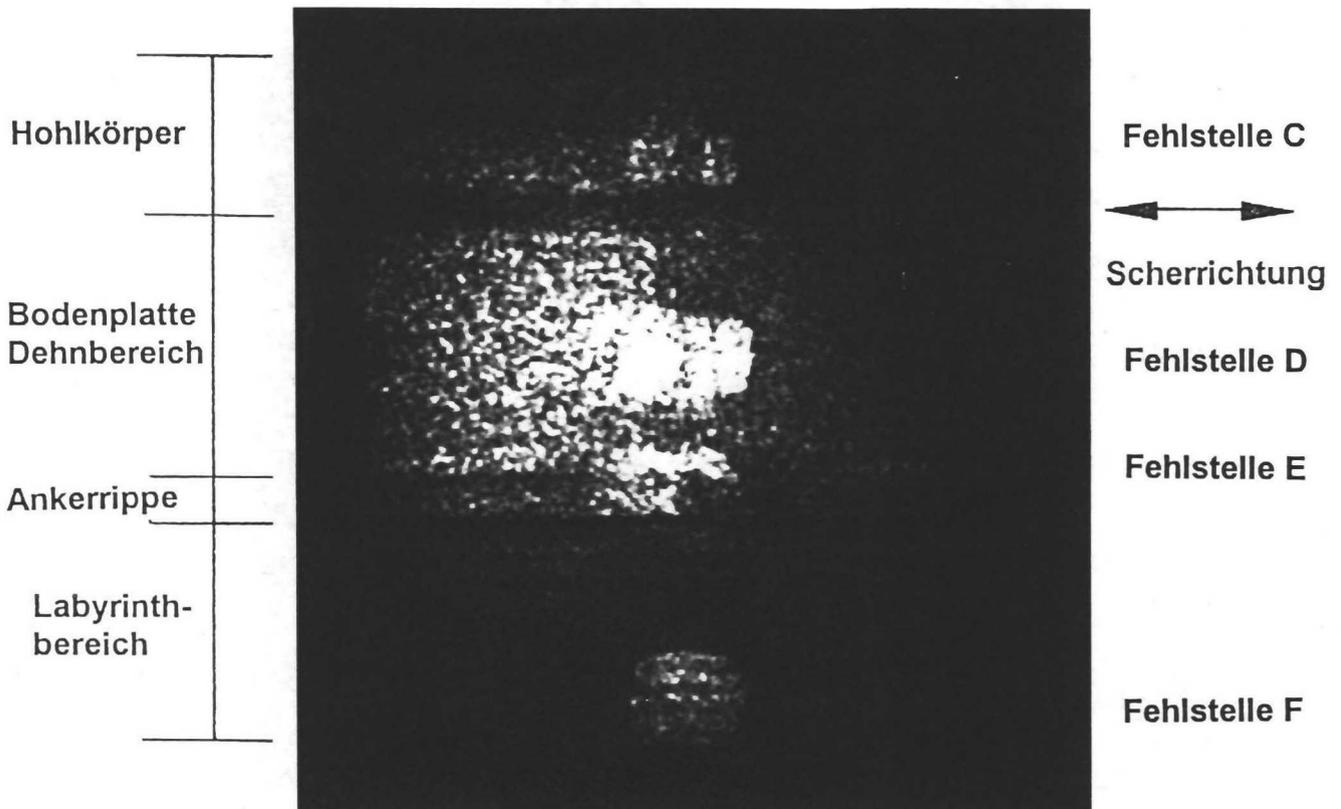


b) Dehn- und Labyrinthbereich

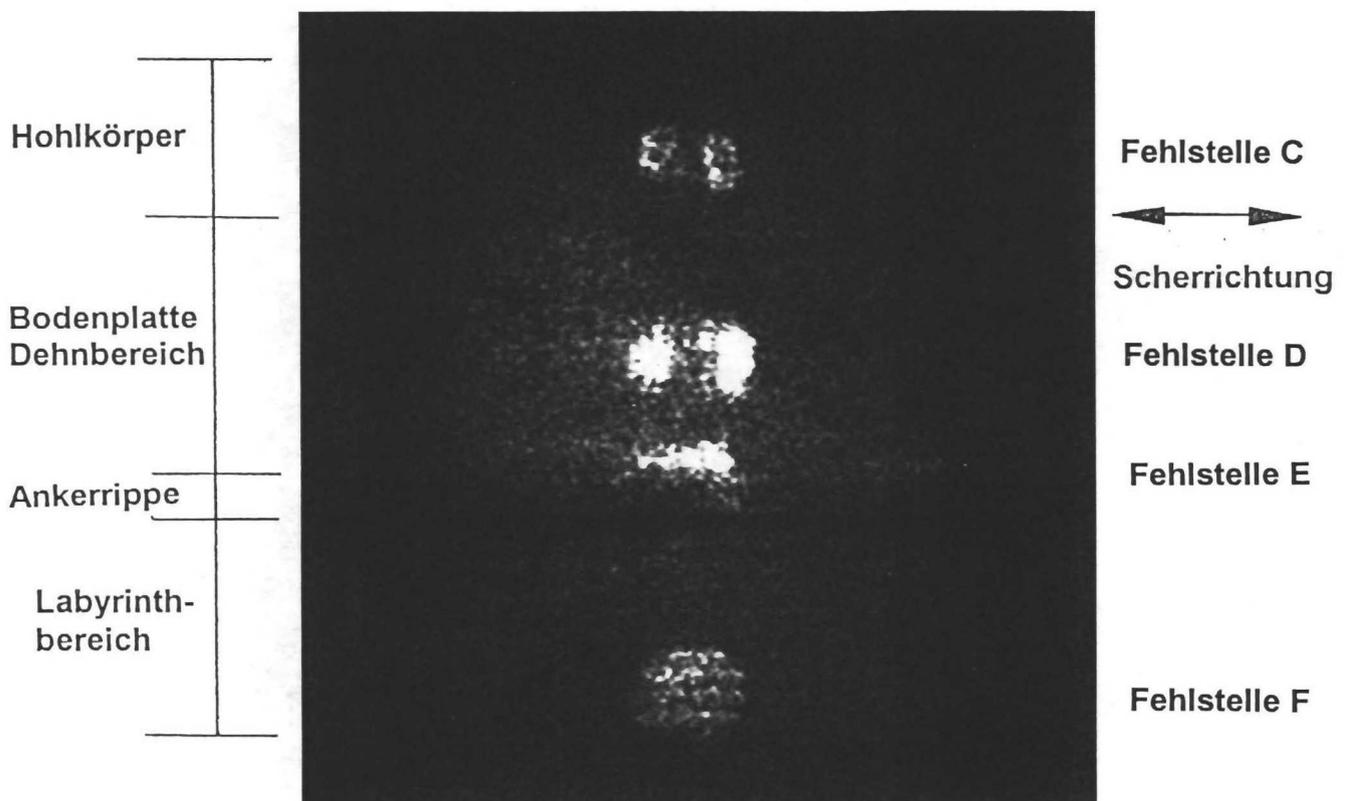
**Bild 46:** Shearogramme vom thermoplastischen Stumpfstoß (Probe Nr. 27; vgl. Tabelle 9) in einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt ohne Unterdruck im Hohlkörper, Aufnahme bei 20°C. Flächige Fehlstellen sind sichtbar.



**Bild 47:** Shearogramme vom thermoplastischen Stumpfstoß (Probe Nr. 27; vgl. Tabelle 9) in einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt ohne Unterdruck im Hohlkörper, Aufnahme bei 35°C. Flächige Fehlstellen sind sichtbar, jedoch sind mehr Störsignale als bei 20°C erkennbar (vgl. Bild 46)



a) Beidseitige Abschottungen jeweils im Abstand von ca. 10 cm vom Stoß

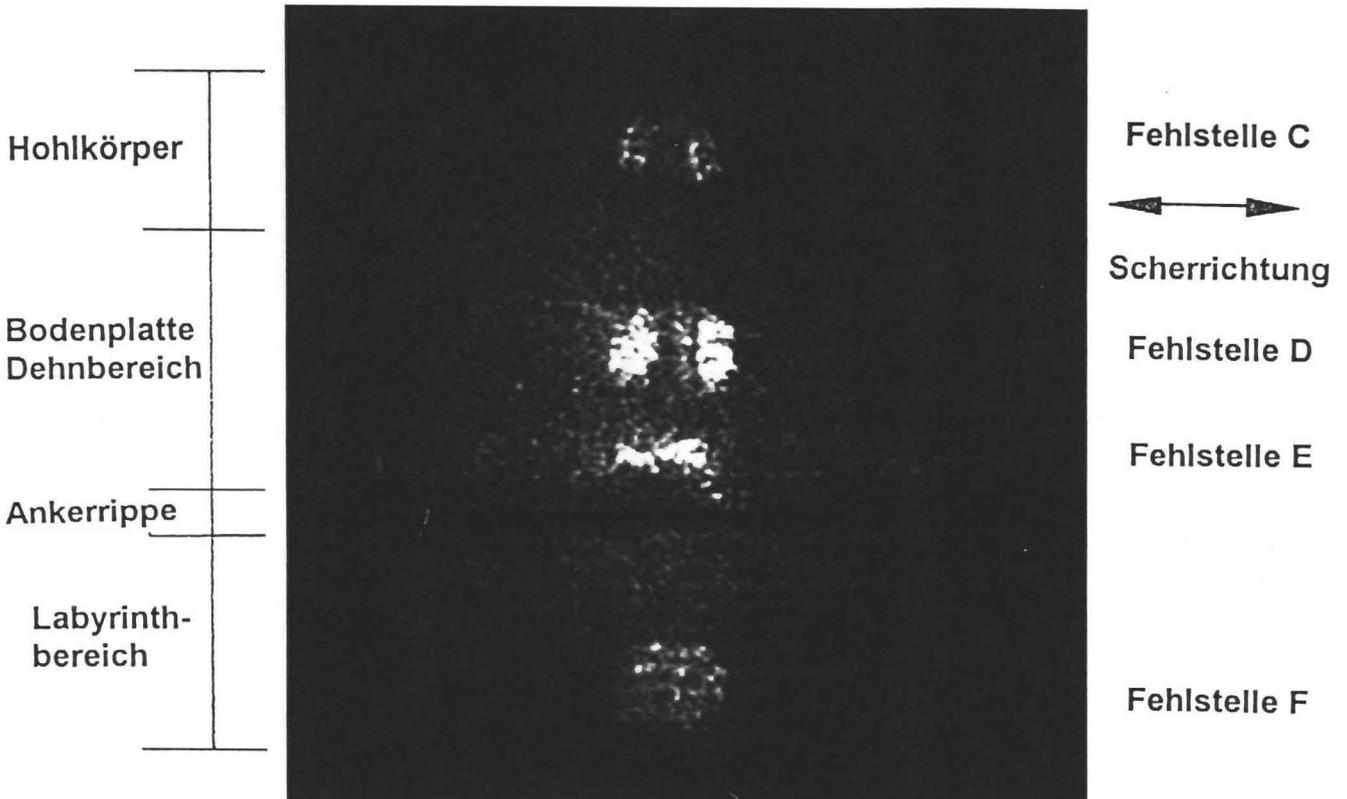


b) Beidseitige Abschottungen jeweils im Abstand von ca. 20 cm vom Stoß

**Bild 48:** Shearogramme vom thermoplastischen Stumpfstoß (Probe Nr. 27; vgl. Tabelle 9) in einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt mit Moosgummi-Abschottungen in 10 cm und 20 cm Abstand vom Stoß und Unterdruck im Hohlkörper.

Flächige Fehlstellen sind sichtbar.

Bei Abschottung nahe am Stoß treten jedoch stärkere Störsignale auf.

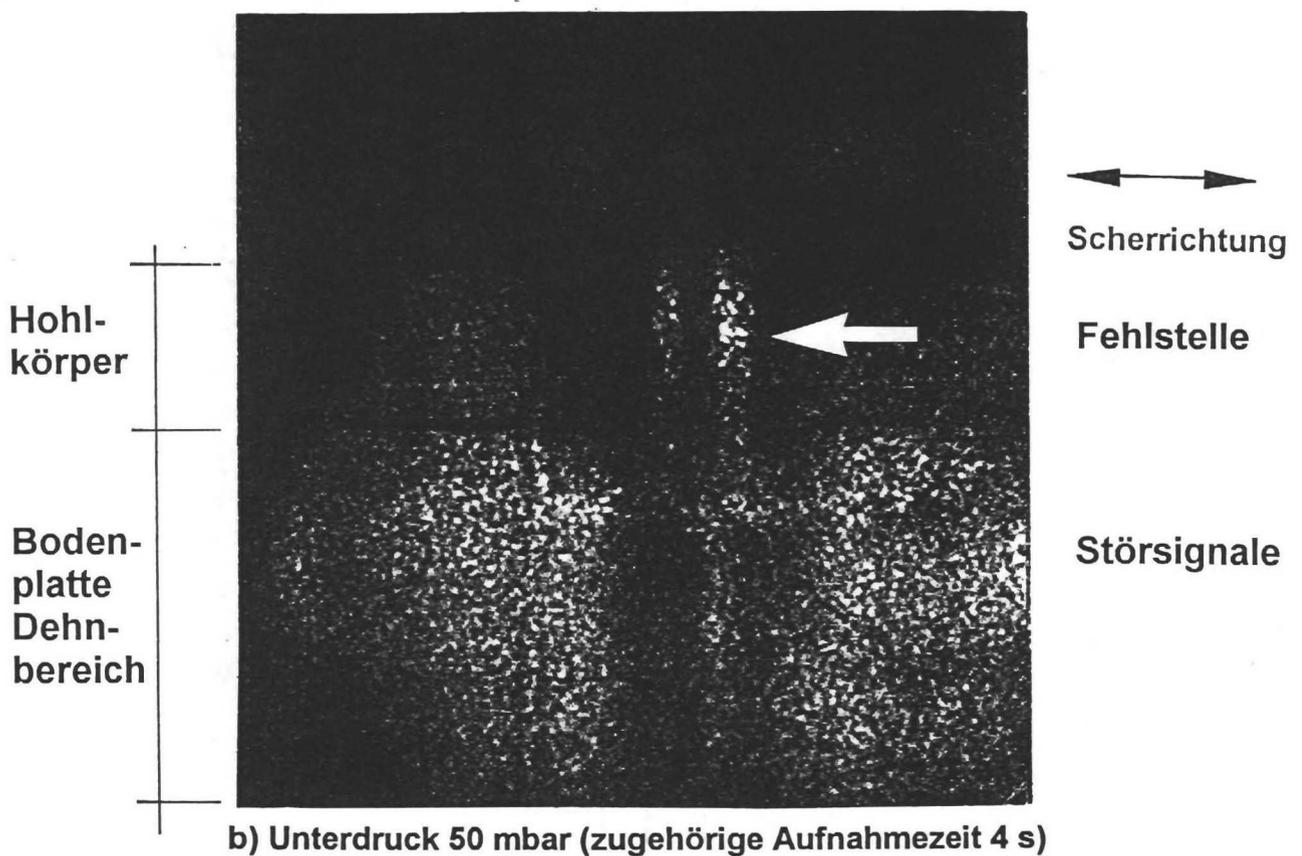
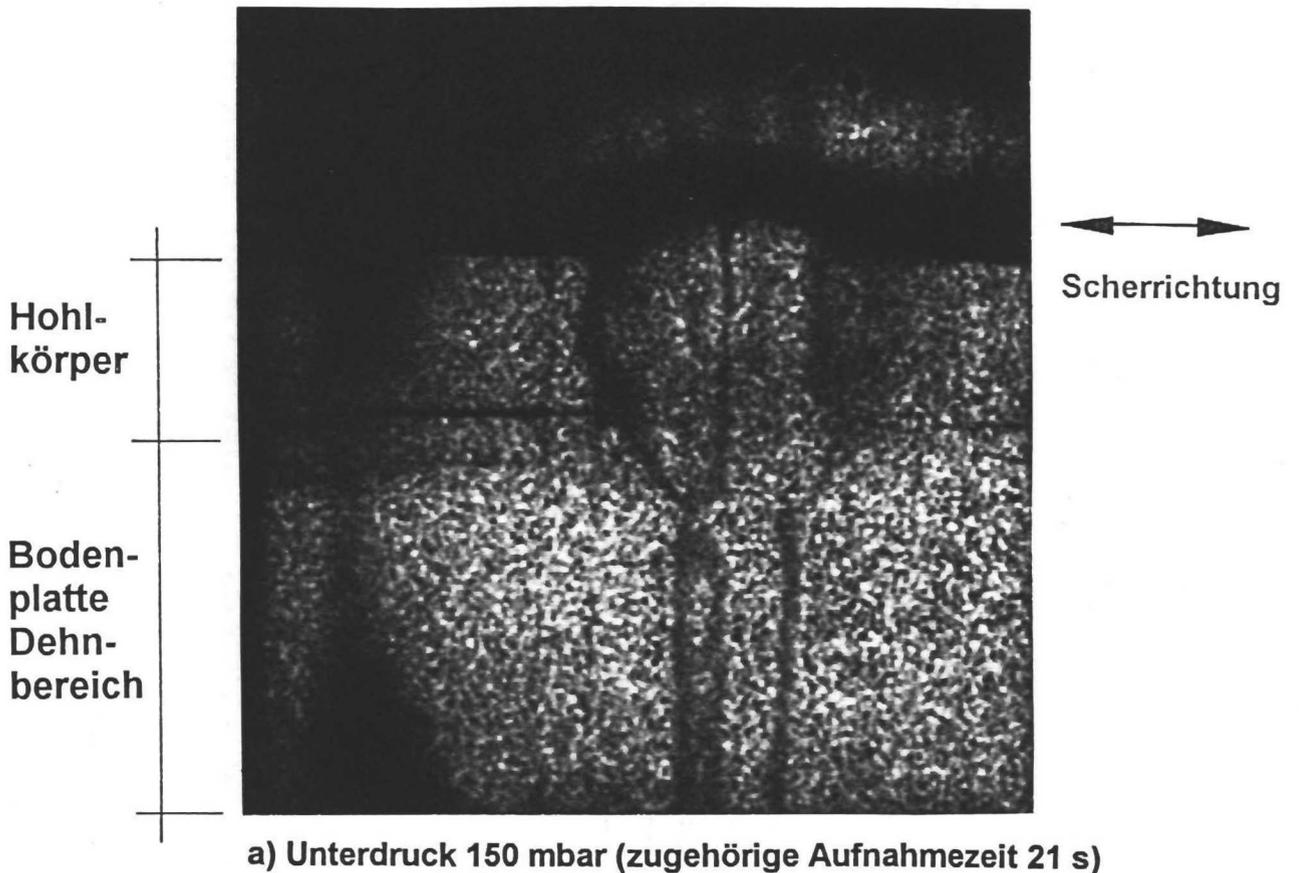


a) Beidseitige Abschottungen jeweils im Abstand von ca. 30 cm vom Stoß

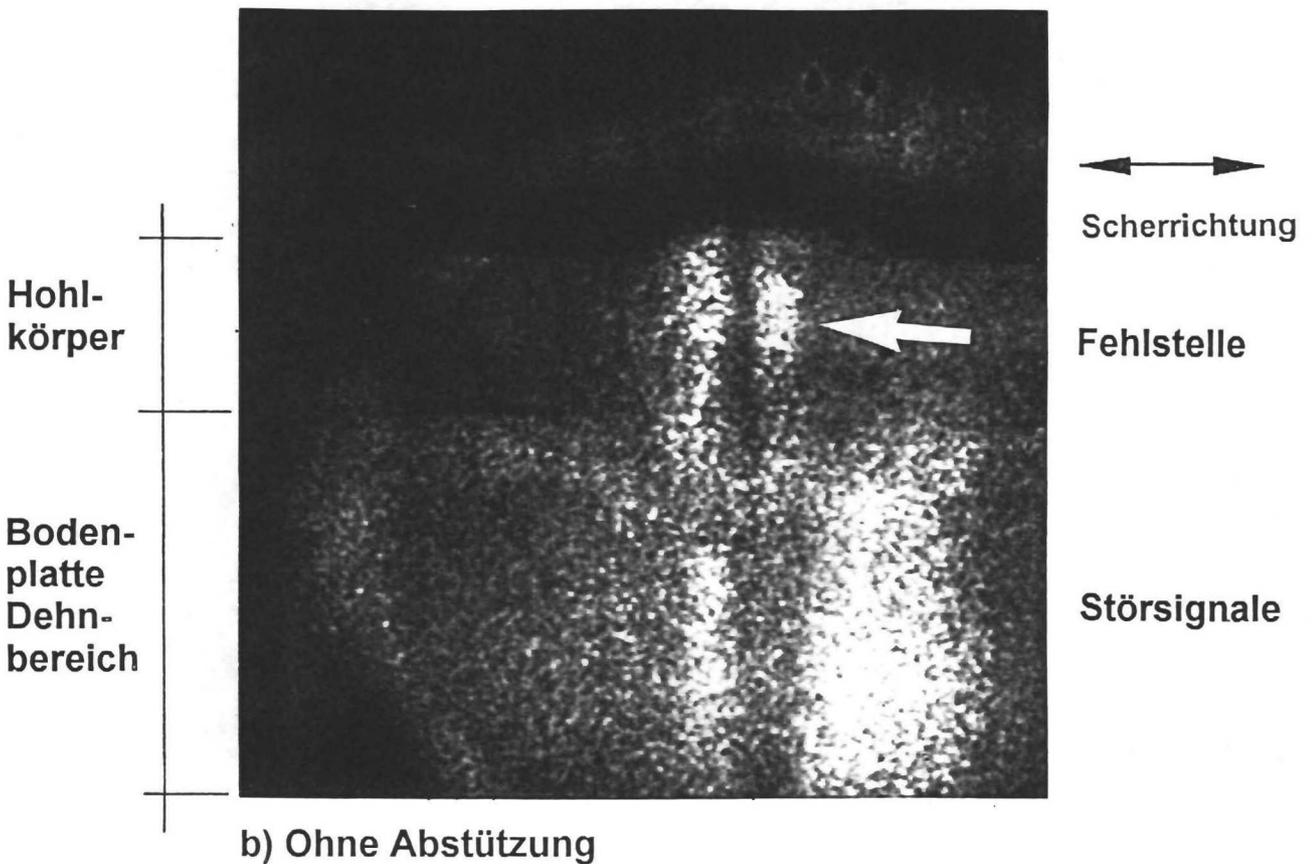
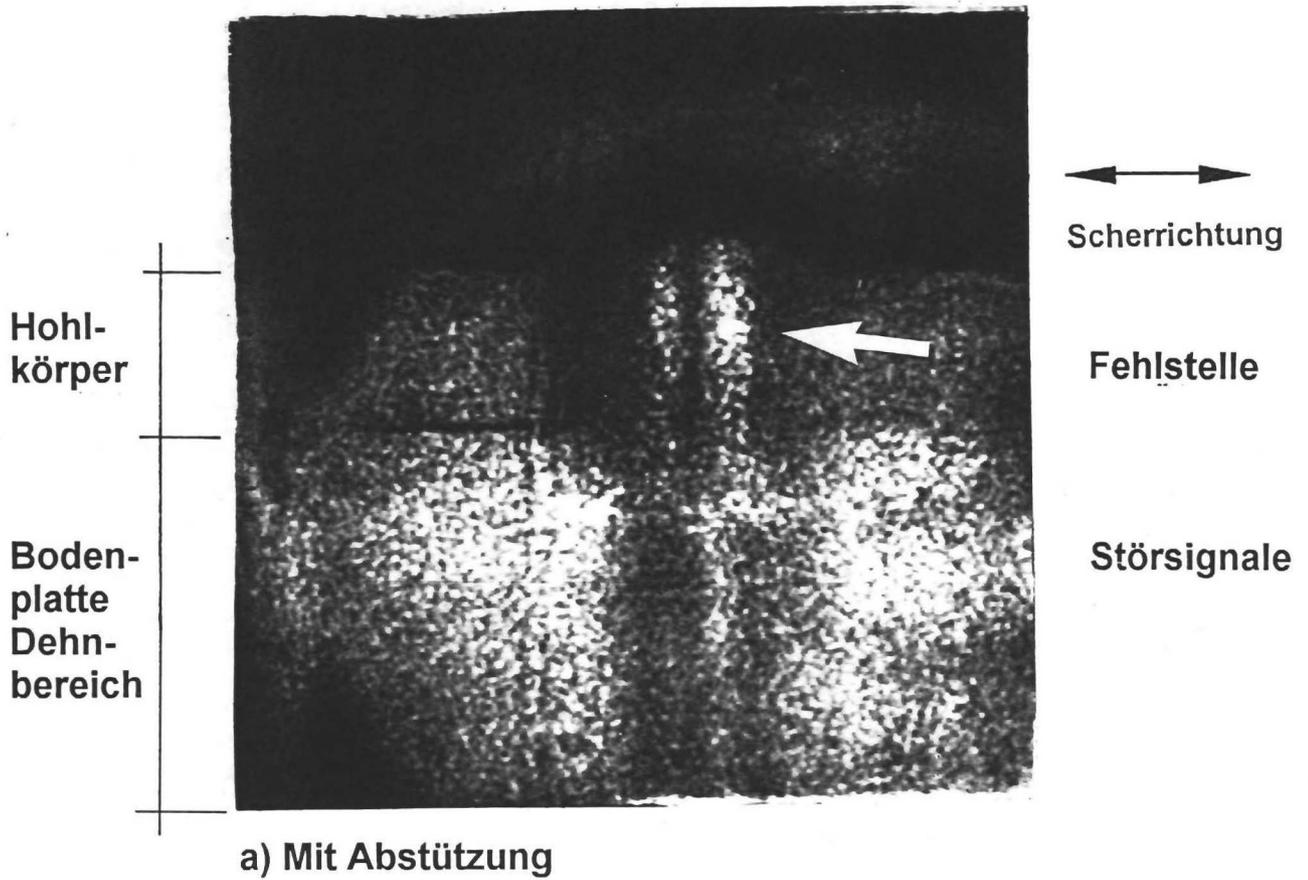


b) Beidseitige Abschottungen jeweils im Abstand von ca. 40 cm vom Stoß

**Bild 49:** Shearogramme vom thermoplastischen Stumpfstoß (Probe Nr. 27; vgl. Tabelle 9) in einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt mit Moosgummi-Abschottungen in 30 cm und 40 cm Abstand vom Stoß und Unterdruck im Hohlkörper.  
 Flächige Fehlstellen sind sichtbar, weniger Störsignale als bei Normaldruck im Hohlkörper (vgl. Bild 46).

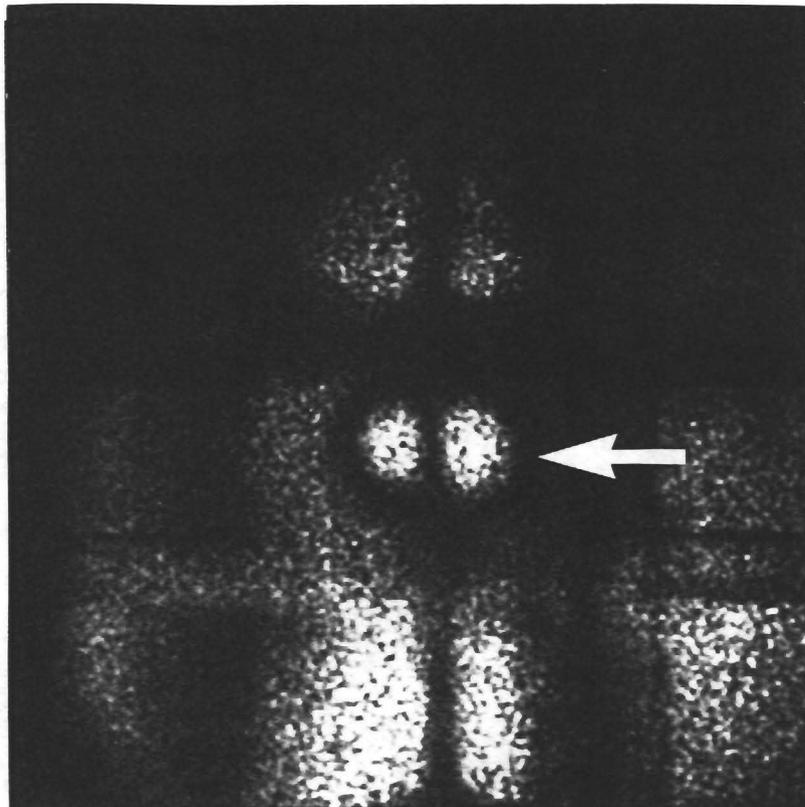
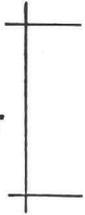


**Bild 50:** Shearogramme vom elastomeren Stumpfstoß (Rückseite von Probe Nr. 30; vgl. Tabelle 9) in einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt bei zwei verschiedenen Unterdrücken  
Unplanmäßige Fehlstelle in der Hohlkörperwandung wird nur bei einem Unterdruck von 50 mbar und zugehöriger verkürzter Aufnahmezeit sichtbar.



**Bild 51:** Shearogramme vom elastomeren Stumpfstoß (Probe Nr. 30; vgl. Tabelle 9) in einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt mit und ohne Abstützung des Fugenbandes. Fehlstelle in der Hohlkörperwandung ist in beiden Fällen sichtbar.

Hohl-  
körper



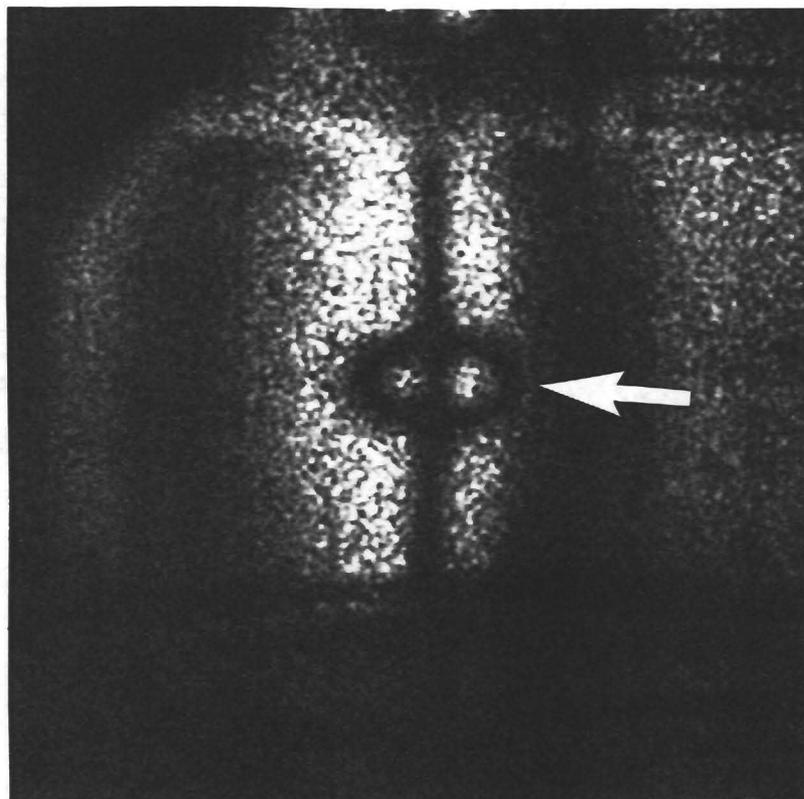
←→  
Scherrichtung

Fehlstelle C

Störsignale

a) Bereich Hohlkörper

Boden-  
platte  
Dehn-  
bereich



←→  
Scherrichtung

Fehlstelle B

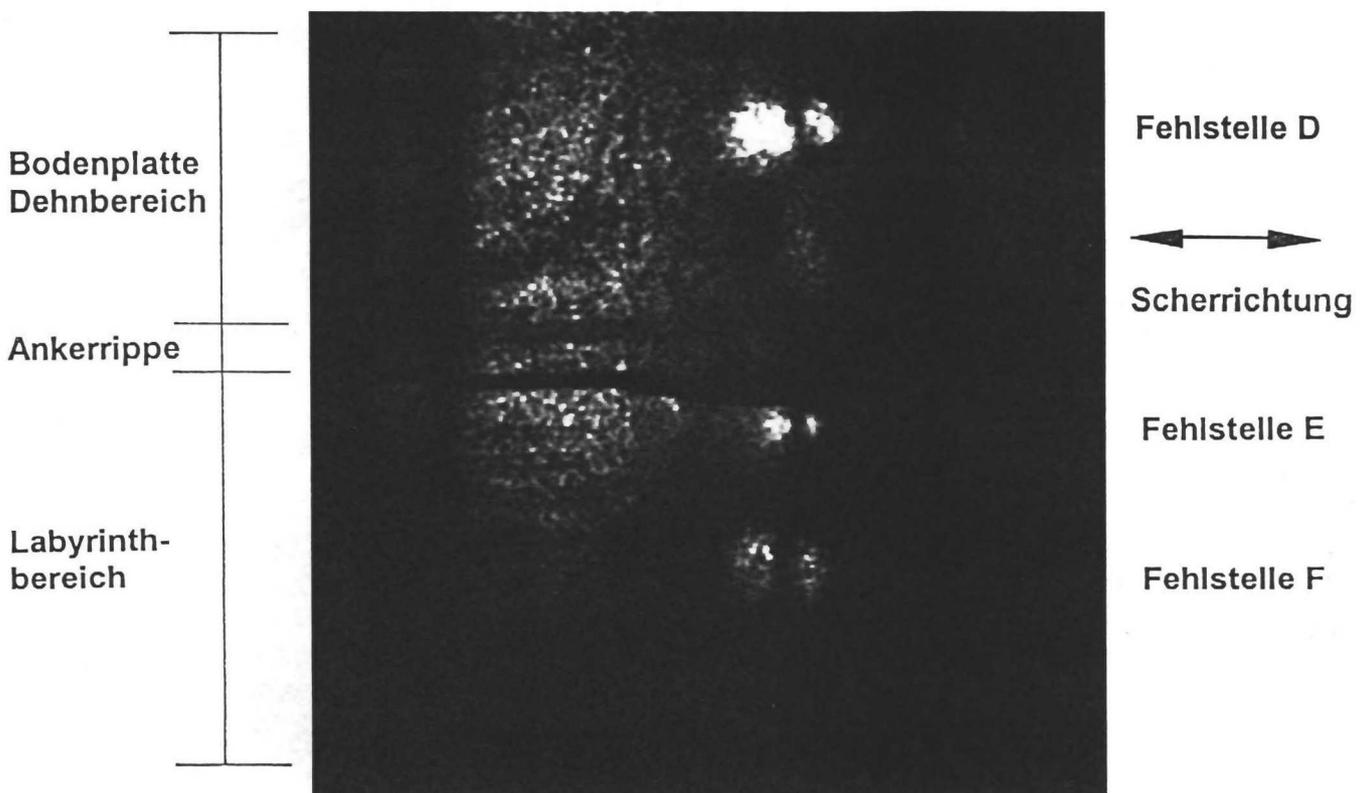
Störsignale

b) Bodenplatte im Dehnbereich

**Bild 52:** Shearogramme vom elastomeren Stumpfstoß (Probe Nr. 30; vgl. Tabelle 9) in einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt ohne Unterdruck im Hohlkörper, Aufnahme bei 20°C. Flächige Fehlstelle im Hohlkörper und im Dehnbereich ist sichtbar.

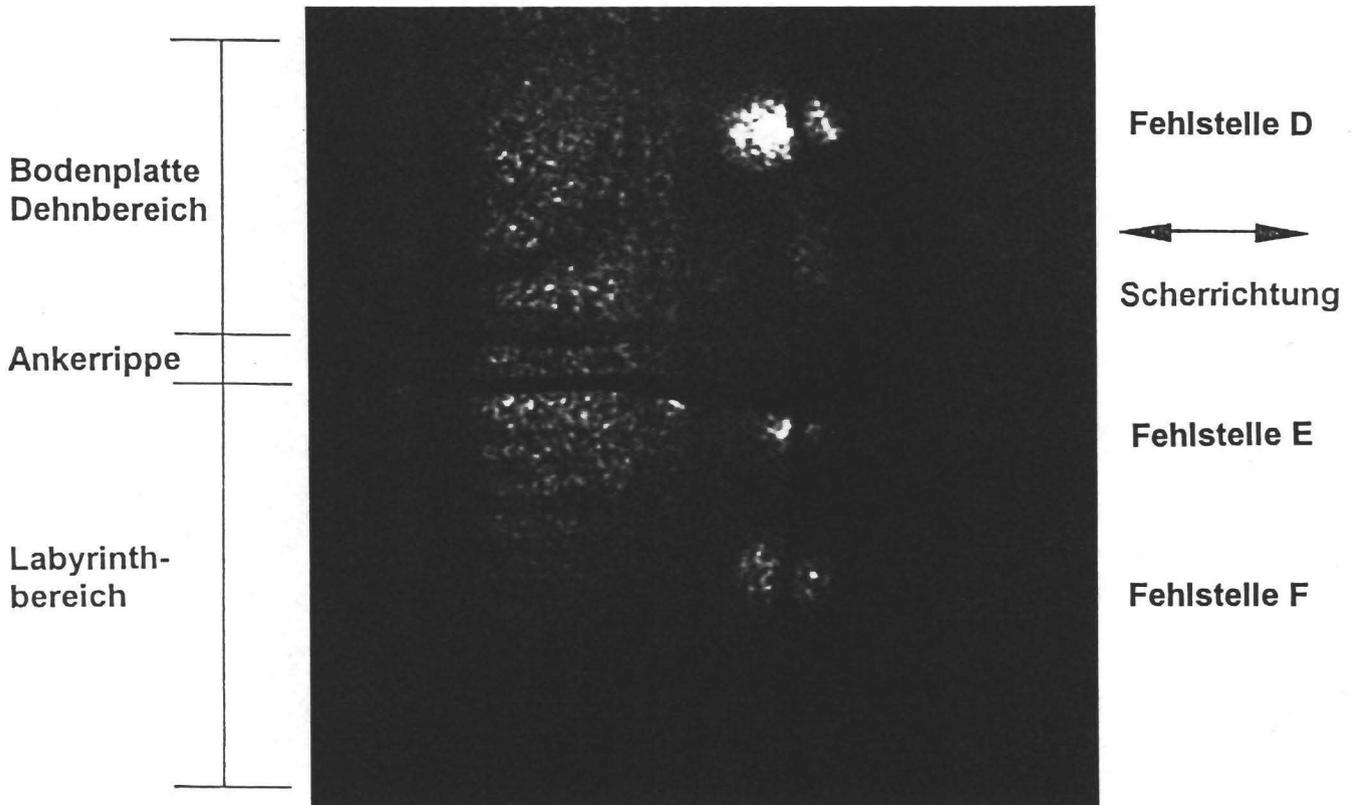


a) Beidseitige Abschottungen jeweils im Abstand von ca. 10 cm vom Stoß

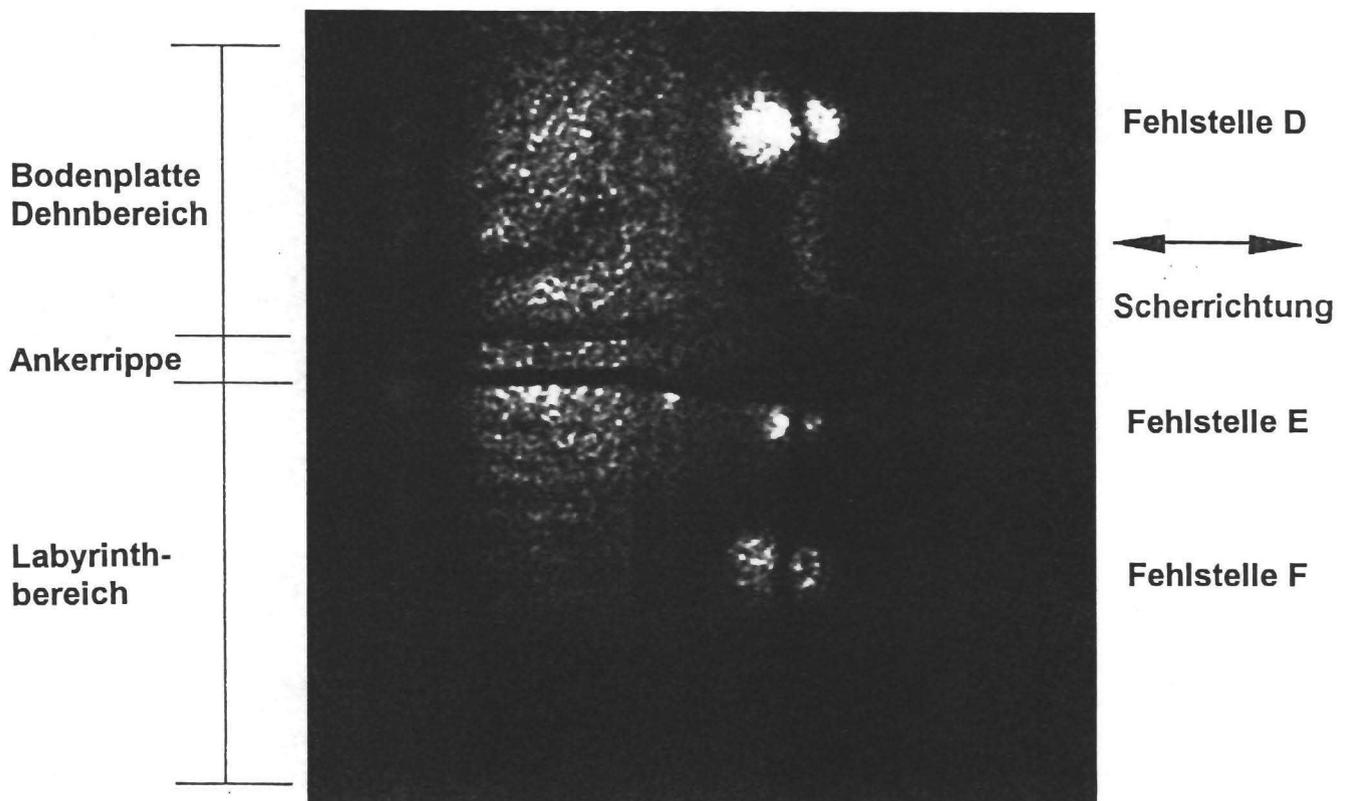


b) Beidseitige Abschottungen jeweils im Abstand von ca. 20 cm vom Stoß

**Bild 53:** Shearogramme vom elastomeren Stumpfstoß (Probe Nr. 30; vgl. Tabelle 9) in einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt mit Moosgummi-Abschottungen in 10 cm und 20 cm Abstand vom Stoß und Unterdruck im Hohlkörper. Fehlstellenortung unabhängig vom Abschottungsort ist möglich.

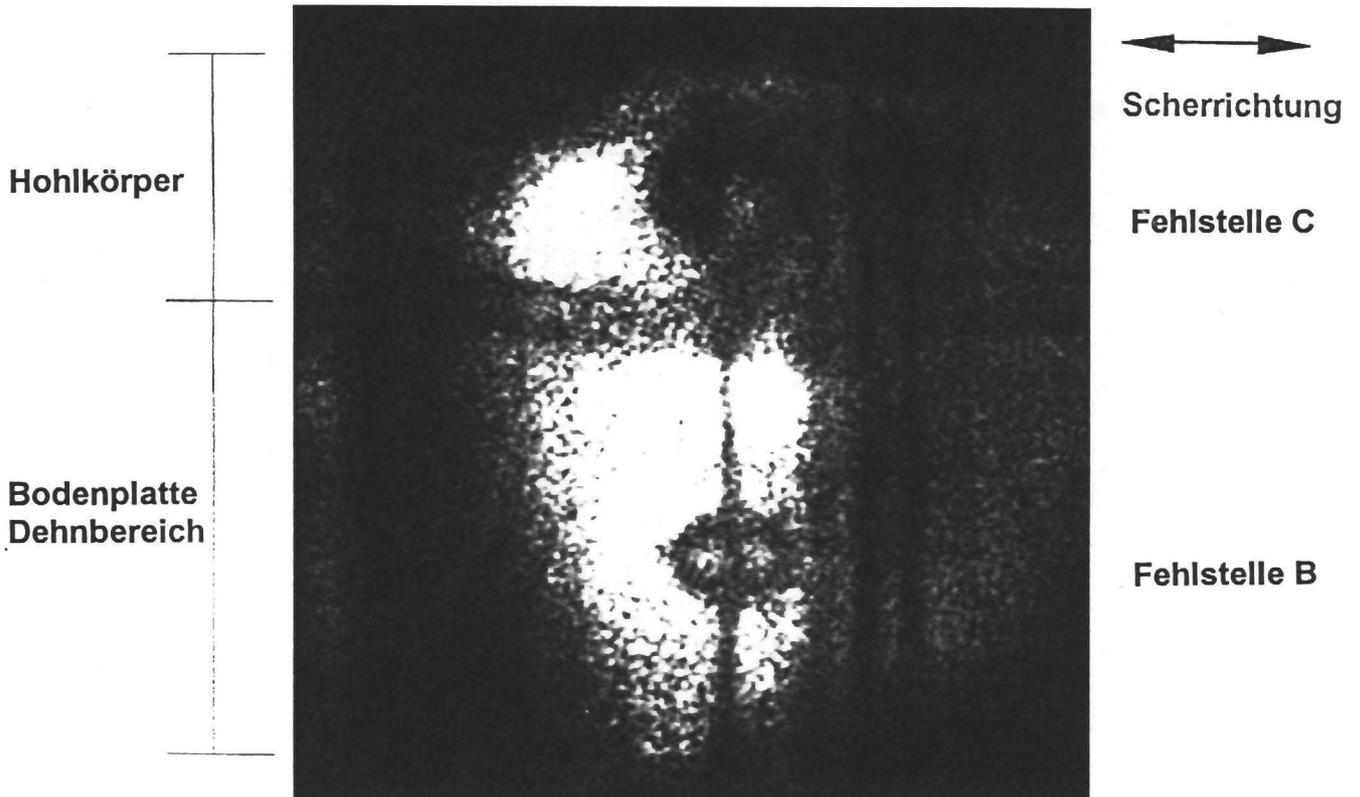


a) Beidseitige Moosgummi-Abschottungen jeweils im Abstand von ca. 30 cm vom Stoß

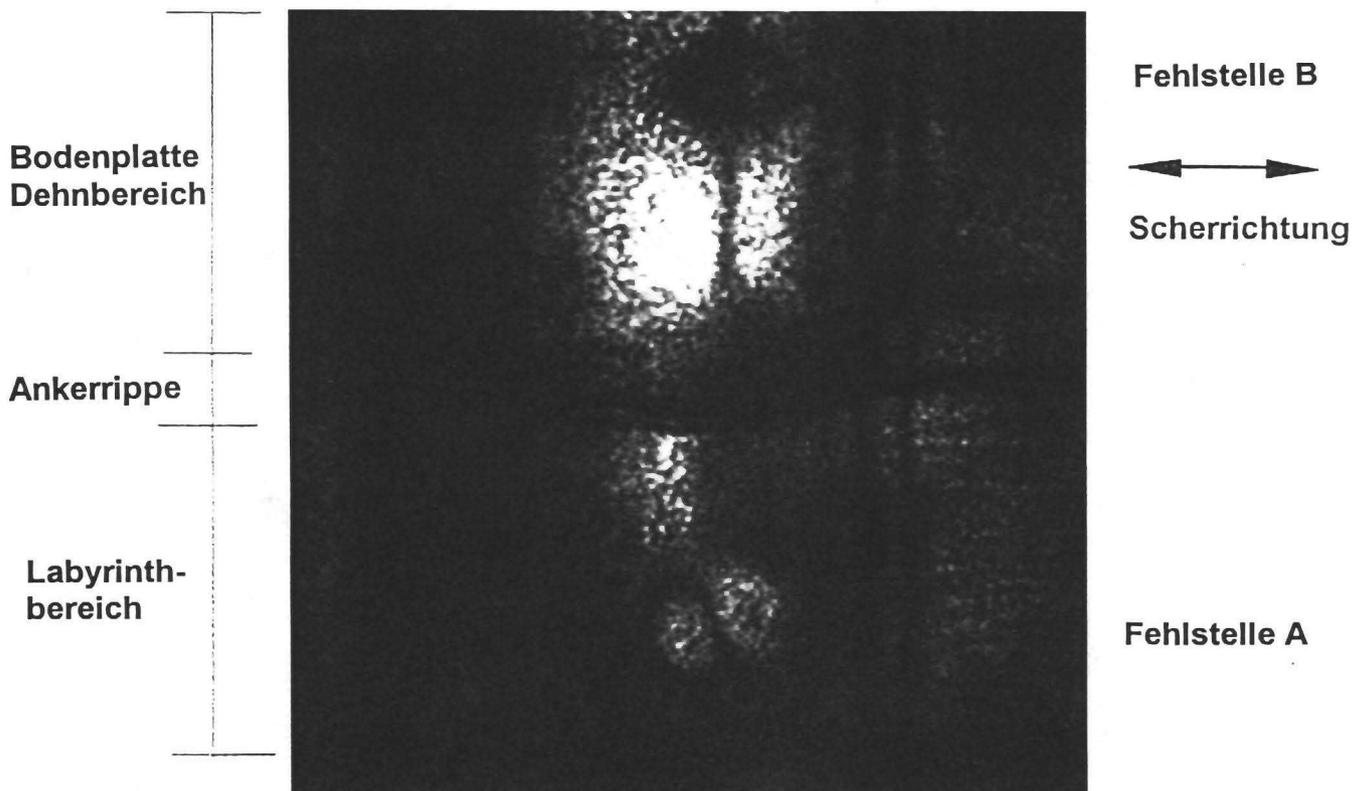


b) Beidseitige Klemm-Abschottungen jeweils im Abstand von ca. 40 cm vom Stoß

**Bild 54:** Shearogramme vom elastomeren Stumpfstoß (Probe Nr. 30; vgl. Tabelle 9) in einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt mit Unterdruck im Hohlkörper und Klemmabschottung in 40 cm Abstand vom Stoß bzw. alternativ Moosgummi-Abschottung in 30 cm Abstand vom Stoß. Flächige Fehlstellen sind sichtbar, weniger Störsignale als bei Aufnahmen mit Normaldruck im Hohlkörper (vgl. Bild 52)



a) Hohlkörper und Dehnbereich

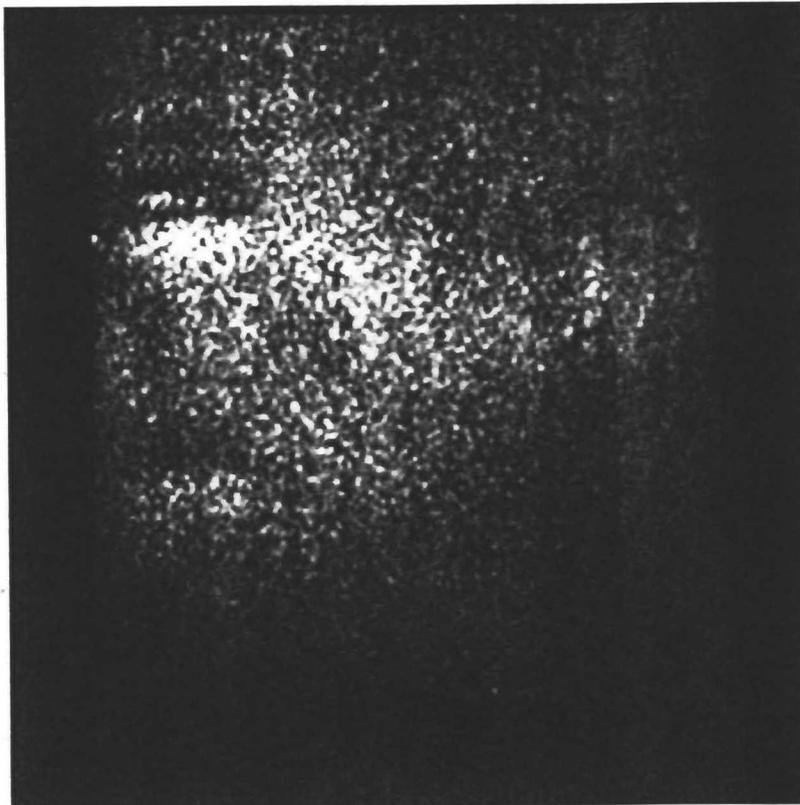


b) Dehn- und Labyrinthbereich

**Bild 55:** Shearogramme vom elastomeren Stumpfstoß (Probe Nr. 30; vgl. Tabelle 9) in einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt ohne Unterdruck im Hohlkörper, Aufnahme bei 35°C. Fehlstellen treten nicht mehr so deutlich in Erscheinung wie bei 20°C (vgl. Bild 52)

t = 4 mm

t = 6 mm

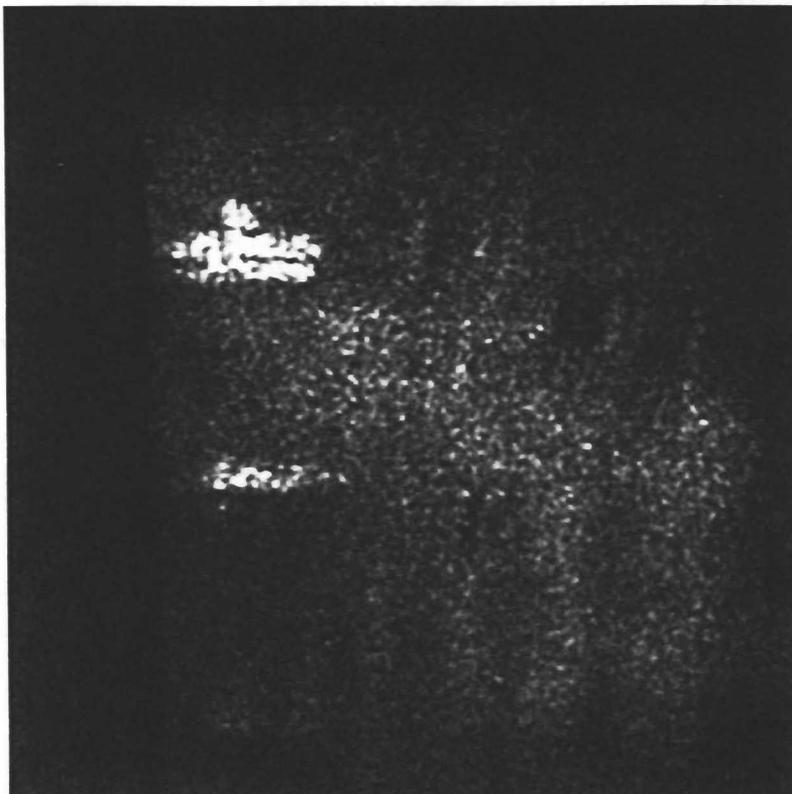


Scherrichtung

a) Aufnahme bei +20°C

t = 2 mm

t = 4 mm



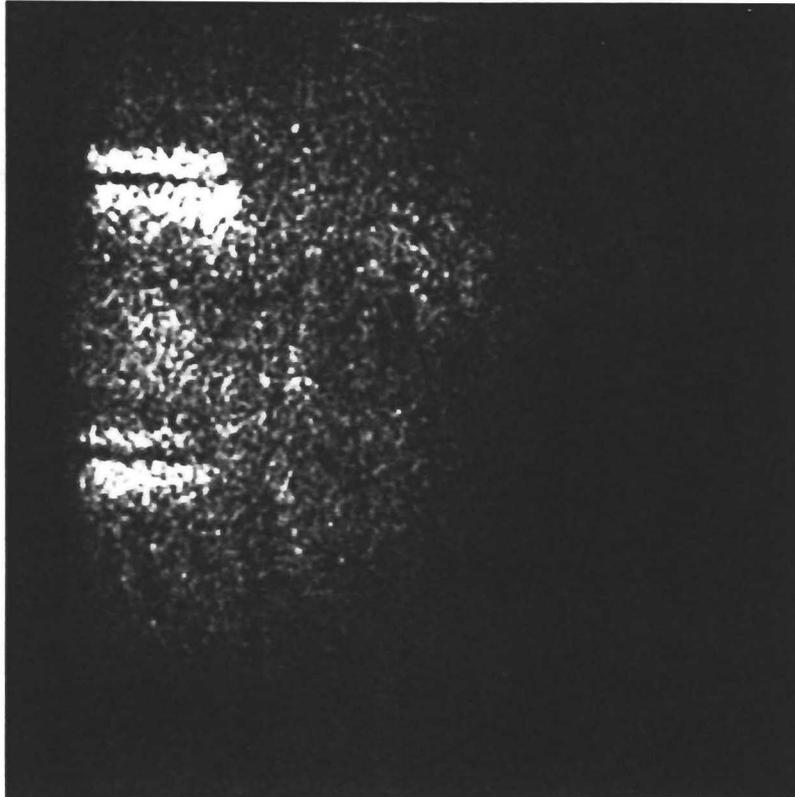
Scherrichtung

b) Aufnahme bei +35°C

**Bild 56:** Shearogramme vom thermoplastischen Quader mit Fehlstellen von 1 mm Durchmesser, aufgenommen bei +20°C und +35°C  
Bei beiden Temperaturen sind die Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung t = 4 mm ortbar

t = 2 mm

t = 4 mm

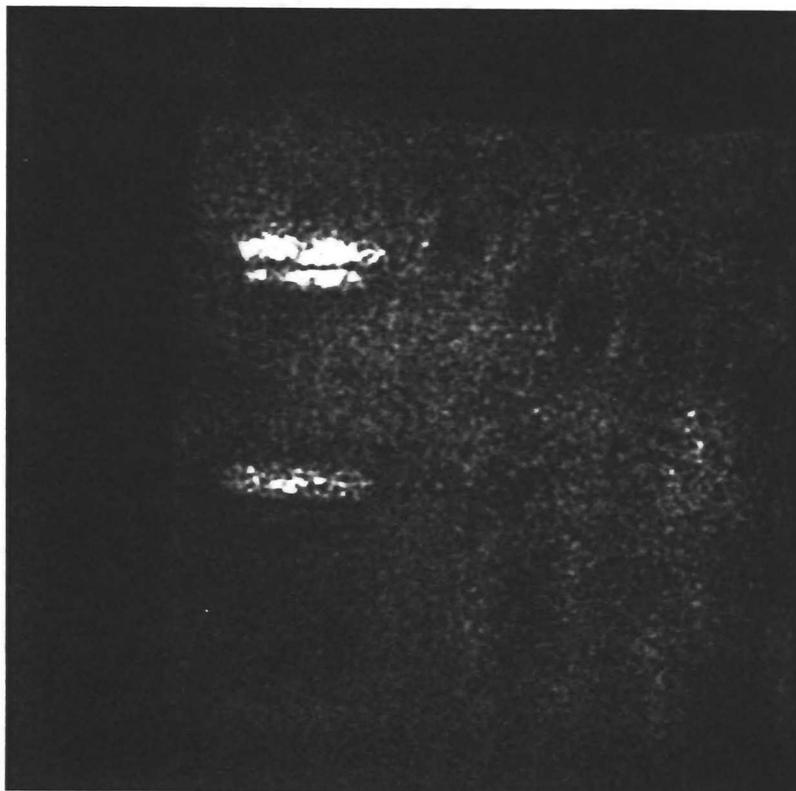


Scherrichtung

a) Aufnahme bei +20°C

t = 2 mm

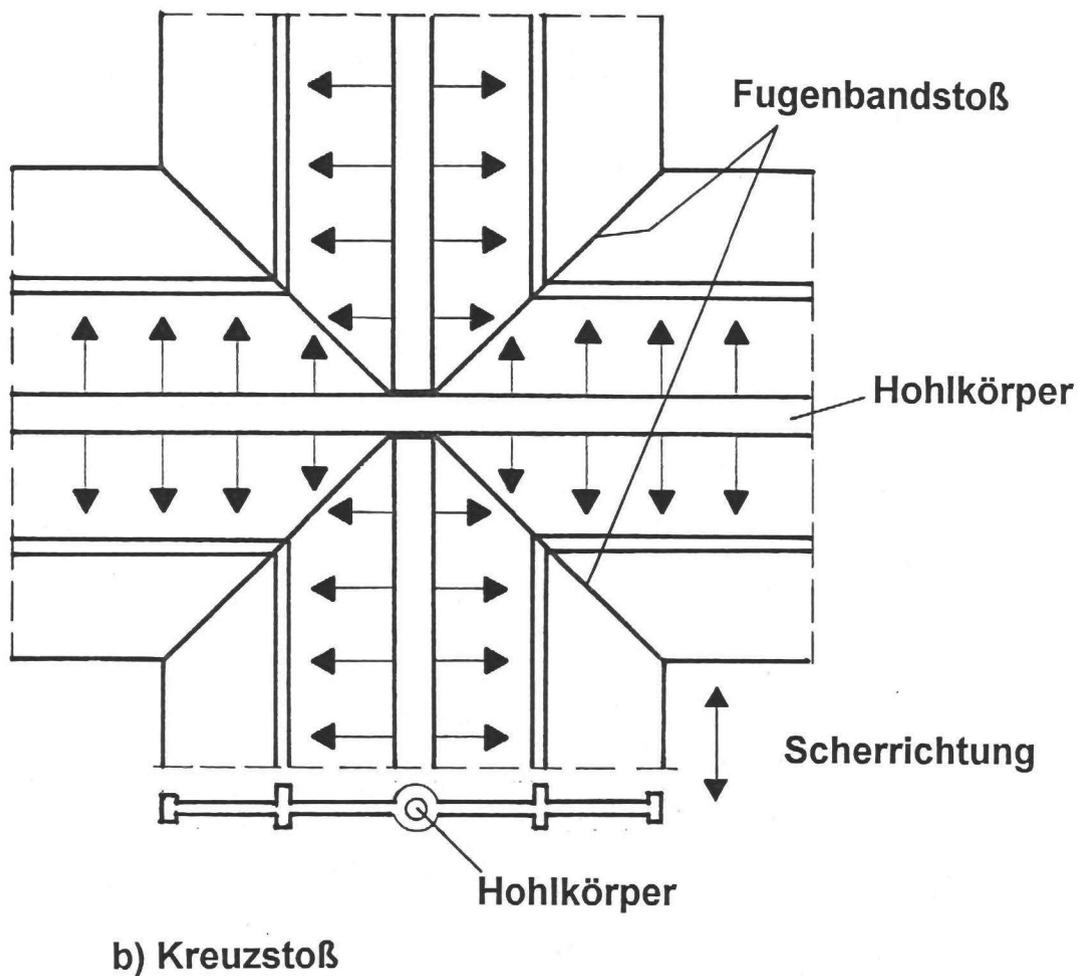
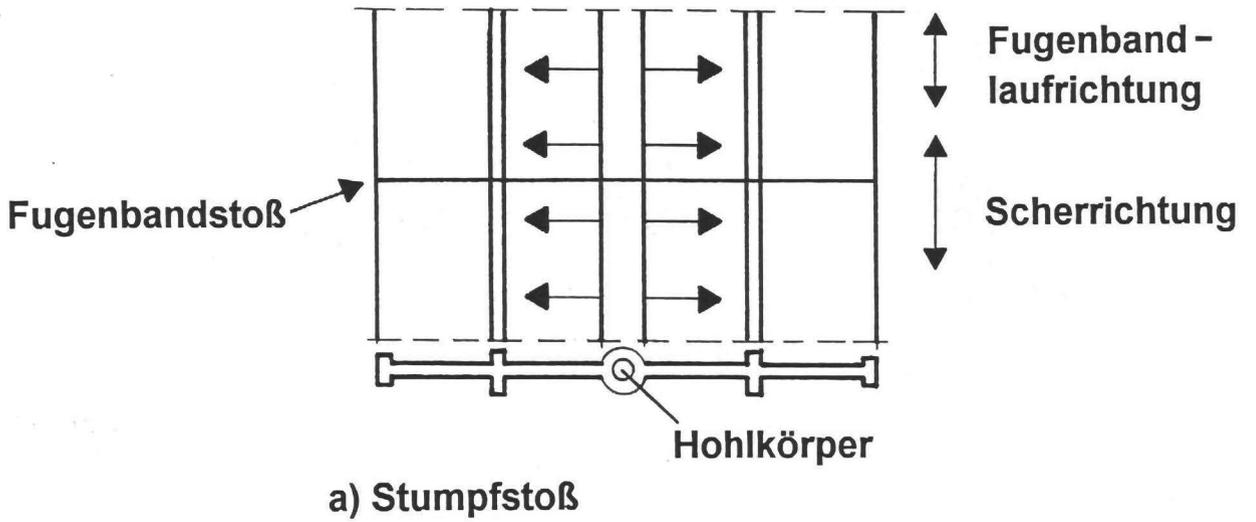
t = 4 mm



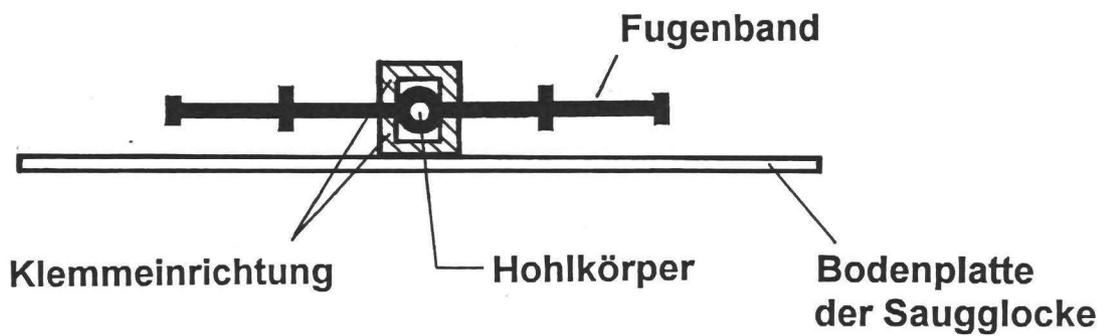
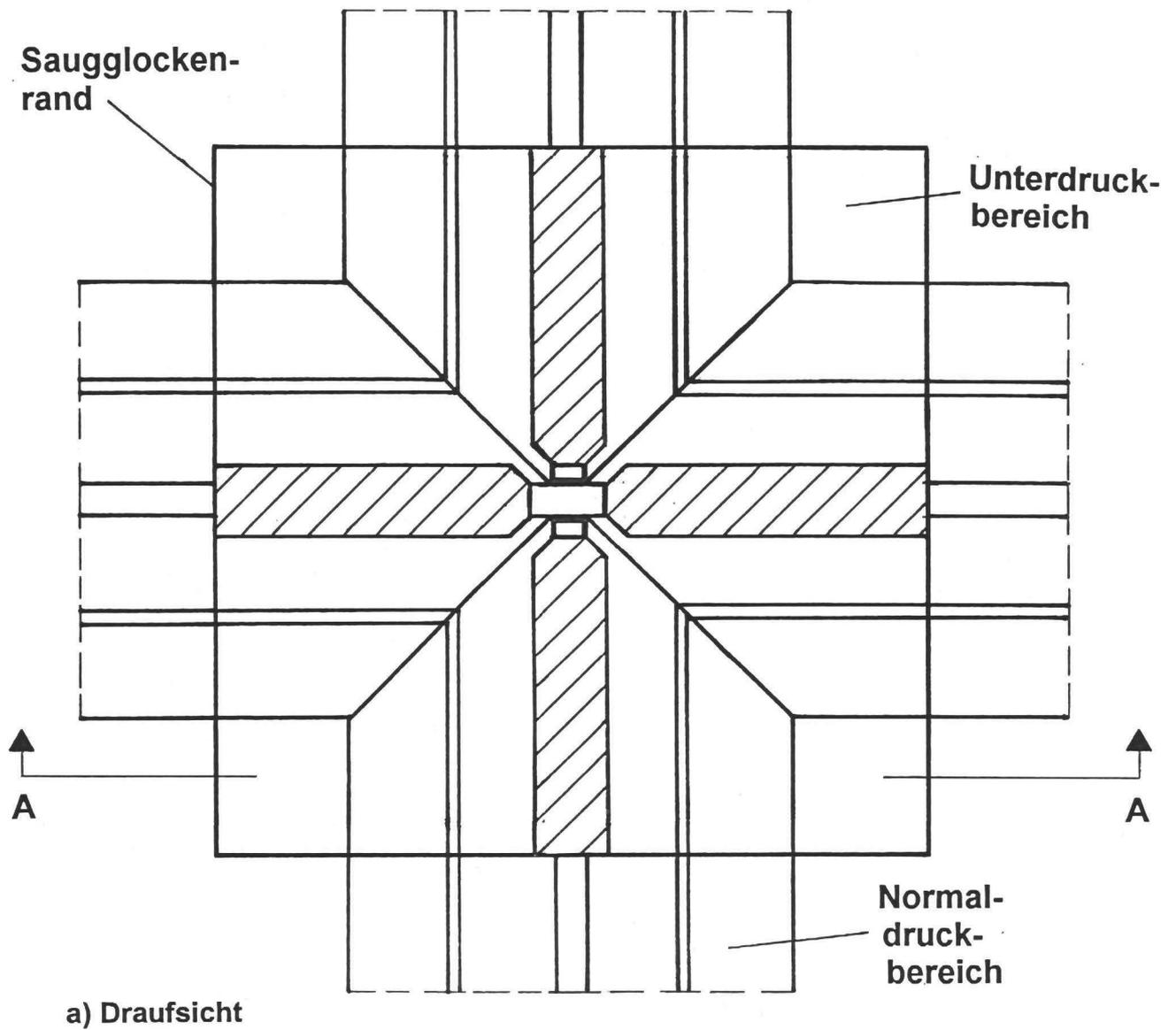
Scherrichtung

b) Aufnahme bei +35°C

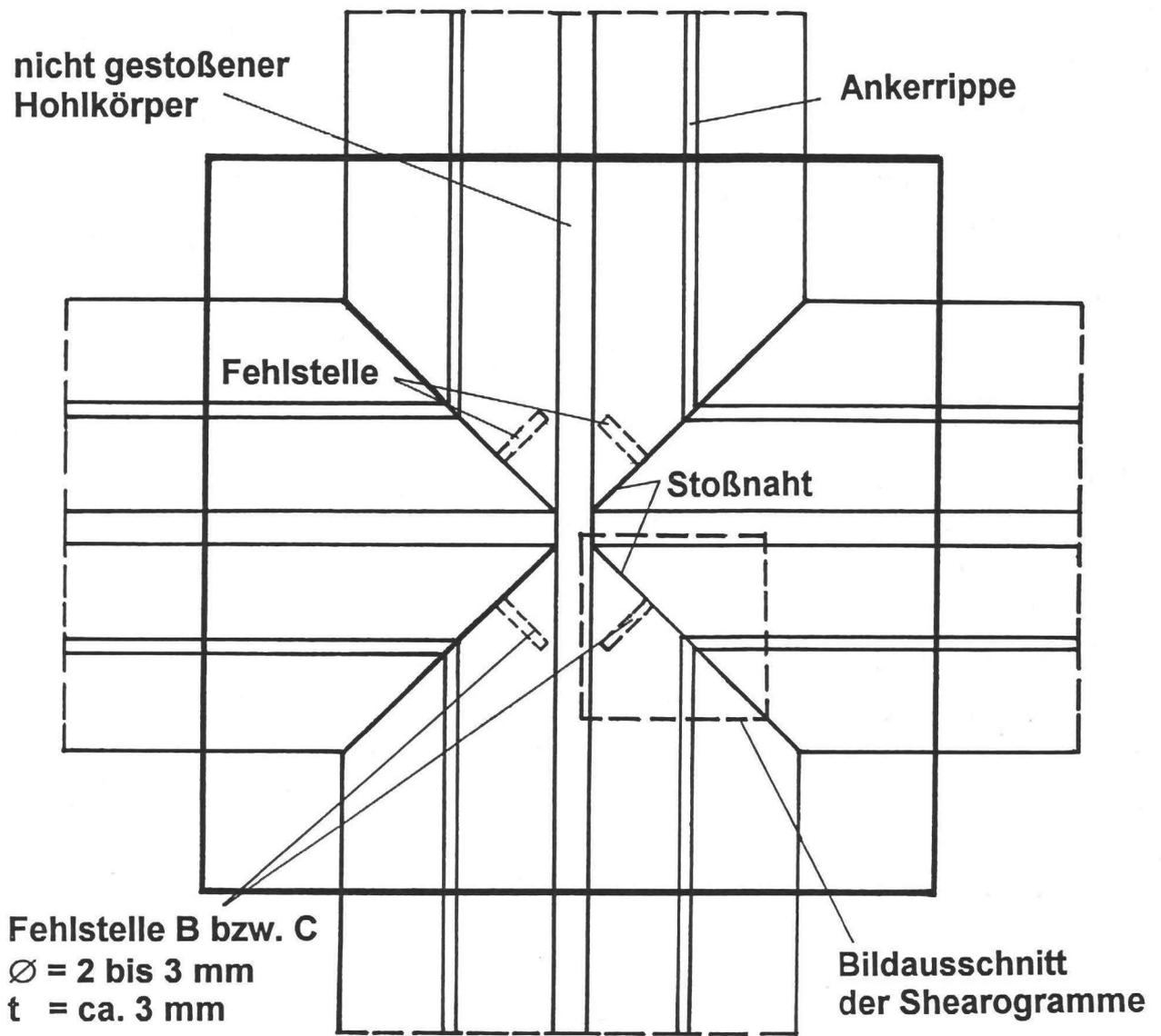
**Bild 57:** Shearogramme vom Elastomerquader mit Fehlstellen von 2 mm Durchmesser, aufgenommen bei +20°C und +35°C  
Bei beiden Temperaturen sind die Fehlstellen bis zur Materialüberdeckung t = 4 mm ortbar



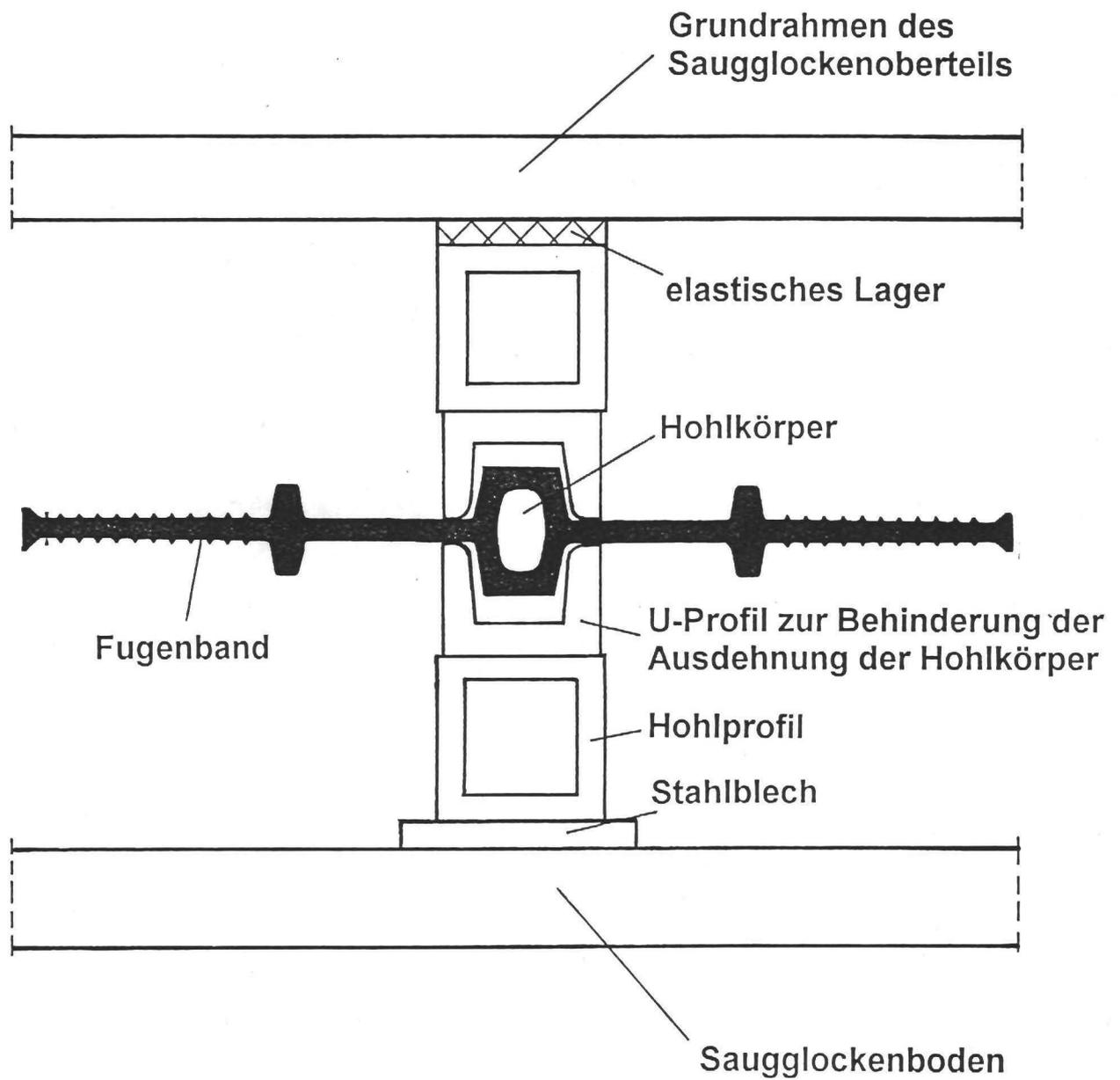
**Bild 58:** Auswirkungen der Hohlkörperausdehnung auf die Fugenbandverformung bei verschiedenen Fugenbandstößen



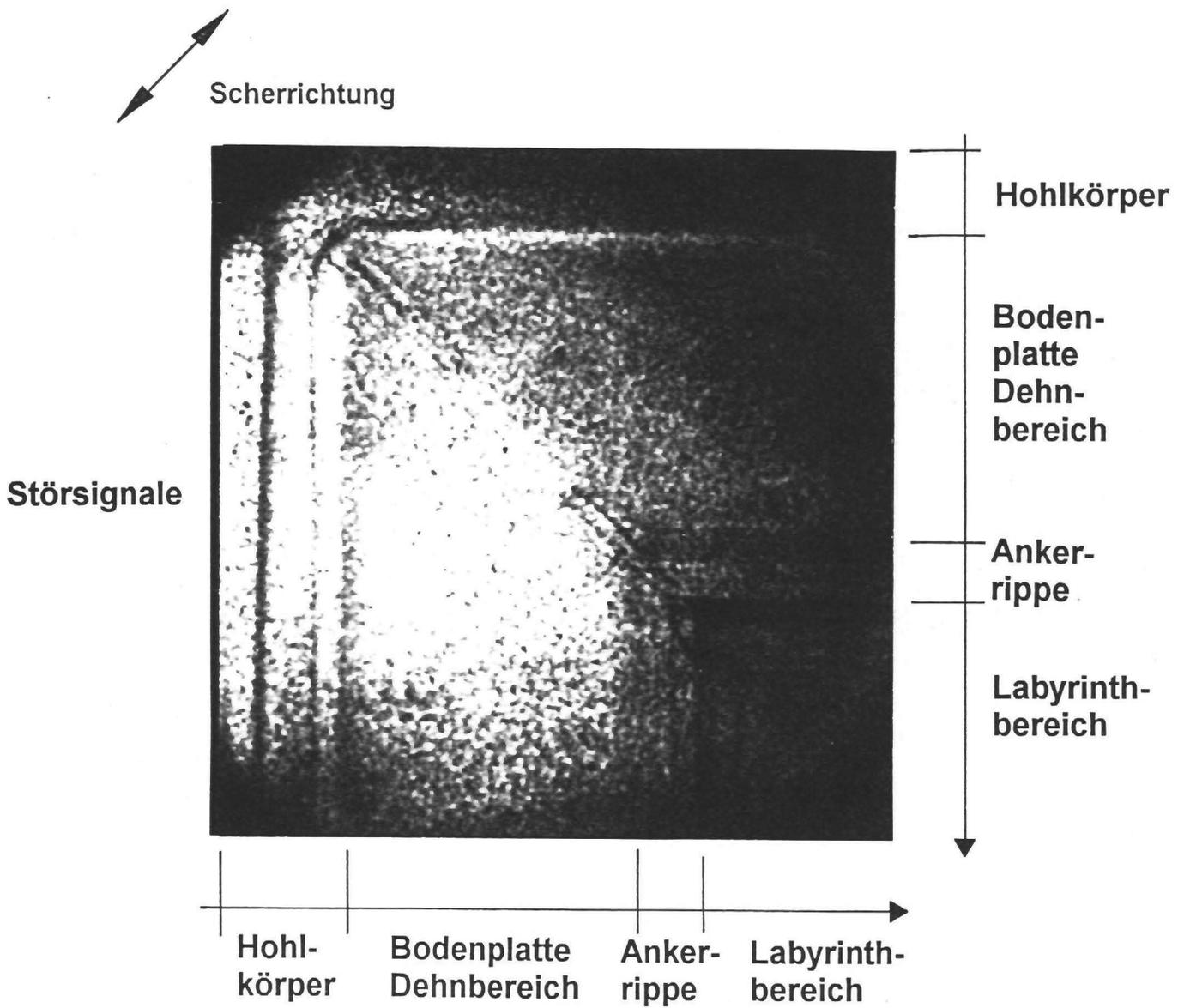
**Bild 59:** Klemmeinrichtung zur Verhinderung seitlicher Ausdehnungen des Hohlkörpers



**Bild 60:** Anordnung der Fehlstellen im thermoplastischen Kreuzstoß und Bildausschnitt der Shearogramme

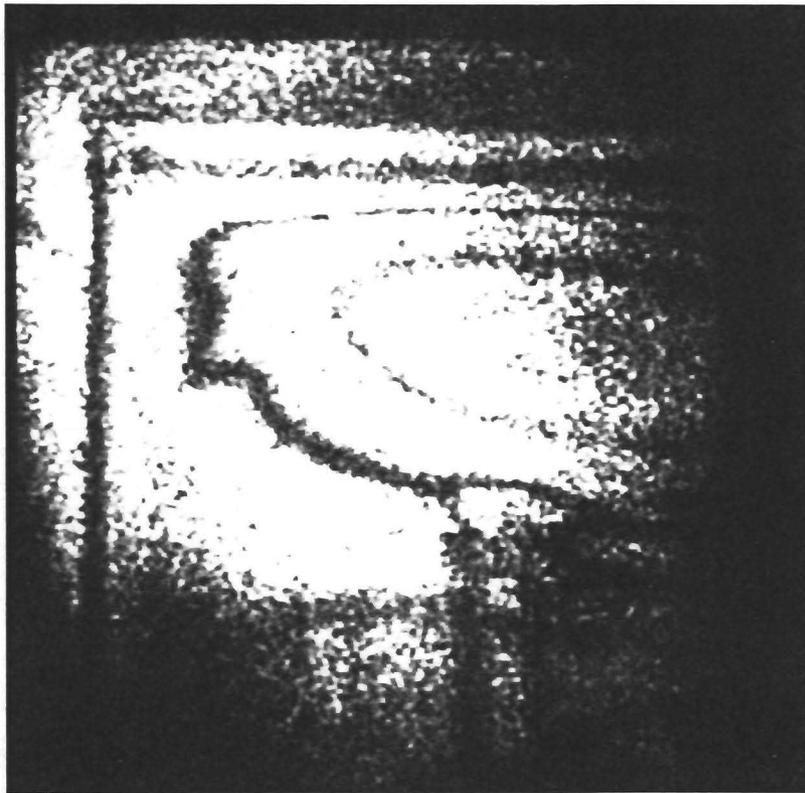


**Bild 61:** Prinzip der gewählten Hohlkörpereinklemmung im Saugglockenbereich



**Bild 62:** Beispiel für ein Shearogramm von einem thermoplastischen T-Stoß (Probe Nr. 28, vgl. Tabelle 9). Jeder der drei Fugenbandabschnitte des T-Stoßes ragt aus der Saugglocke heraus. Es sind nur Störsignale erkennbar

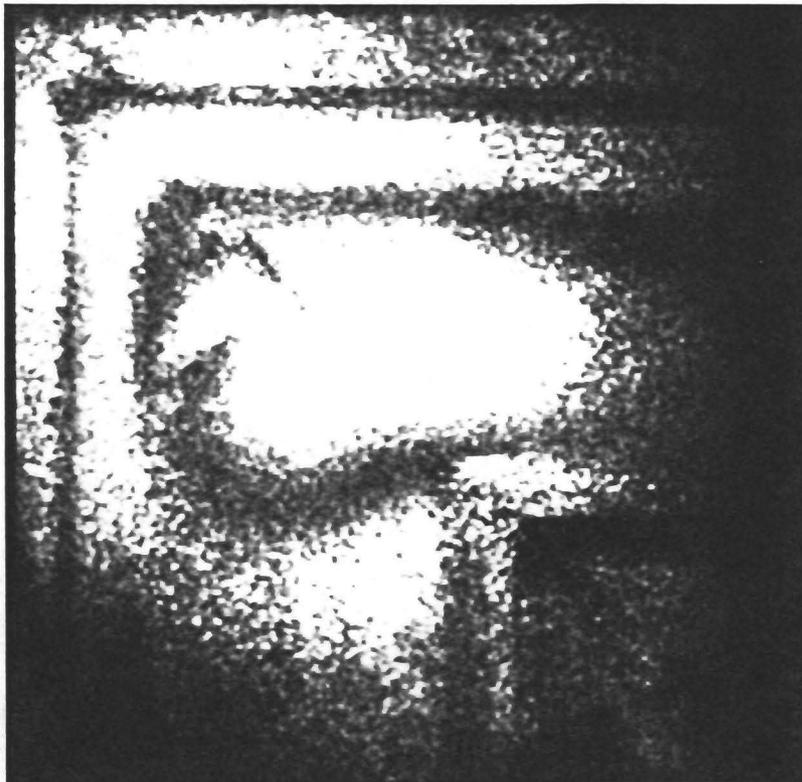
Störsignale



Scherrichtung

a) Scherrichtung parallel zum Hohlkörper, Scherbetrag ca. 5 mm

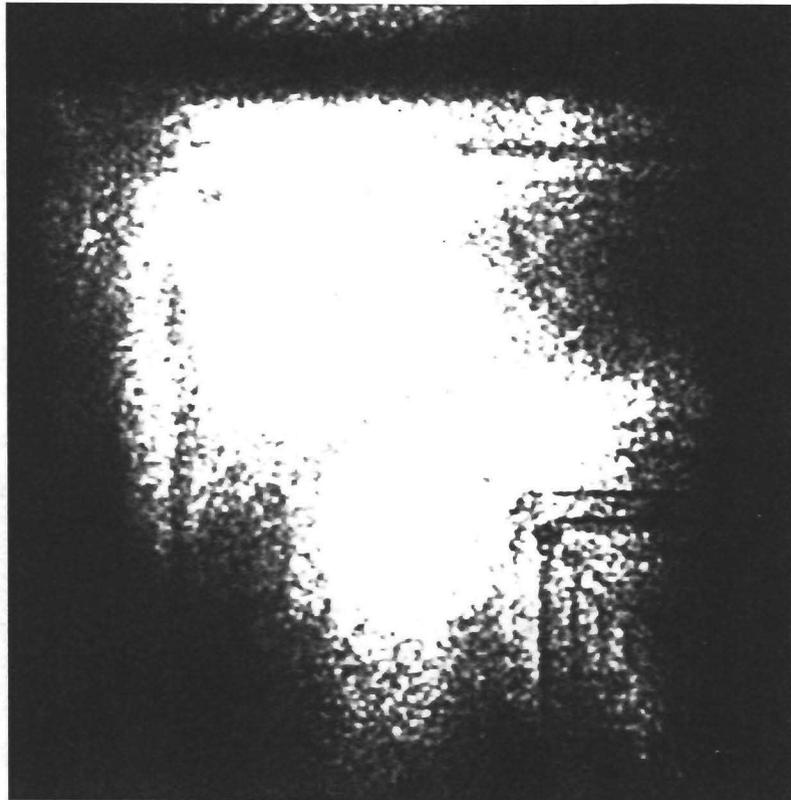
Störsignale



Scherrichtung

b) Scherrichtung parallel zur Stoßnaht, Scherbetrag ca. 2,5 mm

**Bild 63:** Shearogramme vom thermoplastischen Kreuzstoß (Probe Nr. 29, vgl. Tabelle 9) ohne Unterdruck im Hohlkörper. Jeder der vier Fugenbandabschnitte des Kreuzstoßes ragt aus der Saugglocke heraus. Auch bei veränderten Scherparametern ist aufgrund starker Störsignale keine Fehlstelle ortbar.



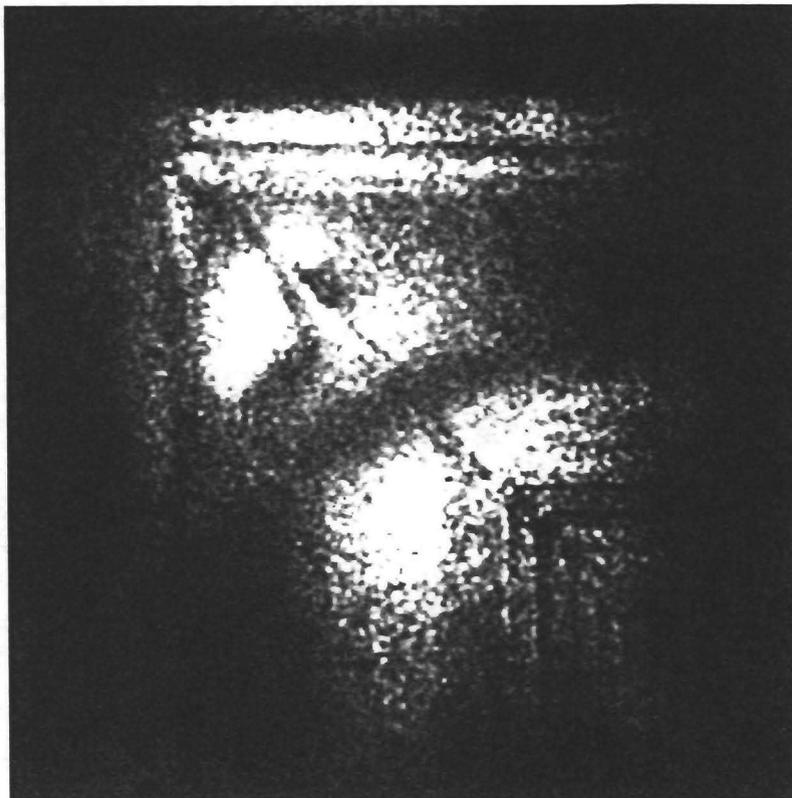
Scherrichtung

**Bild 64:** Shearogramm vom thermoplastischen Kreuzstoß (Probe Nr. 29, vgl. Tabelle 9) mit Unterdruck von 50 mbar im Hohlkörper. Jeder der vier Fugenbandabschnitte des Kreuzstoßes ragt aus der Saugglocke heraus. Bei Grundeinstellung der Versuchsparameter sind nur Störsignale erkennbar.

Stör-  
signale →

Fehl-  
stelle →

Stör-  
signale →

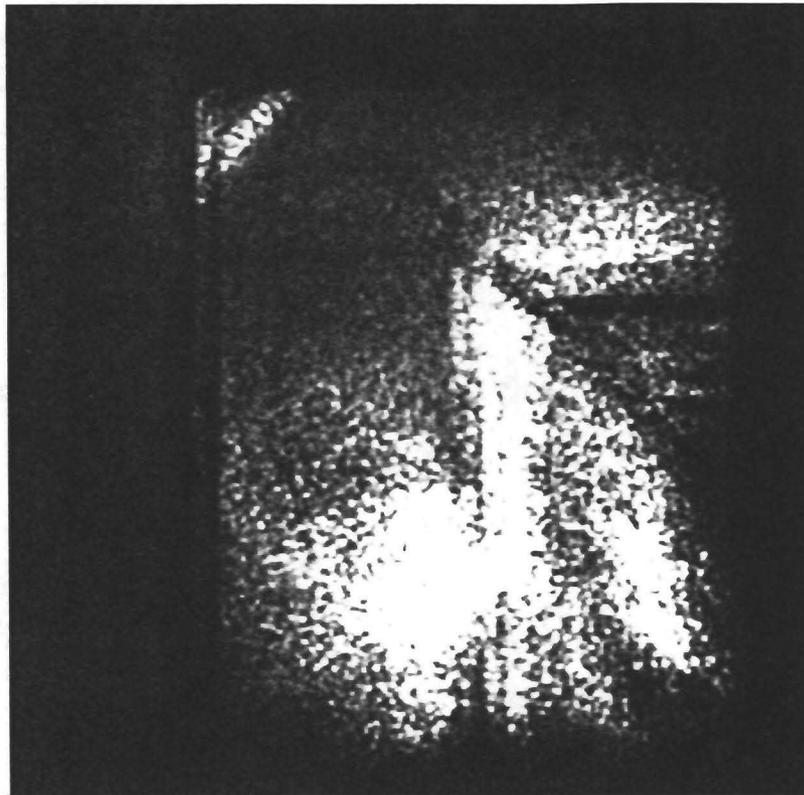


Scherrichtung

**Bild 65:** Shearogramm vom thermoplastischen Kreuzstoß (Probe Nr. 29, vgl. Tabelle 9) mit Unterdruck von 25 mbar im Hohlkörper. Jeder der vier Fugenbandabschnitte des Kreuzstoßes ragt aus der Saugglocke heraus. Durch Halbierung des Unterdrucks wird die Fehlstelle im Dehnbereich sichtbar (vgl. Bild 64). Störsignale täuschen jedoch weitere Fehlstellen vor.

Fehl-  
stelle →

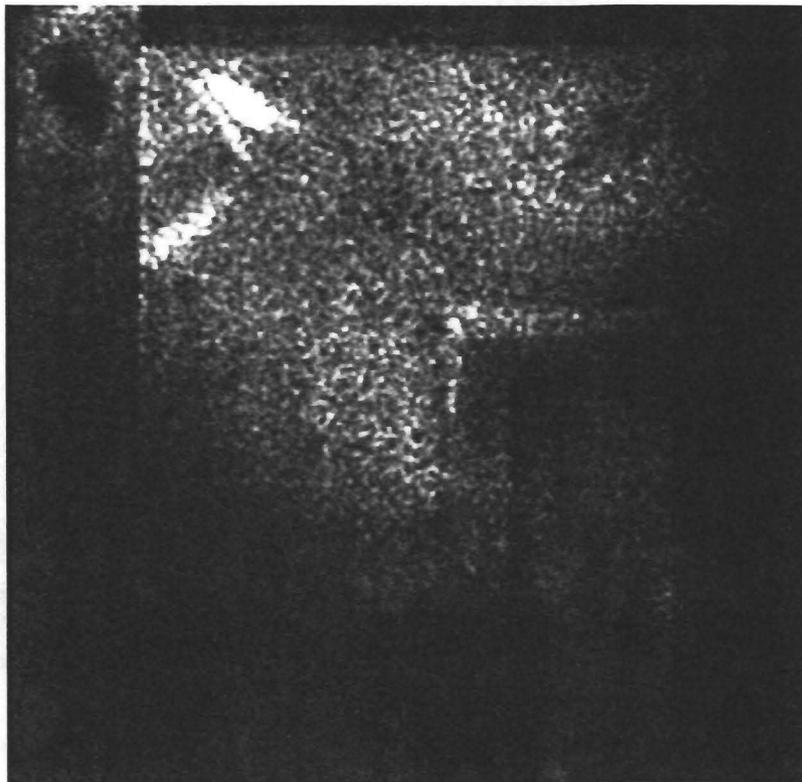
Stör-  
signale →



↕  
Scher-  
richtung

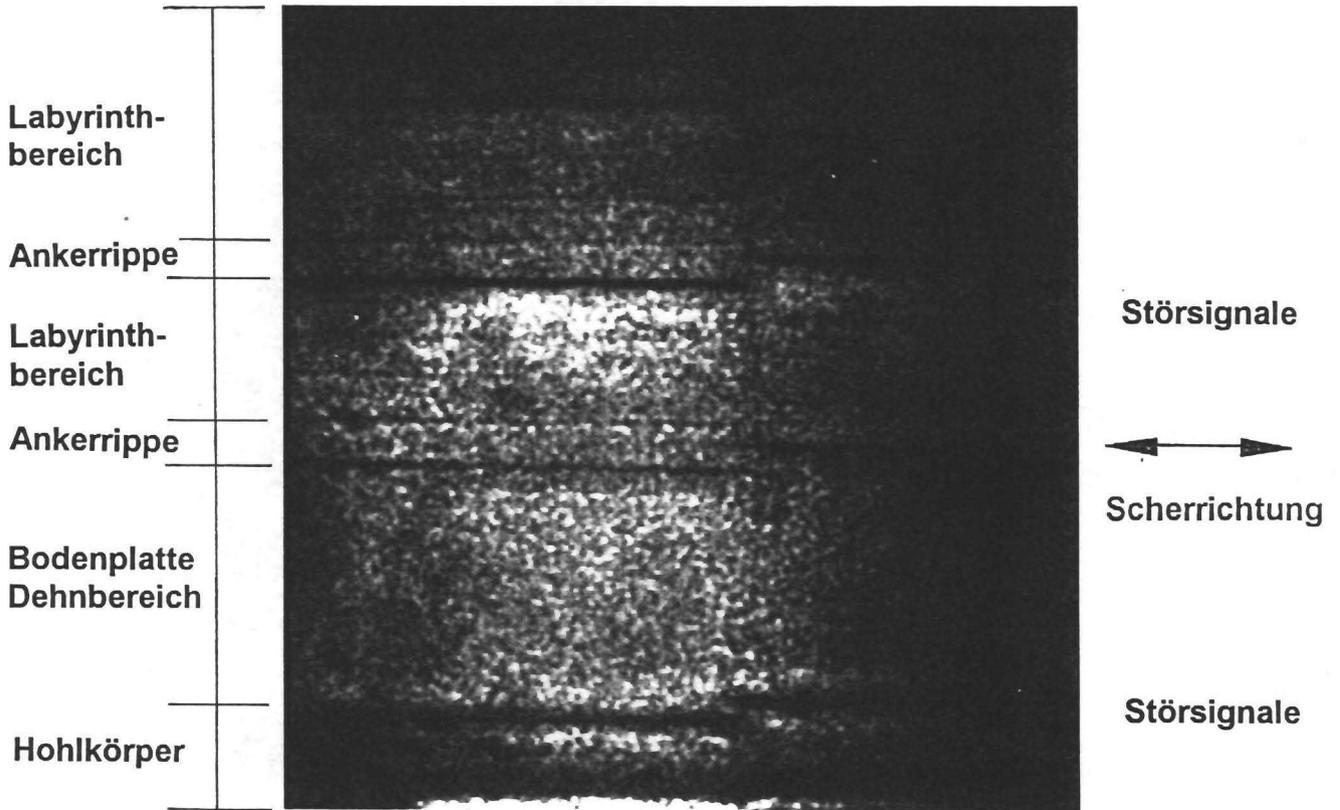
**Bild 66:** Shearogramm vom thermoplastischen Kreuzstoß (Probe Nr. 29, vgl. Tabelle 9) mit Hohlkörpereinklemmung im Saugglockenbereich nach Bild 61, jedoch ohne Unterdruck im Hohlkörper. Jeder der vier Fugenbandabschnitte des Kreuzstoßes ragt aus der Saugglocke heraus. Fehlstelle im Dehnbereich ist ortbar; Störsignale täuschen jedoch weitere Fehlstellen vor.

Fehl-  
stelle →

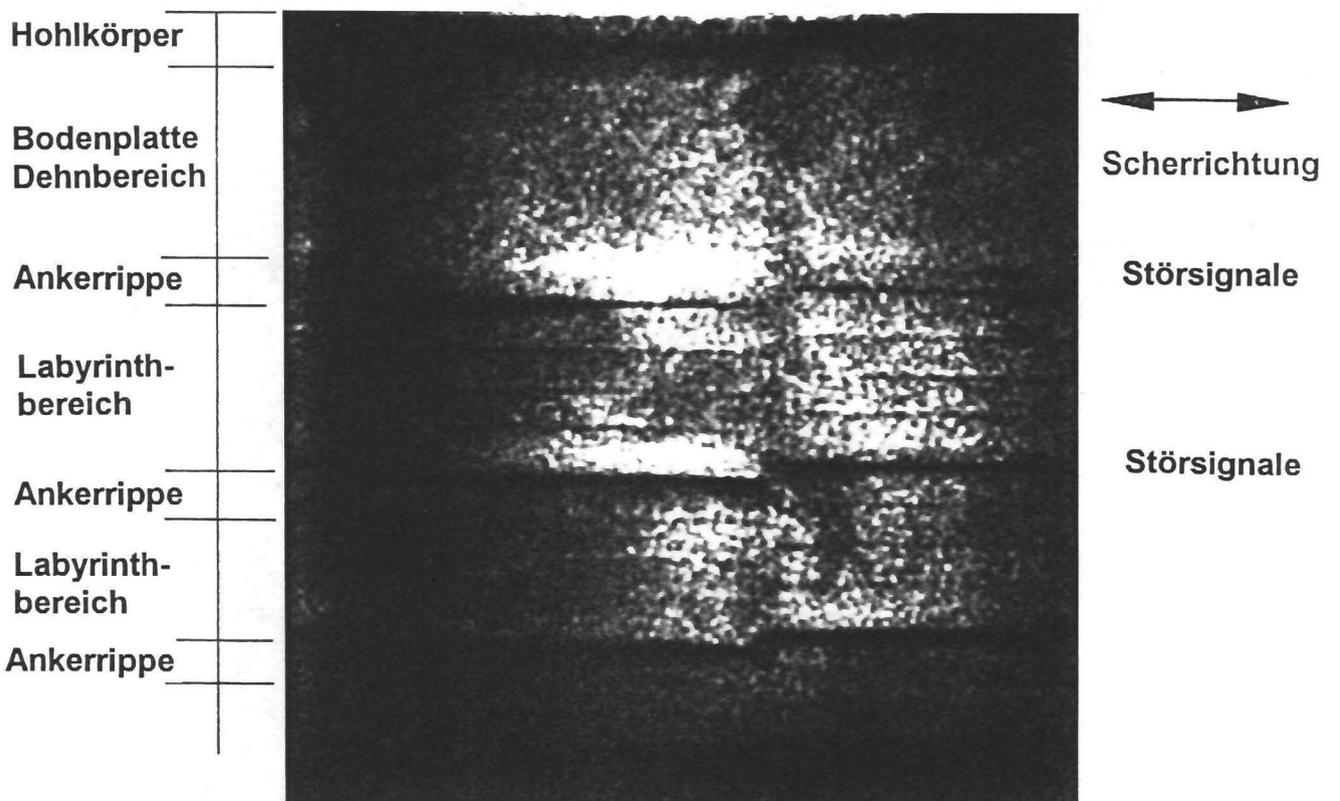


↔  
Scher-  
richtung

**Bild 67:** Shearogramm vom thermoplastischen Kreuzstoß (Probe Nr. 29, vgl. Tabelle 9) mit Unterdruck im Hohlkörper und Hohlkörpereinklemmung im Saugglockenbereich nach Bild 61 (vgl. Bild 66). Jeder der vier Fugenbandabschnitte des Kreuzstoßes ragt aus der Saugglocke heraus. Fehlstelle im Dehnbereich ist ortbar, kaum Störsignale.

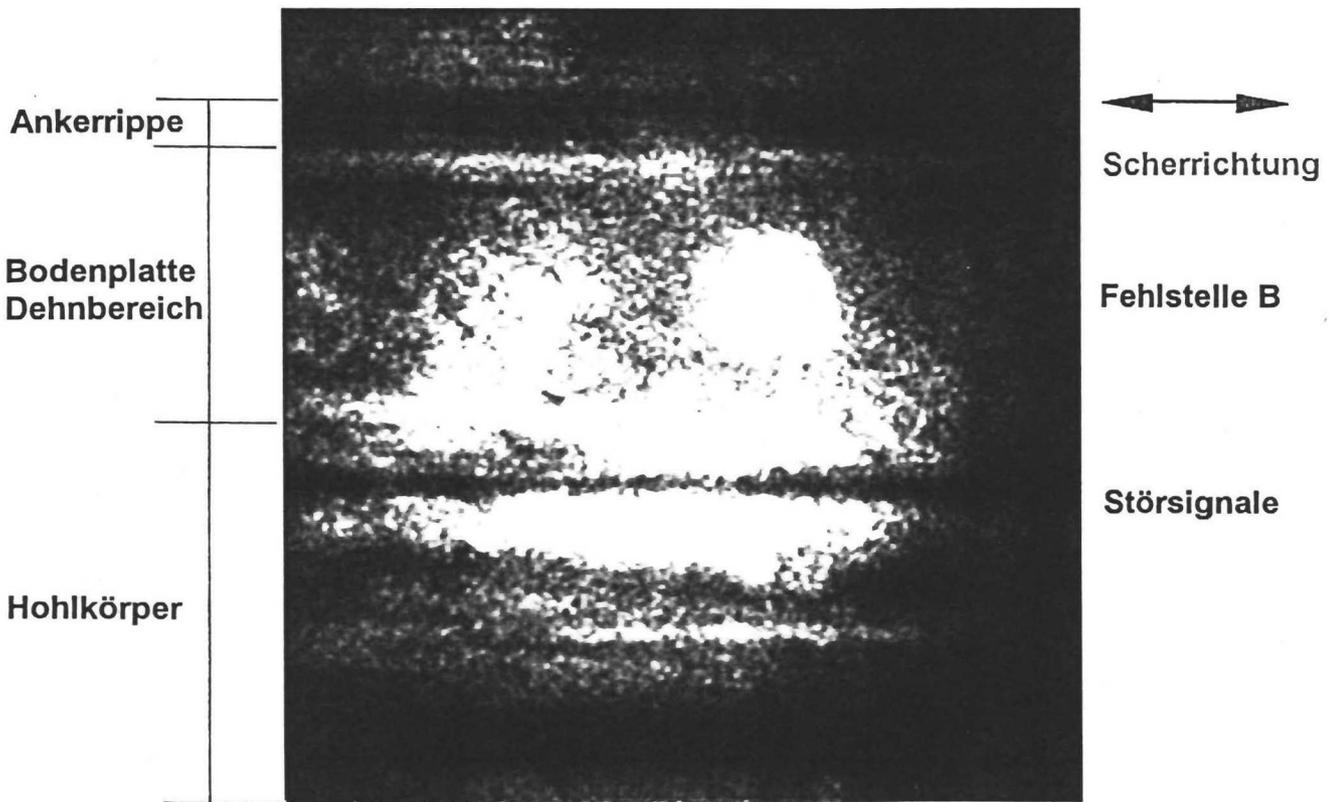


a) Nördliche Fugenbandseite

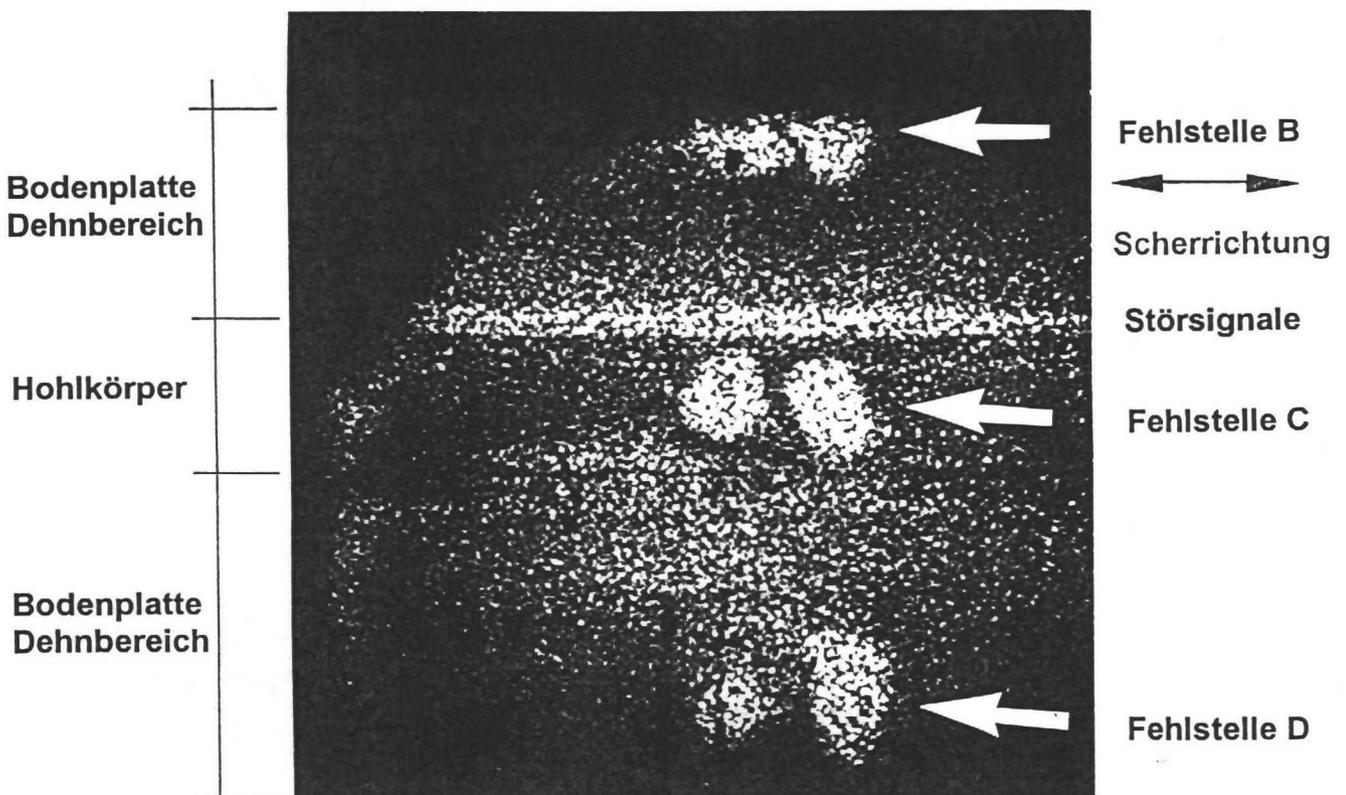


b) Südliche Fugenbandseite

**Bild 68:** Shearogramme vom thermoplastischen Baustellenstoß  
Keine Fehlstellen sichtbar, da der Stoß fehlerfrei ausgeführt wurde. Störsignale vor allem im Bereich der Ankerrippen



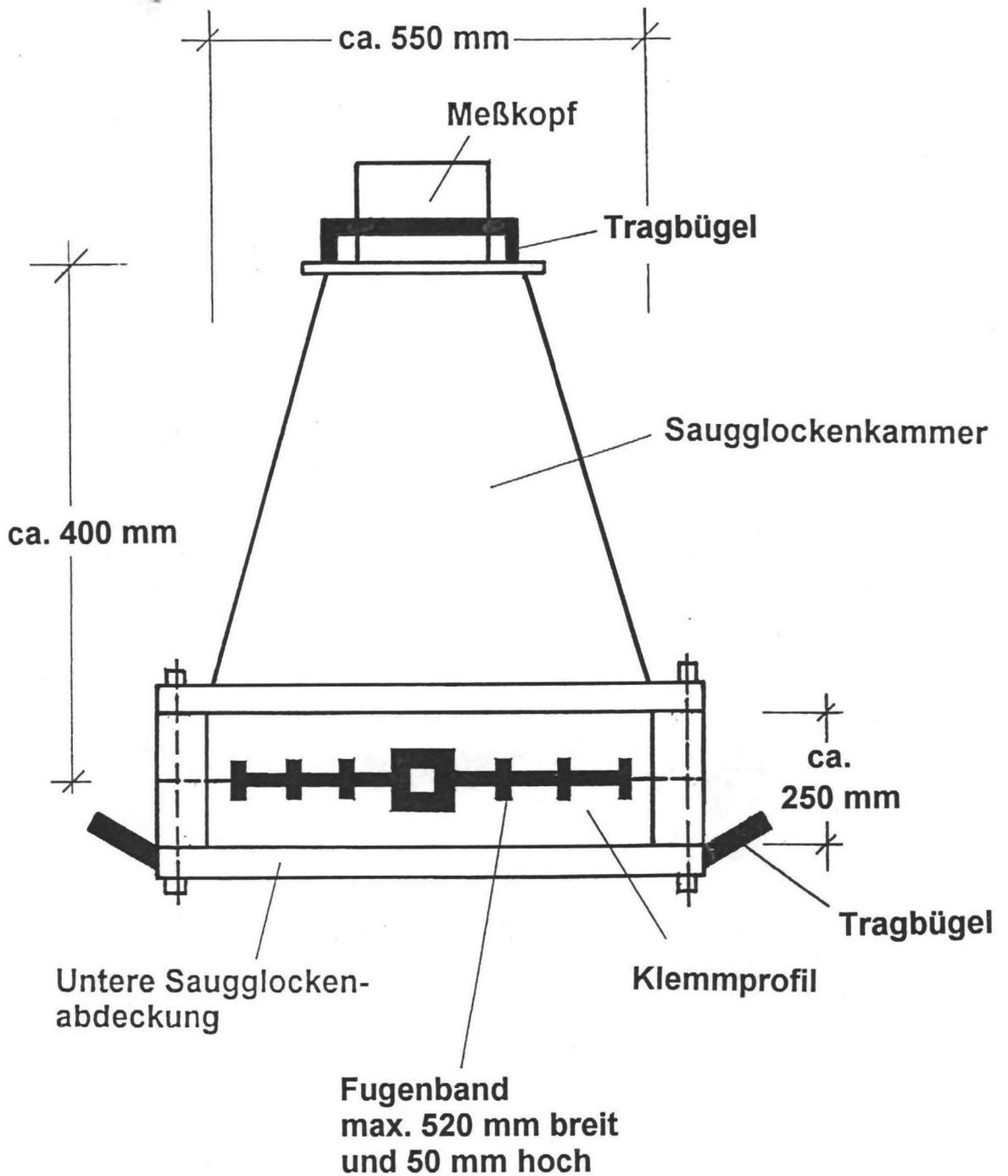
a) Aufnahme auf der Baustelle



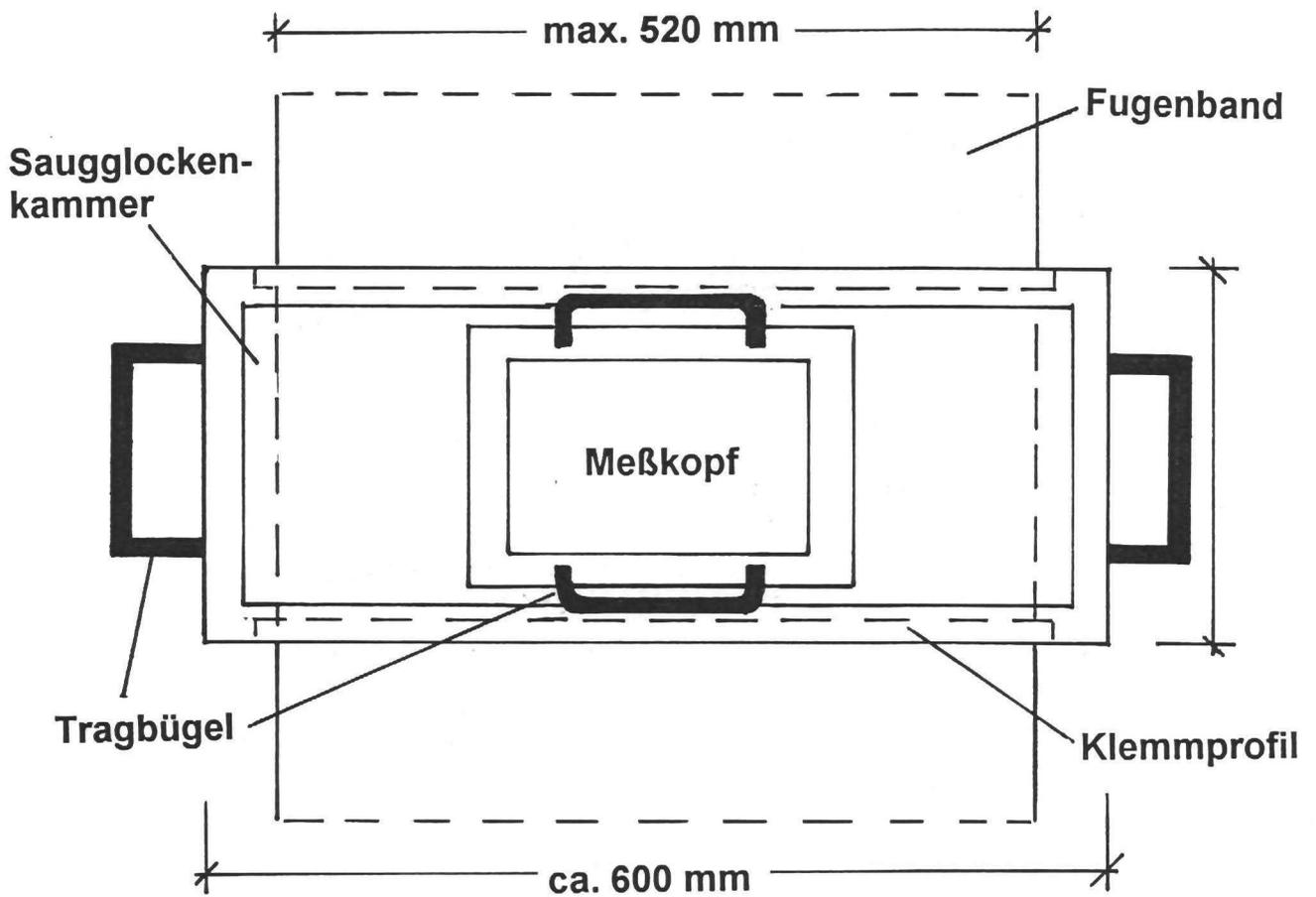
b) Aufnahme im Labor

**Bild 69:** Vergleich der Baustellen- und Labor-Shearogramme vom thermoplastischen Stumpfstoß mit präparierten Fehlstellen an einem ca. 80 cm langen Fugenbandabschnitt (Probe Nr. 27; vgl. Tabelle 9).

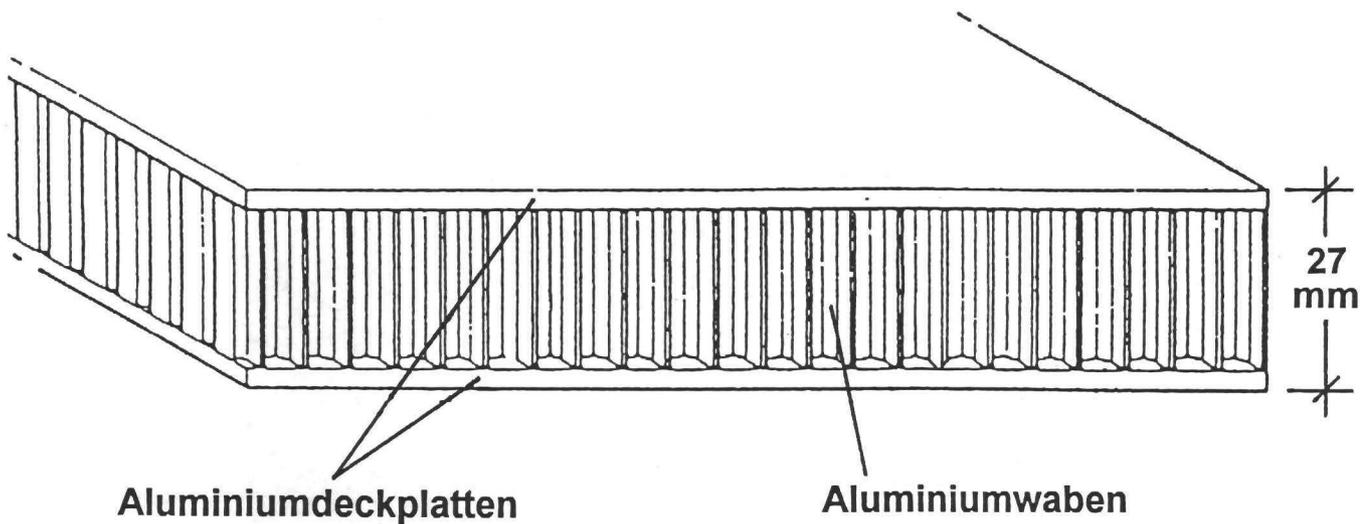
Im Labor konnten die Fehlstellen wesentlich besser geortet werden.



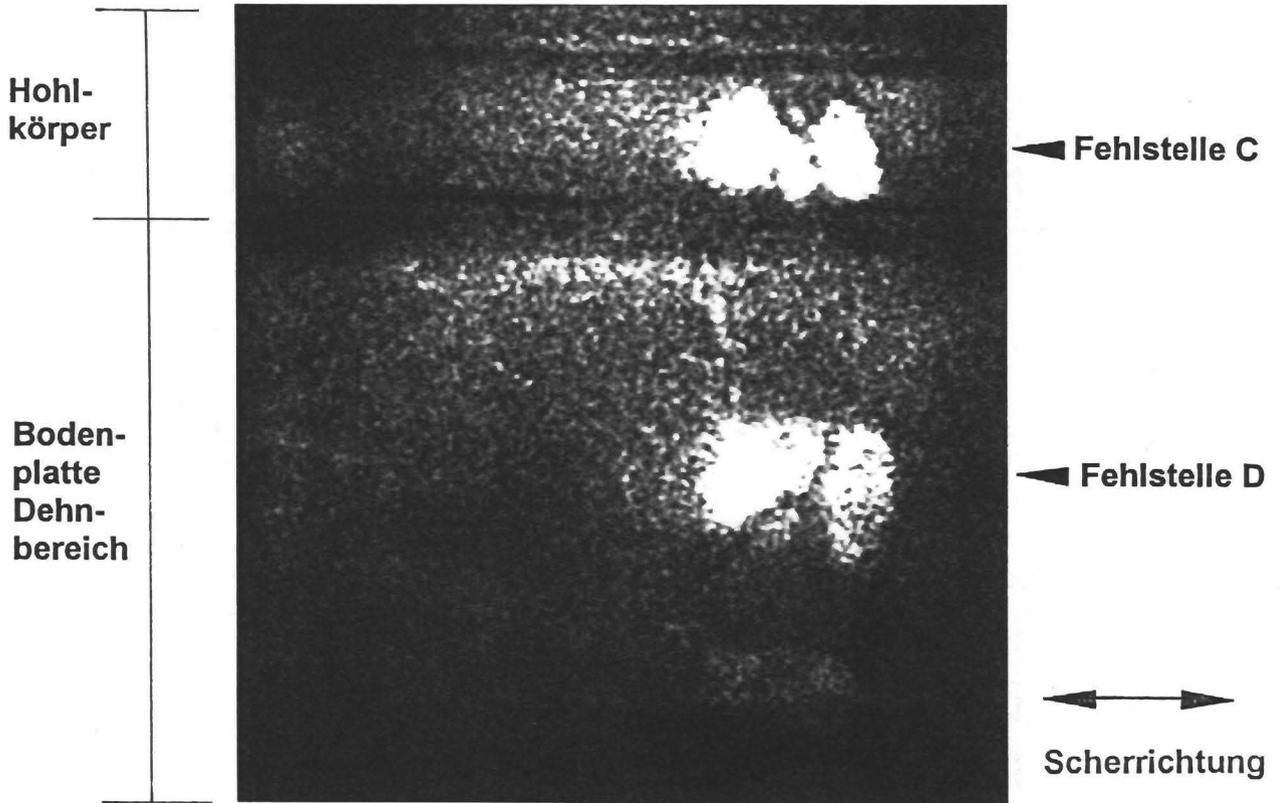
**Bild 70:** Baustellen-Saugglocke zur Prüfung von Stumpfstoßen in langen Fugenbändern auf Baustellen (Seitenansicht)



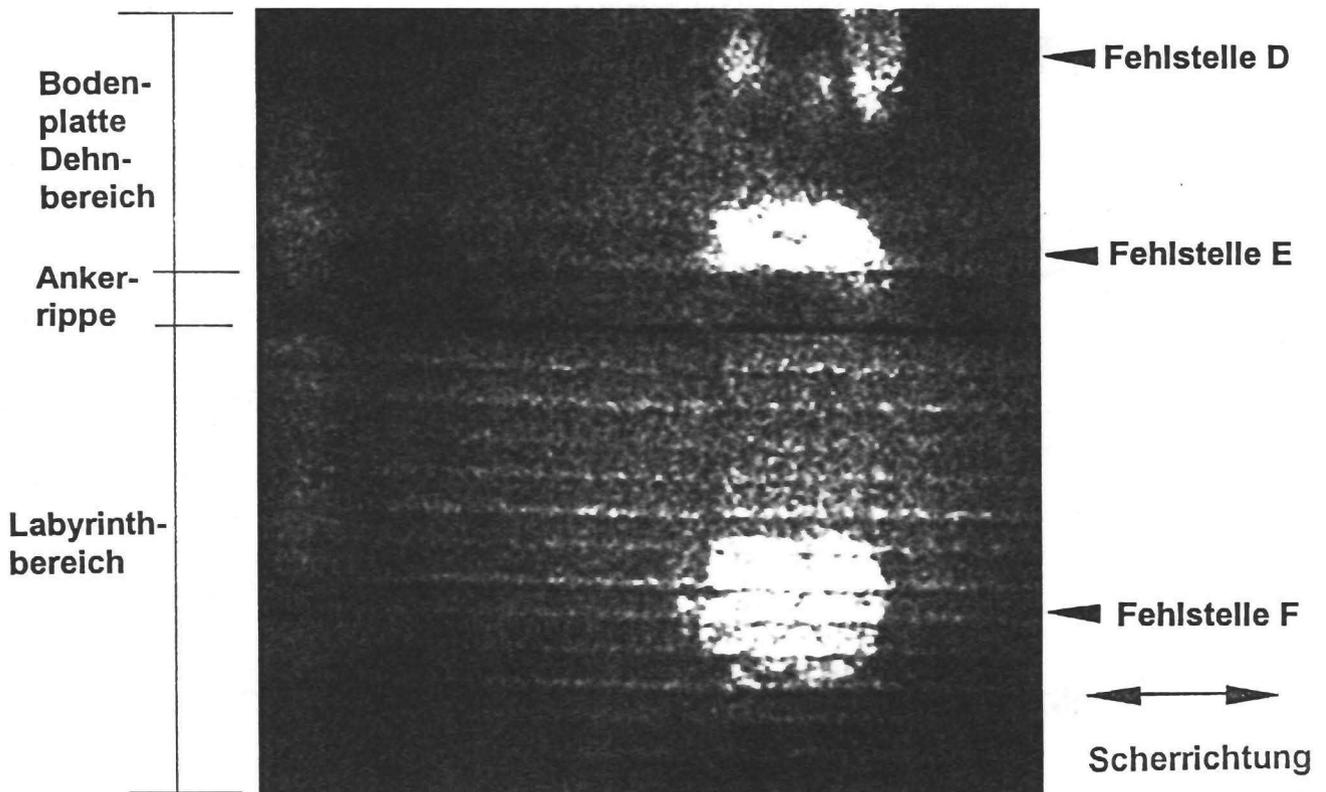
**Bild 71:** Baustellen-Saugglocke zur Prüfung von Stumpfstoßen in langen Fugenbändern auf Baustellen (Draufsicht)



**Bild 72:** Wandung des Saugglockenoberteils aus einer Aluminium-Wabenplatte

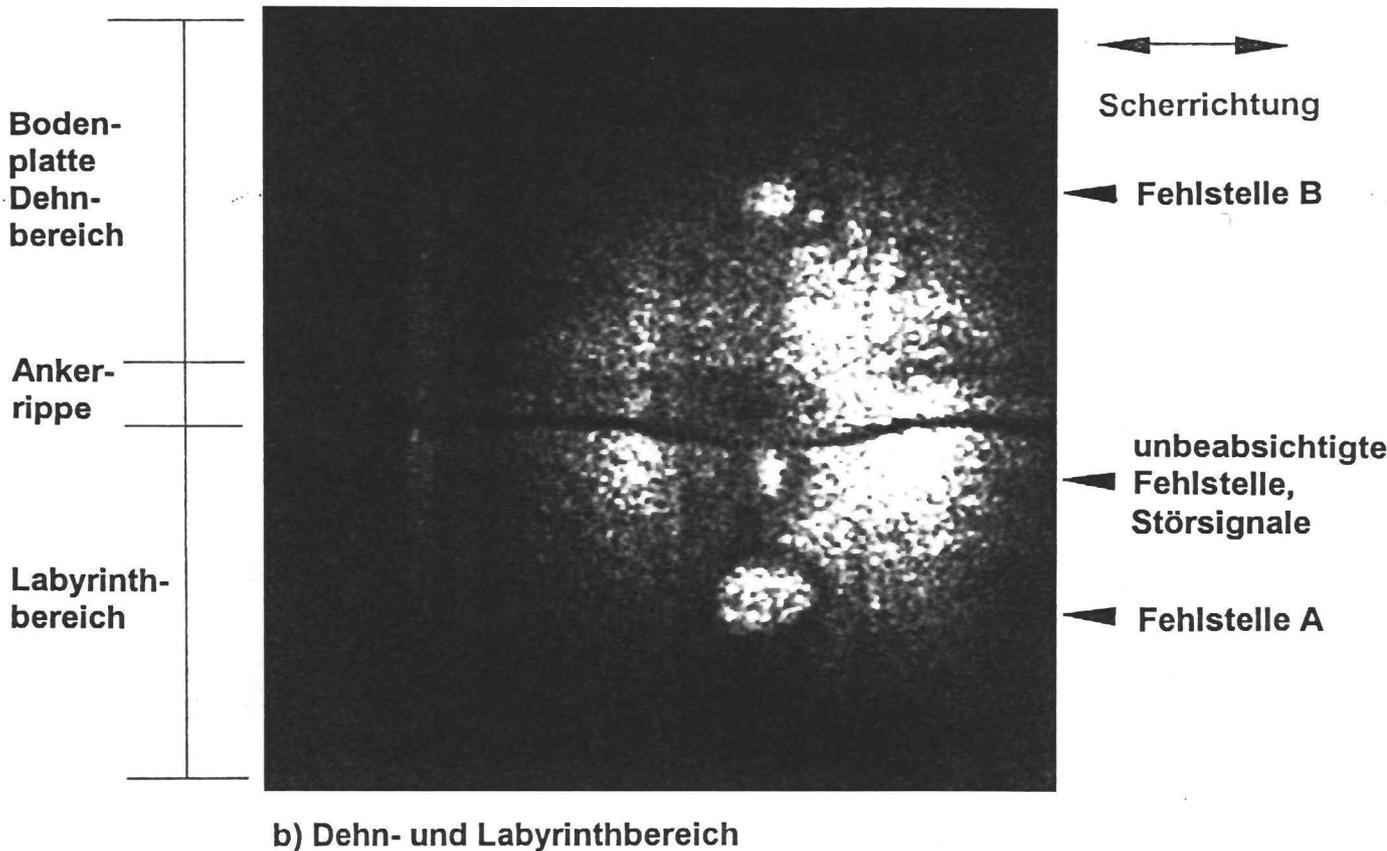
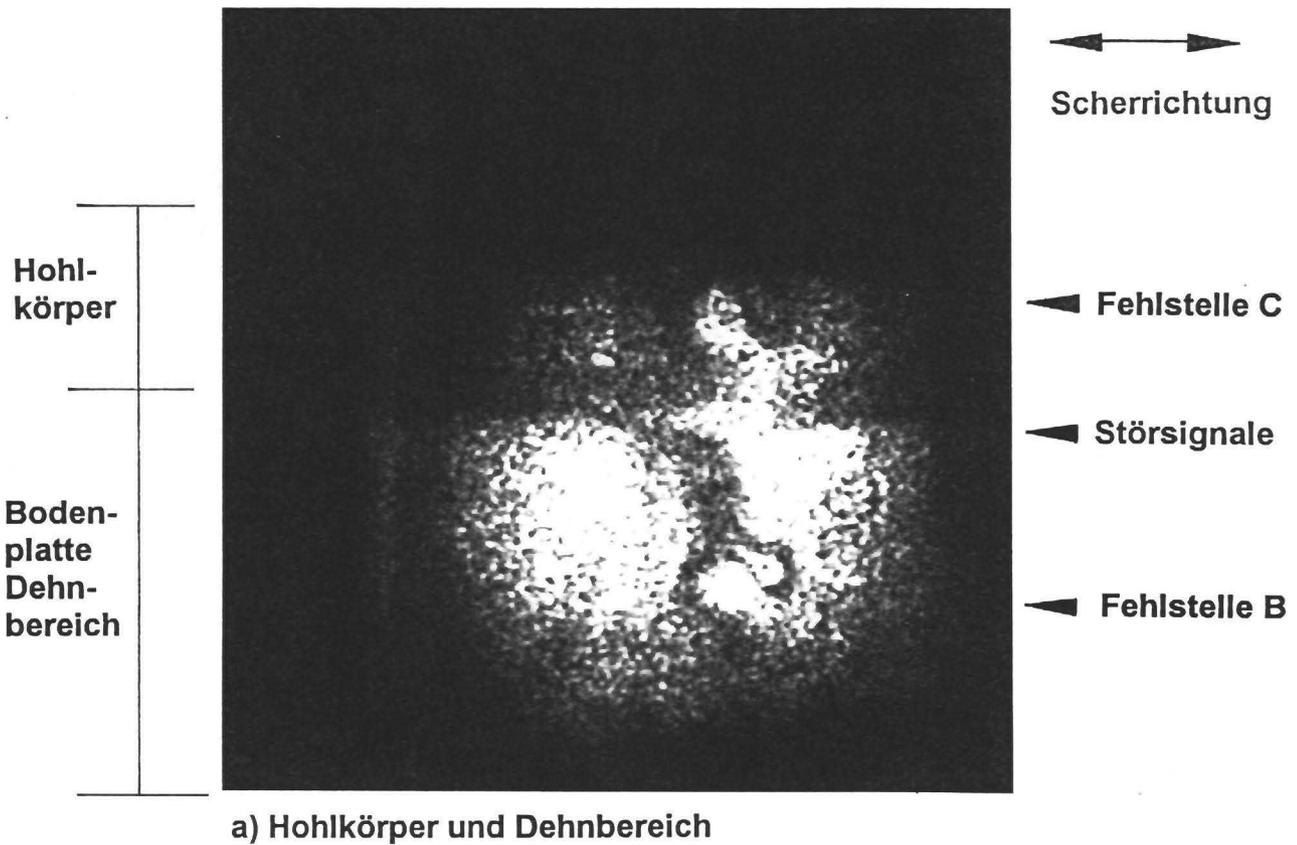


a) Hohlkörper und Dehnbereich

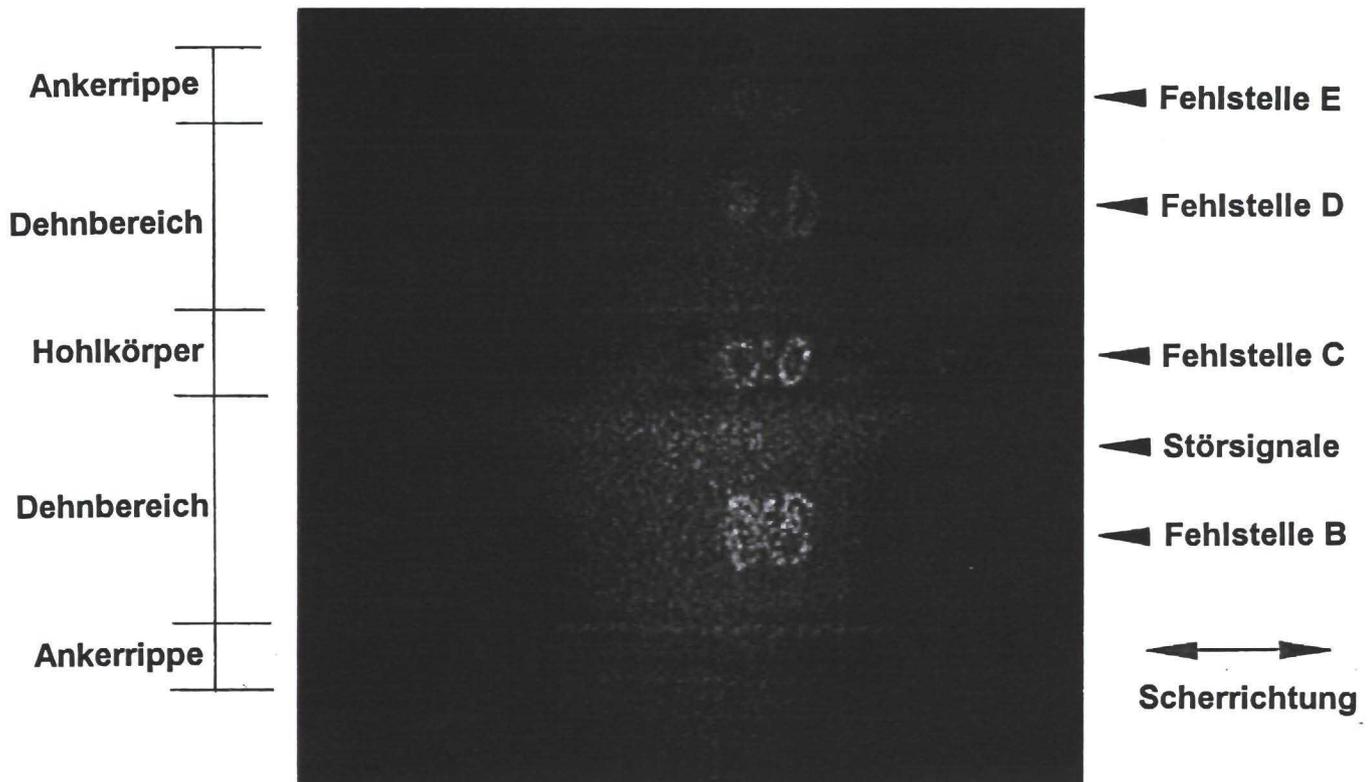


b) Dehn- und Labyrinthbereich

**Bild 73:** Shearogramme vom thermoplastischen Stumpfstoß (Probe Nr. 27; vgl. Tabelle 14) bei Verwendung der Baustellen-Saugglocke und Labormeßtechnik. Die flächigen Fehlstellen parallel zur Fugenbandebene im Hohlkörper, der Ankerrippe, dem Dehnenteil und dem Labyrinthbereich heben sich deutlich von den Störsignalen ab.



**Bild 74:** Shearogramme vom elastomeren Stumpfstoß (Probe Nr. 30; vgl. Tabelle 14) bei Verwendung der Baustellen-Saugglocke und Labormesstechnik. Die eingebauten flächigen Fehlstellen und auch eine bei der Stoßherstellung unbeabsichtigt entstandene Fehlstelle sind erkennbar, werden aber von nennenswerten Störsignalen begleitet.

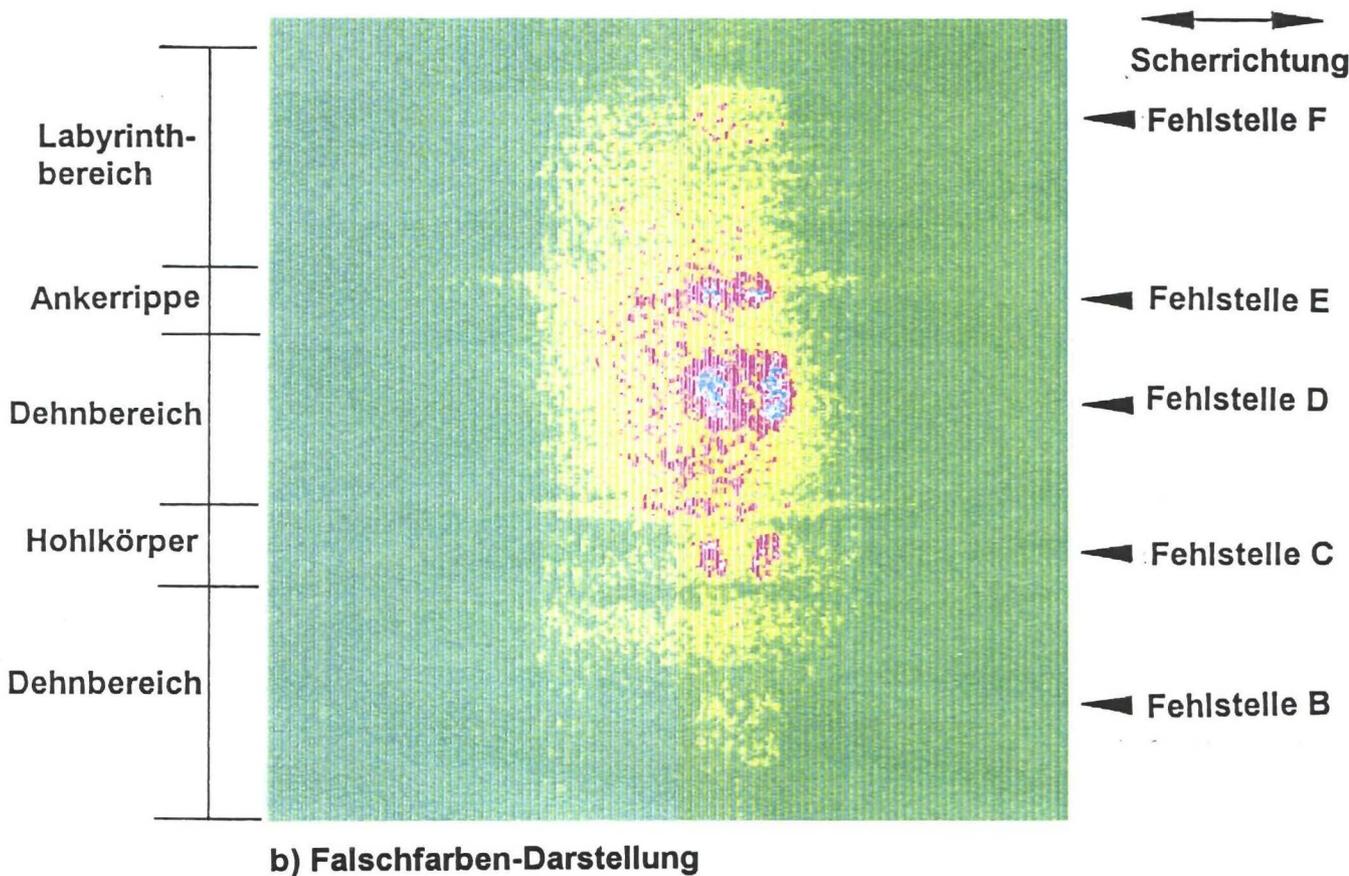
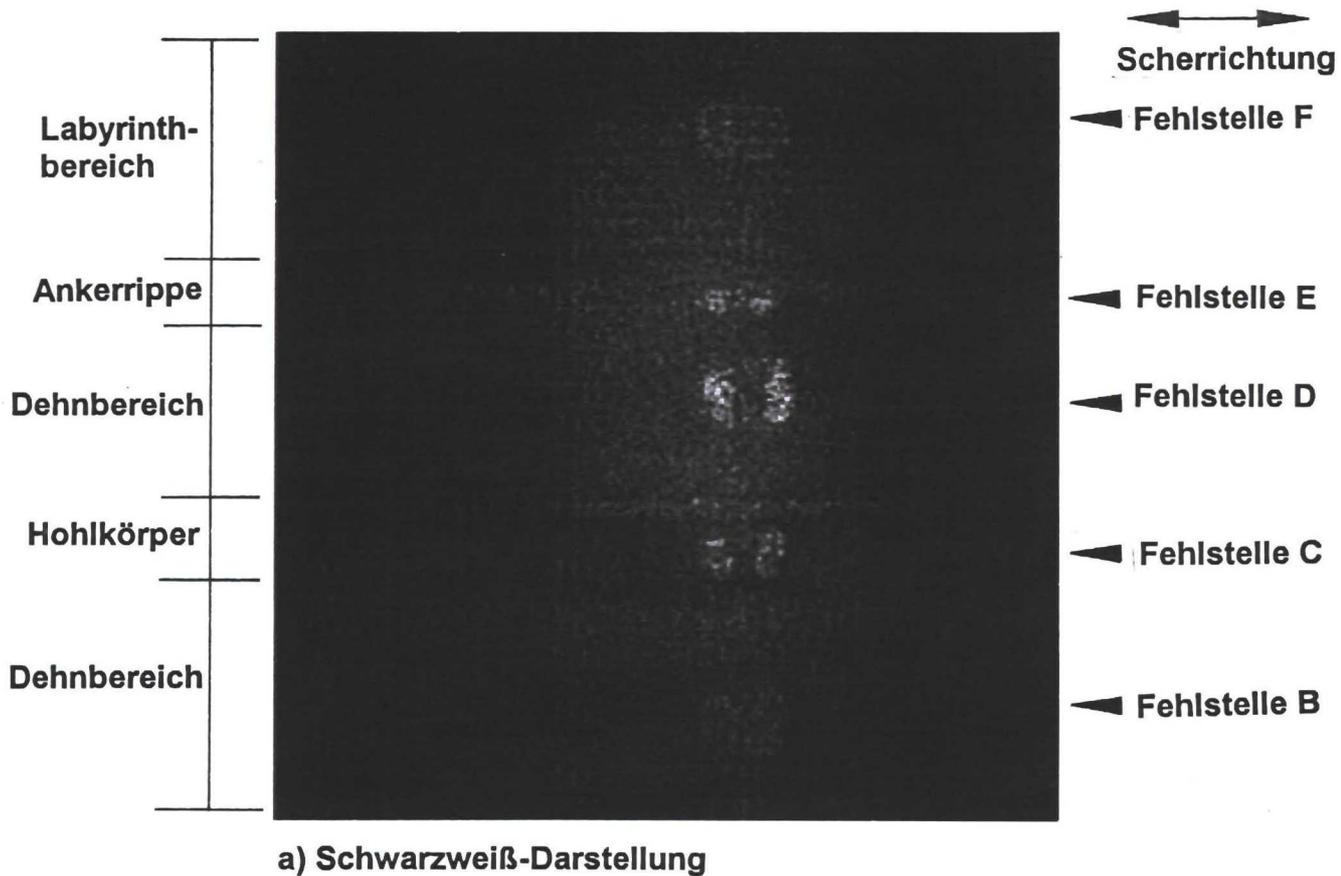


a) Schwarzweiß-Darstellung

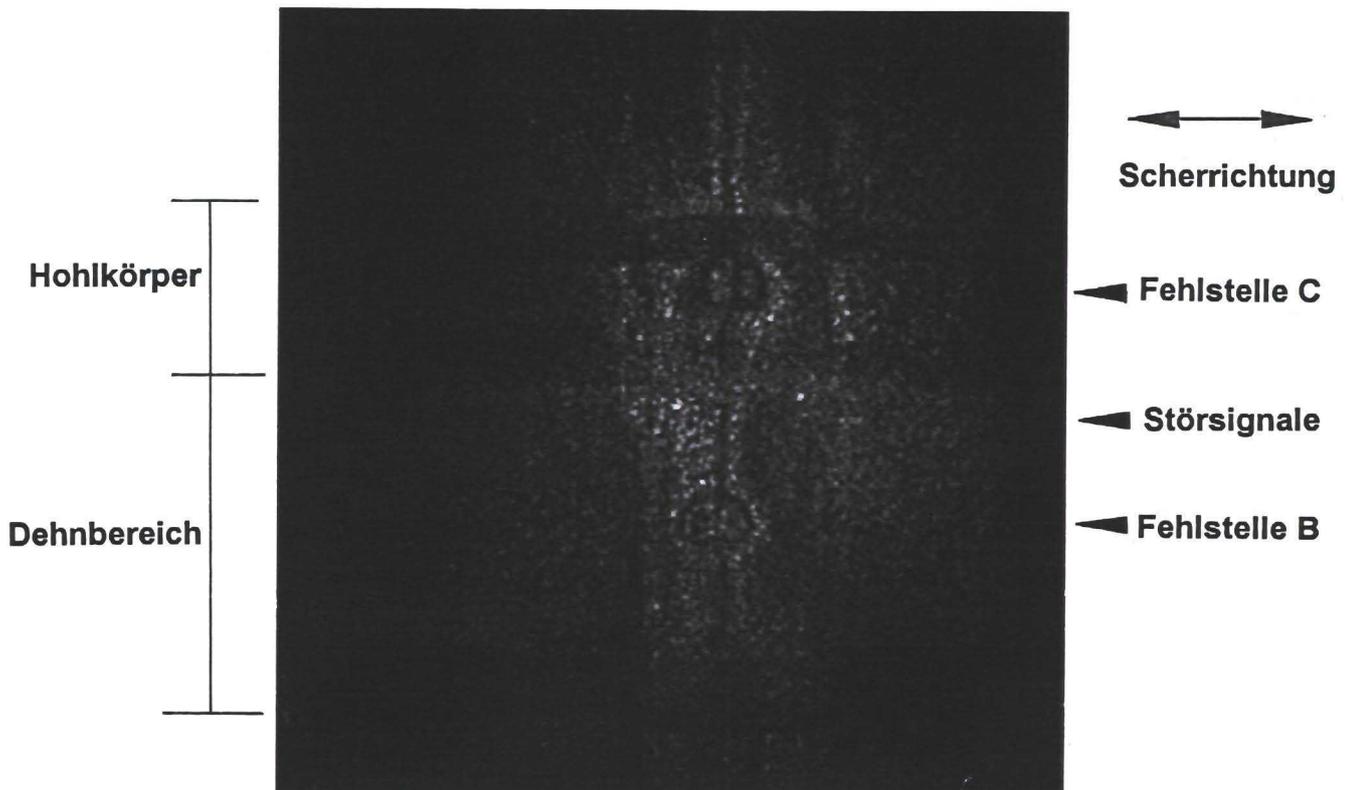


b) Falschfarben-Darstellung

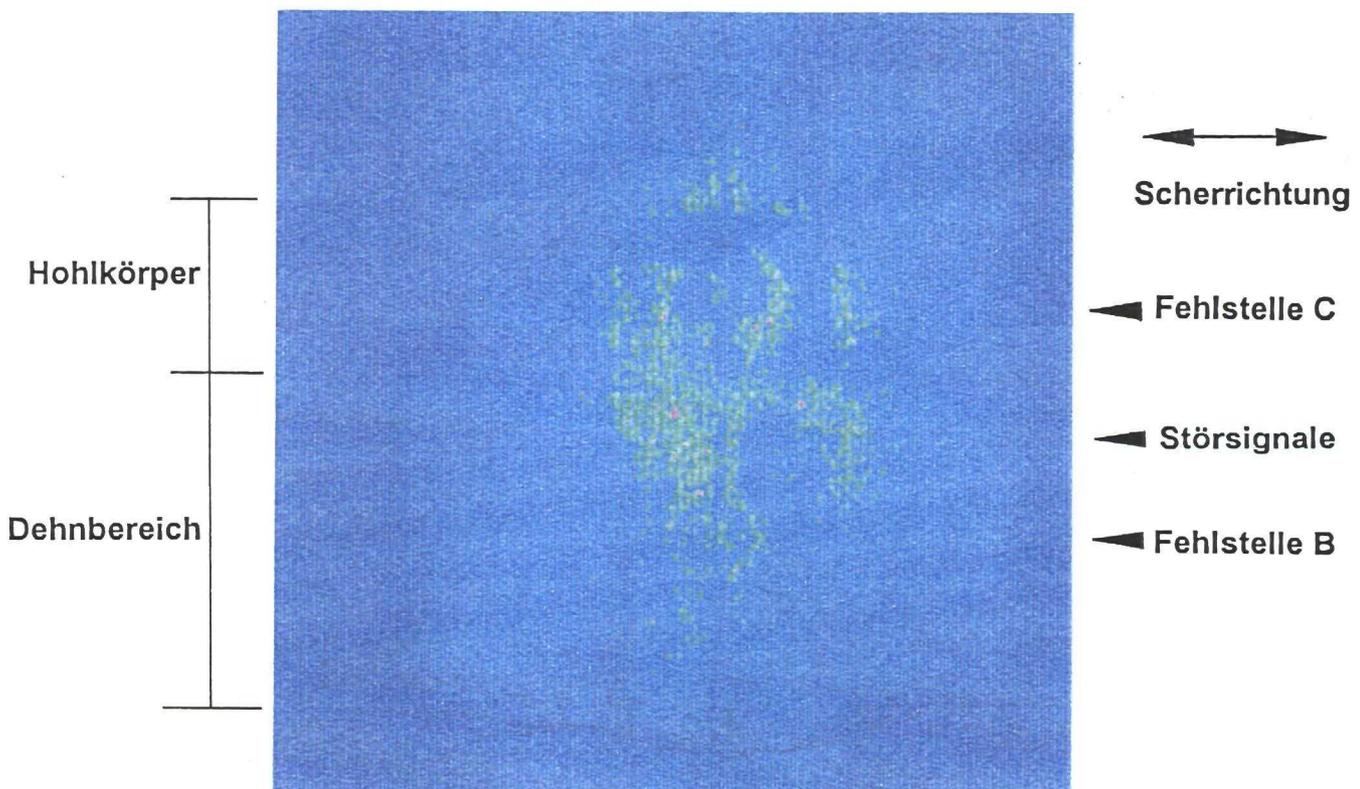
**Bild 75:** Shearogramme vom mittleren Bereich des thermoplastischen Stumpfstoßes (Probe Nr. 27; vgl. Tabelle 14) bei Verwendung der Baustellen-Saugglocke und Baustellenmeßtechnik. Die flächigen Fehlstellen parallel zur Fugenebene sind trotz vorhandener Störsignale deutlich erkennbar, nicht jedoch die senkrecht angeordnete Fehlstelle A in der einen Ankerrippe.



**Bild 76:** Shearogramme vom Labyrinth- und Mittelbereich des thermoplastischen Stumpfstoßes (Probe Nr. 27; vgl. Tabelle 14) bei Verwendung der Baustellen-Saugglocke und Baustellenmeßtechnik. Mit dem zum Labyrinthbereich verschwenkten Meßkopf wird ergänzend zu Bild 75 auch die Fehlstelle im Labyrinthbereich trotz des vorhandenen Störsignaluntergrundes sichtbar.



**a) Schwarzweiß-Darstellung**



**b) Falschfarben-Darstellung**

**Bild 77:** Shearogramme vom elastomeren Stumpfstoß (Probe Nr. 30; vgl. Tabelle 14) bei Verwendung der Baustellen-Saugglocke und Baustellenmeßtechnik. Die flächigen Fehlstellen im Hohlkörper und im Dehnbereich sind trotz vorhandener Störsignale deutlich erkennbar.