

Temporärer Korrosionsschutz von Spannstählen gegen Spannungsrißkor- rosion in Spannbetonbauwerken

T 2175

T 2175

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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.

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

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

www.baufachinformation.de

SCHLUSSBERICHT

Zum Forschungsvorhaben

"Temporärer Korrosionsschutz
von Spannstählen gegen
Spannungsrißkorrosion in Spannbetonbauwerken"

finanziert durch das Institut für Bautechnik

Az.: IV 1-5 - 415/84

Forschungsstelle: Bundesanstalt für Materialforschung und
- prüfung (BAM), Berlin
Forschungsleiter: Dr.-Ing. B. Isecke

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung
2	Das Korrosionssystem Spannstahl im unverpreßten Hüllrohr
3	Möglichkeiten des temporären Korrosionsschutzes im Spannbetonbau
4	Untersuchungen
4.1	Spülen der Spannkanäle mit vorgetrockneter Luft
4.1.1	Prinzip des Verfahrens
4.1.2	Untersuchungen mit vorgetrockneter Luft auf einer Baustelle
4.1.3	Untersuchungen an einem praxisnahen Versuchsbalken
4.2	Spülen von Spannkanälen mit Stickstoffgas
4.3	Untersuchungen mit filmbildenden Mitteln
4.3.1	Charakterisierung filmbildender temporärer Korrosionsschutzmittel durch Infrarot-Spektroskopie
4.3.2	Wirksamkeit filmbildender Korrosionsschutzmittel unter atmosphärischer Korrosionsbelastung
4.3.3	Elektrochemische Messungen
4.3.4	Korrosionsverhalten von Spannstählen mit filmbildenden Mitteln im vorgespannten Zustand
4.3.4.1	Beschreibung der Vorkorrosion ohne mechanische Belastung
4.3.4.2	Aufbau der Dauerstandversuche
4.3.4.3	Ergebnisse
4.3.5	Langzeitverhalten von Spannstählen mit temporären Korrosionsschutzmitteln in verpreßten Hüllrohren
5	Zusammenfassung
6	Literatur

Temporärer Korrosionsschutz von Spannstählen gegen Spannungsrißkorrosion in Spannbetonbauwerken

1 Einleitung

Beim Spannbetonbau mit nachträglichem Verbund bildet die hohe Alkalität des Verpreßmörtels einen hinreichenden Korrosionsschutz für den Spannstahl. Während der einzelnen Verarbeitungsphasen der Spannglieder zwischen dem Anliefern und endgültigen Verpressen der Hüllrohre können Bedingungen vorliegen, die zur Korrosion des Spannstahles und unter besonders ungünstigen Umständen zum Bruch des Spannstahles durch Spannungsrißkorrosion führen (1). Die stärkste Gefährdung des Spannstahles liegt dann vor, wenn sich der Spannstahl im vorgespannten jedoch unverpreßten Zustand im Bauwerk befindet (2). Aus diesem Grund begrenzt DIN 4227 Teil 1, Abschnitt 6.5.2 diesen Zeitraum auf maximal 2 Wochen. In der Spannbetonpraxis treten jedoch Fälle auf, bei denen der Baufortschritt aus unterschiedlichen Gründen eine Verarbeitung gemäß DIN 4227, Teil 1 mit der vorgeschriebenen Frist von 2 Wochen nicht zuläßt. Die Ursache kann z.B. in unvorhersehbaren Witterungsänderungen liegen, die ein Verpressen der Spannglieder verhindern; relativ häufig kann auch aus bautechnischen, durch die Konstruktion vorgegebenen Gründen ein Verpressen der Spannglieder innerhalb der vorgegebenen Frist nicht erfolgen. Nach DIN 4227, Teil 1, Abschnitt 6.5.2 sind dann "besondere Maßnahmen zum vorübergehenden Korrosionsschutz der Spannstähle vorzusehen; andernfalls ist der Nachweis zu führen, daß schädigende Korrosion nicht auftritt". Im weiteren werden dann geeignete Schutzmaßnahmen aufgeführt, wobei deren Schutzwirkung und Unschädlichkeit im Einzelfall insbesondere auch im Hinblick auf den Verbund zwischen Spanngliedern und Einpreßmörtel nachzuweisen ist.

Allgemein kann zwischen zwei grundsätzlichen Arten des Korrosionsschutzes (3, 4) unterschieden werden. Beim aktiven Korrosionsschutz werden die Bedingungen für die Korrosion geändert, bei der Anwendung passiver Korrosionsschutzmaßnahmen werden die Reaktionspartner durch eine schützende Zwischenschicht getrennt. Als aktive Schutzverfahren haben sich der elektrochemische Schutz (kathodisch oder anodisch), die Anwendung von Inhibitoren, die Wasseraufbereitung oder der Einsatz von schützenden Atmosphären (getrocknete Luft, Stickstoff) in verschiedenen Bereichen der Technik bewährt. Für den passiven Korrosionsschutz, insbesondere für temporäre Korrosionsschutzmaßnahmen kommen vornehmlich organische Stoffe (5) mit filmbildenden Eigenschaften in Frage, die häufig zusätzlich Korrosionsinhibitoren enthalten. Als Nachteil dieser Verfahren kann ihre Gefährdung hinsichtlich der praktisch nicht vermeidbaren örtlichen Verletzung der Schichten angesehen werden, im Spannbetonbau muß zusätzlich ihre Entfernung vor dem Injizieren gewährleistet sein, da bei glatten Spannstählen eine Abminderung der Verbundfestigkeit zwischen Spannstahl und Mörtel nachgewiesen wurde (6). Als optimaler Korrosionsschutz erweist sich in der Praxis häufig eine Kombination von aktiven und passiven Korrosionsschutzmaßnahmen.

Die bisherigen Erkenntnisse hinsichtlich der Wirksamkeit temporärer Korrosionsschutzsysteme gegen Spannungsrißkorrosion sind unzureichend. Rieche (6, 7) untersuchte die Eignung verschiedener Mittel des passiven Korrosionsschutzes bezüglich ihrer Eignung für den Spannbeton, die gefundenen Ergebnisse sind jedoch nicht übertragbar auf die Schutzwirkung der Systeme gegenüber Spannungsrißkorrosion unter den Bedingungen des unverpreßten Hüllrohres. Die Untersuchungen sollten deshalb Aussagen liefern, inwieweit sich passive und aktive Korrosionsschutzsysteme im temporär unverpreßten Hüllrohr gegen Spannungsrißkorrosion bewähren.

Von besonderer Bedeutung ist im Zusammenhang der Verwendung temporärer Korrosionsschutzmittel die Fragestellung, inwieweit durch das Zusammenwirken von temporären Korrosionsschutzmitteln und Einpreßmörtel Bedingungen an der Spannstahloberfläche nach dem Verpressen entstehen können, die unter Umständen auch nach langer Nutzungszeit eines Bauwerks wasserstoffinduzierte Spannungsrißkorrosion und Spannstählen auslösen können. Aus diesem Grunde sollte ein wesentlicher Teil der Untersuchungen dazu dienen, den Einfluß der Zusammensetzung temporärer Korrosionsschutzmittel, die für den Spannbetonbau geeignet sind, im Hinblick auf eine Erhöhung des Risikos der wasserstoffinduzierten Spannungsrißkorrosion an Spannstählen im Einpreßmörtel zu untersuchen. Hintergrund für diesen Verdacht bildeten Schadensanalysen (8) an bainitischen Spannstählen, an denen nach über 10-jähriger Standzeit im Bauwerk spröde, wasserstoffinduzierte Brüche auftraten, die nur auf ein Zusammenwirken der Komponenten wasserstoffempfindlicher Spannstahl/temporärer Korrosionsschutz/Einpreßmörtel zurückzuführen waren. Zusammenfassend lassen sich die Aufgabenstellungen der Untersuchungen wie folgt darstellen:

- Definition und Nachweis der Eignung von temporären Korrosionsschutzmaßnahmen im Spannbetonbau,
- Untersuchung des Einflusses von filmbildenden Korrosionsschutzmitteln im Hinblick auf die Langzeitwirkung in verpreßten Hüllrohren.

2 Das Korrosionssystem Spannstahl im unverpreßten Hüllrohr

Während der Verarbeitung von Spannstählen auf Baustellen kann der Spannstahl im unverpreßten Zustand verschiedenen Korrosionsmedien ausgesetzt sein (2). Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung des Korrosionssystems Spannstahl im unverpreßten Hüllrohr. Wasser kann auf vielfältige Weise in Spannkäule eindringen. Schon beim Transport, Verlegen

und Verweilen der Spannglieder in der unbetonierten Verschaltung kann durch schadhafte Hüllrohre oder an freiliegenden, nicht ausreichend abgedichteten Ankerteilen Wasser in Spannglieder eindringen. Nach dem Betonieren besteht ebenfalls die Möglichkeit, daß Restwasser vom Betonieren in die Spannkäle gelangt.

Vom elektrochemischen Standpunkt entspricht das in Hüllrohren eventuell vorhandene Wasser einem wäßrigen Elektrolyten, dessen Zusammensetzung einen überaus wesentlichen Einfluß auf das Korrosionsverhalten des Spannstahles im Hüllrohr ausübt. Neben der Zusammensetzung dieser im folgenden als Hüllrohrwasser bezeichneten Elektrolyten bildet auch deren Verbreitung im Spannkanal einen außerordentlichen Einfluß auf die Gefährdung des Spannstahles durch Korrosion. Besondere Würdigung verdient der Umstand, daß sich, falls Wasser in Spannkälen angetroffen wird, dieses zumeist nur in einigen, tiefer liegenden Bereichen des Spannglieds den Spannstahl völlig umhüllt. Besonderer Korrosionsgefahr unterliegen die Phasengrenzgebiete, an denen der Spannstahl partiell vom Hüllrohrwasser und andernteils von der Hüllrohratmosphäre umgeben ist.

Die korrosionschemisch relevanten Parameter des Hüllroherelektrolyten sind sein pH-Wert, die Gehalte an Fremdionen und das Potential des Spannstahles im Hüllroherelektrolyten. Da die Aussagen über die Zusammensetzung von Hüllrohrwässern eine wesentliche Voraussetzung für praxisnahe Umgebungsbedingungen in Laborversuchen und die Entwicklung praxiskonformer Prüfverfahren bildeten, wurden auf verschiedenen Baustellen mit unterschiedlichen Spannsystemen durch Ausblasen der Spannkäle mit Preßluft auftretende Hüllrohrwässer aufgefangen und chemisch auf ihren pH-Wert und den Gehalt an Fremdionen untersucht.

Zunächst konnte ermittelt werden, daß bei allen untersuchten Bauabschnitten aus einer großen Zahl von Spanngliedern (im Mittel 30 bis 50% aller verlegten Spannglieder) Wasser in Form von Nebel, Tropfen oder auch ausfließendes Wasser nach dem Durchblasen mit Preßluft austrat. Farbe und Trübung des Wassers hatten entweder bräunlichen, durchsichtigen oder trüben Charakter. Als Extremfall wurde in der oberen Fahrbahnplatte eines Brückenbauwerkes in 80% der 196, ca. 10 m langen Querspannglieder Wasseraustritt beim Durchblasen beobachtet.

Tabelle 1 enthält die pH-Werte sowie Chlorid- und Sulfatgehalte der auf verschiedenen Baustellen aufgefangenen und untersuchten Hüllrohrwässer. Neben den Chlorid- und Sulfatgehalten wurden die Lösungen auch hinsichtlich ihrer Gehalte an Nitrat-, Sulfid- und Rhodanidionen analysiert, meßbare Anteile konnten jedoch bei diesen Ionensorten nicht ermittelt werden. Die Angaben bezüglich des pH-Wertes der Hüllrohrwässer verdeutlichen, daß diese mit Ausnahme der Proben 12, 14 bis 17 und 19 in der Mehrzahl im alkalischen Bereich liegen. Ein weiteres übergreifend gültiges Ergebnis bilden die gegenüber Leitungswasser um ein vielfaches erhöhten Gehalte an Chloriden (max. 337 mg/l) bzw. Sulfaten (max. 4881 mg/l), obwohl auch Proben mit geringeren Anteilen (18 bis 23) vorgefunden wurden. Sowohl die erhöhten pH-Werte als auch die Gehalte an Chloriden und Sulfaten geben Hinweise, daß es sich mit Ausnahme der Proben 18 bis 23 um in die Hüllrohre eingedrungenes Restwasser des Betoniervorgangs handeln muß. Ein vollkommener Schutz der Spannglieder gegen das Eindringen von Wasser durch die metallischen Hüllrohre kann demnach nicht vorausgesetzt werden. Bei den Proben 18 bis 23 lassen insbesondere die sehr geringen Chloridgehalte vermuten, daß es sich bei den Hüllrohrwässern um Regenwasser handeln muß, das entweder beim Verlegen bzw. während der Verweilzeit in der Verschalung in die Hüllrohre eindringen konnte. Auch diese Proben zeigen, daß trotz der niedrigen Fremdionengehalte eine Vermischung mit

Restwasser vom Betoniervorgang stattgefunden haben muß, da, abgesehen von Probe 19, alle anderen Proben erhöhte pH-Werte aufweisen.

Von wesentlicher Bedeutung für die Abschätzung des Risikos einer wasserstoffinduzierten Spannungsrißkorrosion an Spannstählen ist das Einwirken der o.g. Hüllrohrwässer auf Spannstähle unterschiedlicher Gefüge und Festigkeitsstufen. bei Vorliegen gleichartiger Elektrolyten ergibt sich eine Abstufung der Gefährdung gegen wasserstoffinduzierte Rißeinleitung und -ausbreitung, die sich nach der Spannstahlqualität (2) und der Höhe der einwirkenden mechanischen Vorspannung richtet.

3 Möglichkeiten des temporären Korrosionsschutzes im Spannbetonbau

Für den zeitliche begrenzten Korrosionsschutz von Spannstählen in unverpreßten Hüllrohren eignen sich grundsätzlich zwei Verfahren. Bei der Anwendung passiver Schutzmaßnahmen werden filmbildende Mittel auf die Oberfläche des Spannstahles aufgetragen, die den elektrolytischen Kontakt zwischen Spannstahl und Elektrolyt (Hüllrohrwasser) ausschließen bzw. soweit vermindern, daß ein Korrosionsschaden (Bruch des Spannstahles) während der Aufenthaltszeit im unverpreßten Hüllrohr vermieden wird. Bei der Anwendung aktiver Schutzmaßnahmen im Hüllrohr werden durch Herabsetzung des Sauerstoffpartialdrucks (Spülen der Spannkanäle mit Stickstoff) bzw. durch das Spülen der Spannkanäle mit vorgetrockneter Luft (Verhindern der Bildung eines Elektrolyten) Bedingungen im Hüllrohr erzeugt, die Korrosion unterbinden, da entweder der für die Korrosion notwendige Parameter Sauerstoff oder Feuchtigkeit nicht vorliegt. Beide Verfahrensmöglichkeiten sind in die Untersuchungen einbezogen.

4 Untersuchungen

4.1 Spülen der Spannkanäle mit vorgetrockneter Luft

4.1.1 Prinzip des Verfahrens

Zum Ablauf des Korrosionsprozesses an einem Metall bildet das gleichzeitige Vorhandensein von Sauerstoff und Wasser eine notwendige Voraussetzung. Es ist deshalb möglich, den Korrosionsvorgang an einer Metalloberfläche zu unterbinden bzw. auf unbedeutende Beträge abzumindern, indem der Umgebung entweder Sauerstoff entzogen wird oder aber die Luftfeuchtigkeit soweit abgesenkt wird, daß sich auf der Oberfläche des Metalles keine Wasseradsorptionsfilme ausbilden können, die elektrochemische Überführungsprozesse ermöglichen. Abbildung 2 verdeutlicht diesen Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Korrosionsgeschwindigkeit anhand einer Untersuchung von Vernon (19), der Stahlproben in Atmosphären mit unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten auslagerte und das Korrosionsverhalten der Proben durch die Gewichtszunahme in mg/dm^2 darstellte. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen, die in Abb. 2 dargestellt sind, geht hervor, daß bei Unterschreiten einer kritischen Grenzfeuchte von 60% rel. Feuchte, die Korrosion des Stahles auf unbedeutend kleine Werte reduziert wird. Diese kritischen Grenzfeuchten verschieben sich in Gegenwart von hygroskopischen Salzen zu niedrigeren Werten; unterhalb von 40% rel. Feuchte ist aber auch unter ungünstigen Umgebungsbedingungen ein korrosiver Angriff unwahrscheinlich.

Da die Korrosion eines Spannstahles in einem unverpreßten Hüllrohr im Prinzip einen Sonderfall der atmosphärischen Korrosion eventuell verbunden mit dem gleichzeitigen Vorhandensein eines wäßrigen Elektrolyten (Hüllrohrwasser) darstellt, kann durch Maßnahmen, die eine Abminderung der relativen Feuchte im Hüllrohr unterhalb des kritischen Grenzwertes bewirken, der Korrosionsschutz des Spannstahles sichergestellt werden. Ein wirtschaftlich vertretbares und

technisch zu realisierendes Verfahren bietet das Spülen der Spannkanäle mit Trockenluft in einem kontinuierlichen Verfahren, das von der Firma Munters (10) entwickelt wurde. Abbildung 3 zeigt das Funktionsschema des Verfahrens.

Luft wird zunächst durch einen wabenförmig aufgebauten und mit 7 h^{-1} extrem langsam laufenden Rotor geführt. Die mit der Luft eingebrachte Feuchtigkeit lagert sich an die mit Lithiumchlorid imprägnierten Oberflächen der Waben an und wird in einem kleineren Sektor durch Heißluft wieder ausgetragen. Dabei handelt es sich um einen rein physikalischen Adsorptionsvorgang. Ein Risiko durch Austragungen mit der Trockenluft, wie es bei der Verwendung von Chemikalien oder durch den mechanischen Antrieb bei schichtweise aufgeschütteten Kristallen auftreten kann ist dabei ausgeschlossen. Zusatzaggregate sind auch für Taupunktbereiche bis -40°C nicht erforderlich.

Bei der Verwendung zum temporären Korrosionsschutz von Spannstählen in unverpreßten Hüllrohren wird der Ausgang des Gerätes über einen Schlauch an einen abgedichteten Spannkanal angeschlossen. Die zu durchspülenden Spannkanäle sind, um den Luftdurchtritt zu gewährleisten, untereinander verbunden. Dies kann beispielsweise mit wenig Aufwand über die Entlüftungsrohre geschehen. Der am Ende der untereinander verbundenen Spannglieder austretende Luftstrom wird in das Gerät zurückgeführt und dort regeneriert. Durch den zusätzlichen Einsatz von Verdichtern können auch Gesamtlängen, die sich aus der Addition der verbundenen Spannglieder ergeben, von mehreren 100 m Länge mit einem Gerät kostengünstig betrieben werden.

Darüber hinaus bietet das Verfahren den Vorteil, daß, falls sich aus dem Betoniervorgang resultierende Ansammlung von Wässern in den Hüllrohren (2) befinden, diese durch die Einstellung des Gleichgewichtes zwischen Temperatur, rel. Feuchte und Wasser kontinuierlich ausgetragen werden.

4.1.2 Untersuchungen mit getrockneter Luft auf einer Baustelle

Um die korrosionshemmende Wirkung der Spülung von Spannkämen mit vorgetrockneter Luft nachzuweisen, sind eine Reihe von Untersuchungen sowohl auf Baustellen als auch im Labormaßstab durchgeführt worden. Auf einer Großbaustelle wurde ein Spannbetonbalken mit Konsole erstellt. Die Länge des Balkens betrug 12.0 m, der Querschnitt im Konsolbereich $b/d = 2.5 \text{ m}/3.5 \text{ m}$. Zur Abfangung der Überbauungslast werden vier Lagen mit insgesamt 22 Spanngliedern SUSPA V mit jeweils 42 Spanndrähten, $d = 7 \text{ mm}$, St 1470/1670 erforderlich. Vor dem Betonieren des auf der Konsole aufgelagerten Balkens konnten lediglich die Spannglieder der oberen beiden Lagen gespannt und verpreßt werden. Für die Spannglieder der unteren Lagen war dies erst nach neun Monaten möglich, weil vorher ausreichende Überbauungslasten fehlten.

Um den Korrosionsschutz während dieser Zeit sicherzustellen, wurde an der Festankerseite ein Luftentfeuchter nach dem o.g. Verfahren mit einer Trockenluftmenge von $120 \text{ m}^3/\text{h}$ angeschlossen. Die Kontrolle des Korrosionsschutzsystems erfolgte über kleine Meßsonden, die die Temperatur und relative Feuchte nebeneinander kontinuierlich ermittelten und registrierten. Diese Meßfühler wurden an drei verschiedenen Stellen eingebaut. Abbildung 4 zeigt die relative Feuchte an diesen Meßstellen in Abhängigkeit von der Zeit. Die Meßstelle 1 befand sich in der Umgebungsatmosphäre des Bauteils (obere Kurve), das Streuband der mittleren Kurve entspricht einem Spannkanal ohne Lüftung, die Meßwerte der unteren Kurve wurden am Austritt des Luftstroms am Ende der untereinander verbundenen Spannglieder gewonnen. Die Ergebnisse zeigen, daß während der gesamten Einschaltzeit der Luftspülung die relative Feuchte in den gespülten Spannkämen in einem Bereich zwischen 30 und 35% Luftfeuchtigkeit lag und damit wesentlich niedriger als in der Außenatmosphäre und dem ungespülten Spannkanal. Um zu untersuchen,

inwieweit sich bei Ausschalten der Trockenluft die Feuchtigkeitsbedingungen im Spannkanal ändern, wurde in dieser Versuchsreihe nach ca. 70 h die Trockenspülung abgeschaltet und nach 120 h wieder in Betrieb gesetzt. Aus der Kurve geht hervor, daß sich bereits kurz nach dem Abschalten ein Feuchtwert einstellt, der im Bereich des ungespülten Spannkanals liegt. Insgesamt zeigen die Ergebnisse die Wirksamkeit des Korrosionsschutzsystems in ausgeprägter Form, da die eingestellten Luftfeuchtigkeiten wesentlich unterhalb der kritischen Grenzfeuchte für einen Korrosionsangriff liegen. Dieses Ergebnis wurde bestätigt durch in die Spannkanäle eingelegte Referenzdrähte, die nach neun Monaten entnommen wurden und keinerlei Korrosionserscheinungen aufwiesen.

4.1.3 Untersuchungen an einem praxisnahen Versuchsbalken

Im Rahmen der Arbeiten an einer Berliner Großbaustelle wurde in Abstimmung zwischen den Beteiligten (BAM, Fa. SUSPA, Bauherr Sen Bau + Wohnen, Berlin) ein Spannbetonbalken von ca. 20 m Länge gefertigt. Der Balken enthielt zwei Spanngliedtypen:

- a) 3 Stück BBRV-SUSPA II mit je 16 Drähten, davon jeweils 8 Drähte gespannt, 8 ungespannt
- b) 3 Stück VSL 5-7 mit je 7 Litzen (100 mm²) davon jeweils 3 gespannt, 4 ungespannt.

Als Untersuchungsparameter für den temporären Korrosionsschutz wurden ausgeführt

- je ein Spannglied BBRV und VSL als Vergleichsspannglied ohne besonderen temporären Korrosionsschutz (nur an den Enden abgedichtet).
- je ein Spannglied BBRV und VSL mit vorgetrockneter Luftspülung (Verfahren Munters).

- je ein Spannglied BBRV und VSL behandelt mit Rustban 310, Emulsion 1:4

Die Spanngliedlänge betrug jeweils ca. 20 m wobei sich eine parabelförmige Anordnung mit Tiefpunkt ergab. Der Betonquerschnitt von $0.7 \times 1.0 \text{ m}^2$ enthielt 2 übereinander angeordnete Lagen mit je drei Spannglieder. Durch die entspannbare Anordnung der Verankerung wurde eine spätere Entnahme der Spannglieder nach Versuchsende ermöglicht.

Die Versuchsdauer lag bei ca. 14 Monaten. Während der gesamten Versuchsdauer wurde die Temperatur und relative Feuchte in den Spanngliedern und an einer Vergleichsstelle in der freien Atmosphäre gemessen und registriert. Abb. 5 zeigt den Versuchsbalken mit der Luftentfeuchtung und dem Schreiber zum Registrieren der Meßwerte.

Die Ergebnisse der Messungen sind in den Abb. 6 bis 18 dargestellt, wobei die Abb. 6 bis 12 die Meßwerte während der ersten 150 h und die Abb. 13 bis 18 die Meßwerte zwischen 21 und 36 Tagen enthalten. Da sich die Ergebnisse während der ersten Wochen und Monate prinzipiell nicht unterschieden, wurde auf eine weitere Darstellung verzichtet. Die einzelnen Meßpunkte sind den Abbildungen wie folgt zu entnehmen:

- Atm = Meßpunkt in der Atmosphäre
- Sp = Meßpunkt im Spannglied ohne Luftentfeuchter
- Spgl = Meßpunkt im Spannglied mit vorgetrockneter Luftspülung

Die Ergebnisse der Abb. 6 bis 18 lassen sich wie folgt zusammenfassen

1. Temperatur und rel. Feuchte in der freien Atmosphäre folgen den jahreszeitlichen klimatischen Bedingungen.

2. In Spannkanälen ohne zusätzliche Luftspülung liegen die Temperaturen und rel. Feuchten mit unbedeutenden Abweichungen im Bereich der freien Atmosphäre. Dies bedeutet, daß Kondensatbildung entsprechend den atmosphärischen Schwankungen möglich ist.
3. In den Spannkanälen mit vorgetrockneter Luftspülung ergibt sich ein Feuchtwert im Bereich zwischen 30 und 40% rel. Feuchte, der zur Bildung eines korrosionsauslösenden Feuchtigkeitsfilms auf der Spannstahlatmosfera nicht ausreicht.

Nach 14 Monaten Dauer wurden die Versuche beendet, die Spannstähle mechanisch entlastet und das Korrosionsverhalten der Spannstähle beurteilt. Abb. 19 zeigt die Spanngliedenden nach Entfernung der Kappen (siehe Abb. 5). Deutliche Korrosionserscheinungen sind auf den Spannstählen (Litzen sowohl wie Einzeldrähte) an den überstehenden Enden und im Verankerungsbereich zu erkennen, die im vorderen Teil des Bildes dargestellt sind. Diese Spannstähle waren ungeschützt der Spannkanalatmosfera ausgesetzt. Dagegen wiesen sowohl die Spannstähle in den luftgespülten Kanälen als auch die mit Rustban 310-Emulsion beschichteten Litzen und Einzeldrähte keine oder nur unbedeutende Korrosionserscheinungen auf. Dieses Ergebnis bestätigt die aus den Messungen der relativen Feuchte resultierenden Erwartungen einer positiven Korrosionsschutzwirkung des Verfahrens der Luftspülung.

In der Mitte des Balkens wurden in den geschützten Spannkanälen unabhängig vom Schutzverfahren keine oder in den ungeschützten Spannkanälen nur unwesentliche Korrosionserscheinungen vorgefunden (s. Abb. 20).

4.2 Spülen von Spannkanälen mit Stickstoffe

Um die Korrosionsschutzwirkung einer Spülung mit gasförmigem Stickstoff zu untersuchen, wurden an vorgespannten Stabstählen der Qualität St 1080/1230 in Hüllrohren in einem Laborkeller der BAM unter atmosphärischen Bedingungen Spülversuche mit einer Spüllänge von 20 m vorgenommen. Nach ca. 4 monatiger Versuchsdauer waren unter diesen Bedingungen keinerlei Korrosionsangriffe auf der Spannstahloberfläche sichtbar, so daß dieses Verfahren eine vergleichbare Wirkung wie die Spannkanalspülung mit vorgetrockneter Luft erzielen kann.

4.3 Untersuchungen mit filmbildenden Mitteln

4.3.1 Charakterisierung filmbildender temporärer Korrosionsschutzmittel durch Infrarot-Spektroskopie

Wie bereits vorher angedeutet wurde, sollte durch die vorliegenden Untersuchungen geklärt werden, inwieweit ein Zusammenhang zwischen der Verwendung temporärer Korrosionsschutzmittel und einem aktuellen Schadensfall, bei dem ein temporärer Korrosionsschutz angewendet wurde, besteht. Aus diesem Grunde wurden Spektren handelsüblicher temporärer Korrosionsschutzmittel aufgenommen, um das im Schadensfall verwendete Mittel entsprechend seinem chemischen Aufbau eventuell einem dieser Mittel zuzuordnen. Das Verfahren der Infrarotspektroskopie lieferte bei Durchstrahlung einer Probe mit Strahlung im Infrarotbereich ein für die Substanz charakteristisches Absorptionsspektrum, das zumindest qualitative Angaben über die Zusammensetzung organischer Verbindungen erlaubt.

a) Korrosionsschutzmittel aus dem Schadensfall

Eine Probe des Versuchsmaterials wurde nach entsprechender Vorbereitung, d.h. der Herstellung eines Kaliumbromidpreßlings, infrarotspektrometrisch untersucht. Das Infrarotspektrum ließ erkennen, daß neben anorganischen Stoffen, z.B. Calciumcarbonat, organische Bestandteile enthalten waren. Ein Teil des Untersuchungsmaterials wurde über Nacht mit Ethanol extrahiert. Der Extrakt wurde eingedampft, getrocknet und der Rückstand wiederum infrarotspektrometrisch untersucht. Das Spektrum (Abb. 21) zeigte, daß paraffinische Strukturen vorherrschten, wie sie beispielsweise in paraffinischen Mineralölen, -fetten und -wachsen vorliegen. Zusätzliche Absorptionsbanden im Bereich der Bandenlagen zwischen 1000 und 1200 (in der Abb. 21 mit Pfeilen gekennzeichnet) mit schwächerer Intensität ließen die Gegenwart von Alkylsulfonaten vermuten.

Um das Korrosionsschutzmittel einem eventuellen handelsüblichen Produkt zuzuordnen, wurden die Spektren typischer temporärer Korrosionsschutzmittel aufgenommen und mit dem im Schadensfall verwendeten Mittel verglichen. Zusätzlich wurden Spektren temporärer Korrosionsschutzmittel eines Forschungsberichtes von Rieche und Rehm über "Untersuchungen zur Frage der Eignung von temporären Korrosionsschutzmitteln für Spannstähle", FMPA Stuttgart, vom 29.09.78 herangezogen, um aus diesen Unterlagen weitere Vergleichsmöglichkeiten zu gewinnen.

b) Rustban 310, 393, 397, 324

Die vier untersuchten Mittel werden von der Firma Esso AG hergestellt und vertrieben und nach Angaben des Herstellers folgendermaßen charakterisiert:

Rustban 310: Mit Wasser emulgierbares Öl, das einen äußerst dünnen öligen Schutzfilm hinterläßt.

Rustban 393: Mit Verdünnungsmittel, hinterläßt einen transparenten, dünnen fettartigen Schutzfilm.

Rustban 397: Mit Verdünnungsmittel, bildet einen grifffesten, transparenten und elastischen Film.

Rustban 324: Plastisch, wachsartig, für die Außenkonservierung sehr wirksamer Dauerschutz.

Vor Aufnahme der Spektren wurden alle Mittel einem Nachweisverfahren auf Schwefel unterzogen. Geringe Mengen der Substanzen wurden mit metallischem Natrium aufgeschlossen. Die erhaltene Aufschlußlösung wurde anschließend mit einer Nitroprussid-Natriumlösung versetzt. Die Proben aller Mittel zeigten durch eine Violettfärbung der Lösung an, daß Schwefelgehalte vorlagen. Die intensivste Reaktion wurde beim Rustban 310 vorgefunden.

Die Bilder 22 bis 25 zeigen die ermittelten Infrarotspektren. Von wesentlicher Bedeutung im Hinblick auf das Korrosionsverhalten des Stahls sind die bereits in Abb. 21 dargestellten Alkylsulfonate, die in mehr oder weniger starker Intensität in allen Mitteln vorhanden sind. Die Spektren von Rustban 310 und 393 weisen qualitative Ähnlichkeiten, das wachsartige Mittel 324 unterscheidet sich deutlich von den anderen Spektren durch die starke Intensität im Bereich der Bandenlagen um 720, die auf geordnete Kohlenwasserstoffstrukturen kristalliner Art schließen lassen. Im Vergleich zum Korrosionsschutzmittel des Schadensfalls ergibt sich die größte Ähnlichkeit mit den Mitteln Rustban 310 und 393. Bei den von Rieche und Rehm aufgenommenen Spektren zeigt die Probe Nr. 4 (Abb. 26) die größte Übereinstimmung mit dem Mittel aus dem Schadensfall. Nach den vorliegenden Informationen soll es sich bei diesem Mittel um Rustban 310 handeln. Rustban 397 scheidet nach unseren Untersuchungen als Mittel des Schadensfalls aus. Es entspricht in einer Struktur eher den Mitteln 2 und 3 des Forschungsberichtes, da alle Hauptbestandteile (paraffinische Struktur, Salz einer Fettsäure) der gleichen Verbindungsklasse angehören.

Nach diesen Ergebnissen wurden in die vorliegenden Untersuchungen die Mittel Rustban 310, und 393 einbezogen, da diese die größte baupraktische Relevanz im Hinblick auf ihre technische Anwendung und anschließende Entfernung nach Beendigung der zeitlich begrenzten Korrosionsschutzmaßnahme besitzen.

4.3.2 Wirksamkeit filmbildender Korrosionsschutzmittel unter atmosphärischer Korrosionsbelastung

Um die korrosionsschützende Wirkung der Mittel Rustban 310 und 393 bei atmosphärischer Korrosionsbelastung zu untersuchen (Fall der Lagerung auf Baustellen), wurden über einen Zeitraum von 8 Wochen atmosphärische Auslagerungsversuche an Spannstahlproben der Qualität St 1375/1570 bzw. 1420/1570, $d = 12.2$ mm unternommen. Ein Teil der Proben wurde durch Tauchen in Rustban 310-Emulsion Wasser Rustban 310 = 4:12, Rustban 310 Rustban 393 vorbehandelt. Vergleichsproben wurden ohne weitere korrosionsschützende Maßnahmen unter gleichen Bedingungen ausgelegt.

Die Ergebnisse nach 8-wöchiger atmosphärischer Exposition sind in den Bildern 27 und 28 dargestellt, wobei Abb. 27 die Oberseite und Abb. 28 die Unterseite der Proben zeigt. Bei allen mit Rustban 310 behandelten Proben (Emulsion und reines Mittel) lagen nach dieser Zeit keinerlei Korrosionsangriffe an den Spannstählen vor. Rustban 393 wird im Laufe der Zeit durch Niederschläge oder Kondenswasser von der Stahloberfläche abgewaschen, so daß kein wesentlicher Unterschied im Vergleich zu den unbeschichteten Proben besteht. Nach diesen Ergebnissen scheint für den Anwendungsfall im Spannbetonbau nur Rustban 310 eine nützliche Korrosionsschutzwirkung zu besitzen.

4.3.3 Elektrochemische Messungen

Elektrochemische Polarisationskurven können Auskunft geben, inwieweit eine Korrosionsgefährdung von Stählen unter bestimmten Umgebungsbedingungen zu erwarten ist.

Die Abb. 29 und 30 zeigen kathodische (Abb. 29) bzw. anodische Polarisationskurven von unbeschichteten und in Rustban 310 getauchte Spannstahlproben in ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung, die als Elektrolyt einem Injektionsmörtel entspricht. Die unbeschichteten Proben zeigen erwartungsgemäß einen breiten Passivbereich mit geringer Stromdichte, der im kathodischen Bereich durch die Wasserstoff- und im anodischen durch die Sauerstoffentwicklung begrenzt ist. Qualitativ ähnliche Verläufe ergeben sich bei den in Rustban getauchten Proben, wobei sich sowohl das Wasserstoffentwicklungspotential als auch das Sauerstoffentwicklungspotential zu negativeren bzw. positiveren Werten verschieben. Dieser inhibierende Effekt ist ohne Bedeutung für den Korrosionsschutz des Spannstahls im Verpreßmörtel, so daß diese Kurven keine Anhaltspunkte für einen negativen Einfluß von verbleibenden Resten des Mittels im Verpreßmörtel zulassen.

Die Abb. 31 bis 33 zeigen die Ergebnisse anodischer potentiostatischer Polarisationsversuche, die in gesättigter Calciumhydroxidlösung mit unterschiedlichem Chloridgehalt durchgeführt wurden. Diese Lösungen entsprechen praxisähnlichen Hüllrohrwässern mit unterschiedlichen Chloridgehalten. Abb. 31 zeigt, daß bei einem Ca Cl_2 -Gehalt von 0,1% in der Lösung die Passivität und damit der Korrosionsschutz gewährleistet bleibt, unabhängig ob die Proben mit Rustban 310 behandelt wurden oder nicht.

Bei einer Erhöhung des Chlordigehaltes auf 1% CaCl_2 (Abb. 32) tritt an den Proben Korrosion ein, was durch den Anstieg der Stromdichte beim Durchbruchpotential gekennzeichnet ist. Von Interesse für das Korrosionsverhalten ist die Verschiebung des Durchbruchpotentials bei der Rustbanprobe zu positiveren Werten und der geringere Anstieg der Kurve nach dem Durchbruchpotential. Dieser Verlauf bestätigt die

inhibierende Wirkung des Rustbans und kann als positiver Aspekt gedeutet werden. Bei Vorliegen noch höherer Chloridgehalte in der Lösung (Abb. 33) befinden sich beide Proben in einem gleichmäßigen Aktivzustand der Korrosion, der keine Differenzierung mehr zuläßt.

4.3.4 Korrosionsverhalten von Spannstählen mit filmbildenden Mitteln im vorgespannten Zustand

In diese Untersuchungen wurden wiederum mit Rustban 310 bzw. 393 behandelte Proben und Vergleichsproben einbezogen. Die Prüfung der Spannstähle vollzog sich in zwei Stufen. Im ersten Teil der Untersuchungen wurden die Stähle einer Feuchtlagerung in salzfreier und salzhaltiger Umgebung ausgesetzt. Eine mechanische Belastung während dieser Phase fand nicht statt. Die Stähle wurden kurzzeitig vollständig mit dem Korrosionsmedium beaufschlagt und anschließend atmosphärisch feuchter Luft ausgesetzt. Die Beanspruchung wiederholte sich zyklisch über drei Wochen.

Da in der Praxis die bei der Lagerung oder beim Einbau der Spannglieder entstandenen und durch Korrosion bedingten Vorschädigungen nach dem Vorspannen durch das Einwirken der mechanischen Spannung und spezifischer Mikroklimata im Spannkanal aktiviert und verschärft werden können, wurden im zweiten Teil der Laborversuche die Stähle mit 80% der Zugfestigkeit vorgespannt und in einem Dauerstandversuch Elektrolyten ausgesetzt, die in ihrer Zusammensetzung Hüllrohrwässern entsprachen. Trat unter diesen Bedingungen innerhalb von 1 000 h kein bruchbedingtes Versagen der Spannstähle auf, wurde anschließend ein Zugversuch an den Proben durchgeführt, um einen eventuell vorhandenen Einfluß auf die mechanischen Kennwerte der Spannstähle nachzuweisen.

4.3.4.1 Beschreibung der Vorkorrosion ohne mechanische Belastung

Abb. 34 zeigt schematisch den Aufbau der Vorkorrosionsanlage. Der Spannstahl befindet sich in einem an den Enden abgedichteten und verschlossenen, gewellten PVC-Hüllrohr von 50 mm Durchmesser. Als Elektrolytlösung wird destilliertes Wasser mit Zusätzen von Chloriden (500 mg/l) oder Sulfaten (500 mg/l) von oben über eine Steuereinrichtung in das Hüllrohr geleitet. Der Stab bleibt eine Stunde lang vom Prüfmedium völlig umgeben. Danach wird die Lösung aus dem Hüllrohr entfernt. Um den Einfluß von Spalten zu simulieren, liegt der Stab im unteren Teil des Hüllrohres an den Wellungen an, die auch nach dem Ablassen der Prüflösung noch mit einem Rest des Elektrolyten gefüllt bleiben. In diesem Zustand wird der Stahl zwei Stunden einer Feuchtlagerung ausgesetzt, danach wird wieder Lösung zugeführt und der gesamte Prozeß über einen Zeitraum von insgesamt drei Wochen periodisch wiederholt.

4.4.2 Aufbau der Dauerstandversuche

Die Dauerstandversuche sollten möglichst genau die praktischen Bedingungen reproduzieren, denen ein Spannstahl vor dem Injizieren im Bauwerk ausgesetzt ist.

Um diese Bedingungen im Laborversuch zu simulieren, wurden die Spannstähle nach dem Ausbau aus der Vorkorrosionsanlage in einem Dauerstandversuch mit 80% ihrer Zugfestigkeit vorgespannt und gleichzeitig hüllrohrähnlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Abb. 35 zeigt schematisch den Aufbau einer Prüfeinrichtung. Der vorkorrodierte Stab wurde gegen den Rahmen vorgespannt und war auf einer Länge von ca. 1 m von einer hüllrohrähnlichen PVC-Zelle umgeben (Abb. 36), die in zwei Bereiche unterteilt war. Der linke Teil war durch einen Kunststoffschwamm, mit dem der Prüfstab

umwickelt war, gasdicht vom rechten Teil der Zelle getrennt. Nach Aufbringen der Prüflast wurden beide Zellbereiche entweder mit gesättigter Ca(OH)_2 -Lösung, die 1 000 mg/ ISO_4 und 100 mgCl enthielt, bzw. mit Leitungswasser soweit gefüllt, daß nur der untere Teil der Spannstahloberfläche vom Elektrolyten benetzt wird. Sowohl die verwendeten Elektrolyten als auch die geometrischen Bedingungen in der Zelle entsprachen bei dieser Anordnung in hohem Maße den praktischen Gegebenheiten im Spannkanaal. Der rechte Einfüllstutzen wurde verschlossen, um auch den möglicherweise auf der Baustelle eintretenden abnehmenden Sauerstoffgehalt im Hüllrohr zu simulieren.

4.3.4.3 Ergebnisse

Unter den vorgenannten Bedingungen der Vorkorrosion in chlorid- bzw. chlorid- und sulfathaltiger Umgebung trat bei keinem der untersuchten Stähle der Qualität St 1420/1570 bzw. St 1080/1230, die als wasserstoffempfindliche Spannstahlqualitäten unter Korrosionsbelastung eingestuft werden können (2) im Dauerstandversuch ein Bruch ein. Um zu überprüfen, inwieweit Veränderungen der mechanischen Kennwerte eingetreten waren, die Rückschlüsse auf wasserstoffinduzierte Versprödung der Spannstähle zuließen, wurden nach Beendigung der Dauerstandversuche Zugversuche an den Spannstählen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Zugversuche im Hinblick auf die Brucheinschnürung, die als sensibelster Indikator für wasserstoffinduzierte Versprödungseffekte in Spannstählen anzusehen ist, sind in den Abbildungen 37 und 38 für den vergüteten Spannstahl St 1420/1570 dargestellt. Aus den Abbildungen geht hervor, daß sowohl nach Chlorid- bzw. kombinierter Chlordi-Sulfat-Vorkorrosion und anschließendem Dauerstandversuch ohne die Anwendung temporärer Korrosionsschutzmittel wasserstoffinduzierte Versprödungseffekte am Spannstahl St 1420/1570 auftreten, die sich in einer Verminderung der Brucheinschnürung ausdrücken. Wie die in den Abb. 37 und 38 jeweils ganz rechts stehenden

Balkenwerte zeigen, wird die Brucheinschnürung erheblich abgemindert gegenüber dem Streuband der Originalwerte der Brucheinschnürung. Bei der Anwendung der Mittel Rustban 310 (als Emulsion oder auch in reinem Zustand) und Rustban 393 treten diese Abminderungen der Brucheinschnürung gar nicht oder in nicht so ausgeprägter Form auf. Ein promovierender Effekt dieser Mittel im Hinblick auf die Wasserstoffaktivität kann somit im nichtinjizierten Hüllrohr ausgeschlossen werden. Wie die Ergebnisse zeigen wird im Gegenteil durch die Verwendung der Mittel ein Korrosionsschutzeffekt selbst unter dieser sehr hohen Korrosionsbelastung erzielt.

Gleichartige Ergebnisse ergaben sich auch für die Spannstahlqualität St 1080/1230.

4.3.5 Langzeitverhalten von Spannstählen mit temporären Korrosionsschutzmitteln in verpreßten Hüllrohren

Um Informationen über das Langzeitverhalten von Spannstählen mit temporären Korrosionsschutzmitteln in verpreßten Hüllrohren zu erhalten wurden Spannstähle der Qualitäten St 835/1030 ($d = 26$ mm), St 1080/1230 ($d = 26$ mm), St 1420/1570 ($d = 12$ mm) und St 1350/1570 ($d = 12.2$ mm) mit den temporären Korrosionsschutzmitteln Rustban 310 und 393 beschichtet und mit 80% der Zugfestigkeit vorgespannt. Daran anschließend wurden die Hüllrohre verpreßt und in diesem Zustand für fast 3 Jahre belassen. Während dieser Zeit trat an allen Spannstählen kein Bruch ein.

Nach ca. 3 Jahren wurden die Spannstähle entlastet und ausgebaut. Abb., 39 zeigt beispielhaft die Spannstahloberfläche und Reste des Verpreßmörtels. Die Filme des Korrosionsschutzmittels Rustban 310 sind mit dem Injektionsmörtel durchmischt und optisch kaum zu erkennen. Die Spannstahloberfläche befindet sich in einem korrosionsfreien Passivzustand ohne großflächige oder lokale Korrosionsbezirke.

Um sicherzustellen, daß dieser optisch einwandfreie Zustand sich auch bei der Prüfung der Spannstähle in Zugversuchen bestätigen würde, sind an ausgebauten Proben Zugversuche durchgeführt worden, die keine Abweichung von den Originalwerten der Spannstähle ergaben. Eine Gefährdung durch wasserstoffinduzierte Spannungsrißkorrosion der Spannstähle im verpreßten Hüllrohr bei Verwendung dieser Korrosionsschutzmittel liegt nach diesen Ergebnissen nicht vor.

5 Zusammenfassung

Um die Wirksamkeit und Unschädlichkeit zeitlich begrenzter Korrosionsschutz-Maßnahmen für Spannstähle in unverpreßten Hüllrohren zu untersuchen, sind aktive und passive Korrosionsschutz-Verfahren praxisnah untersucht worden. Baustellenuntersuchungen und praxisnahe Versuche an Versuchsbalken bzw. Laborproben ergaben, daß das Durchspülen von Spannkämen mit vorgetrockneter Luft bzw. Stickstoff auch über Zeiträume von mehr als einem Jahr hinreichenden Korrosionsschutz von Spannstählen in unverpreßten Hüllrohren gewährleistet.

Vergleichbare Korrosionsschutz-Effekte können auch bei der Verwendung filmbildender Mittel auf der Spannstahloberfläche erzielt werden. Dies wird durch Auslagerungsversuche, elektrochemische Untersuchungen und Dauerstandversuche mit starker Korrosionsbelastung der Hüllrohre belegt. Eine schädigende Wirkung der Mittel durch Erhöhung des Risikos eines wasserstoffinduzierten Bruches an Spannstählen bei Verwendung der handelsüblichen Mittel Rustban 310 und 393 wurde in langfristigen Dauerstandversuchen sowohl in unverpreßten als auch in injizierten Hüllrohren nicht ermittelt.

6 Literatur

- (1) U. Nürnberger
"Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen"
Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 308
(1980) Bonn - Bad Godesberg 1/195
- (2) B. Isecke, W. Stichel
"Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren"
Forschungsbericht 87 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin (1982) 1/49
- (3) G. Herbsleb
"Korrosionsschutz von Stahl"
Verlag Stahleisen m.b.H. Düsseldorf (1977) 1/25
- (4) A. Rahmel, W. Schwenk
"Korrosion und Korrosionsschutz von Stahl"
Verlag Chemie, Weinheim, New York (1977) 1/380
- (5) W. Friehe
Metalloberfläche 22 (1968), 264/69
- (6) G. Riehe, J. Delille
"Erfahrungen bei der Prüfung von temporären Korrosionsschutzmitteln für Spannstähle"
Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 298, Berlin
(1978)
- (7) G. Rieche
"Temporärer Korrosionsschutz von Spannstählen"
Berichtsband "Korrosionsverhalten von Spannstählen"
Inst. f. Bautechnik Berlin (1983) 44/46

- (8) Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Auftrags Nr. 1.3/10954 unveröffentlicht

- (9) W. H. J. Vernon
"Study of Atmospheric Corrosion of Metals"
Part III, Trans. Faraday Soc. 31 (1935) 1678/1700

- (10) H. Steger
"Die Verhütung von Stillstandskorrosion in Dampfkraft-
anlagen"
Der Maschinenschaden 49 (1967) Heft 1, 23/27

Tabelle 1

Zusammensetzung von Hüllrohrwässern

Probe Nr.	Lage im Bauwerk	pH-Wert bei 20°C	Chloridgehalt in mg/l	Sulfatgehalt in mg/l
1	Querträger	12,0	181	1584
2	Querspannglied	11,2	63	182
3	Querspannglied	11,2	63	181
4	Querspannglied	11,4	58	180
5	Querspannglied	11,4	58	182
6	Längsspannglied	11,4	81	869
7	Querspannglied	10,9	58	512
8	Fahrbahnplatte	11,5	32	100
9	Längsträger	11,3	145	.-
10	Querträger	11,8	220	2830
11	Rahmenstiel	11,9	301	4304
12	Rahmenstiel	7,7	337	4327
13	Rahmenstiel	11,1	284	4881
14	Rahmenstiel	9,0	277	4007
15	Rahmenstiel	7,1	291	3969
16	Rahmenstiel	7,1	267	3933
17	Rahmenstiel	9,7	250	3667
18	Längsspannglied	11,3	4	28
19	Längsspannglied	8,6	8	117
20	Längsspannglied	11,1	2	31
21	Längsspannglied	11,3	2	49
22	Querspannglied	11,3	3	49
23	Querspannglied	10,2	18	260
24*	Längsspannglied	10,3	82	236
25*	Längsspannglied	10,3	82	239
26*	Längsspannglied	10,3	82	194
27	Längsspannglied	11,4	115	475

* Wasser vor dem Betonieren eingefüllt

Abb. 1: Korrosionssystem Spannstahl im unverpreßten Hüllrohr

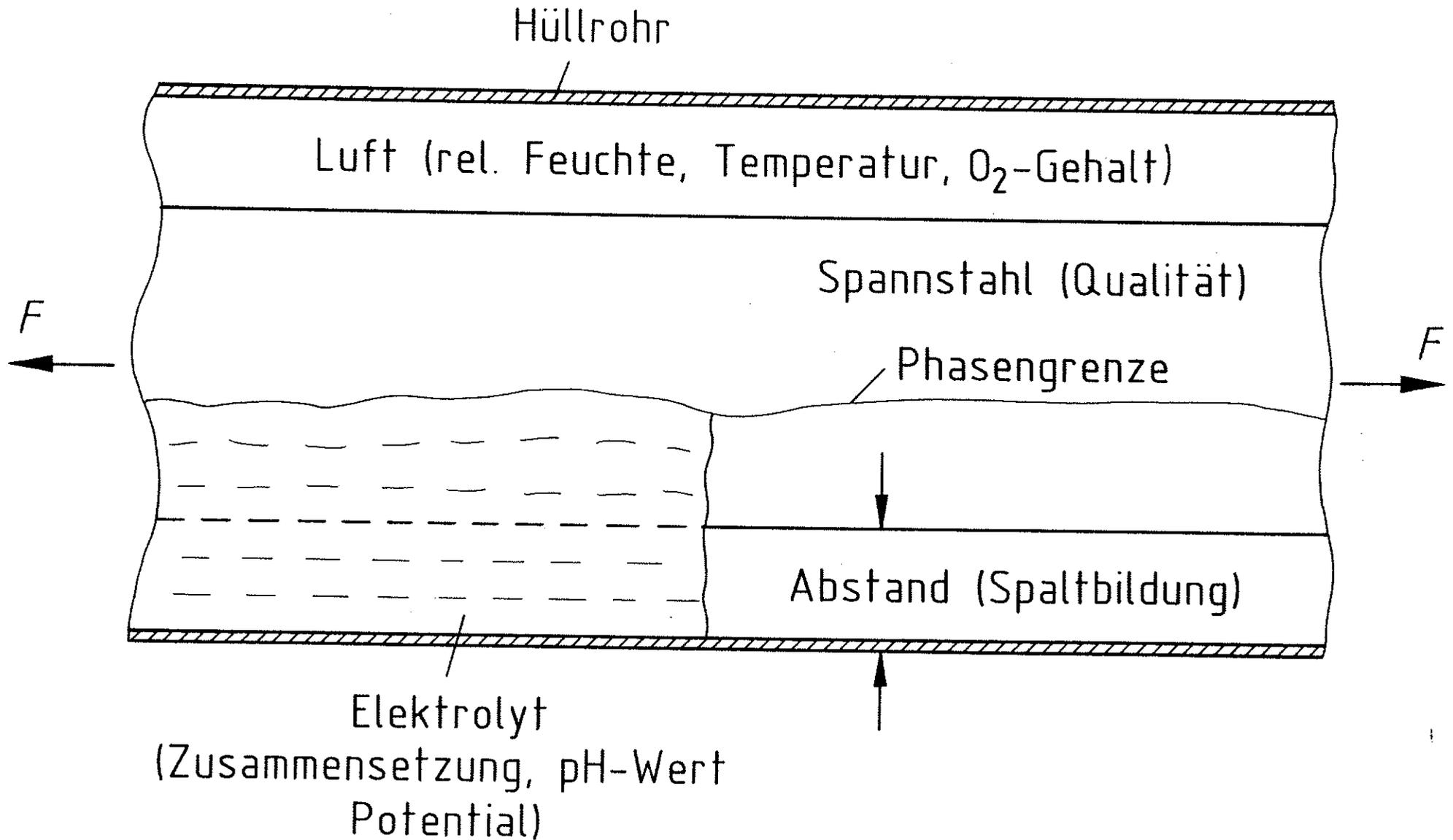


Abb. 2: Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in Abhängigkeit von der relativen Feuchte der Umgebungsluft mit 0,01 % SO₂ (nach 9)

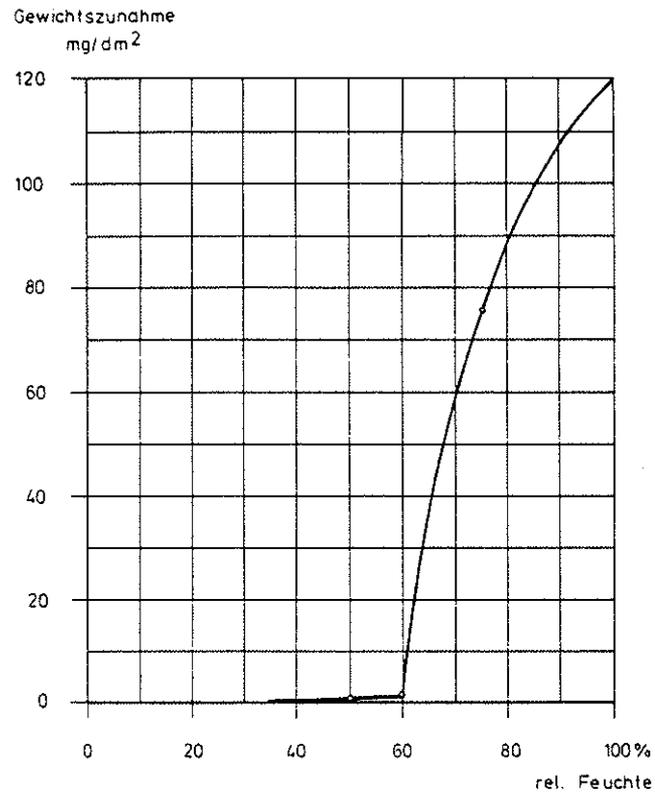


Abb. 3: Funktionsschema der kontinuierlichen Adsorptionstrocknung (Munters-Verfahren)

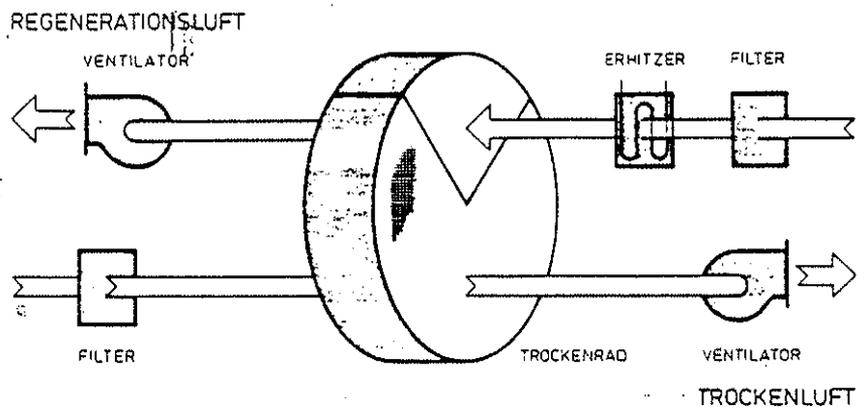


Abb. 4: Relative Feuchte in Abhängigkeit von der Zeit

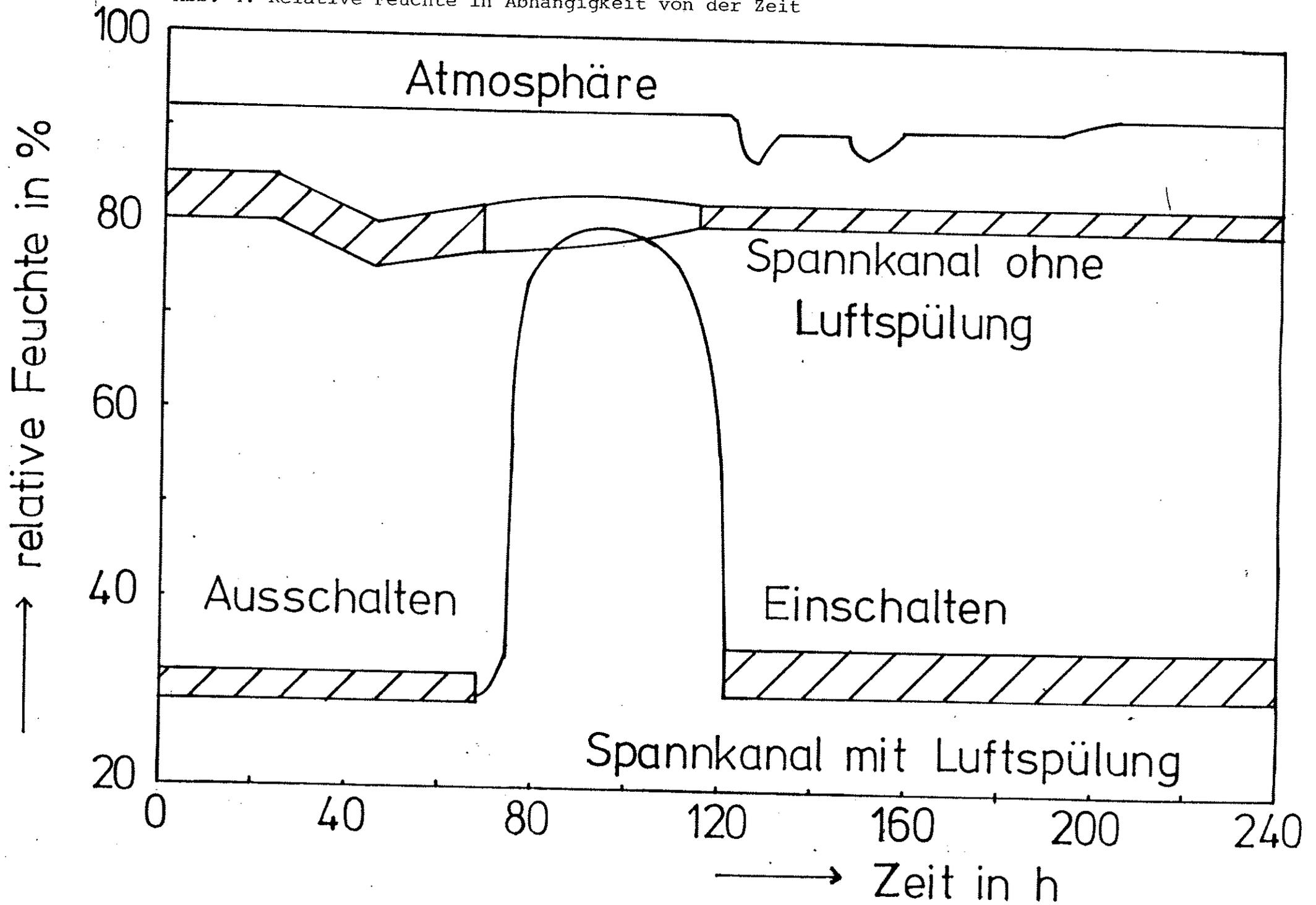
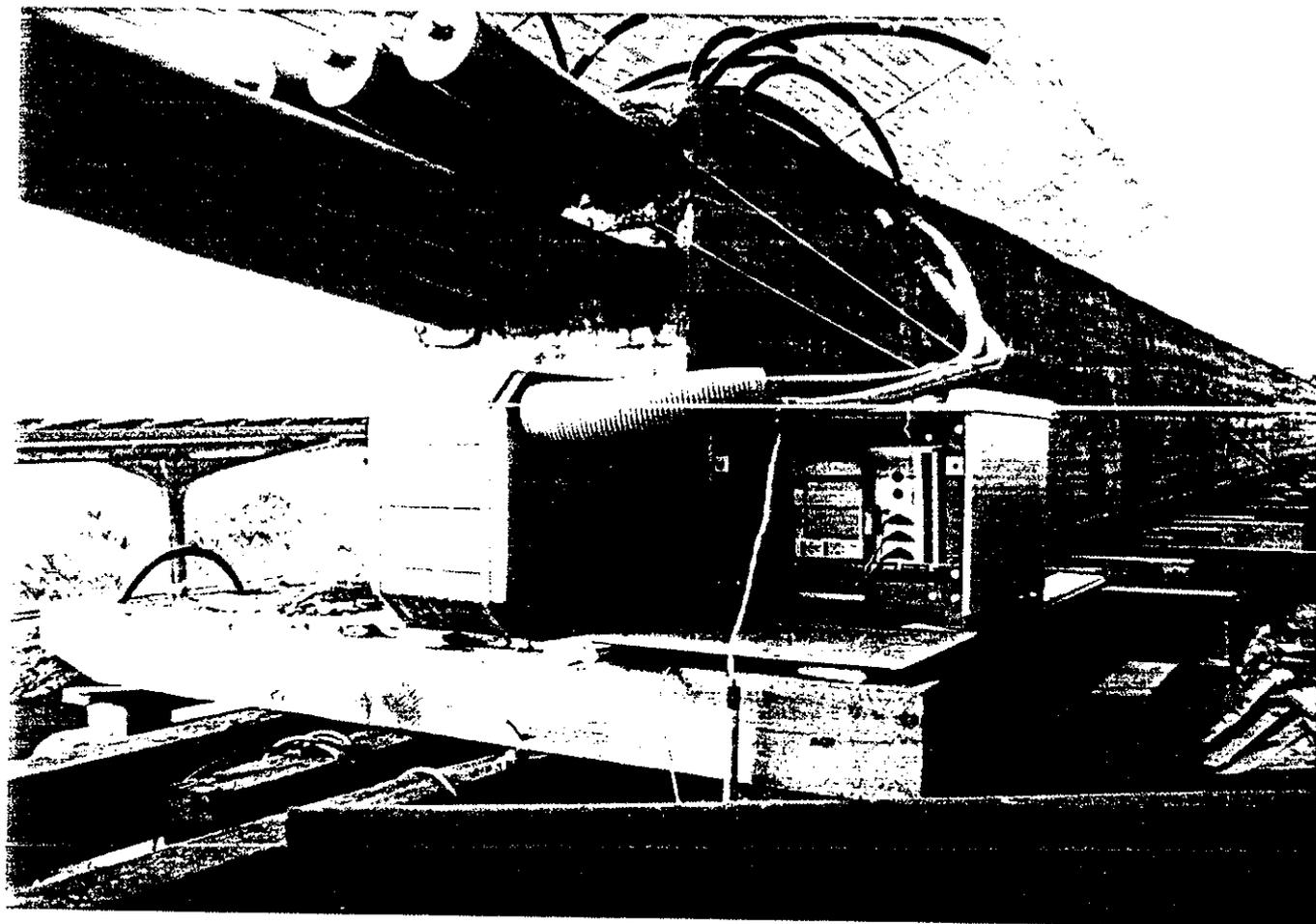
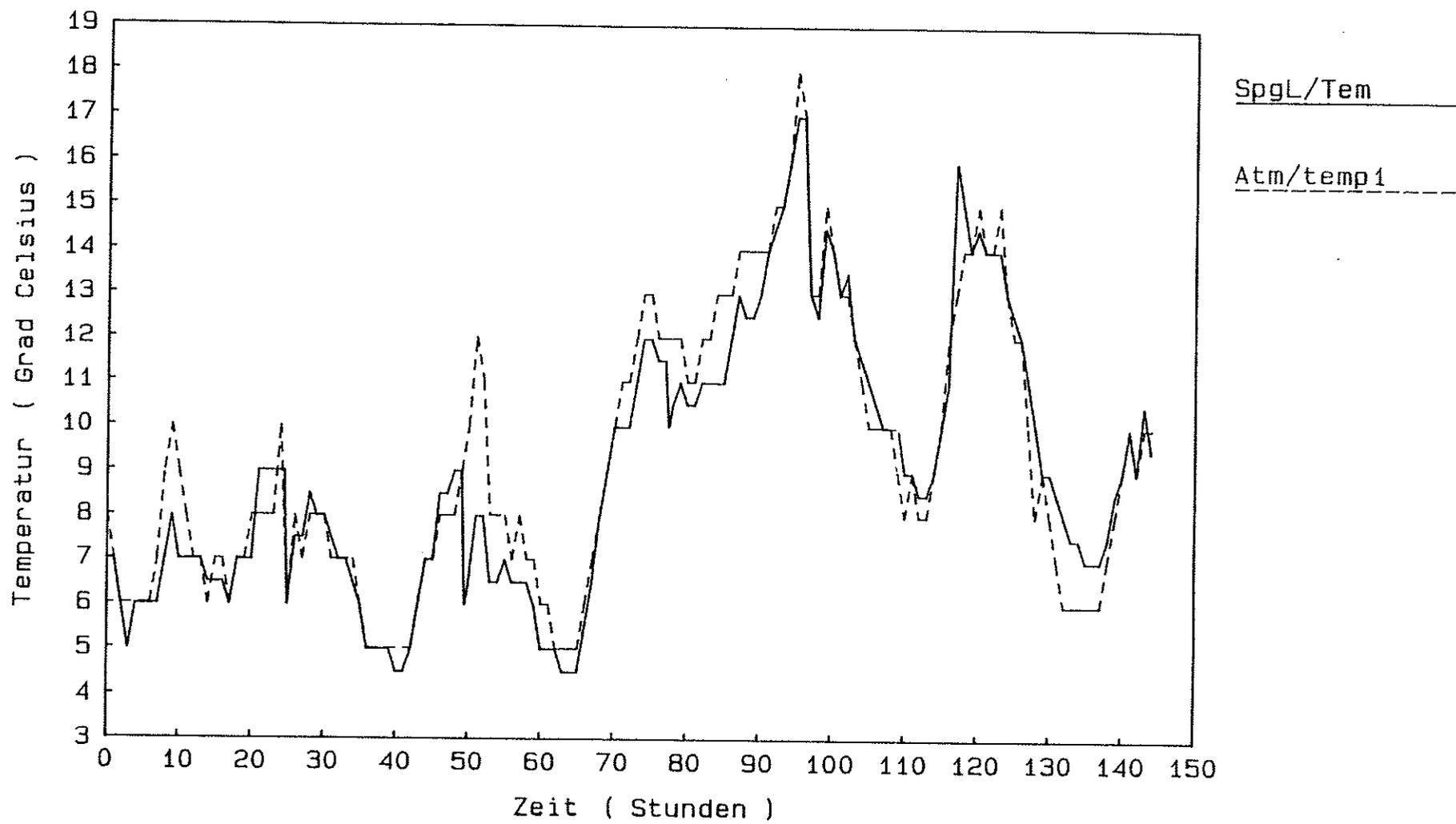


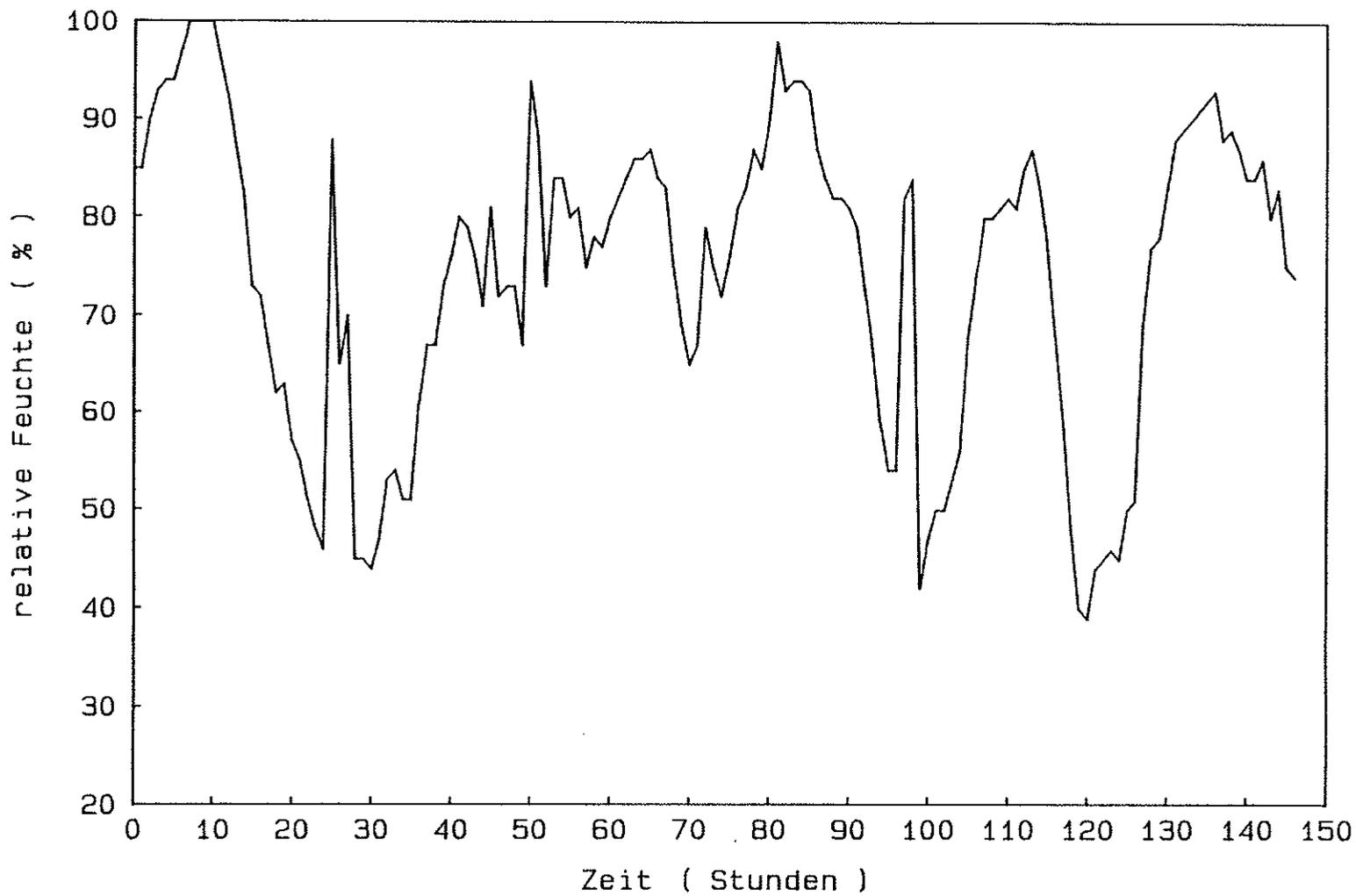
Abb. 5: Versuchsbalken mit Meßeinrichtungen





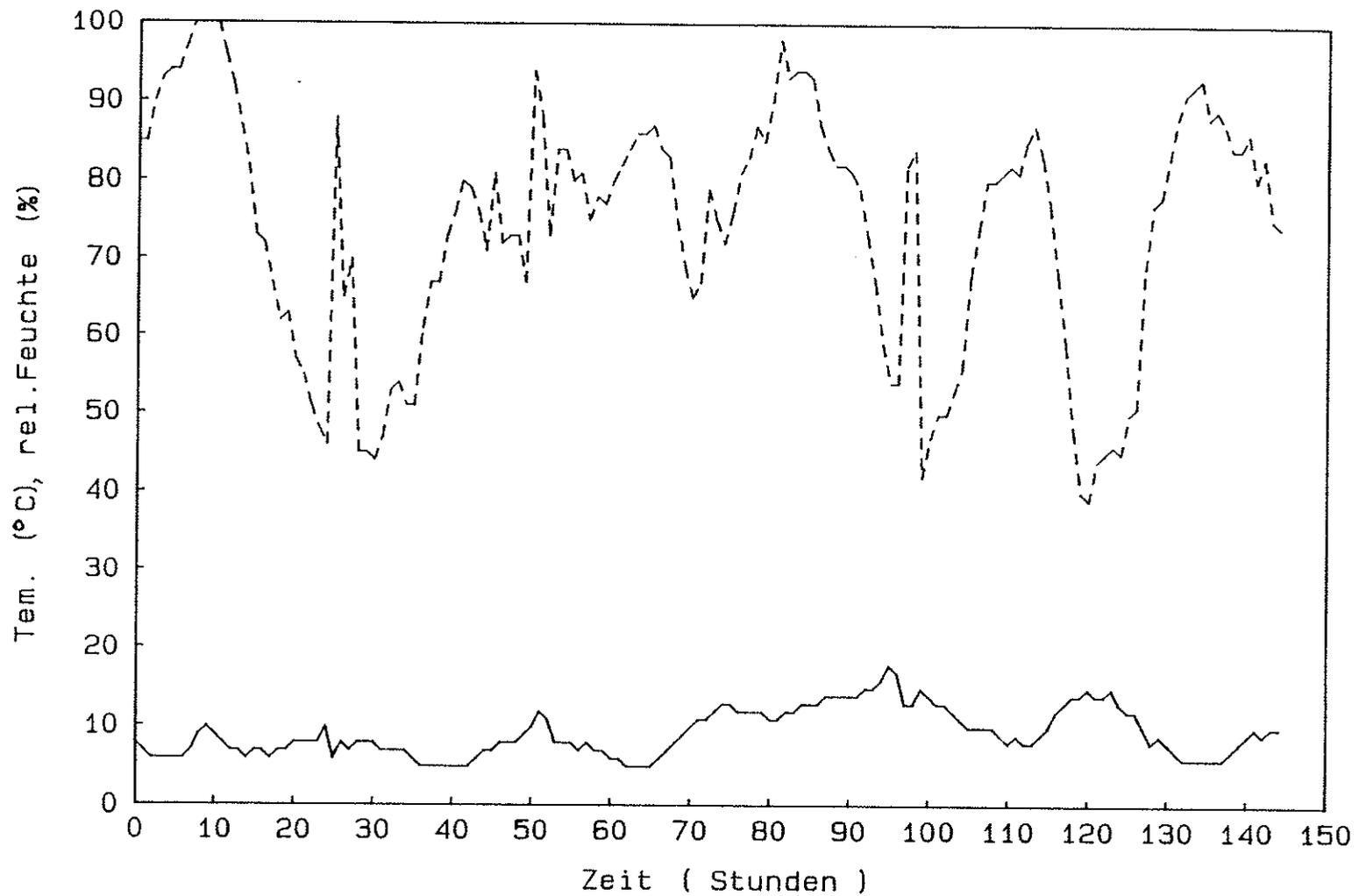
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 6: Temperatur und Feuchtemessung
in Spannkanälen



BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 7: Temperatur und Feuchtemessung
in Spannkanälen

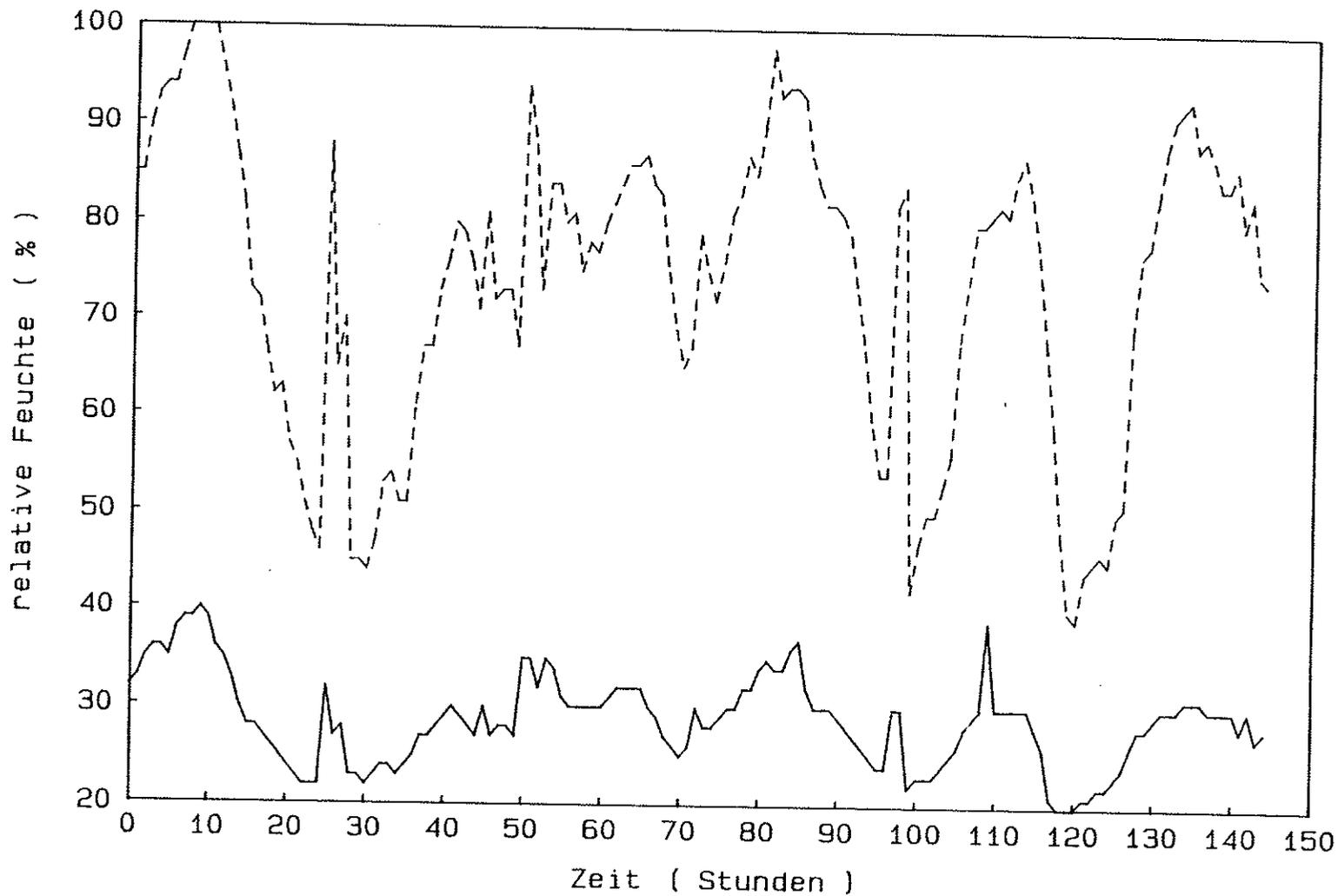


Temperatur

rel. Feuchte

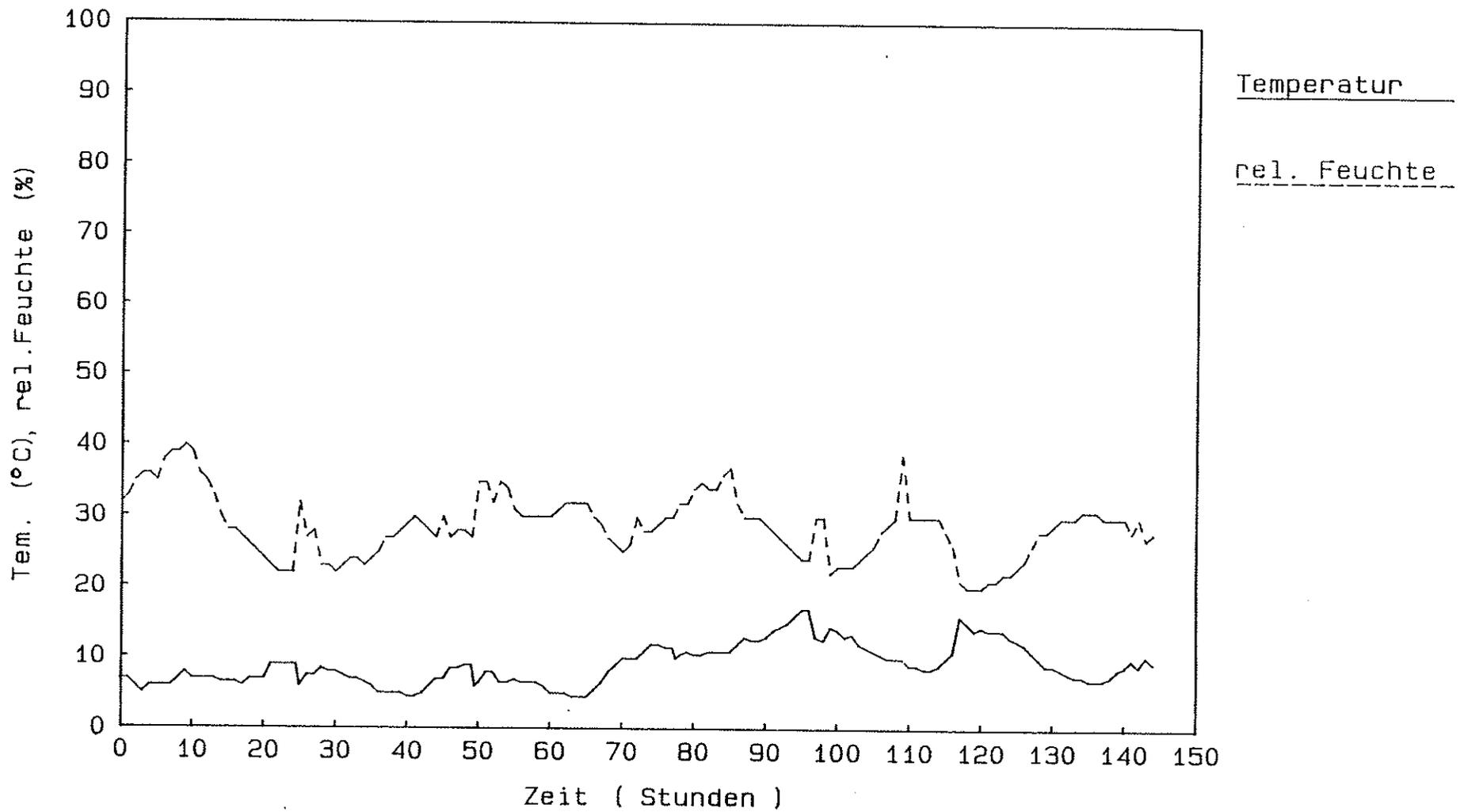
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 8: Temperatur und Feuchtemessung
in der Atmosphäre



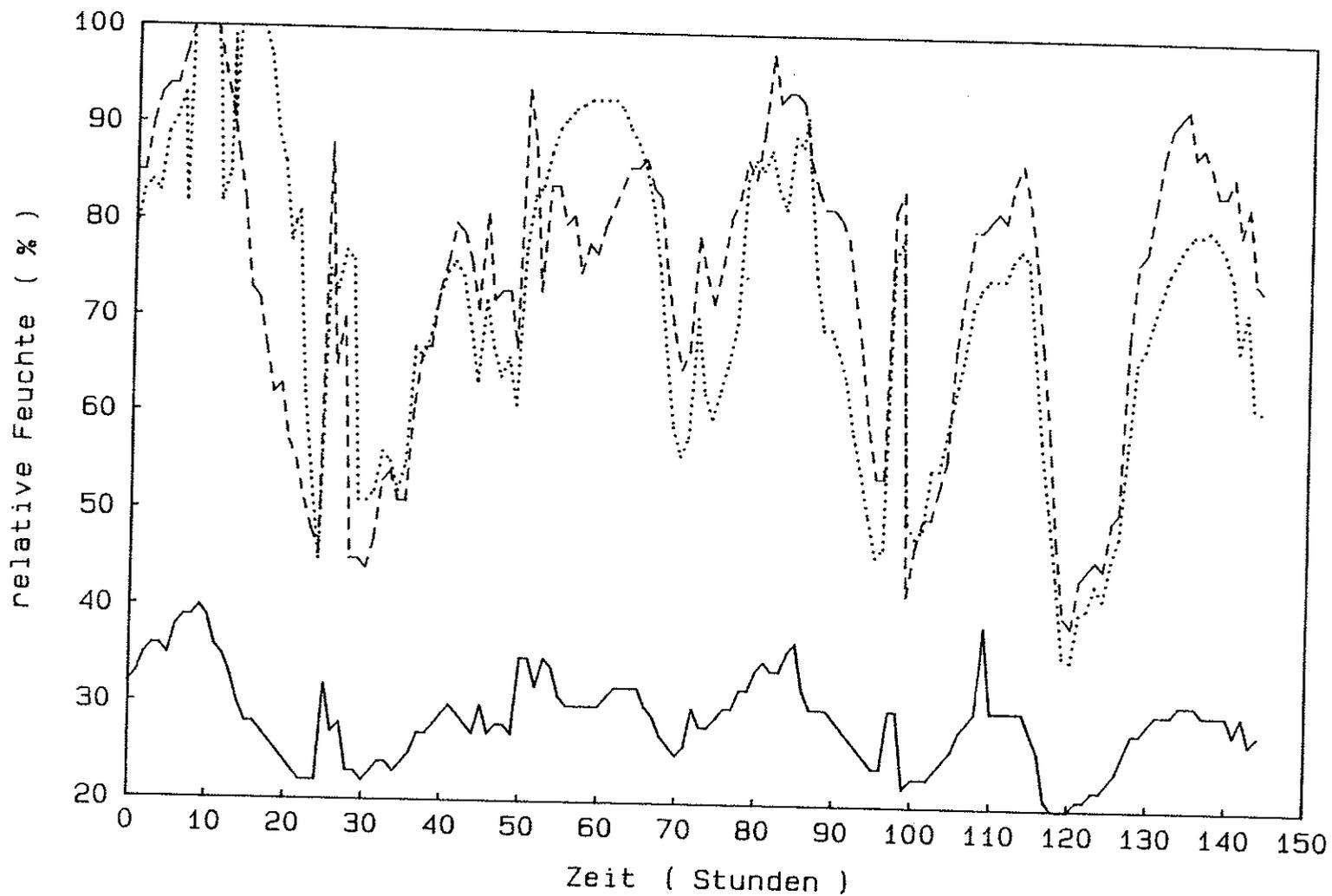
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 9: Temperatur und Feuchtemessung
in Spannkanälen



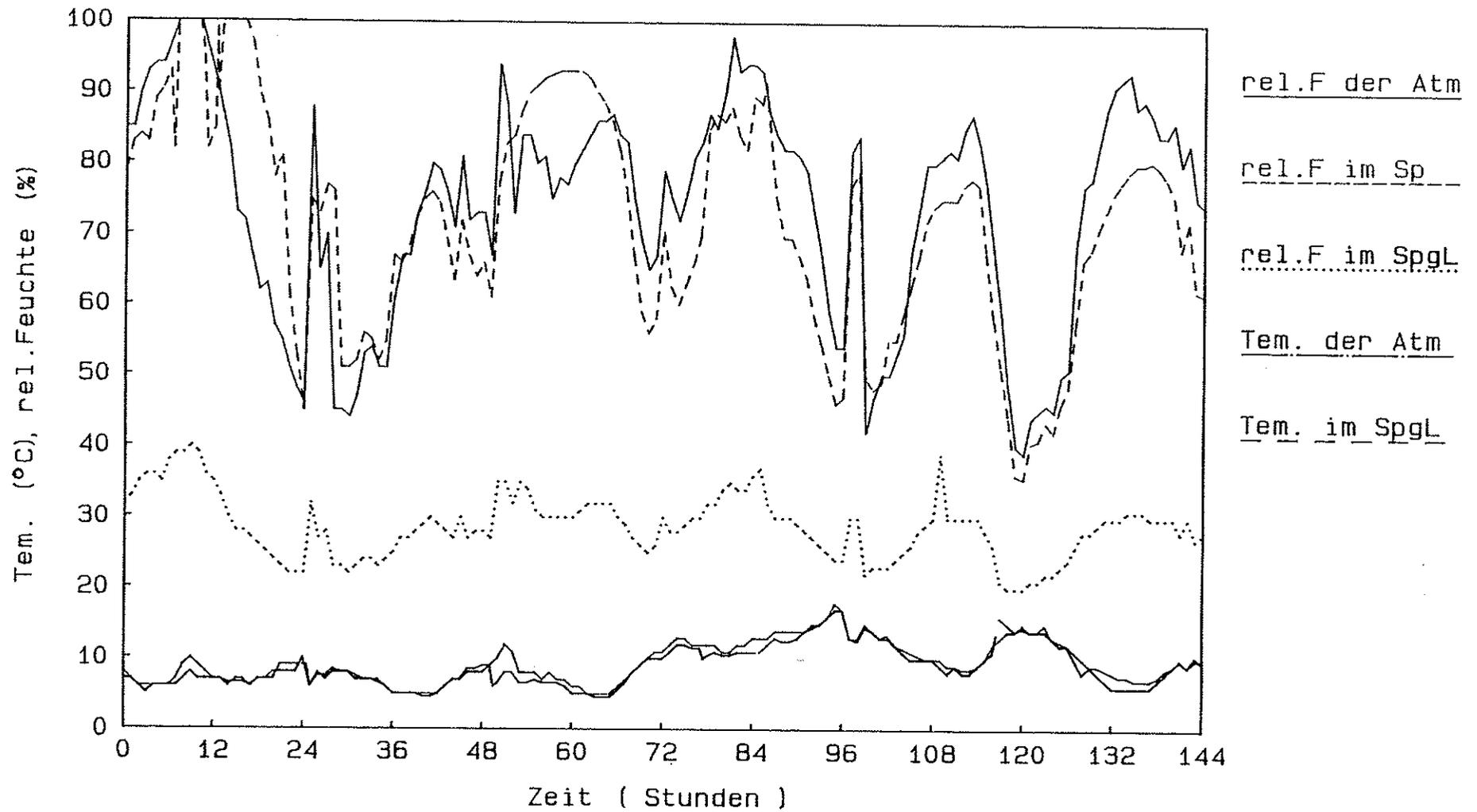
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 10: Temperatur und Feuchtemessung
im Spannkanal mit getrockneter Luft



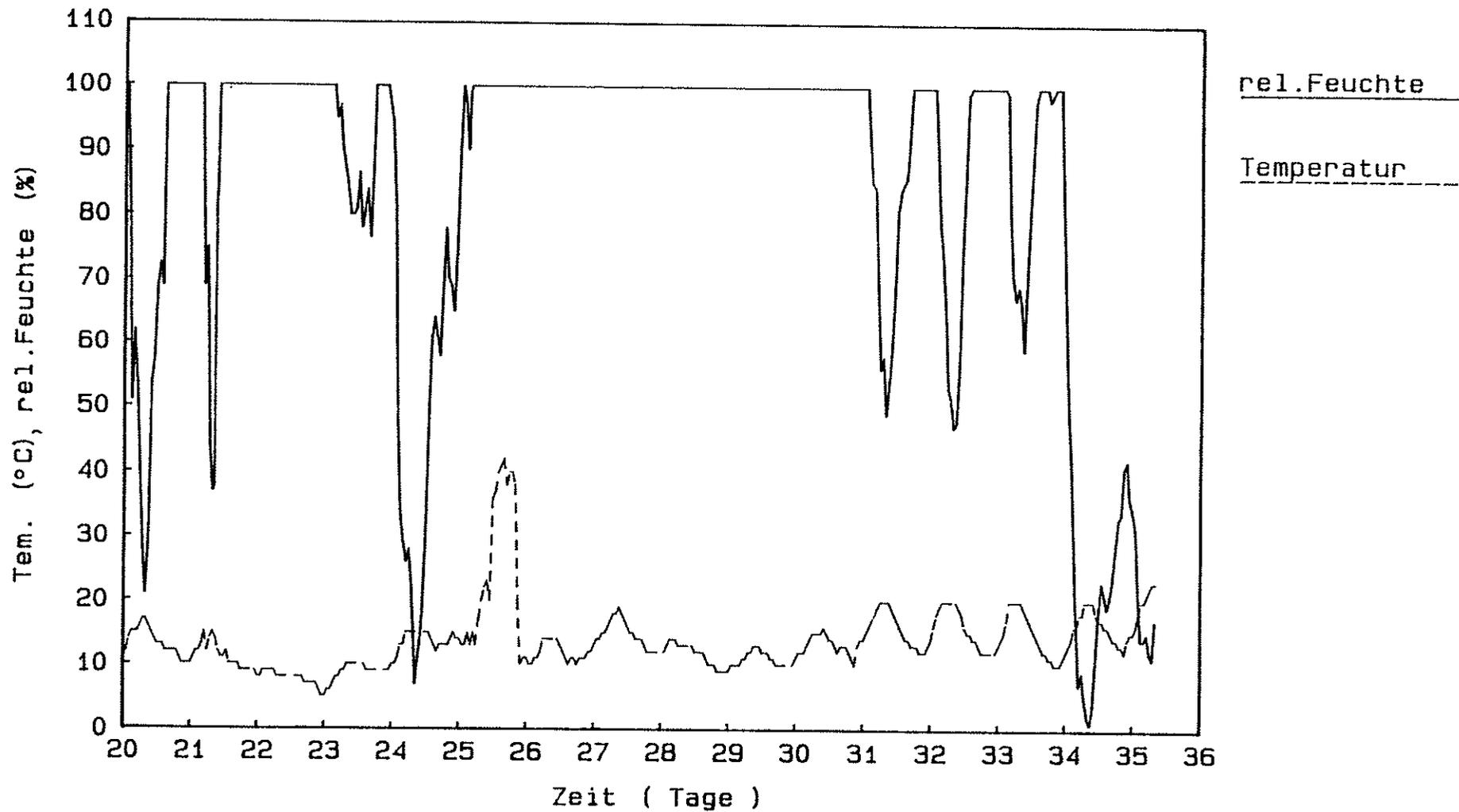
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 11: Feuchtemessung in Atmosphäre
und Spannkanälen



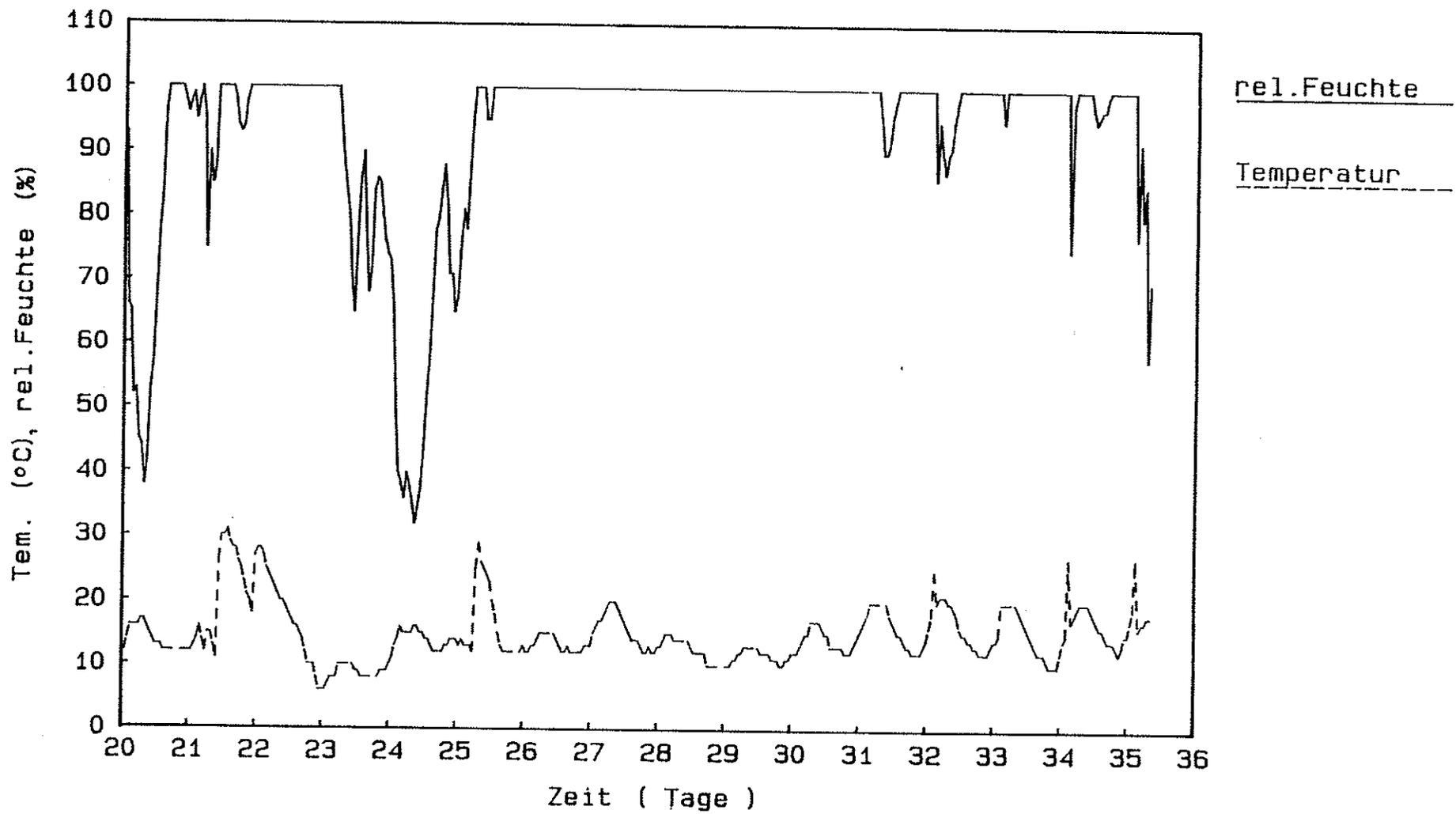
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 12:
Temperatur/Feuchtemessung in Atmosphäre (Atm) Spannkanaal (Sp)
u. Spannkanaal mit getrockneter Luft (SpgL)



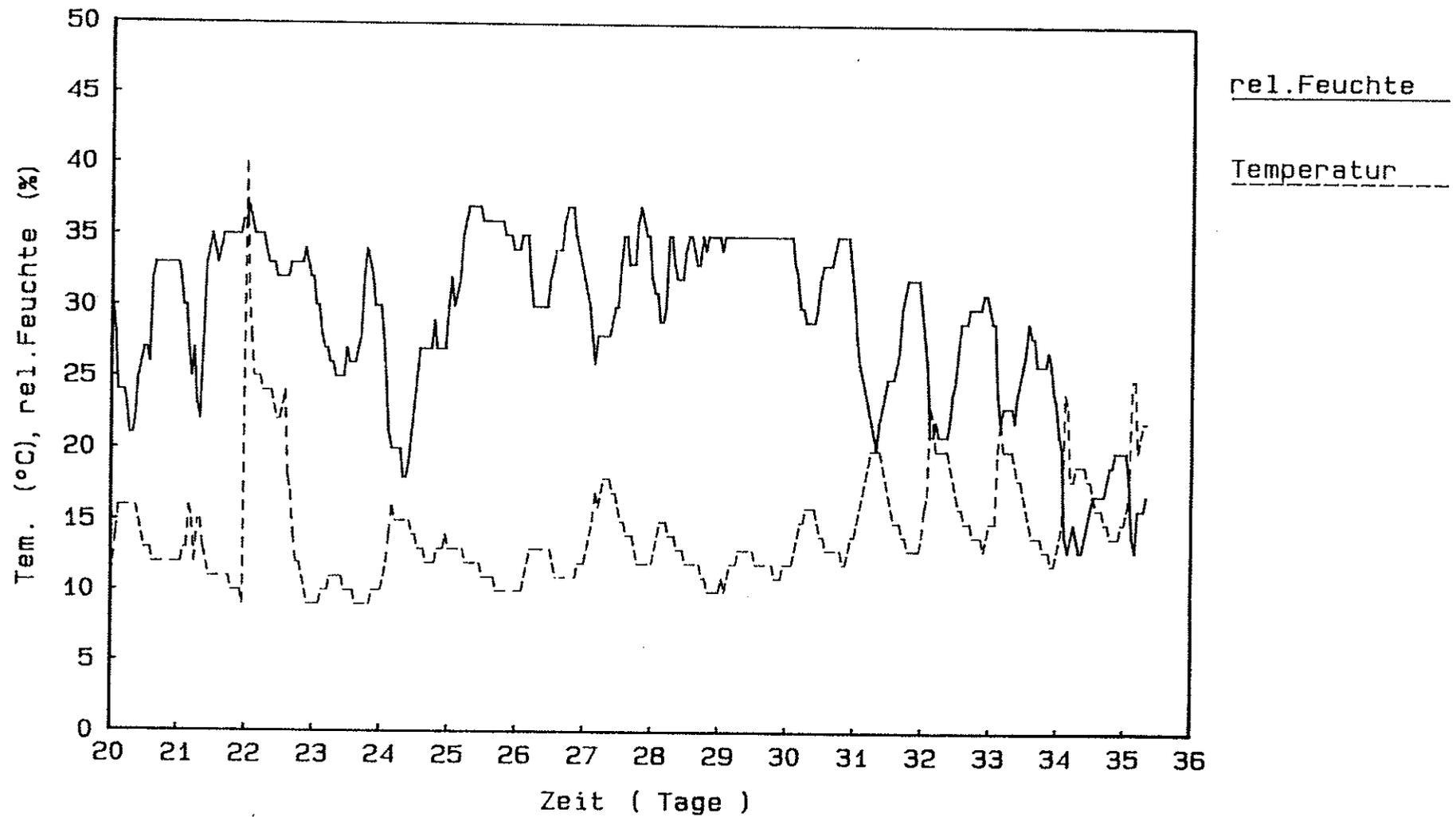
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 13: Temperatur- und Feuchtemessung
in der Atmosphäre



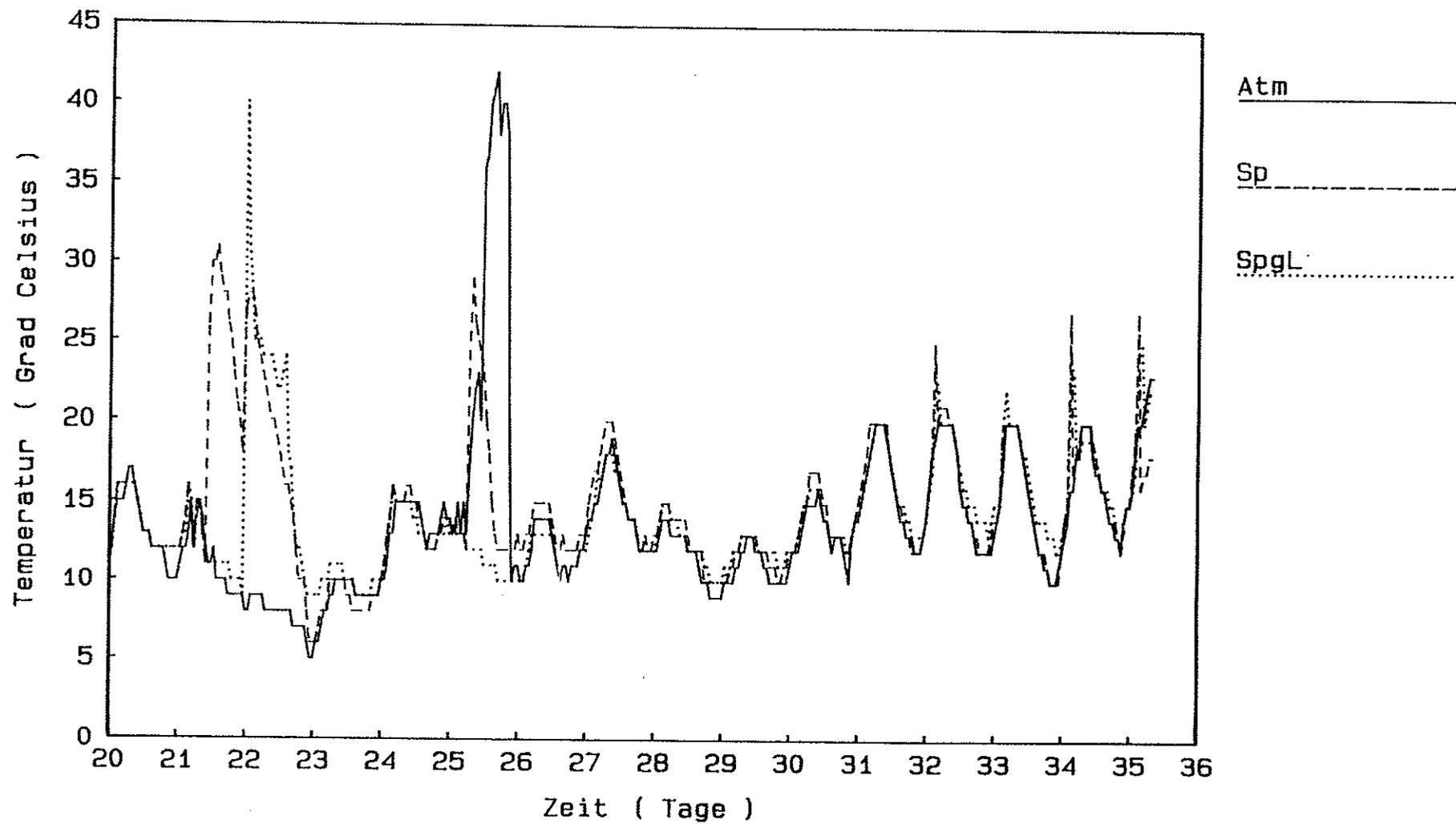
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 14: Temperatur- und Feuchtemessung
im Spannkanal ohne getrocknete Luft



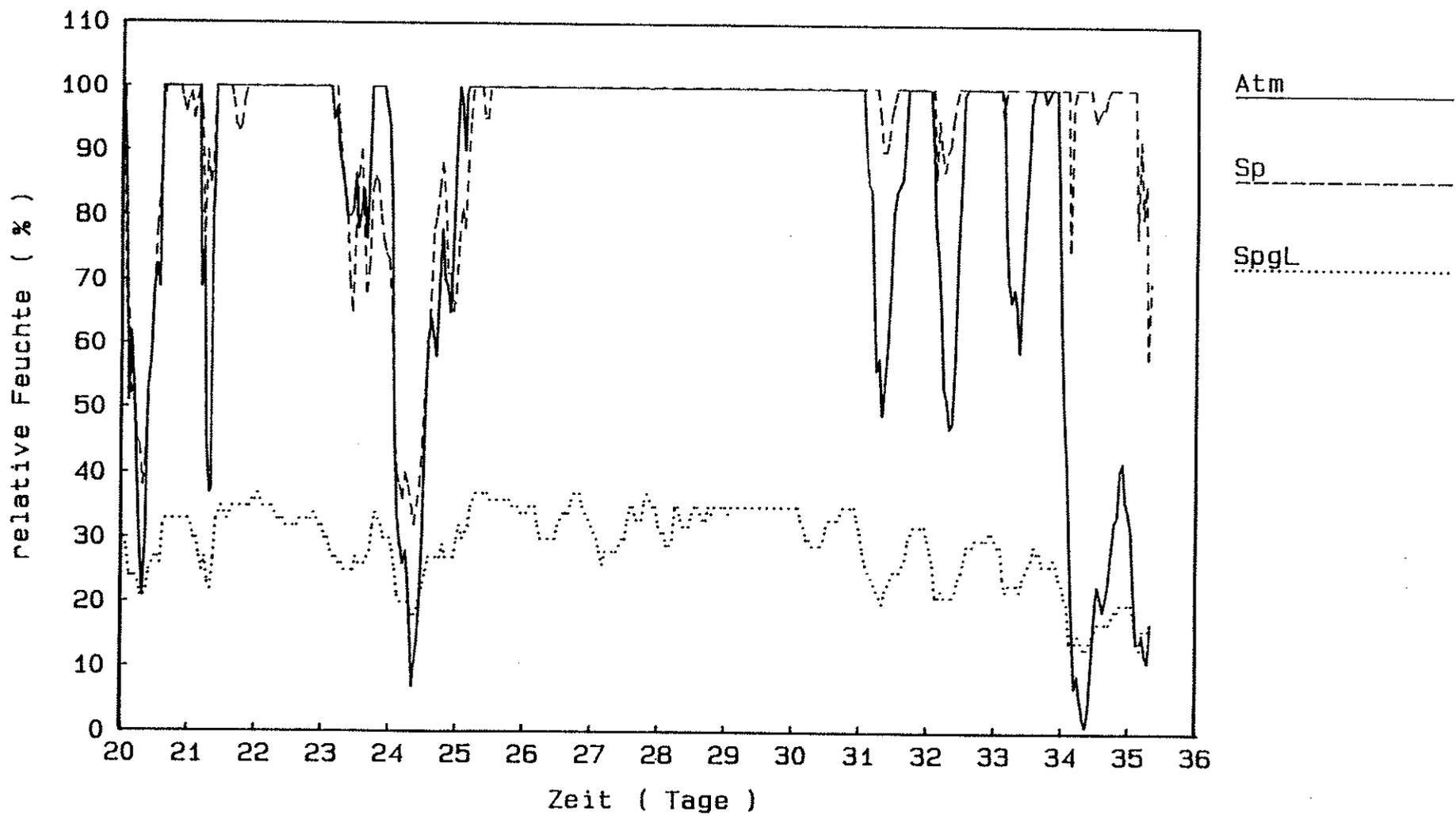
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 15: Temperatur- und Feuchtemessung
im Spannkanal mit getrockneter Luft



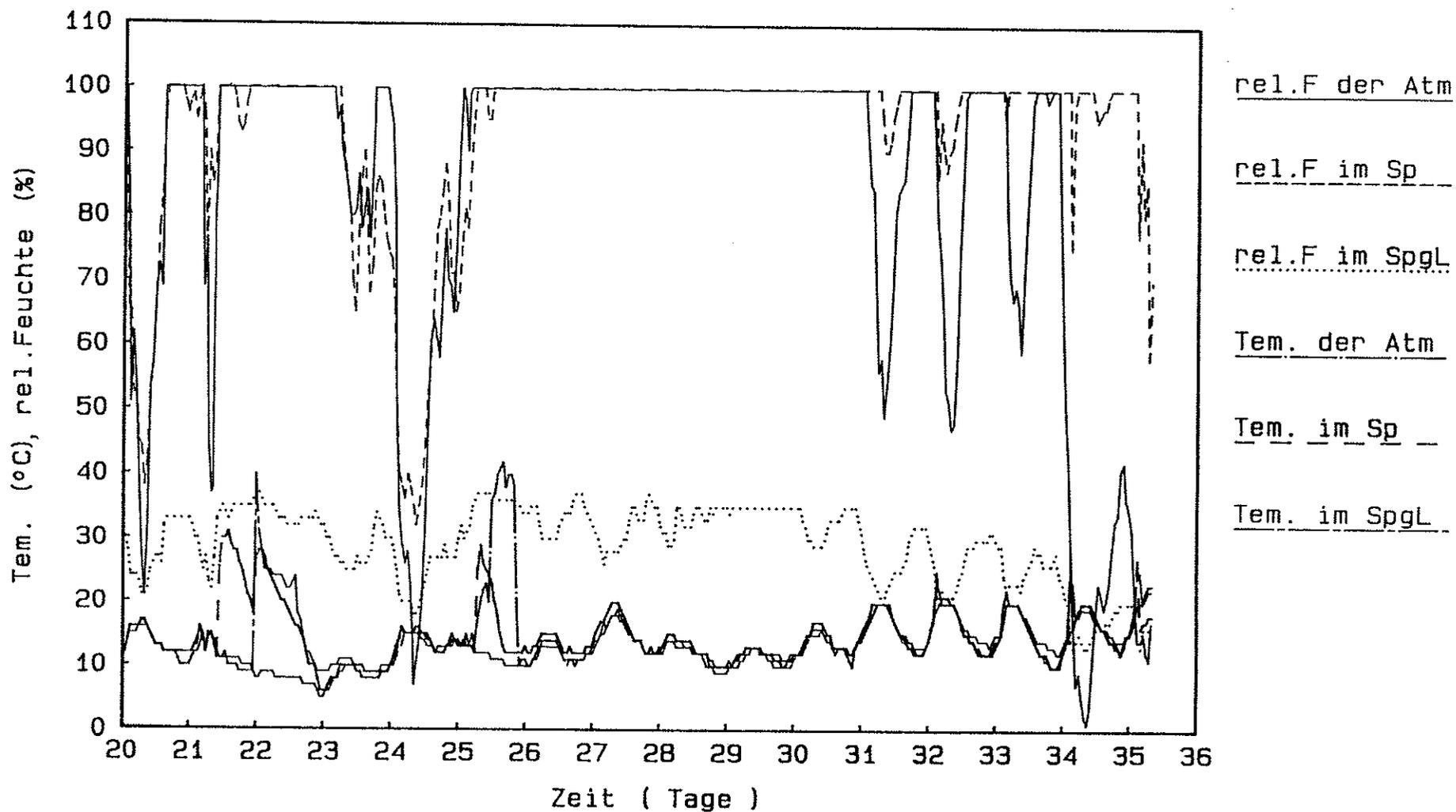
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 16:
Temperaturmessung in Atmosphäre (Atm), Spannkanaal (Sp)
u. Spannkanaal mit getrockneter Luft (SpgL)



BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb.17: Feuchtemessung in Atmosphäre (Atm), Spannkanaal (Sp)
u. Spannkanaal mit getrockneter Luft (SpgL)



BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 18:
Temperatur/Feuchtemessung in Atmosphäre (Atm), Spannkanal (Sp)
u. Spannkanal mit getrockneter Luft (SpGL)



Abb. 19: Korrosionsverhalten der Spannstähle
an den Enden des Versuchsbalkens



Abb. 20: Korrosionsverhalten der Litzen in der
Mitte des Versuchsbalkens

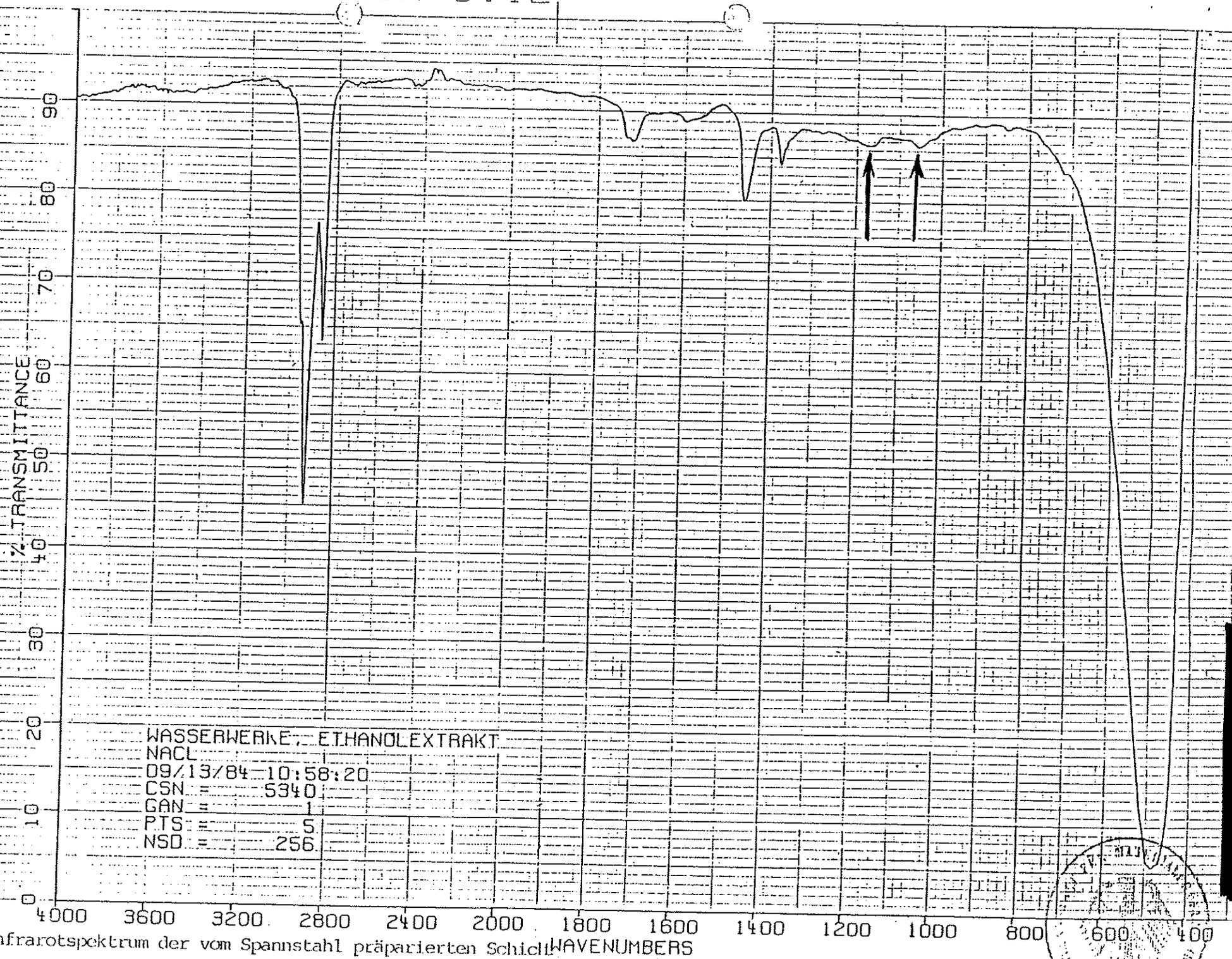


Abb.21: Infrarotspektrum der vom Spannstahl präparierten Schicht

DMT DL 1 IN 3.42

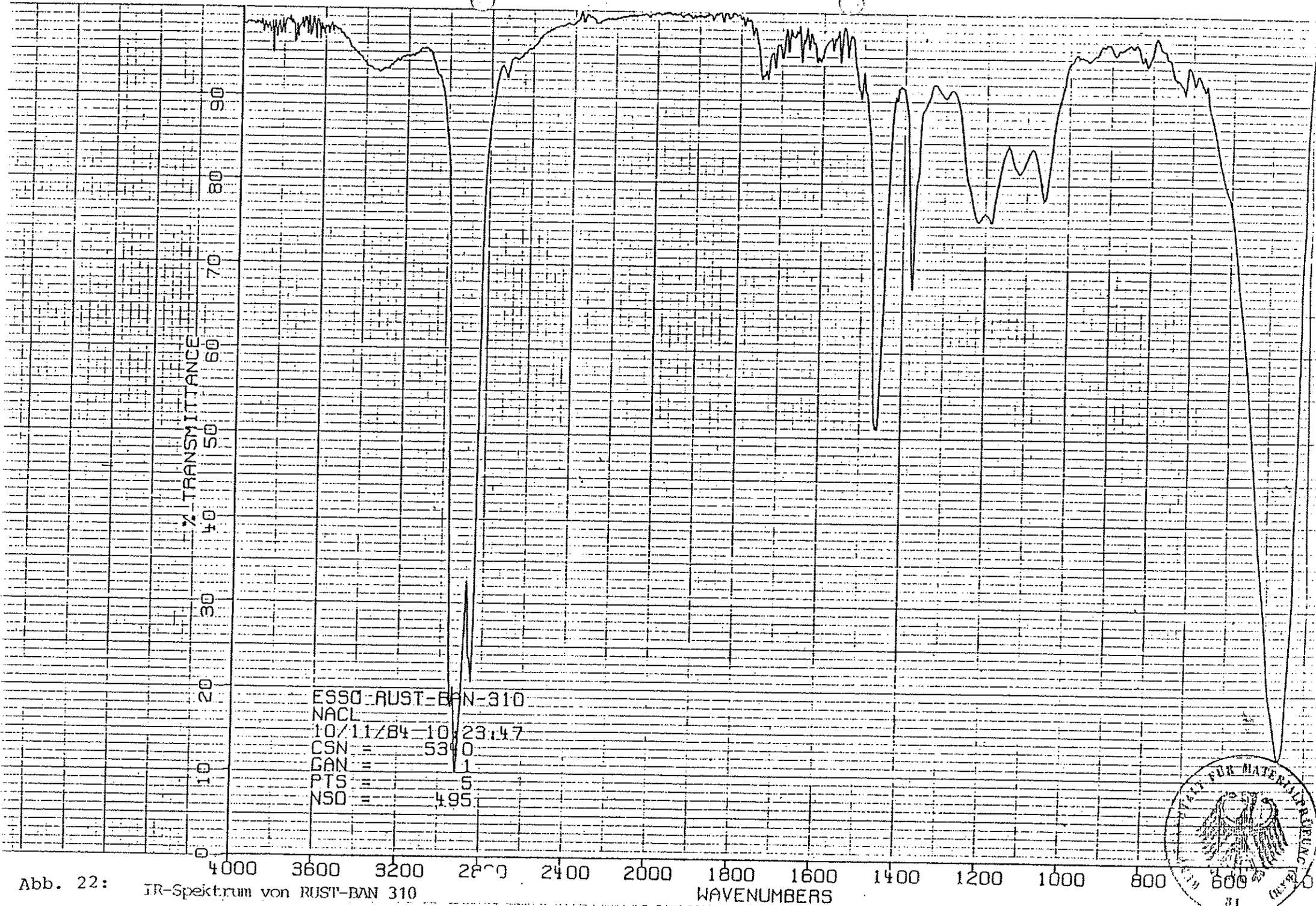
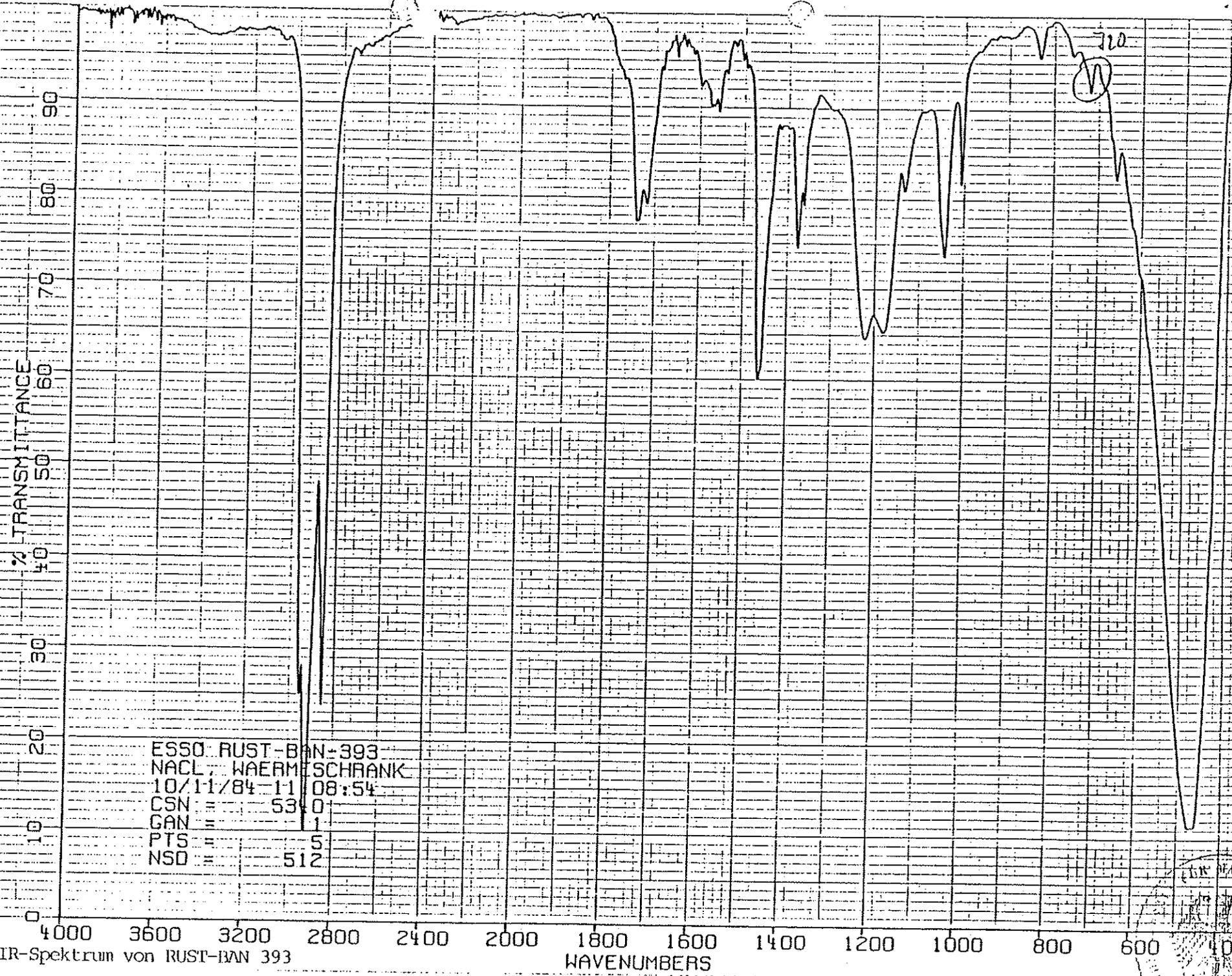


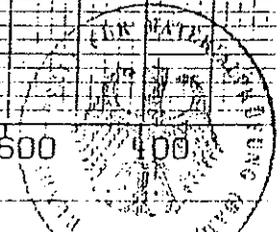
Abb. 22: IR-Spektrum von RUST-BAN 310





ESSO RUST-BAN-393
NACL. WAERME SCHRANK
10/11/84 11 08:54
CSN = 530
GAN = 1
PTS = 5
NSD = 512

Abb. 23: IR-Spektrum von RUST-BAN 393



DHM BERLIN 3.42

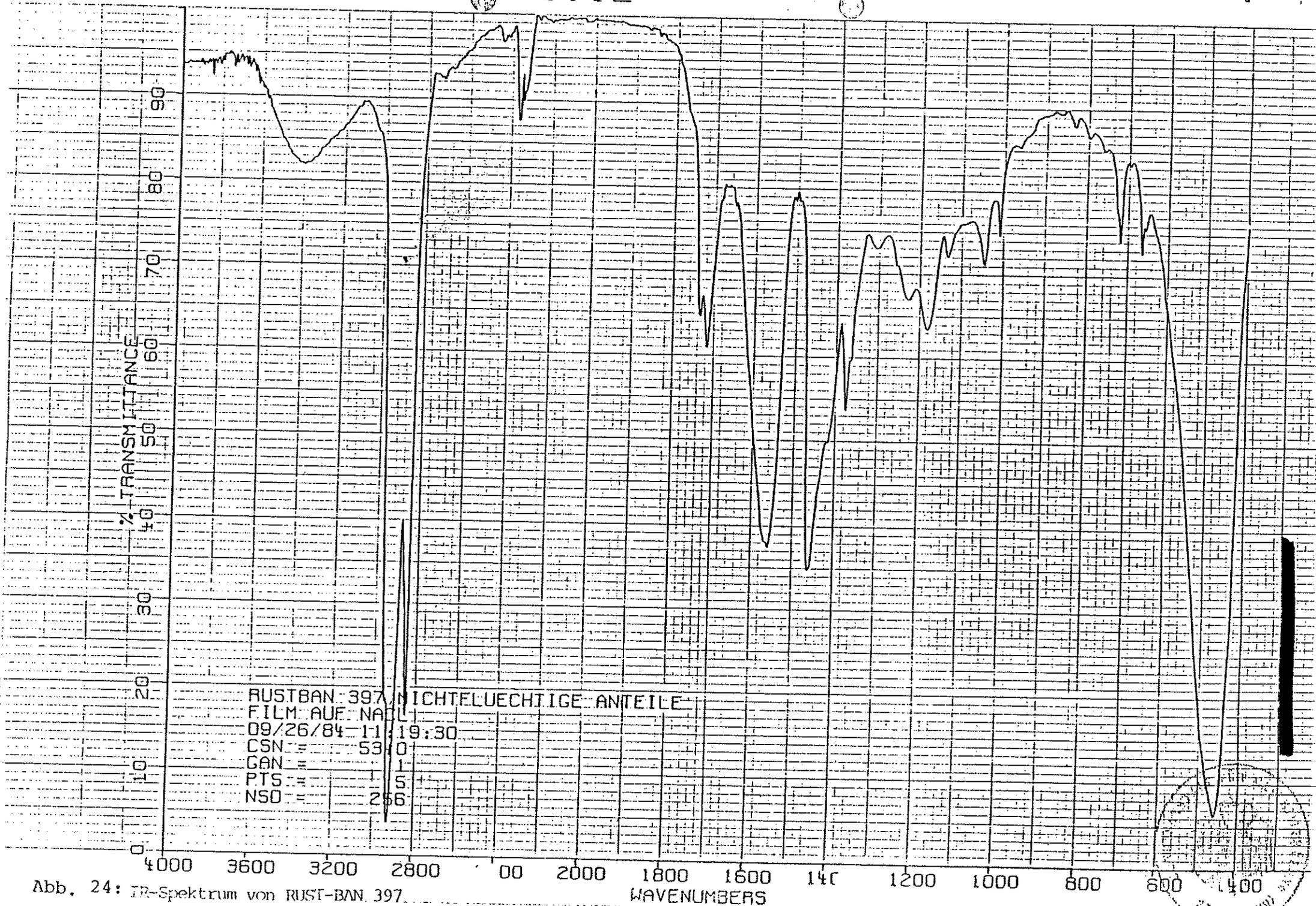


Abb. 24: IR-Spektrum von RUST-BAN 397

BAM BERLIN 3.42

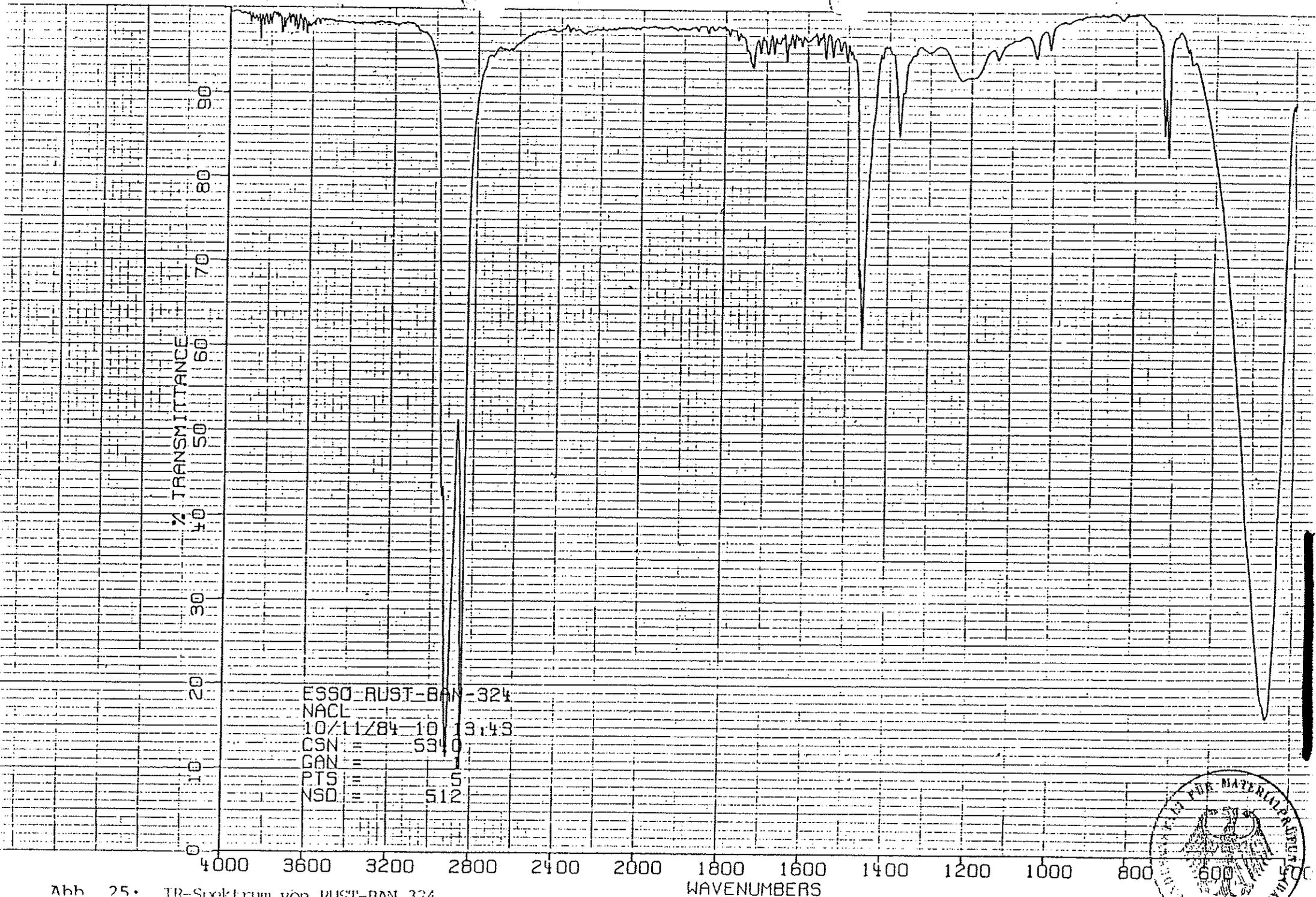
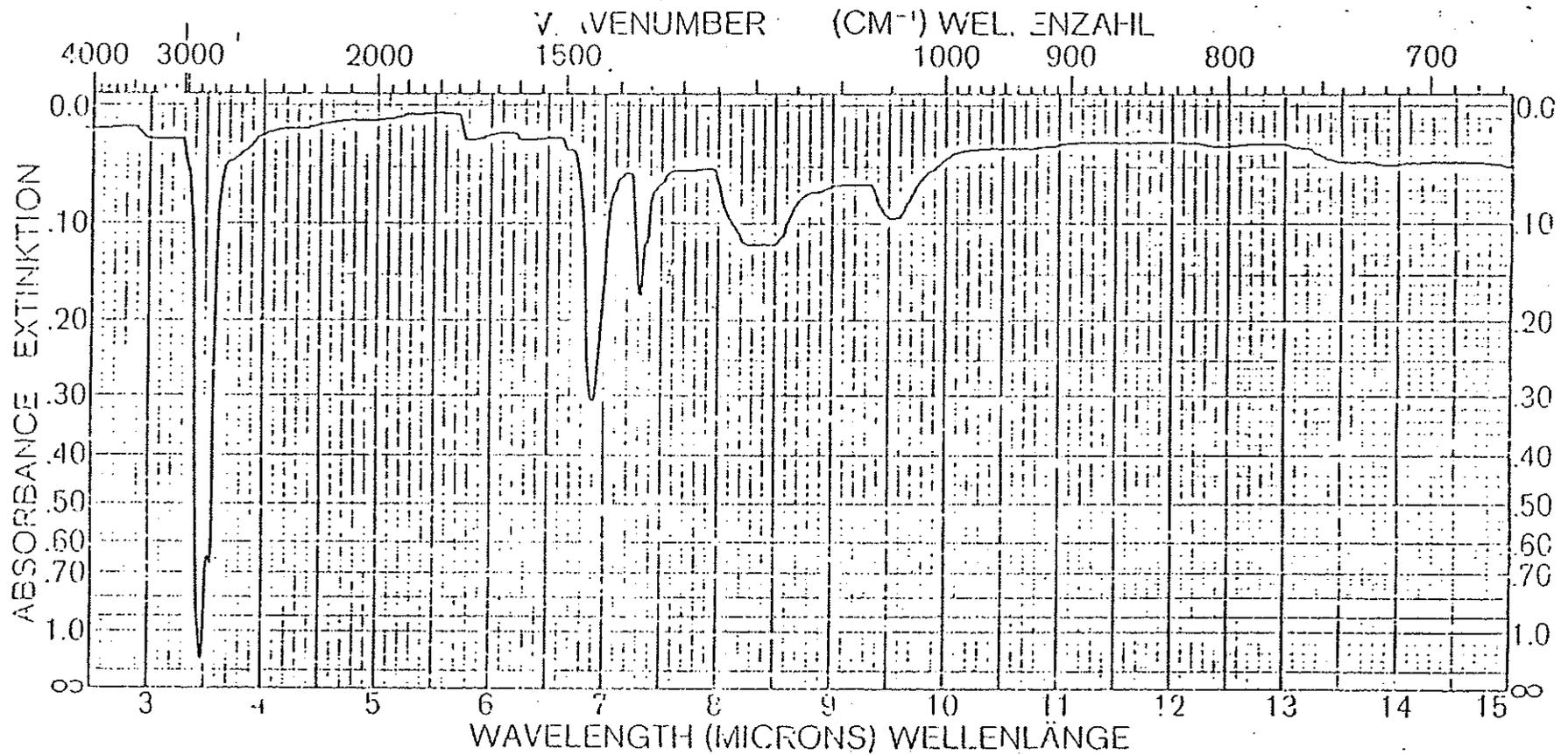


Abb 25. IR-Spektrum von RUST-BAM 324





SAMPLE PROBE Probe Nr. 4 Nichtflüchtige Anteile (Trocknung bei 40°C, 48 Std.)	PHASE <u>auf NaCl</u>	SCAN SPEED <u>slow</u> SLIT <u>1.0</u> GESCHWINDIGKEIT
	SOLVENT LÖSUNGSMITTEL _____	OPERATOR <u>Alk</u> DATE <u>2.7.76</u> BEARBEITER DATUM
CONC. KONZENTRATION _____	REMARKS BEMERKUNGEN _____	
CELL PATH SCHICHDICKE _____	REFERENCE VERGLEICH _____	
ORIGIN HERKUNFT <u>C 94 135 A</u>		
PART NO 137-1246		

NO. Anlage 6

Abb. 26: IR-Spektrum von Probe Nr. 4 nach

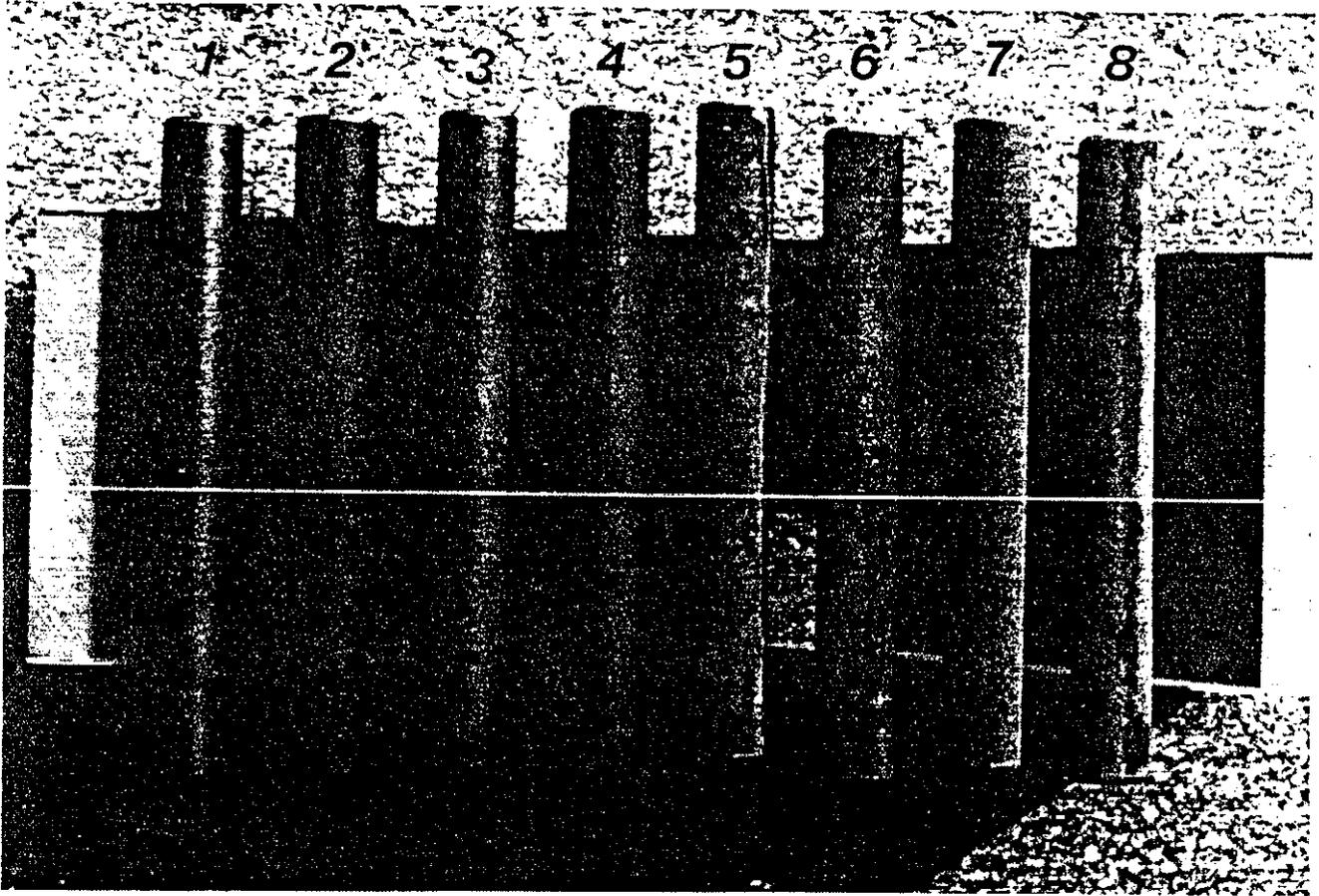


Abb. 27: Spannstahlproben nach achtwöchiger atmosphärischer Auslagerung (Oberseite)

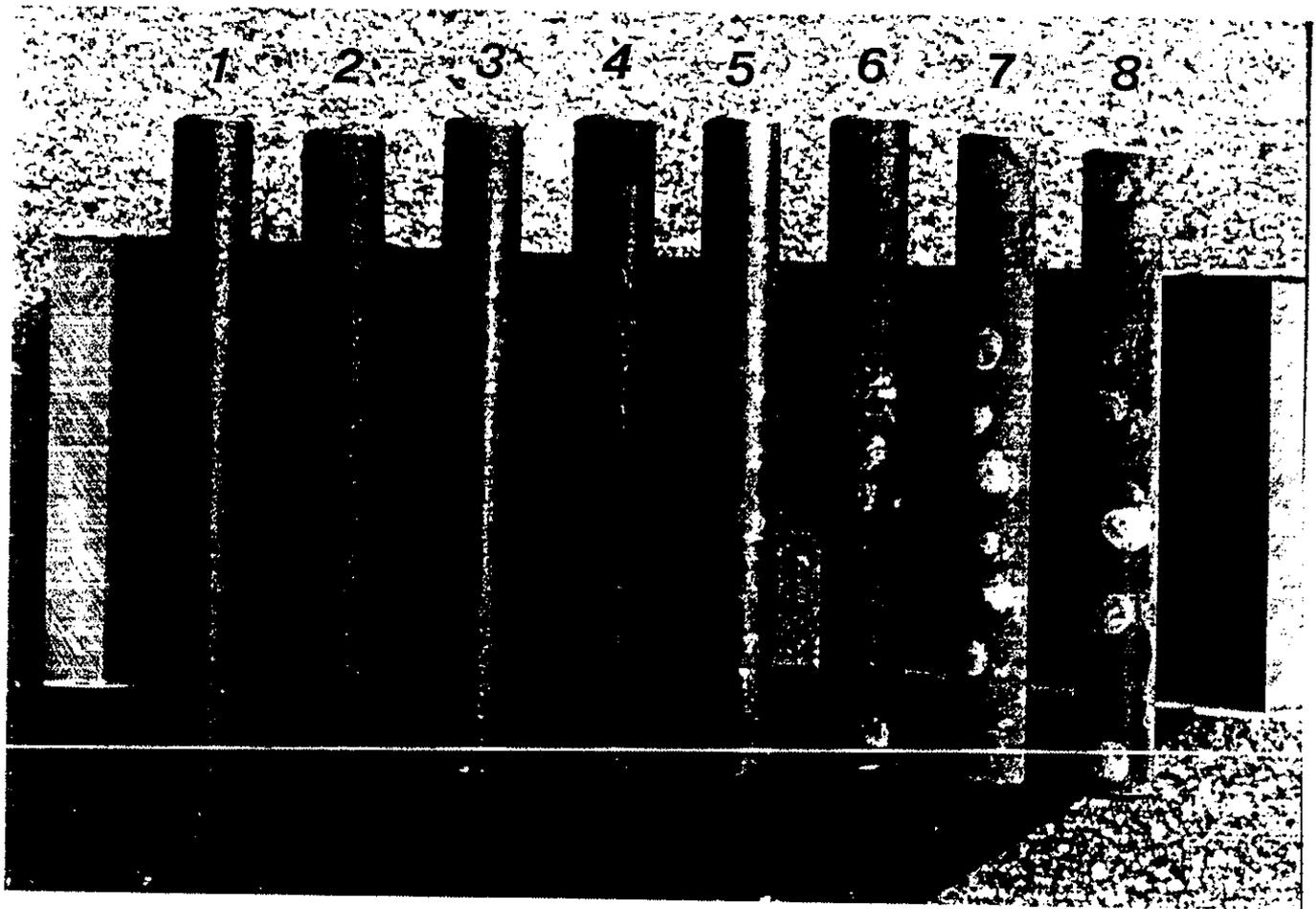
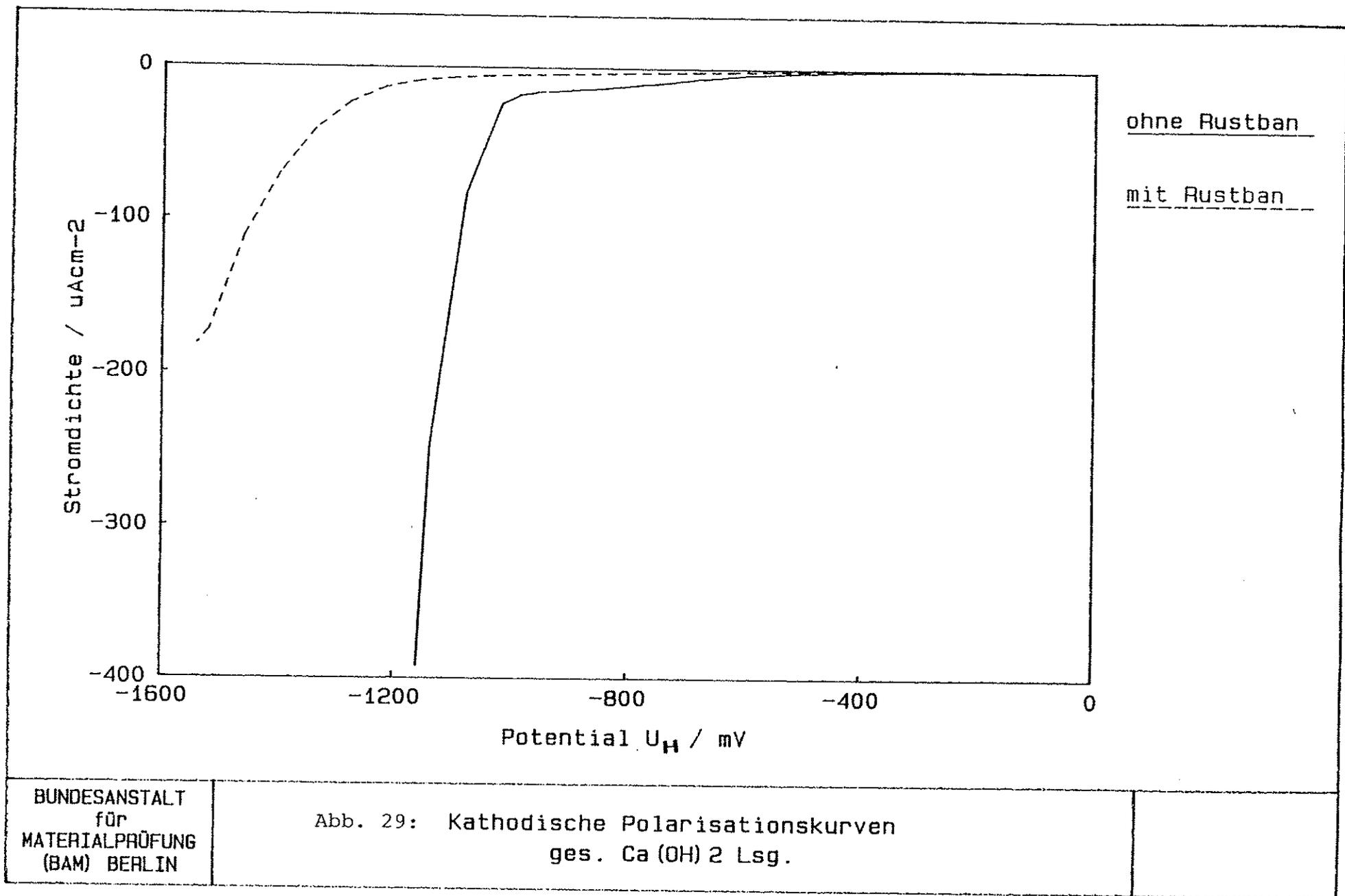


Abb. 28: Spannstahlproben nach achtwöchiger atmosphärischer Auslagerung (Unterseite)

1	Rustbau 310	St 1375/1570
2	Rustbau 310	St 1420/1570
3	Rustbau 310	Emulsion 1:4 St 1375/1570
4	Rustbau 310	Emulsion 1:4 St 1420/1570
5	Rustbau 393	St 1375/1570
6	Rustbau 393	St 1420/1570
7	ohne Mittel	St 1375/1570
8	ohne Mittel	St 1420/1570

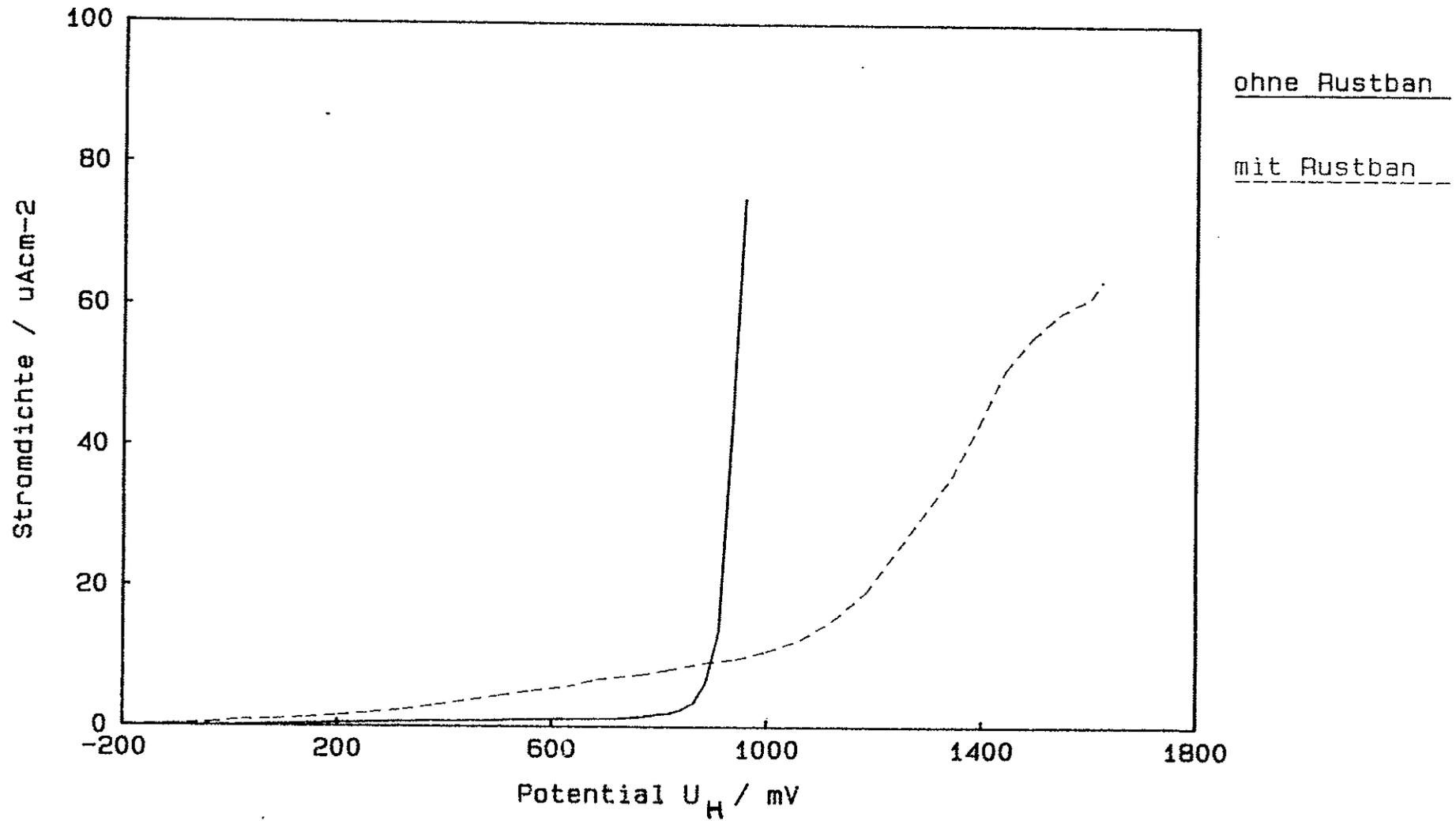


ohne Rustban

mit Rustban

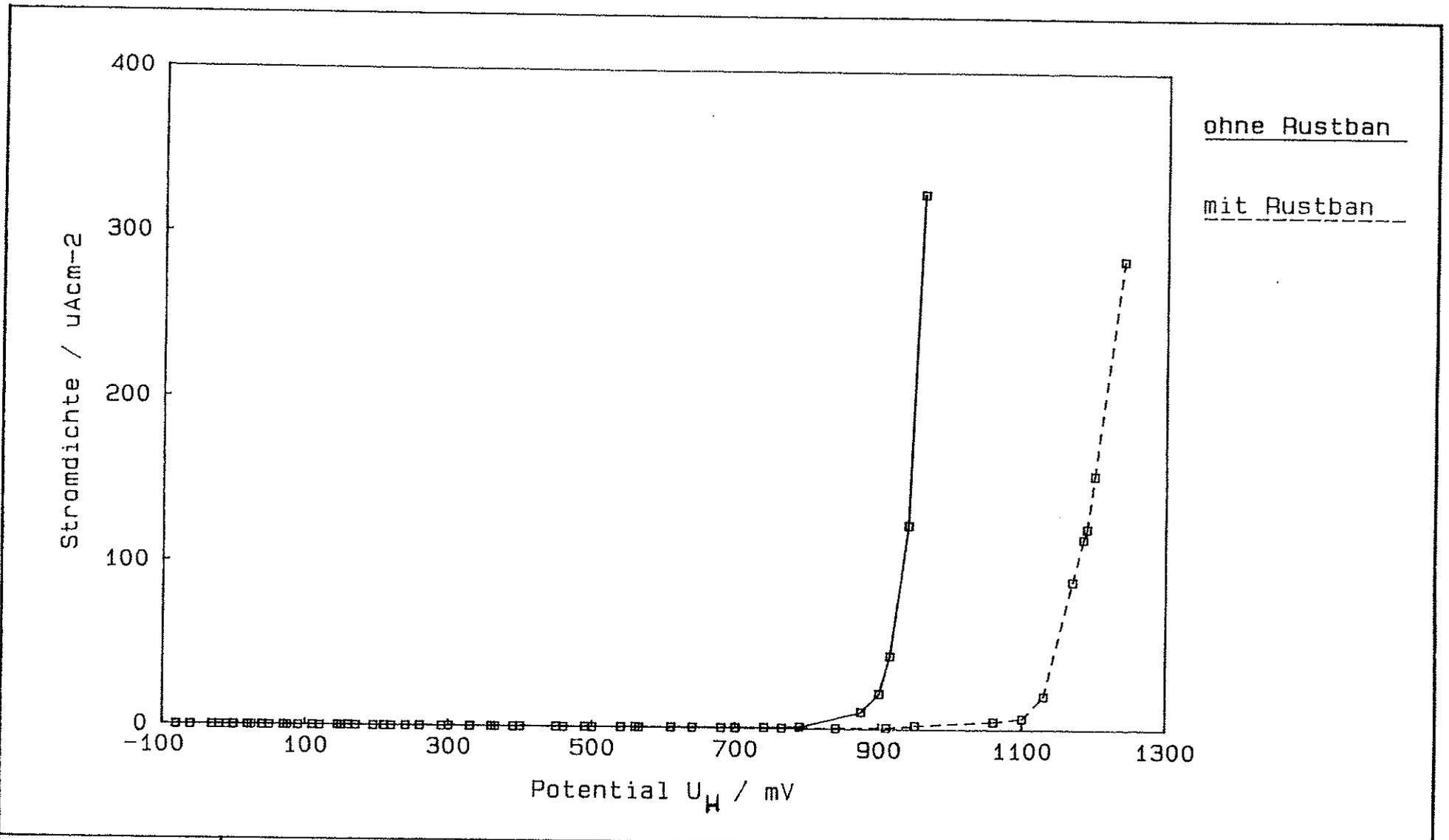
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 29: Kathodische Polarisationskurven
ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Lsg.



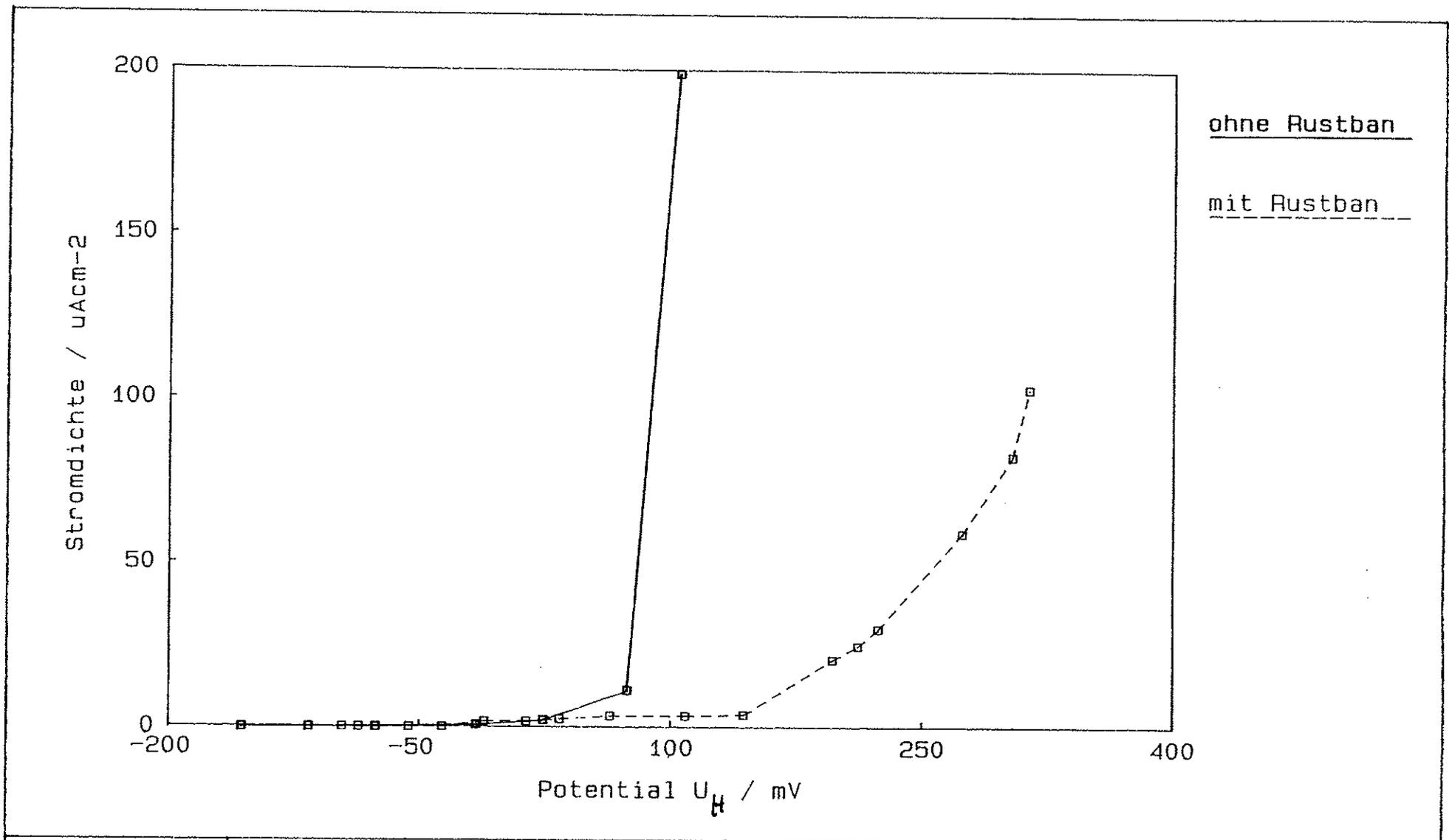
BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 30: Polarisationskurven
in ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Lsg.

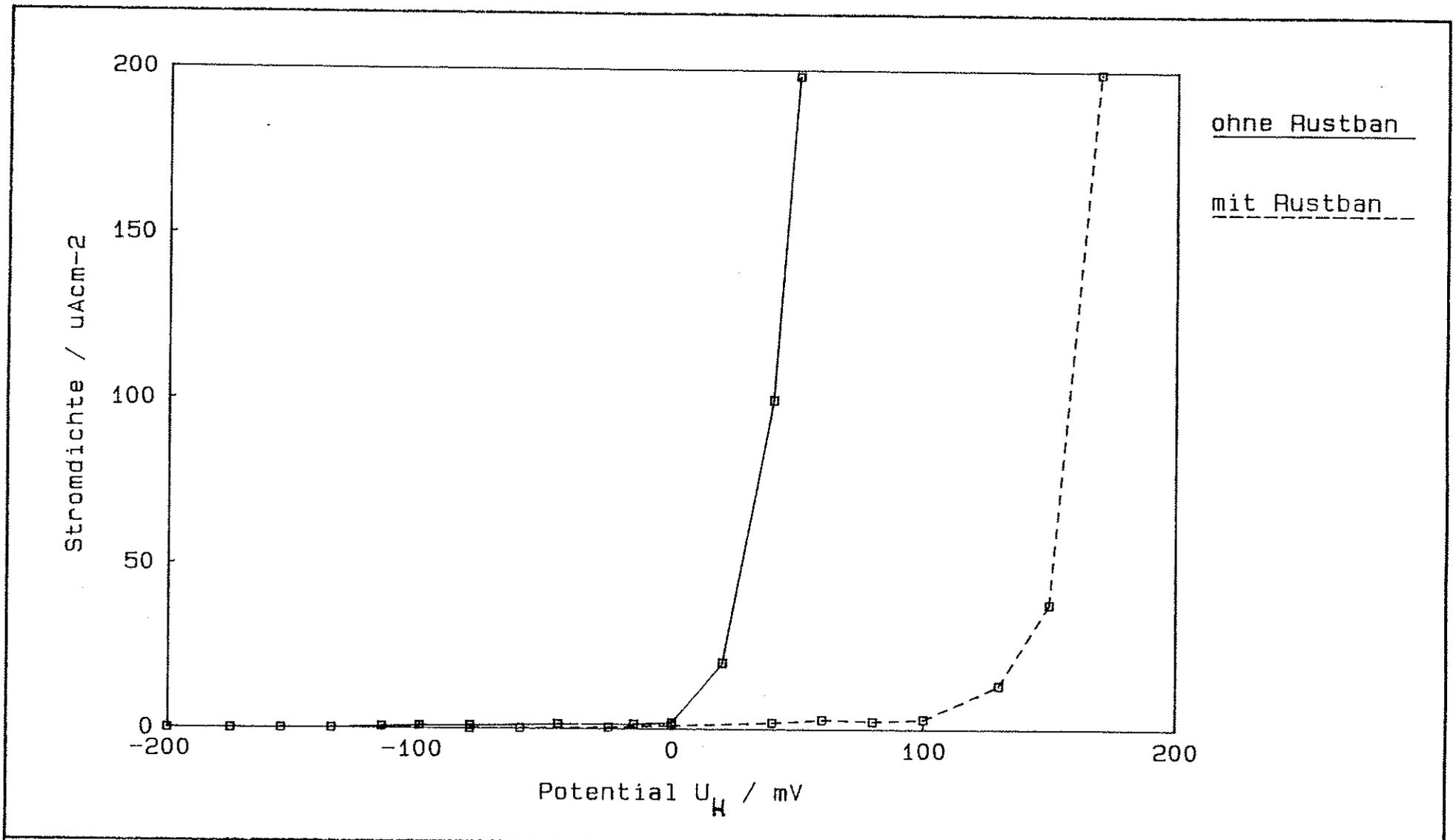


BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 31: Potentiostatische Polarisationskurven
ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Lsg. + 0.1% CaCl_2



BUNDESANSTALT für MATERIALPRÜFUNG (BAM) BERLIN	Abb. 32: Potentiostatische Polarisationskurven ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Lsg. + 1% CaCl_2	
---	---	--



ohne Rustban

mit Rustban

BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 33: Potentiostatische Polarisationskurven
ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Lsg. + 2% CaCl_2

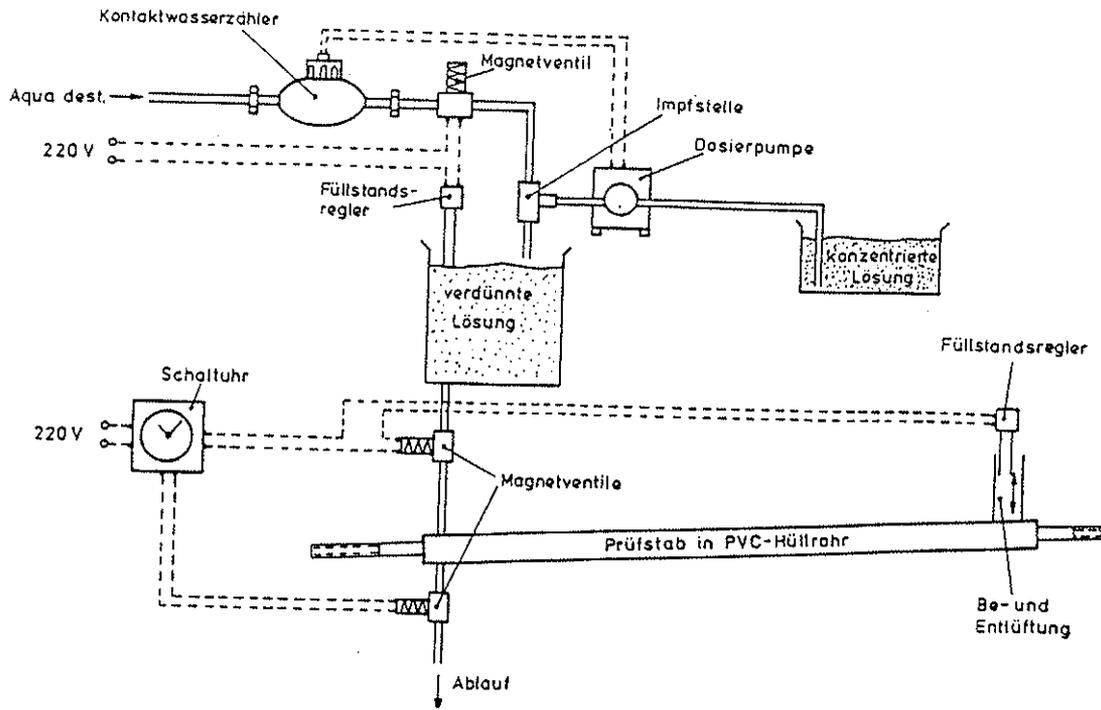


Abb. 34: Vorkorrosionsanlage

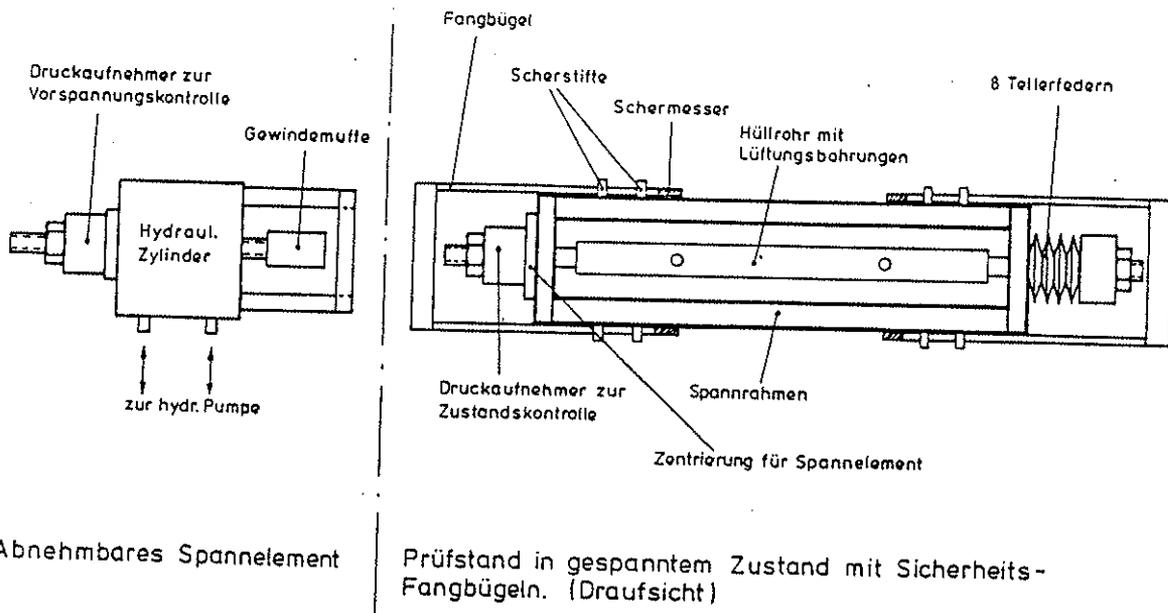


Abb. 35: Dauerstandversuche

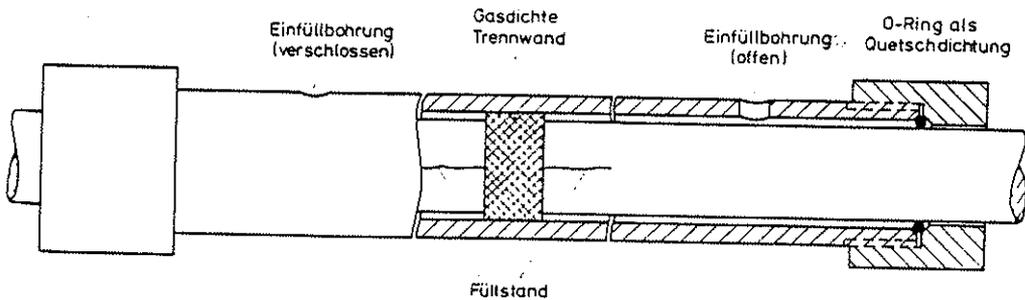
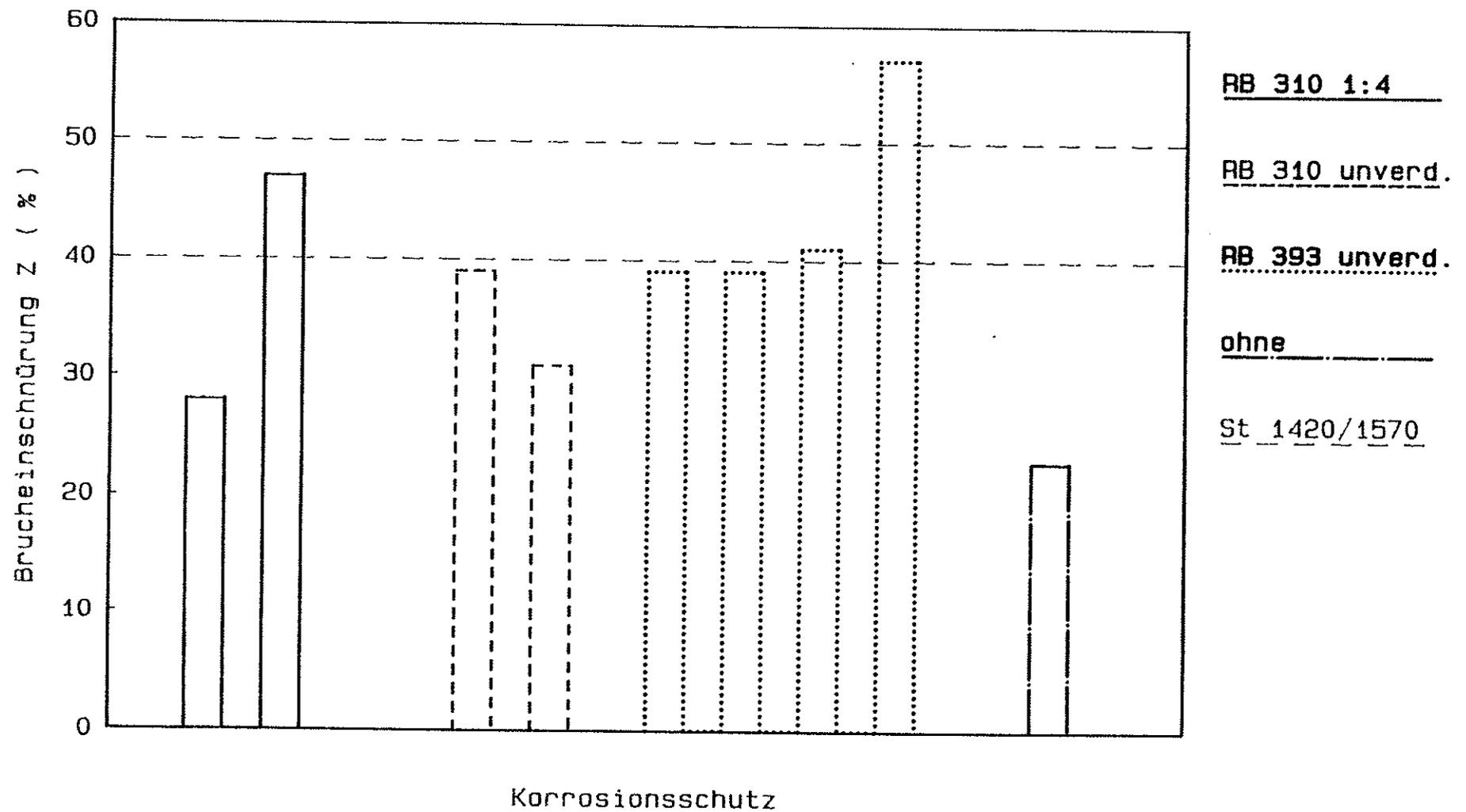
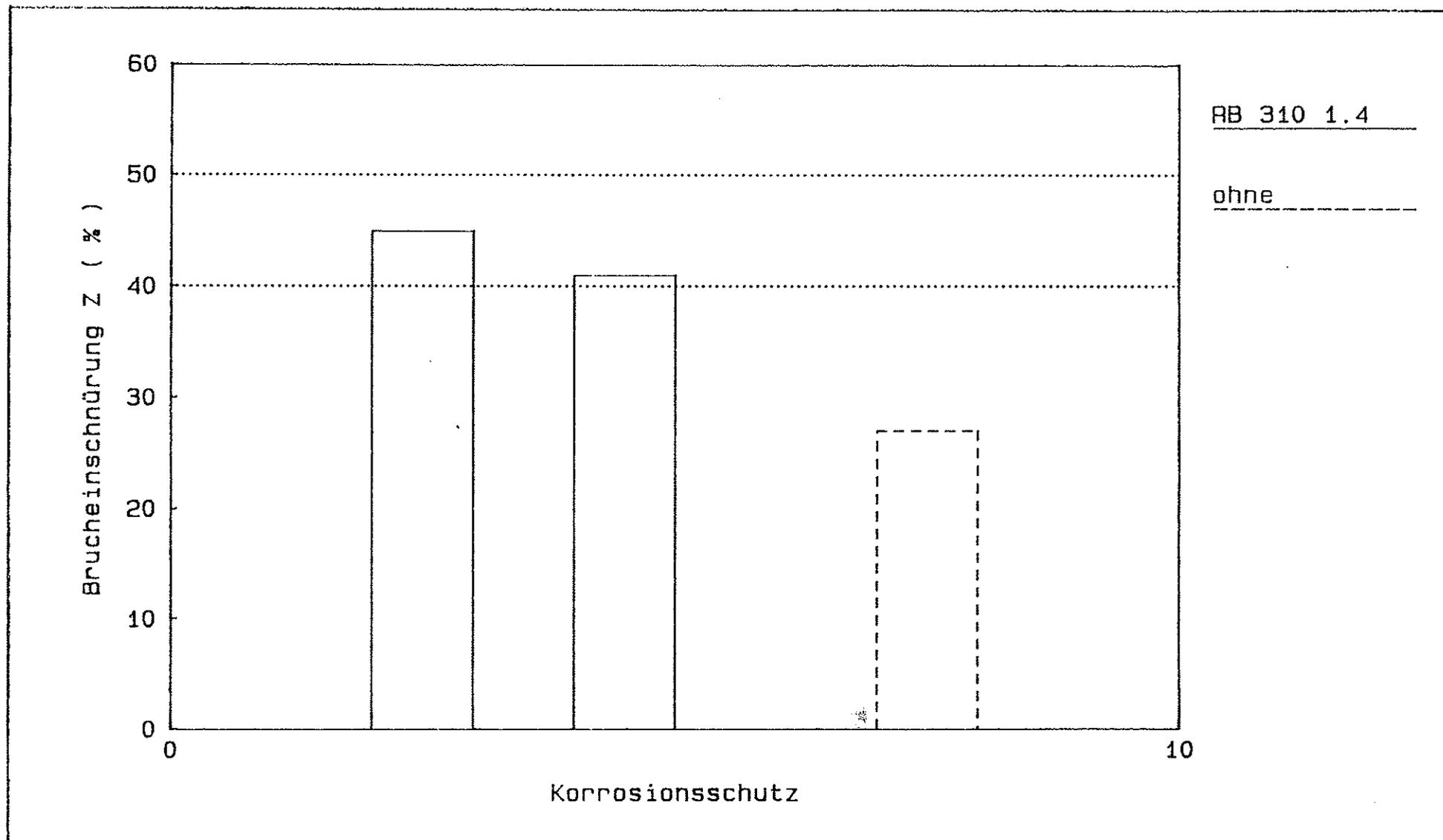


Abb. 36: Prinzipdarstellung einer Prüfzelle

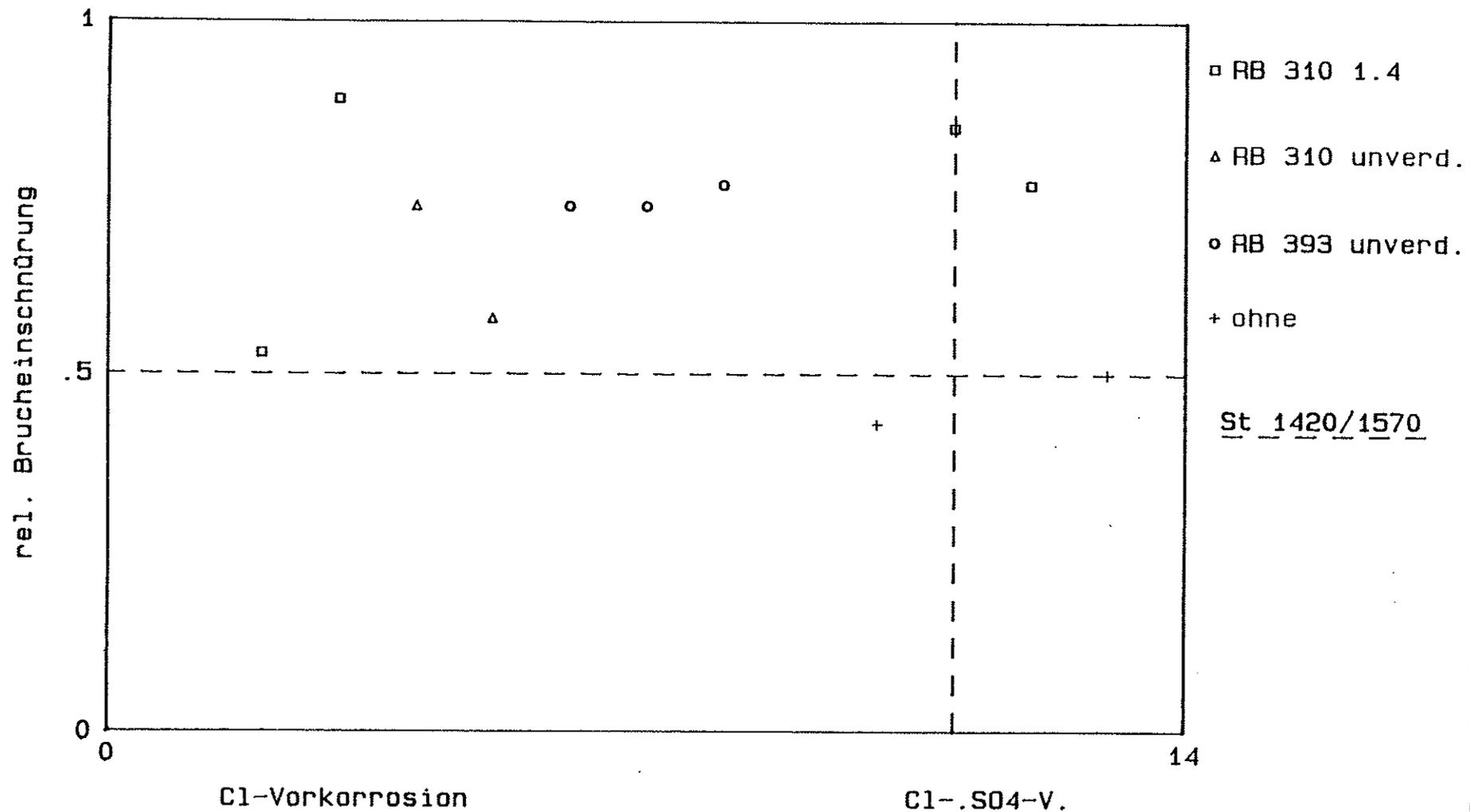


BUNDESANSTALT
für
MATERIALPRÜFUNG
(BAM) BERLIN

Abb. 37: Bruch einschnürung nach Vorkorrosion in
chloridhaltiger Umgebung und Dauerstandversuch



BUNDESANSTALT für MATERIALPRÜFUNG (BAM) BERLIN	Abb. 38: Bruch einschnürung nach Vorkorrosion in sulfat- und chloridhaltiger Umgebung und Dauerstandversuch	
---	--	--



BUNDEANSTALT
 für
 MATERIALPRÜFUNG
 (BAM) BERLIN

Relative mechanische Kennwerte
 nach Vorkorrosion

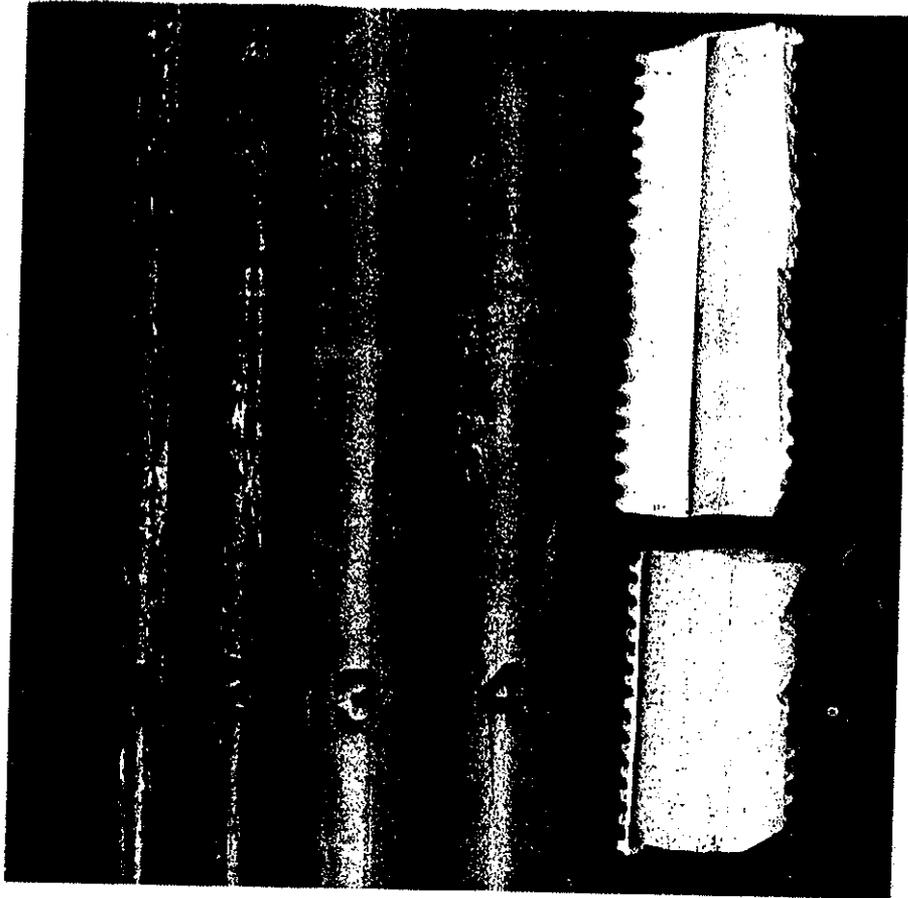


Abb. 39: Spannstähle mit Rustbau 310 nach ca. 3-jähriger
Vorspannung im verpreßten Hüllrohr

- 1 = St 835/1030
- 2 = St 1080/1230
- 3 = St 1420/1570
- 4 = St 1350/1570