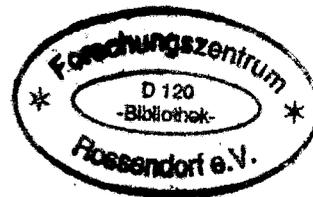


WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

**FZR-383**

Juli 2003

ISSN 1437-322X



*Arnd Böttger<sup>1)</sup>, Thoralf Gocht<sup>2)</sup>, Horst-Michael Prasser<sup>1)</sup> und  
Jochen Zschau<sup>1)</sup>*

## **Transiente Kondensationsversuche an einem Notkondensator - Einzelrohr**

**BMWi Projekt 1 50 12 15**

Herausgeber:  
Forschungszentrum Rossendorf e.V.  
Postfach 51 01 19  
D-01314 Dresden  
Telefon +49 351 26 00  
Telefax +49 351 2 69 04 61  
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt  
Alle Rechte beim Herausgeber

*Arnd Böttger<sup>1)</sup>, Thoralf Gocht<sup>2)</sup>, Horst-Michael Prasser<sup>1)</sup> und  
Jochen Zschau<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup>Forschungszentrum Rossendorf e. V.

<sup>2)</sup>Hochschule Zittau/Görlitz (FH)

## **Transiente Kondensationsversuche an einem Notkondensator - Einzelrohr**

(Invers Edwards Pipe Experiment, INVEP)

**BMW Projekt 1 50 12 15**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 150 1215 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

## Zusammenfassung

Die in diesem Bericht vorgestellten Experimente betreffen die Kondensation von Dampf in horizontalen bzw. leicht geneigten Rohren bei hohen auftretenden Temperaturdifferenzen bis zu über 200 K. Weitere Besonderheiten sind die detaillierte Untersuchung des transienten Verhaltens eines nichtkondensierbaren Gases mit einer neuartigen Messtechnik sowie die Ermittlung des Einflusses des Gases auf den Kondensationsvorgang. Beim Experiment wurden schnelle Übergangsvorgänge ausgelöst, indem ein in einer Kühlwanne liegendes, leicht geneigtes Wärmeübertragerrohr plötzlich mit dem Dampfraum eines unter Druck stehenden Kessels verbunden wurde. Dabei wurden im Rohr unterschiedliche Anfangsbedingungen hinsichtlich der Vorlage von nichtkondensierbaren Gasen (in diesem Falle Luft) eingestellt. Es wurden Versuche mit Atmosphärendruck, mit erhöhtem Druck, aber auch mit vorheriger Evakuierung des Versuchsrohrs durchgeführt. Durch eine Instrumentierung mit neuartigen Nadelsonden, die eine Phasendetektion kombiniert mit einer schnellen lokalen Temperaturmessung ermöglichen, konnte die Umverteilung von Dampf, Kondensat und nichtkondensierbarem Gas als Funktion der Zeit beobachtet werden. Damit bieten die erhaltenen Daten die Möglichkeit, insbesondere die in den Thermohydraulikprogrammen vorhandenen Optionen zur Berechnung der Ausbreitung von nichtkondensierbaren Gasen unter transienten Bedingungen zu validieren.

The report presents experiments which were aimed at studying steam condensation in horizontal respectively slightly inclined pipes at high driving temperature differences of up to 200 K. Further specifics are the detailed investigation of the transient behaviour of a non-condensable gas using a novel measuring technique as well as the evaluation of the influence of the gas upon the condensation intensity. For this purpose in the experiment a rapid transient process was realized, which was initiated by suddenly connecting a heat exchanger pipe resting in a pool of cooling water with the steam dome of a pressure vessel. In the pipe, different initial conditions were adjusted by varying the initial pressure of the non-condensable gas (air). Experiments were carried out with atmospheric pressure, with increased air pressure, but also with an evacuated pipe. The new instrumentation consists in novel needle-shaped void probes, which allow the local phase detection combined with a fast temperature measurement. This makes it possible to study the redistribution of steam, condensate and non-condensable as a function of time with a high resolution. The obtained data offer the possibility to validate the models for the prediction of the transport and the effect of non-condensable gases in thermal hydraulic system codes under transient conditions.

## Inhalt

1	Einleitung .....	7
2	Beschreibung der Versuchsanlage .....	8
2.1	Beschreibung des Kondensationsversuchsstandes INVEP, Versuchsdurchführung.....	8
2.2	Instrumentierung des Versuchsrohres .....	11
2.3	Druckhalterversuchsanlage DHVA.....	13
2.4	Instrumentierung der DHVA.....	13
3	Nadelförmige Leitfähigkeitssonden mit integriertem Thermoelement .....	18
3.1	Funktion .....	18
3.2	Erprobung .....	19
4	Gittersensor .....	21
4.1	Sensorkonstruktion .....	21
4.2	Signalerfassung .....	22
5	Signalerfassung .....	23
6	Durchgeführte Experimente .....	23
7	Auswertung der Experimente.....	26
7.1	Allgemeine Bemerkungen .....	26
7.2	Korrektur der Temperaturmessung durch die Thermoelementsonden.....	26
7.3	Prozessverlauf .....	29
7.3.1	Druck und Füllstand.....	29
7.3.2	Evakuiertes Versuchsrohr, typischer Prozessverlauf.....	31
7.3.3	Nichtkondensierbares Gas im Versuchsrohr, typischer Prozessverlauf.....	34
7.3.4	Informationen über das Strömungsregime aus den Gittersensordaten ....	37
7.4	Übersicht über alle Versuche der Hauptserie (Serie 2).....	42
7.5	Sondenausfälle .....	50
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	50
9	Referenzen .....	51
Anlage A	Zusammenstellung der Experimente der Hauptserie .....	52

## 1 Einleitung

Die in diesem Bericht vorgestellten Experimente wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens "Strömungskarten und Modelle für transiente Zweiphasenströmungen" durchgeführt. Das Vorhaben wird unter dem Kennzeichen 150 1215 vom Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie gefördert. Das übergeordnete Ziel des Vorhabens besteht in der Aufstellung von transienten Strömungskarten und der Entwicklung von physikalischen Modellen zur Beschreibung der örtlich und zeitlich veränderlichen Strömungsstruktur von transienten Zweiphasenströmungen. Einer der zu untersuchenden Fälle besteht in der Kondensation von Dampf in horizontalen bzw. leicht geneigten Rohren, wie sie bei passiven Einrichtungen zur Abfuhr der Nachzerfallwärme zur Anwendung kommen können (Notkondensator). Die Besonderheit gegenüber anderen Kondensationsprozessen besteht in den hohen auftretenden Temperaturdifferenzen, die über 200 K betragen können.

Neben Versuchen, die im stationären Betrieb an der NOKO Versuchsanlage des Forschungszentrums Jülich durchgeführt wurden [1], waren Experimente vorgesehen, bei denen die Kondensation einen stark transienten Charakter trägt. Diese Versuche haben Daten geliefert, mit deren Hilfe thermohydraulische Modelle validiert werden können. Dabei wurden bewusst schnelle Übergangsvorgänge ausgelöst, indem ein in einer Kühlwanne liegendes, leicht geneigtes Wärmeübertragerrohr plötzlich mit dem Dampfraum eines unter Druck stehenden Kessels verbunden wurde. Dabei wurden im Rohr unterschiedliche Anfangsbedingungen hinsichtlich der Vorlage von nichtkondensierbaren Gasen (in diesem Falle Luft) eingestellt. Es wurden Versuche mit Atmosphärendruck, mit erhöhtem Druck, aber auch mit vorheriger Evakuierung des Versuchsrohrs durchgeführt. Durch eine Instrumentierung mit neuartigen Nadelsonden, die eine Phasendetektion kombiniert mit einer schnellen lokalen Temperaturmessung ermöglichen, konnte die Umverteilung von Dampf, Kondensat und nichtkondensierbarem Gas als Funktion der Zeit beobachtet werden. Damit bieten die erhaltenen Daten die Möglichkeit, insbesondere die in den Thermohydraulikprogrammen vorhandenen Optionen zur Berechnung der Ausbreitung von nichtkondensierbaren Gasen unter transienten Bedingungen zu validieren.

In Anlehnung an das legendäre Experiment zur schnellen Druckentlastung einer horizontalen Leitung, der sog. "Edwards-Pipe", das die Grundlage für das erste internationale OECD-Standardproblem ISP-1 zur Validierung von Thermohydraulikcodes bildete, wurde als Untertitel zu den hier beschriebenen Experimenten die Bezeichnung "Invers Edwards Pipe Experiment" (INVEP) gewählt, da hier der umgekehrte Vorgang, nämlich die Druckauflastung eines nahezu horizontalen Rohrs durch Beaufschlagung mit Dampf bis zur vollständigen Füllung mit Kondensat Gegenstand der Untersuchungen war.

Die Versuche wurden im Labor des Instituts für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik IPM an der Hochschule Zittau/Görlitz (FH) durchgeführt. Die Versuchsanlage wurde unter Mitwirkung des IPM aufgebaut und an die dortige Druckhalterversuchsanlage DHVA als Dampfquelle angeschlossen. Die Versuche wurden ebenfalls gemeinsam mit dem IPM durchgeführt.

## 2 Beschreibung der Versuchsanlage

### 2.1 Beschreibung des Kondensationsversuchsstandes INVEP, Versuchsdurchführung

Für die Kondensationsversuche wurde eine eigens hierfür vorgesehene Versuchsanlage (Bild 1) aufgebaut. In einem Becken aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit den inneren Abmessungen 6300x100x400 mm (Bild 2) ist ein Versuchsrohr aus Edelstahl W.Nr.1.4571 mit einem Innendurchmesser von 44,3 mm (2 mm Wandstärke) schwach geneigt angeordnet. Das Rohr (s. Bild 3) befindet sich im Mittel 455 mm unterhalb der Wasseroberfläche, die Neigung beträgt 1,56°. Dabei handelt es sich um ein Einzelrohr des zweiten Wärmeübertragerbündels der NOKO-Versuchsanlage in Jülich. Die Wanne (Bild 2) ist außen mit Stahlprofilen versteift, die Profilkonstruktion wird gleichzeitig zur Versuchsrohrhalterung genutzt. Sie wird mit kaltem Leitungswasser gefüllt. Der Wasserspiegel in der Wanne beträgt 800 mm vom Boden.

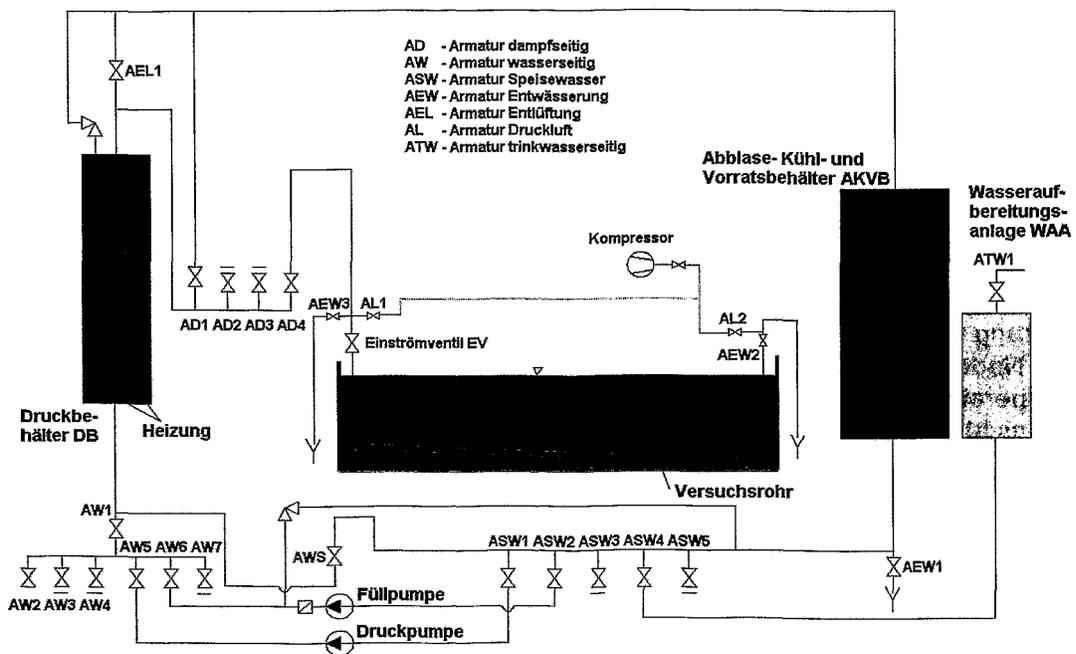


Bild 1 Schaltbild der Versuchsanlage mit Druckbehälter, Kondensationsrohr und Bedienarmaturen

Das Versuchsrohr ist beidseitig mit Flanschdeckeln verschlossen (Bild 4, Bild 5). An der einen Seite ist die Dampfzuleitung mit einer Nennweite von DN25 ( $\varnothing$  33,7 x 3,25) angeschlossen (Bild 4). Sie verbindet das Versuchsrohr mit der Dampfseite des Druckbehälters der Druckhalterversuchsanlage DHVA des IPM (s. Abschnitt 2.3). In der Leitung befinden sich eine Absperrarmatur AD4 und ein Einströmventil EV. Das unmittelbar vor dem Eintritt in das Versuchsrohr befindliche Einströmventil (Bild 3), ein Faltenbalg-Schrägsitzventil DN20, PN100, dient zum Start des Experiments. Das nicht isolierte Ventil ist über eine Rohrreduzierung mit der Dampfzuleitung verschweißt. An dieses Ventil ist über eine Swagelock-Rohrverschraubung Innendurchmesser 20 mm und einer Rohrerweiterung das Einlaufrohr des Kondensationsversuchsstandes angeschlossen, das in den vorderen Flanschdeckel mündet (Bild 6). An den hinteren Flanschdeckel ist eine Impulsleitung DN6 angeschlossen (Bild 5) die

zur Entwässerung und zur Beaufschlagung des Versuchsrohrs mit Pressluft dient. Das Versuchsrohr ist derart geneigt, dass es von der Einströmseite zum Ende hin abfällt. Auf der Gesamtlänge von 5675 mm beträgt die Höhendifferenz 150 mm (s. Bild 8).

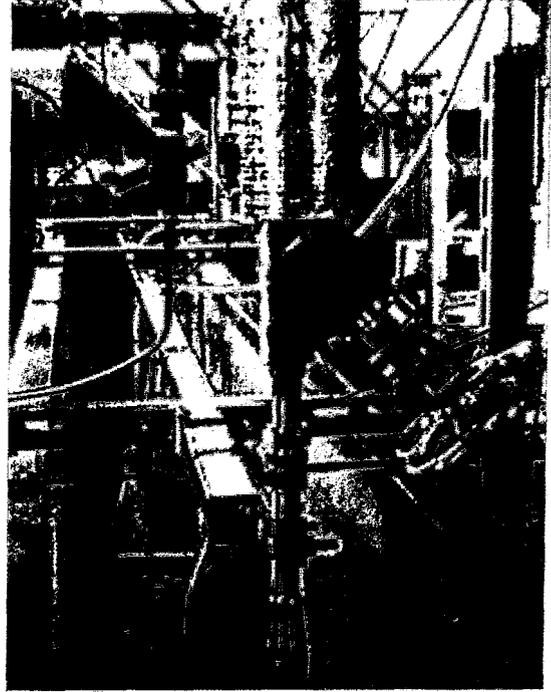


Bild 2 Ansicht der Kühlwanne mit Anschluss der Vakuumpumpe

Bild 3 Ansicht des Kondensationsrohrs in der Kühlwanne, im Vordergrund das Einströmventil

Auf dem Gesamtschaltbild der Anlage in Bild 1 ist die Bezeichnung aller Ventile dargestellt. In der Vorbereitungsphase wird der Druckbehälter DB mit Wasser aus der Wasseraufbereitungsanlage über die Füllpumpe bis zu einem Anfangshöhenstand von ca. 1.8 m gefüllt. Danach wird die Heizung mit Vollast (ca. 23 kW) in Betrieb genommen. Das Entlüftungsventil AEL1 ist zu diesem Zeitpunkt noch offen. Nach dem Erreichen von 100 °C (Dampftemperatur) wird das Inhaltswasser im Druckbehälter DB entgast und danach AEL1 geschlossen. Die beiden Ventile in der Verbindungsleitung zwischen DB und Versuchsrohr, AD4 und Einströmventil EV sind zu diesem Zeitpunkt ebenfalls geschlossen. Im Druckbehälter stellen sich die notwendigen Parameter (Druck und Temperatur) ein. Mit Hilfe der regelbaren Heizungen sind die gewünschten Parameter konstant gehalten worden.

Das Versuchsrohr wird mit Hilfe von Druckluft (Kompressor) entwässert. Dazu wird das Einströmventil EV, das Druckluftventil AL1 und nach dem Druckaufbau im Versuchsrohr auch das Entwässerungsventil AEW2 geöffnet. Nach der Entwässerung wird das Einströmventil geschlossen und der entsprechende Vordruck über das Druckluftventil AL2 eingestellt.

Bei den Experimenten mit Unterdruck (Vakuum ca. 95 %) wurde an AEW2 eine Vakuumpumpe mit Manometer angeschlossen .

Für alle Experimente wird ein annähernd gleicher Anfangsfüllstand eingestellt. Dazu wird mit Hilfe der Druckpumpe bei dem eingestellten Anfangsdruck Wasser aus der Wasseraufbereitungsanlage in den DB gepumpt.

Für den direkten Betrieb des Versuchsrohrs sind die Armaturen AD4, AEW2, AEW3, AL1 sowie AL2 von Bedeutung. Bei allen Armaturen handelt es sich um Handventile. In der Phase der Versuchsvorbereitung wird der Anfangsdruck im Versuchsrohr mit Hilfe des Kompressors über das Ventil AL2 eingestellt. Die Ventile EV, AL1, AEW2 und AEW3 sind dabei geschlossen. Nach Einstellen des Anfangsluftdrucks wird auch AL2 wieder geschlossen. Bei den Versuchen mit Vakuum wird die Vakuumpumpe an die Drainageleitung angeschlossen und die Evakuierung des Versuchsrohrs geschieht über Ventil AEW2.

Nachfolgend wird die Verbindungsleitung zwischen dem Druckbehälter und dem Einströmventil aufgeheizt. Dies geschieht durch Öffnen von AD4 und leichtem Öffnen von AEW3. Dabei strömt zunächst Kondensat aus der Verbindungsleitung. Nachdem die Leitung auf Sättigungstemperatur aufgeheizt ist, beginnt Dampf auszuströmen. Danach kann durch Schließen von AEW3 und Öffnen des Einströmventils EV der Versuch gestartet werden.

Das Öffnen des Einströmventils erfolgt mittels eines mit dem Handrad des Ventils mechanisch verbundenen Akku-Bohrmaschine. Hierzu wird ein in die Bohrmaschine eingespanntes Gestänge von Hand an das Handrad des Ventils gedrückt. Der Stromkreis des Antriebs der Bohrmaschine ist durch ein Relais unterbrochen. Dieses Relais wird durch den Datenerfassungsrechner der Thermoelement-Nadelsonden bei Auslösung des Messstarts angesteuert und schließt den Stromkreis. Dadurch wird die Bohrmaschine angeschaltet und das Einströmventil geöffnet. Der Öffnungsvorgang dauert ca. 0.2 s.

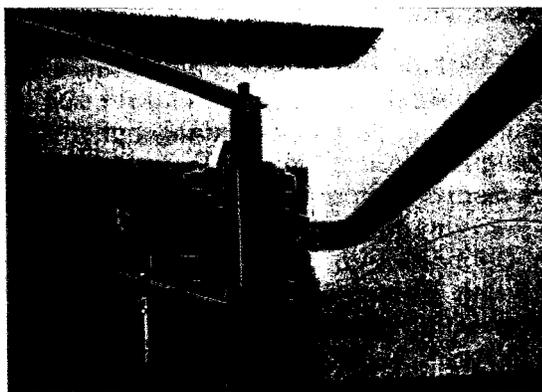


Bild 4 Vorderer Flansch mit Dampfzuleitung

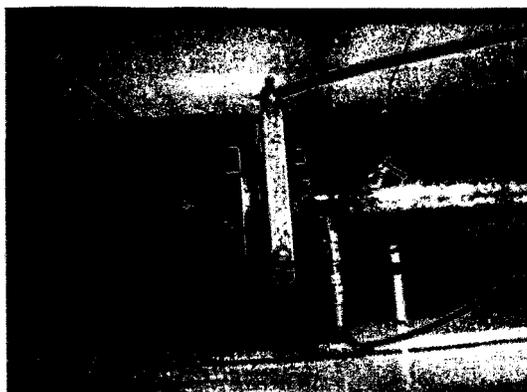


Bild 5 Hinterer Flansch mit Entwässerungsleitung

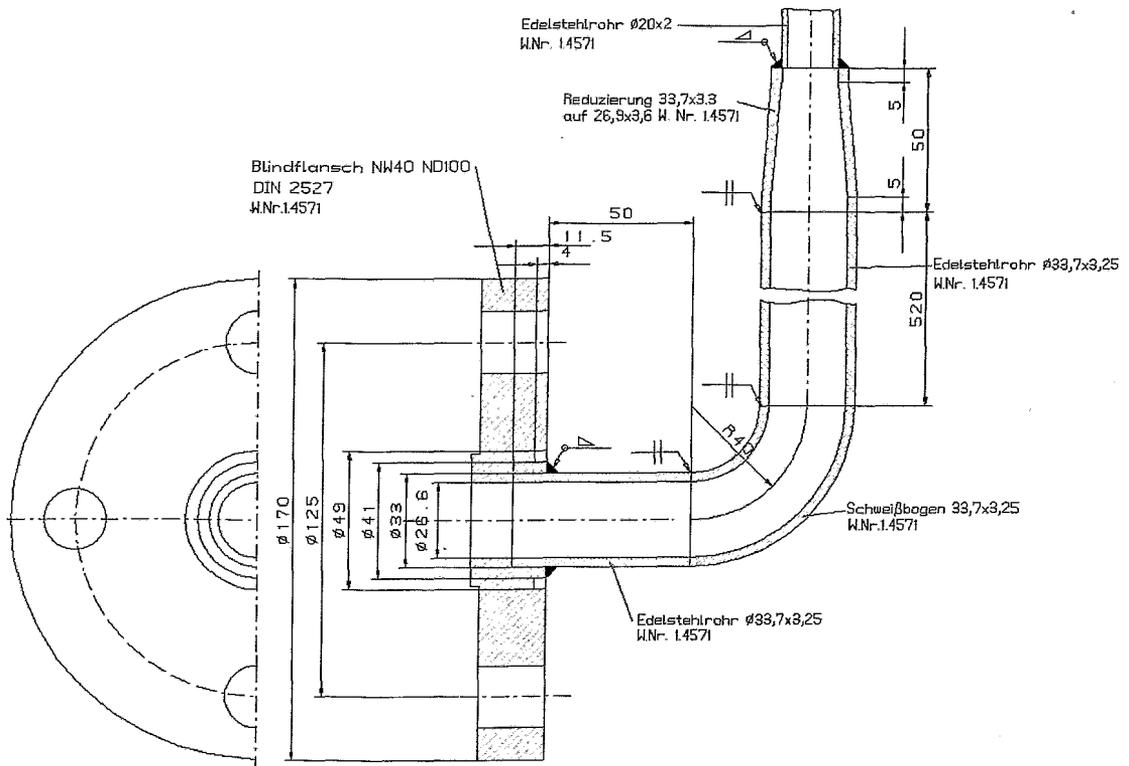


Bild 6 Geometrie des vorderen Flanschs mit Dampfzuleitung

Der Versuch ist beendet, wenn das Versuchsrohr vollständig mit Kondensat gefüllt ist und die Temperatur des Kondensats an allen Messpunkten etwa auf das Temperaturniveau in der Wanne abgesunken ist. Danach kann das Ventil AD4 geschlossen und das Versuchsrohr über AWE2 entleert werden. Zur Unterstützung des Entleerungsvorgangs wird vom Kompressor über AL1 Pressluft ins Rohr gedrückt.

## 2.2 Instrumentierung des Versuchsrohres

Das Versuchsrohr ist wie folgt instrumentiert (s. Bild 7 und Bild 8):

Messstelle	Messgeber <sup>1</sup>	Einbauort [mm] <sup>2</sup>	Messbereich
Druck	p_V Rohr	P	p = 0 - 8 MPa
Temperatur im V.-Rohr	T_1	TE	T = 0 - 300 °C
Gasgehalt	S_1	LS	ε = 0 - 100 %
Temperatur im V.-Rohr	T_2	TE	T = 0 - 300 °C
Gasgehalt, Temperatur	NTS_1	TS	ε = 0 - 100 % T = 0 - 500 °C
Temperatur im V.-Rohr	T_3	TE	T = 0 - 300 °C
Temperatur im V.-Rohr	T_4	TE	T = 0 - 300 °C
Gasgehalt, Temperatur	NTS_2	TS	ε = 0 - 100 % T = 0 - 500 °C
Temperatur im V.-Rohr	T_5	TE	T = 0 - 300 °C
Temperatur im V.-Rohr	T_6	TE	T = 0 - 300 °C
Gasgehalt, Temperatur	NTS_3	TS	ε = 0 - 100 % T = 0 - 500 °C
Temperatur im V.-Rohr	T_7	TE	T = 0 - 300 °C

Messstelle	Messgeber <sup>1</sup>	Einbauort [mm] <sup>2</sup>	Messbereich
8x8 Gittersensor	GS	3645	$\varepsilon = 0 - 100 \%$
Gasgehalt, Temperatur NTS_4	TS	4655	$\varepsilon = 0 - 100 \%$ $T = 0 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatur im V.-Rohr T_8	TE	4655	$T = 0 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$
Gasgehalt S_2	LS	5525	$T = 0 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatur im V.-Rohr T_9	TE	5550	$\varepsilon = 0 - 100 \%$
Temperatur im Becken T_out_1	TE	878	$T = 0 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatur im Becken T_out_2	TE	2578	$T = 0 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatur im Becken T_out_3	TE	3878	$T = 0 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatur im Becken T_out_4	TE	5368	$T = 0 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$

<sup>1</sup> P - Druckaufnehmer, TE - Thermoelement, LS - nadelförmige Leitfähigkeitssonde, TS - nadelförmige Leitfähigkeitssonde mit integriertem Thermoelement

<sup>2</sup> mit Einbauort ist die Länge, gerechnet vom geschlossenen Rohrende, gemeint (siehe Bild 8)

Tabelle 1 Messstellenplan für das Versuchsrohr

Die Druckmessstelle befindet sich am geschlossenen Rohrende. Die Nadelsonden und Thermoelemente wurden mit Hilfe von Stopfbuchsen in den Mittelpunkt des Rohrleitungsquerschnitts positioniert. Der Gittersensor befindet sich im ersten Drittel des Versuchsrohres. Nachdem festgestellt worden war, dass ein Funktionsfehler vorlag, war der Gittersensor zeitweilig ausgebaut und wurde durch einen Dummy ersetzt.

Es werden zwei Arten von Nadelsonden eingesetzt. Am Anfang und am Ende des Versuchsrohres befinden sich zwei herkömmliche Nadelsonden ohne Thermoelement. Vier weitere Positionen sind mit Nadelsonden bestückt, deren Elektrode durch den Mantel eines Mikro-Thermoelements gebildet wird. Dadurch kann an dem jeweiligen Messort gleichzeitig die Leitfähigkeit und die Temperatur gemessen werden. Zur Erfassung der Temperatur im Wasserbecken sind vier Messstellen vorhanden.

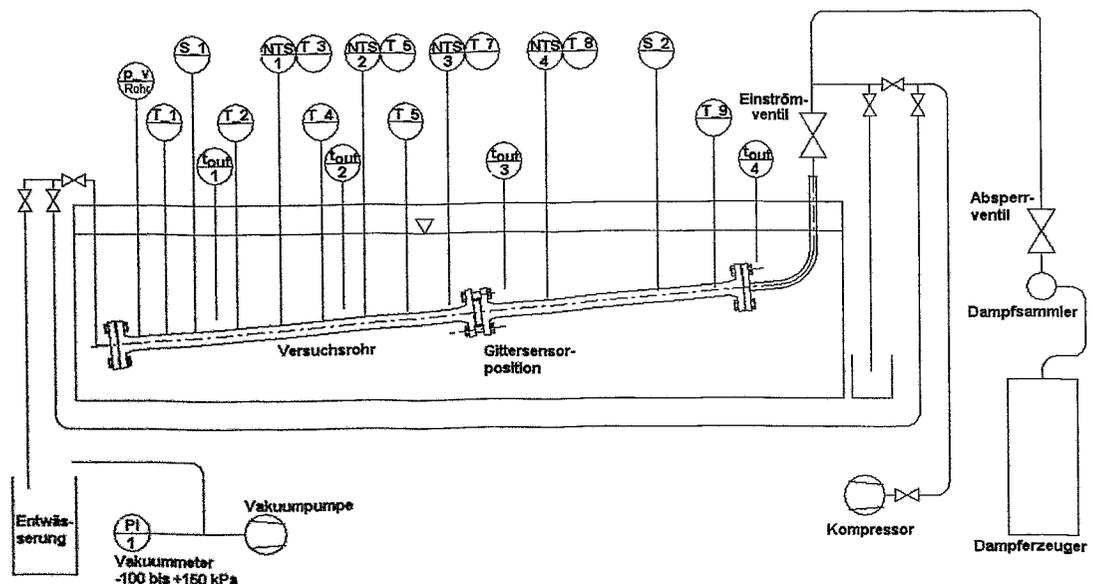


Bild 7 Messstellen am Versuchsrohr

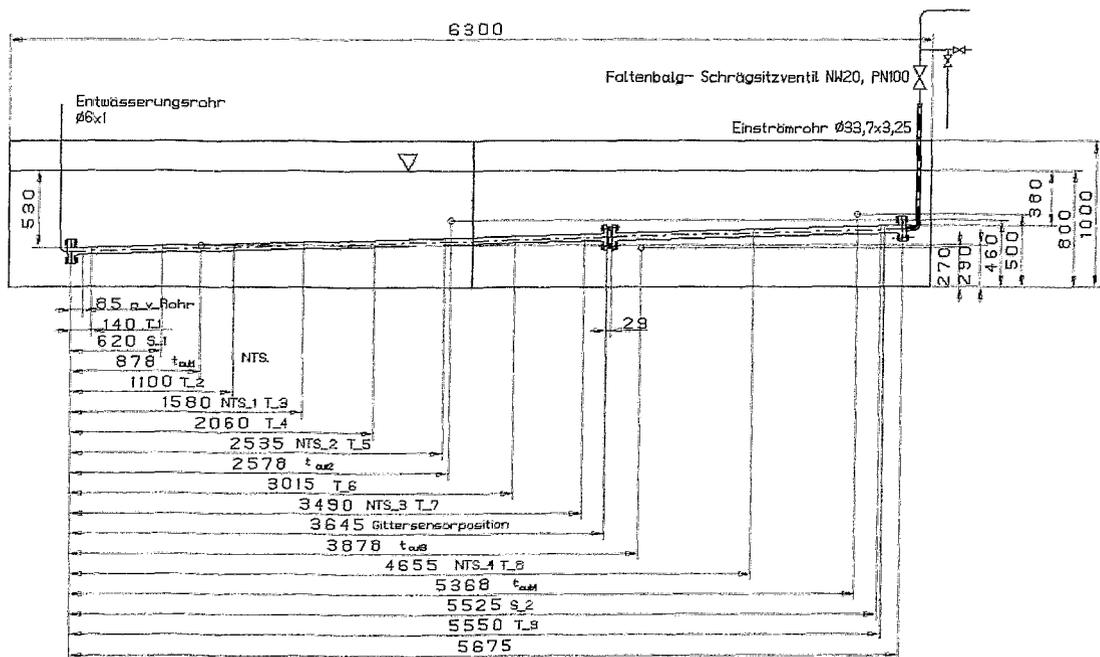


Bild 8 Abmessungen des Versuchsrohrs und Lage der Messstellen

### 2.3 Druckhalterversuchsanlage DHVA

Der Dampf für die Versuche wird durch die Druckhalterversuchsanlage DHVA des Institutes für Prozessautomatisierung und Messtechnik Zittau bereitgestellt. Hauptkomponente von DHVA ist ein elektrisch beheizten zylindrischen Druckbehälter DB. Die maximale Heizleistung beträgt ca. 23 kW. Der Behälter ist kopfseitig über eine wärmeisolierte Rohrleitung DN25 aus Stahl 15Mo3 an einen ebenfalls isolierten Dampfsammler angeschlossen. Von dort wird der Dampf über ein Absperrventil AD4 (DN25, PN250) aus Chromnickelstahl 1.4571 und eine wärmeisolierte Dampfzuleitung aus nichtrostenden Stahl 1.4571 zum Einströmventil EV des Versuchsrohrs geleitet. Die Abmessungen sind in Bild 9 und die Positionen der Messstellen am Druckhalter in Bild 10 dargestellt.

### 2.4 Instrumentierung der DHVA

Bild 9 zeigt den Druckbehälter (DB) der DHVA mit den vorhandenen Stutzen zum Anschluss verschiedener Sensoren, wie z. B. Impulsleitungen für die Druck- und Differenzdruckmessung, Thermoelemente, Leitfähigkeitssonden (Nadelsonden). Zur Datenauswertung werden folgende Signale erfasst:

Messstelle		Messwert	Einbauort (mm)*	Messbereich
Grobfüllstand	dp_grob	Differenzdruck	3355 – 325	0 - 400 mbar
Feinfüllstand	dp_fein	Differenzdruck	2525 – 1375	0 - 250 mbar
Feinfüllstand	dp_fein I	Differenzdruck	2525 – 325	0 - 250 mbar
Druck	p_DB	Druck	3390	0 - 80 bar
Dampf Temperatur	TD_DB	Temperatur	2525	0 - 300 °C

Messstelle		Messwert	Einbauort (mm)*	Messbereich
Wassertemperatur	TW_DB	Temperatur	925	0 - 300 °C
Nadelsonde	NS 1	Dampfgehalt	1325	0 - 100 %
Nadelsonde	NS 2	Dampfgehalt	1525	0 - 100 %
Nadelsonde	NS 3	Dampfgehalt	1725	0 - 100 %
Nadelsonde	NS 4	Dampfgehalt	1925	0 - 100 %
Nadelsonde	NS 5	Dampfgehalt	2125	0 - 100 %
Nadelsonde	NS 6	Dampfgehalt	2325	0 - 100 %

\* mit Einbauort ist die vertikale Höhe der Einbindungen, gerechnet vom Behälterboden, gemeint (siehe Bild 9 bzw. Bild 10)

Tabelle 2 Messstellenplan für den DB der DHVA

Die Überwachung und Erfassung des Füllstandes im DB der DHVA erfolgte mittels hydrostatischer Füllstandsmessung. An der Anlage sind drei Füllstandsmessstellen installiert (siehe

Bild 10), ein Grobfüllstand über die gesamte Höhe des Behälters und zwei Feinfüllstände mit verschiedenen oberen und unteren Einbindungen.

Die Signale dp\_grob, dp\_fein, dp\_fein\_I, p\_DB, TD\_DB und TW\_DB werden vom Messwerterfassungsrechner der Versuchsanlage mit einer Frequenz von 5 Hz aufgezeichnet. Daneben werden auf diese Weise auch die Signale p\_V\_Rohr, T\_1, T\_2, T\_3, T\_4, T\_5, T\_6, T\_7, T\_8, T\_9, T\_out\_1, T\_out\_2, T\_out\_3 und T\_out\_4 mit diesem System erfasst.

Aus den Differenzdrucksignalen werden Füllstände berechnet, die mit in den Ausgabefiles des Systems enthalten sind. Dies geschieht nach folgenden Beziehungen für zwei Bereiche:

1)  $T\_D\_DB < 100\text{ °C}$  ( $p = 1\text{ bar}$ )

$$h = h_{uE} + (H - 100 \cdot \Delta p / g / \rho_V)$$

2)  $T\_D\_DB > 100\text{ °C}$  ( $p > 1\text{ bar}$ ) (Sättigungsparameter)

$$h = h_{uE} + ((\rho_V - \rho'') / (\rho' - \rho'') \cdot H - (100 \cdot \Delta p / g / (\rho' - \rho'')))$$

$h_{uE}$  - Höhe der unteren Einbindung

$H$  - Höhe zwischen der oberen und unteren Einbindung

$\rho_V$  - Dichte in der Vergleichssäule

$\rho'$  - Wasserdichte

$\rho''$  - Dampfdichte

$\Delta p$  - Differenzdruck

$p$  - Druck

$g$  - Fallbeschleunigung

Das Differenzdrucksignal liefern die angeschlossenen Differenzdruckgeber. Die Dichte in der Vergleichssäule wird mit  $1000\text{ kg/m}^3$  angenommen. Die Berechnung der Dichten  $\rho'$  und  $\rho''$  erfolgt über eine berechnete Siedetemperatur, die über eine Kennlinie aus dem Drucksignal  $p\_DB$  ermittelt wird:

### Berechnung der Sättigungstemperatur aus dem Systemdruck:

$$1) \quad x = \frac{\ln(p)}{2.227} - 1$$

$$2) \quad T_s = 0.57702 \cdot x^4 + 5.0048 \cdot x^3 + 22.633 \cdot x^2 + 95.201 \cdot x + 176.61$$

### Berechnung der Sattdampfdichte $\rho''$

$$1) \quad a = \frac{T_s}{100} - 2$$

$$2) \quad b = 0.0072809 \cdot a^4 + 0.15088 \cdot a^3 - 0.41216 \cdot a^2 + 2.0217 \cdot a + 2.0659$$

$$3) \quad \rho'' = e^b$$

### Berechnung der Dichte von Sattwasser $\rho'$

$$1) \quad a = \frac{T_s}{100} - 2$$

$$2) \quad \rho' = -8.8677 \cdot a^4 - 6.6431 \cdot a^3 - 20.075 \cdot a^2 - 115.88 \cdot a + 863.88$$

Zur Erwärmung des Inhaltswassers im DB werden elektrische Heizelemente mit einer Gesamtleistung von ca. 23 kW (wobei 9.2 kW regelbar sind) verwendet. Zur Überwachung der Temperatur im DB sind eine Dampf- und eine Wassertemperaturmessstelle T\_D\_DB und T\_W\_DB installiert.

Die Erfassung und Überwachung des Druckes im DB erfolgt mit einer Druckmessstelle p\_DB und einem Manometer.



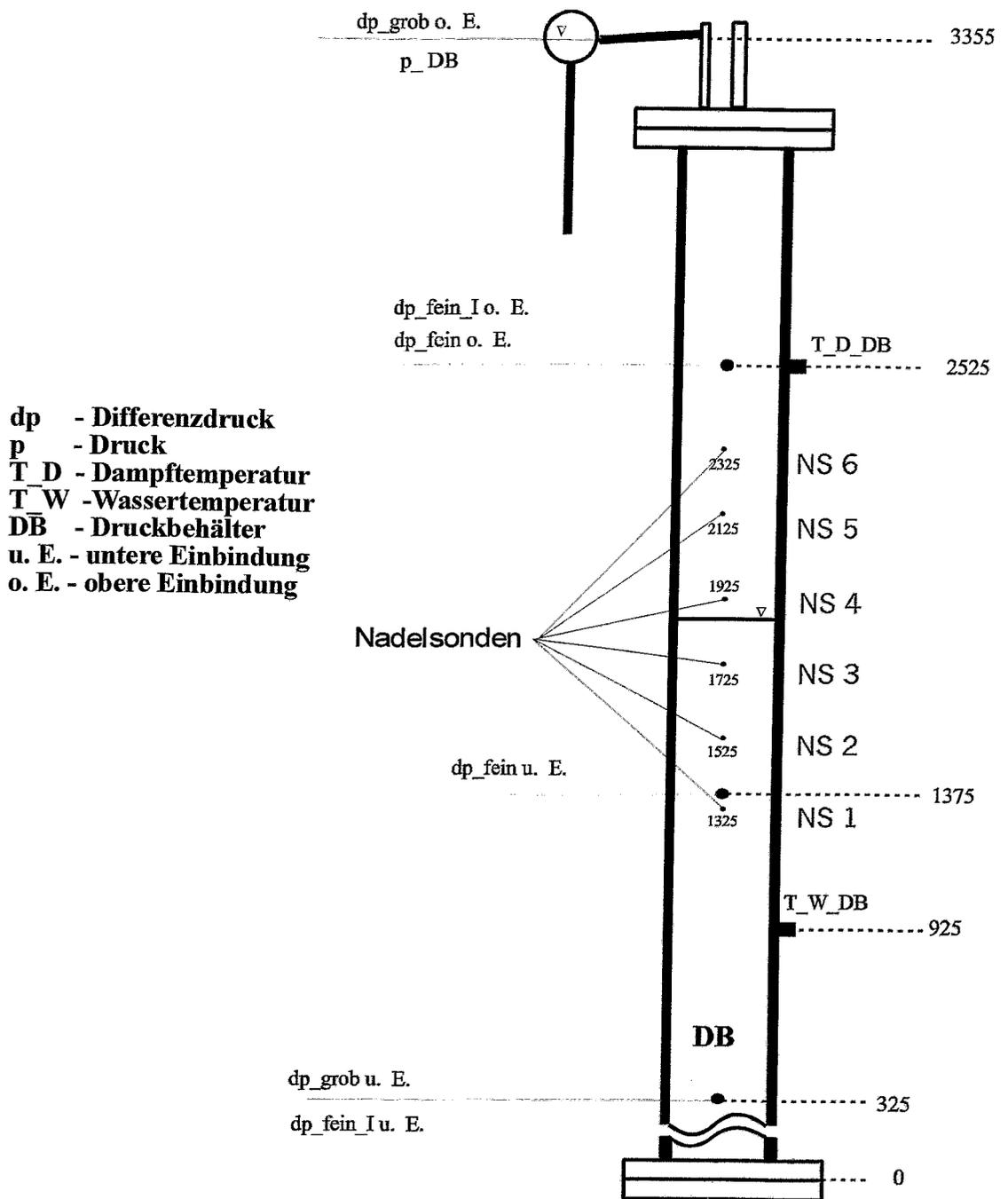


Bild 10 Höhenangaben der Einbindung der Messstellen am Druckbehälter der DHVA

### 3 Nadelförmige Leitfähigkeitssonden mit integriertem Thermoelement

#### 3.1 Funktion

Für die Versuche wurden spezielle nadelförmige Leitfähigkeitssonden entwickelt, bei denen die zentrale Sondenelektrode durch ein Mikrothermoelement mit 0,25 mm Durchmesser ersetzt wurde (vgl. [1]). Neben der Phasendetektion wird damit eine Temperaturmessung mit geringer Trägheit möglich. Der Mantel des Thermoelements dient direkt als Sondenelektrode. Der über das Messmedium zur Gegenelektrode (Rohrwandung) fließende Strom gibt Aufschluss über den Phasenzustand an der Sondenspitze. Durch die Temperaturmessung am selben Ort kann genau ermittelt werden, ob sie der Gas- oder der Flüssigphase zuzuordnen ist.

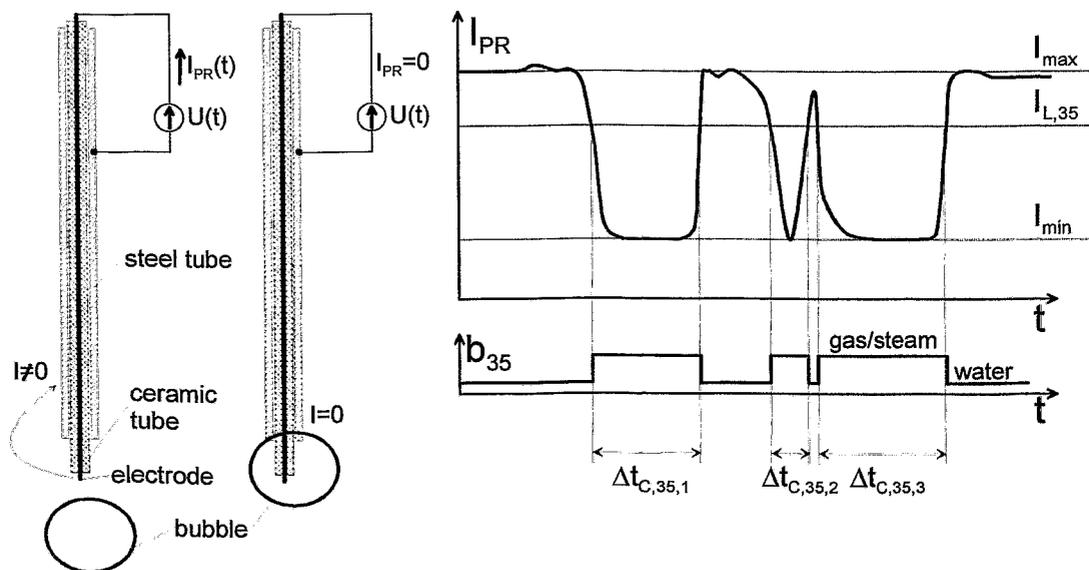


Bild 11 Prinzip der Phasendetektion mit der nadelförmigen Leitfähigkeitssonde

Das Prinzip der Phasendetektion ist in Bild 11 dargestellt. Die leitfähige Spitze der Sonde, in diesem Fall der Mantel des Mikrothermoelements, wird mit einer Spannung beaufschlagt. Dadurch fließt ein elektrischer Strom von der Sondenspitze zur Gegenelektrode, die durch den Sondenschaft und ggf. durch die leitfähige Wandung der Versuchsanlage (Kondensationsrohr) gebildet wird. Der Strom wird unterbrochen, sobald die Sondenspitze von der Gasphase eingeschlossen wird. In der Regel wird das analoge Sondensignal einer Diskriminierung mit einem Schwellwert unterzogen. Das so erhaltene binäre Signal enthält die Information, ob sich die Sondenspitze zu einem bestimmten Zeitpunkt in der leitfähigen Flüssigphase oder im Gas befindet. Durch Integration der Gaskontaktzeit über eine vorgegebene Messperiode kann ein lokaler Volumengasanteil ermittelt werden. Es können jedoch auch einzelne Be- und Entnetzungs Vorgänge detektiert und ihr Zeitpunkt festgestellt werden. Der Aufbau der Thermoelement-Sonde ist schematisch in Bild 12 wiedergegeben.

Die Signalerfassung erfolgt durch eine Elektronikeinheit, an die bis zu vier Sonden gleichzeitig angeschlossen werden können. Sowohl das Leitfähigkeits- als auch das Temperatursignal werden mit einer Frequenz von 500 Hz direkt abgespeichert.

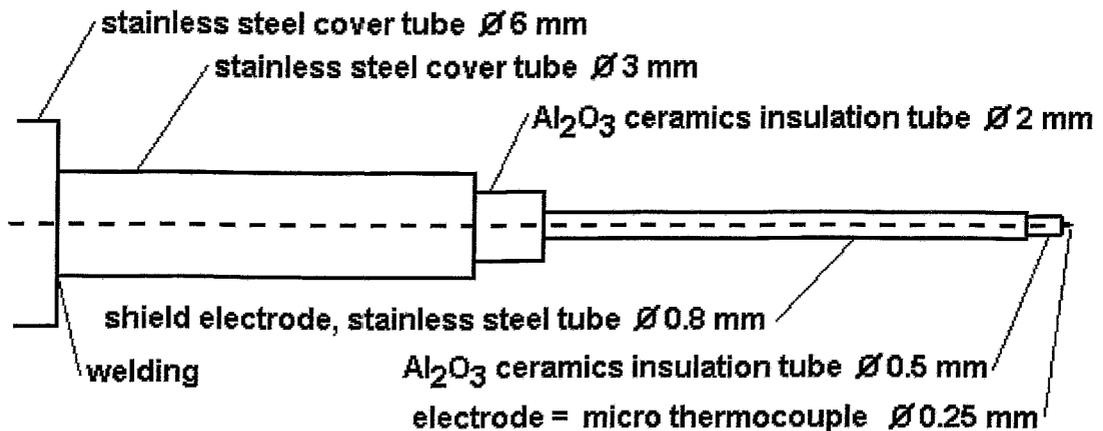


Bild 12 Schematischer Aufbau der nadelförmigen Leitfähigkeitssonde mit integriertem Thermoelement

### 3.2 Erprobung

Bei der Erprobung der Sonden wurde insbesondere die Trägheit der Temperaturmessung untersucht. Hierzu wurde eine Sonde mit einer speziellen Vorrichtung in ein Bad mit Wasser von ca. 70 °C eingetaucht. Eine Zugfeder sorgte für ein rasches Eintauchen nach Ausklinken einer mechanischen Sperre. Mit einer Lichtschranke (Gabel-Optokoppler) wurde ein Synchronimpuls für die Datenerfassung erzeugt. Ein typischer Zeitverlauf der Signals ist in Bild 13 dargestellt. Während das Leitfähigkeitssignal beim Eintauchen sofort, d.h. mit der aus der Abtastfrequenz resultierenden Geschwindigkeit ansteigt, weist das Temperatursignal eine Zeitkonstante von ca. 17 ms auf, die aus der thermischen Trägheit des Thermoelements resultiert.

Was die Genauigkeit der lokalen Dampfgehaltsbestimmung mit Nadelsonden vergleichbaren Durchmessers betrifft, so haben frühere Vergleichsmessungen mit einem Gamma-Densitometer in einer Luft-Wasser-Strömung ergeben, dass der Dampfgehalt im Bereich um 50 % etwa um 10 % unterbewertet wird (Bild 14). Bei Annäherung an 0 bzw. 100 % geht der Fehler zurück. Dies ist auf eine begrenzte Entnetzungsgeschwindigkeit der hydrophilen Sondenspitze bei den verwendeten Materialien und Abmessungen zurückzuführen. Übertragen auf die Detektion einzelner Phasenübergänge bedeutet dies, dass der Übergang Wasser-Dampf leicht verzögert stattfindet, wogegen der Übergang Dampf-Wasser mit steiler Flanke erfolgt. Die Verzögerungen liegen jedoch typischerweise nur im Bereich von bis zu 1 ms und treten deshalb bei der verwendeten Abtastfrequenz für die Direktspeicherung von 500 Hz nicht in Erscheinung.

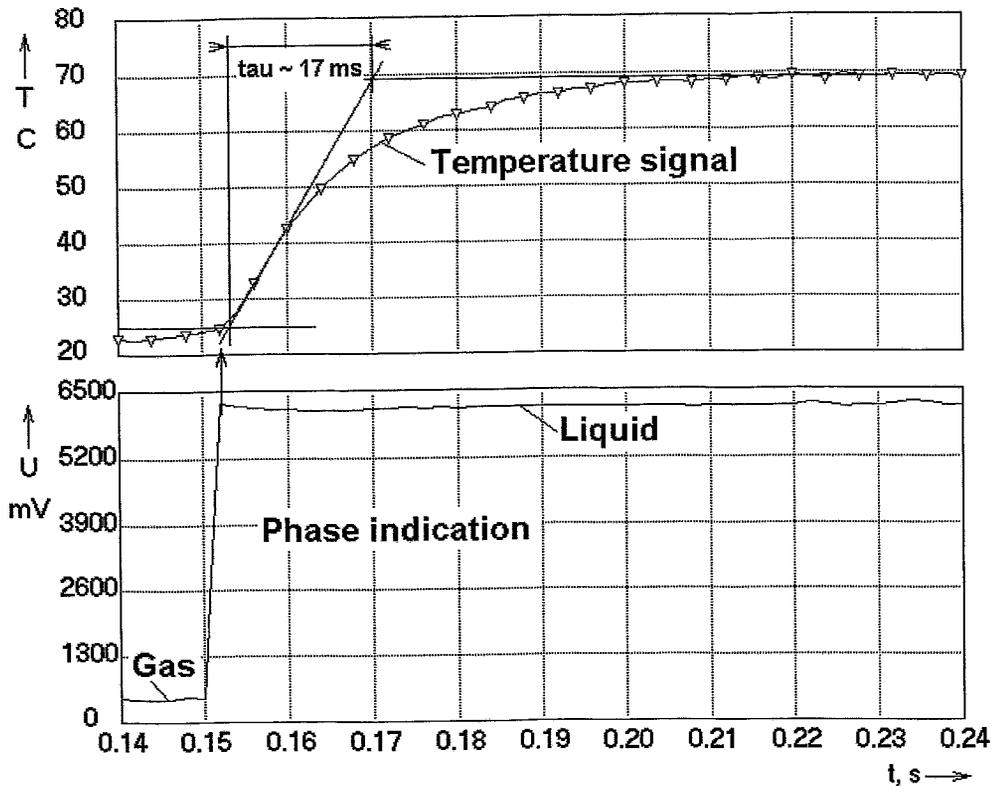


Bild 13 Zeitverhalten der Thermoelementsonde beim Eintauchen in warmes Wasser

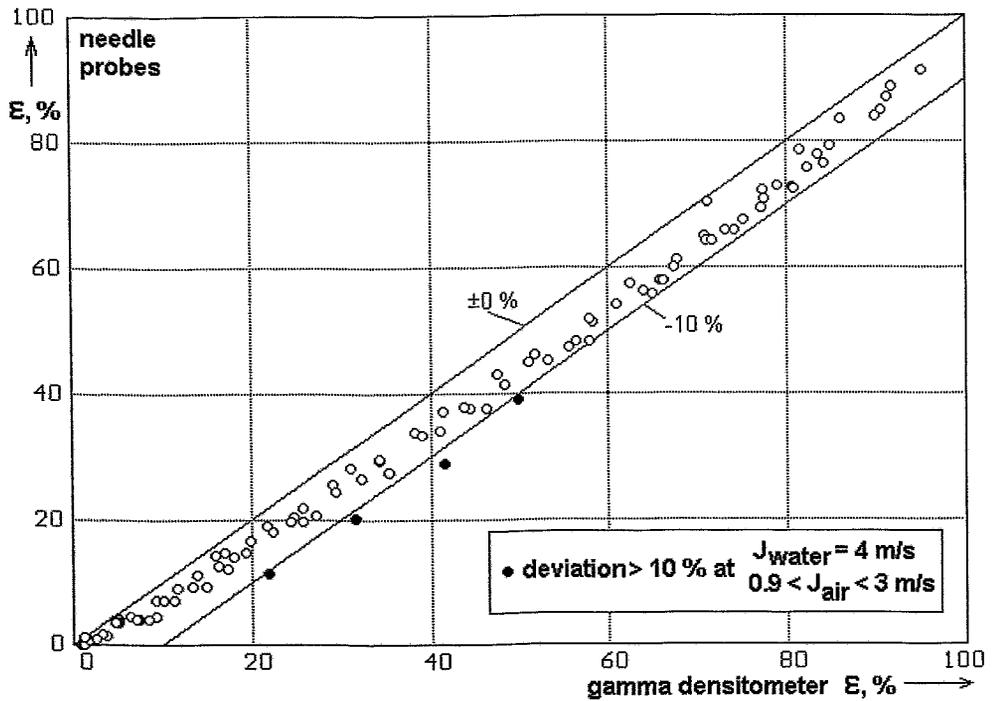


Bild 14 Vergleich Nadelsonde - Gamma-Densitometer in einer Luft-Wasser-Strömung [2]

## 4 Gittersensor

### 4.1 Sensorkonstruktion

Bei den Versuchen wurde der Prototyp eines druck- und temperaturfesten Gittersensors (Bild 15) erprobt. Die Funktionsweise von Gittersensoren allgemein ist in [3] beschrieben. Hier handelt es sich um einen Sensor mit verstärkten Elektroden in Form von Edelstahl-Stäbchen (Bild 16), die zur Verminderung des Strömungswiderstandes strömungsgünstig profiliert wurden. Ähnliche Sensoren wurden bereits für die Visualisierung von Kavitation hinter Schnellschlussarmaturen genutzt [4, 5]. Der Sensor verfügt über 2 x 8 Elektrodenstäbchen, die Messmatrix umfasst 8 x 8 Punkte, davon liegen 60 Messpunkte innerhalb des kreisrunden Messquerschnitts. Die hohen Arbeitstemperaturen machen gegenüber den Kavitationssensoren, die nur bei Umgebungstemperatur betrieben wurden, besondere konstruktive Maßnahmen zur Beherrschung der thermischen Ausdehnung der Elektrodenstäbchen erforderlich. Diese sind nunmehr nur einseitig durch einen Hochtemperatur-Epoxidharz fixiert. Auf der gegenüberliegenden Seite stecken die Stäbchen in Teflon-Hülsen. Die Klebestellen und die Hülsen sind wassergekühlt.

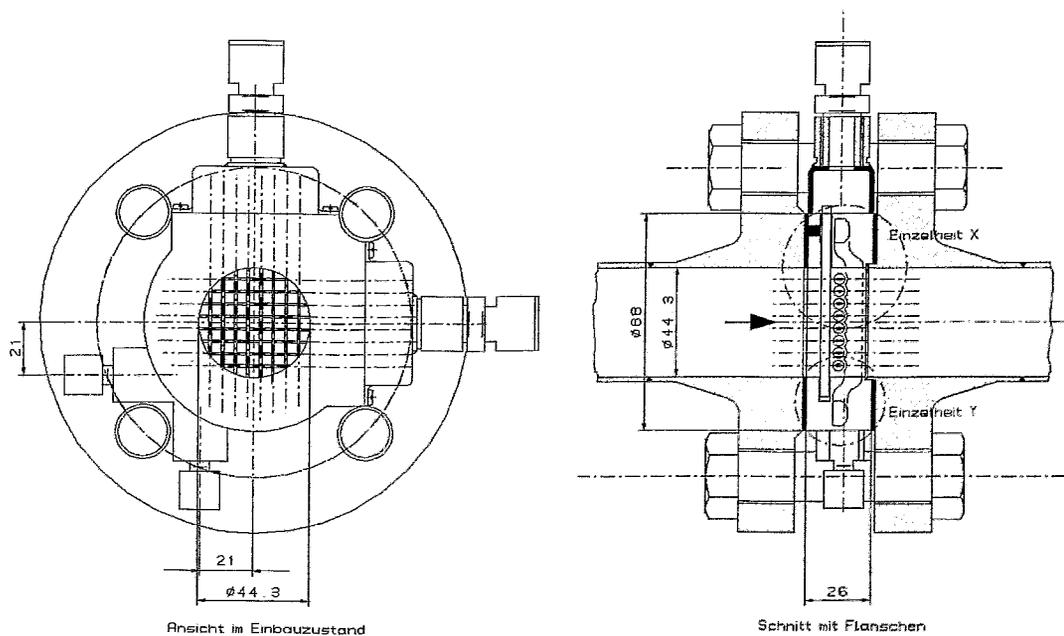


Bild 15 Druck- und temperaturfester Gittersensor im eingeflanschten Zustand

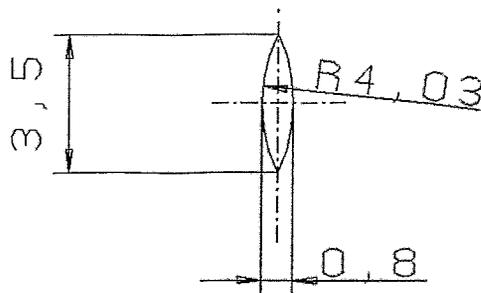


Bild 16 Querschnitt der Elektrodenstäbchen

Der Grundkörper des Sensors verfügt zur Realisierung dieser konstruktiven Maßnahmen über eine Reihe von Sacklöchern und verborgenen Kanälen, die mit konventionellen Bearbeitungstechnologien nicht gefertigt werden können. Aus diesem Grund wurde auf ein computergestütztes Laser-Sinterverfahren zurückgegriffen, bei dem der Grundkörper aus Metallpulver aufgebaut wird. Die Ansicht des Sensors ist in Bild 17 zu sehen.



Bild 17 Ansicht des temperatur- und druckfesten Gittersensors mit 2 x 8 Elektroden

#### 4.2 Signalerfassung

Für die Erfassung der Signale des Gittersensors wurde eine Elektronikeinheit der ersten Generation verwendet, die maximal 16 Sende- und 16 Empfängerelektroden bedienen kann. Von den zur Verfügung stehenden Ein- und Ausgängen wurden entsprechend der Anzahl der Sensorelektroden nur jeweils 8 beschaltet, die übrigen blieben frei. Die Datenaufzeichnung erfolgte mit einer Frequenz von 500 Hz über einen Zeitraum von bis zu 6 Minuten.

Erschwerend kommt gegenüber früheren Messungen hinzu,

- dass die Temperatur des Messmediums sich in weiten Grenzen ändert und damit die Leitfähigkeit der Flüssigphase bei den Kondensationsversuchen nicht konstant ist
- und dass eine Kalibrierung mit vollständig gefülltem Messquerschnitt vor Beginn des Versuches nicht vorgenommen werden kann.

Letzteres ist besonders problematisch, da die richtige Einstellung der Verstärkung nur möglich ist, wenn das leitfähige Medium (Wasser) zur Kalibrierung vorgelegt werden kann. Aus diesem Grund wurde das Messwertaufnahmeprogramm geän-

dert. Es wurde eine automatische on-line Verstärkungsanpassung programmiert, die während der Messung aktiv ist. Sie schaltet die Verstärkung der Empfängerstufen der Gittersensorelektronikeinheit zurück, wenn eine der Stufen übersteuert. Andererseits wird die Verstärkung erhöht, wenn der Messbereich weniger als 20 % ausgesteuert wird. Die neue Verstärkungseinstellung wird in der jeweils nachfolgenden Messung wirksam, d.h. bei Übersteuerung können potentiell einzelne Messungen unbrauchbar sein.

Die jeweils aktuelle Verstärkungseinstellung der Vorverstärkerstufen wird im Ausgabefile mit abgespeichert, was ihre nachträgliche Berücksichtigung bei der Auswertung ermöglicht.

## 5 Signalerfassung

Die Signalerfassung der Gesamtanlage erfolgt mit 4 Rechnern:

- Rechner der DHVA zur Erfassung aller Messstellen am Druckbehälter sowie zusätzlich aller Temperaturen im Wasserbecken ( $T_{out\_1-4}$ ) und der Temperaturen  $T_1, T_3, T_5, T_7, T_9$ ;
- Rechner zur Erfassung der Signale der Nadelsonden mit Thermoelementen (4 Messstellen für die Nadelsonden, 4 Messstellen für Thermoelemente (TE));
- Rechner zur Erfassung der Signale der Nadelsonden ohne Thermoelemente (insgesamt 3 Messstellen, 2 davon im Versuchsrohr ( $S_1, S_2$ ), 1 im Druckbehälter zur Kontrolle des Ausschleusens von Flüssigkeits-Gas-Gemisch (NS bei Höhe 2,325 m im DB)
- Rechner zur Erfassung der Signale des Gittersensors

Diese Konfiguration ist notwendig, da die Sensoren mit verschiedener Hard- und Software betrieben werden müssen.

Die Rechner untereinander werden synchronisiert, so dass ein gleichzeitiger Start aller Rechner gewährleistet ist. Die Synchronisation erfolgt über eine serielle Schnittstelle.

Die Erfassung der Signale und die Überwachung der Betriebsparameter an der DHVA erfolgt mit Hard- und Software der Fa. Intelligent Instrumentation. Zur Darstellung und Speicherung der Daten wird das Programm „Visual Designer“ genutzt. Mit Hilfe einer blockorientierten Oberfläche können die genannten Signale erfasst, gewandelt, dargestellt und gespeichert werden.

## 6 Durchgeführte Experimente

In der Tabelle 3 sind alle Experimente aufgeführt, zu denen verwertbare Daten vorliegen. Bei einigen Experimenten gab es Fehler bei der Auslösung der Datenaufzeichnung, sie sind in Tabelle 3 nicht mit aufgeführt. Der Name des Experiments enthält einen Buchstaben zur Charakterisierung der Druckstufe (Anfangsdruck des Dampfes im Druckbehälter von DHVA). Hierbei bedeuten A - 10 bar, B - 30 bar, C - 50 bar und D - 70 bar. Die nachfolgende Zahl ist eine laufende Nummer.

Die Versuche wurden in drei Serien unterteilt. In der ersten Serie vom 27.03.2001 wurde die Versuchsmethodik und der Gittersensor erstmalig erprobt. Dabei war noch keine Synchronisierung zwischen der Gittersensor- und der Nadelsondenmesstech-

nik auf der einen und dem Messwerterfassungsrechner von DHVA auf der anderen Seite verfügbar. Die Öffnung des Einströmventils EV geschah bei Serie 1 noch von Hand, also ohne den vom Signalerfassungsrechner aus angesteuerten Akku-Schrauber. Eine nachträgliche Ermittlung des Versuchsbeginns in den DHVA-Daten ist nur anhand der aufgezeichneten Drucksignale möglich.

p <sub>0,Luft</sub>	p <sub>0,Dampf</sub>			
	10 bar	30 bar	50 bar	70 bar
0 bar	A07, A12	B07, B11	C11	D07
1 bar	A02, A04, A05, A11	B01, B05, B06, B08	C01, C10, C12	D01, D06
2 bar	A06			
3 bar		B02, B03, B09	C08, C09	D05
5 bar			C02, C04, C05, C06, C14	D04
7 bar				D03
10 bar			C03, C07	D02

Tabelle 3 Testmatrix (ohne fehlgeschlagene Experimente)

- grün:** Serie 1, mit Gittersensor (eine Zeile) und Thermoelementsonden
- schwarz:** Serie 2, ohne Gittersensor, mit Thermoelementsonden
- rot:** Serie 3, mit Gittersensor, ohne Thermoelementsonden

Bei der Auswertung wurde festgestellt, dass ein Schaltungsfehler beim Gittersensor vorlag, durch den nur eine der 8 Zeilen des Sensors ausgelesen wurde. Damit konnte zwar die grundsätzliche Funktionsfähigkeit und die Medienbeständigkeit nachgewiesen werden, die Messdaten sind jedoch nur beschränkt für eine Auswertung geeignet (vgl. Abschnitt 7.3.4).

Nach Schaltung eines Synchronsignals von der Signalerfassungseinheit der Thermoelementsonden zum Datenerfassungsrechner von DHVA (Spannungssignal -12 V bis +12 Volt) und der Installation des Akku-Schraubers zum Öffnen des Einströmventils EV wurde die eigentliche Versuchsserie (Serie 2) am 08.06.2001 und am 11.06.2001 durchgeführt. Hierbei war der Gittersensor nicht verfügbar, da er zur Ermittlung der Fehlerursache ausgebaut worden war.

Die Serie 3 am 29.08.2001 diente der Erprobung des Gittersensors nach Beseitigung des Fehlers. Hierzu wurden einige der Versuche wiederholt. Wegen der in Serie 2 aufgetretenen Sondenausfälle wurden hierbei keine Nadelsondensignale mehr aufgenommen.

Die Anfangsbedingungen der Experimente der Hauptserie 2 sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die Pumpe erzeugt ein Vakuum von ca. 95 %. Als Anfangsfüllstand wurde im Druckbehälter DHVA für alle Experimente 1,86 m eingestellt (Verhinderung des Austritts von Zwei-Phasen-Gemisch aus dem Druckbehälter in das Versuchrohr). Für den DHVA-Rechner wurde eine Abtastrate aller Kanäle von 200 ms festge-

legt. Die Signale der Nadelsonden und des Gittersensors wurden über einen Zeitraum von bis zu 6 min aufgezeichnet.

Exp.	p_DB [bar]	P_VR [bar]	h <sub>grob</sub> [m]	T <sub>out_m</sub> [°C]	t <sub>start</sub>	Bemerkungen
A04	10.0	1.0	1.88	21.1	09:03:23.9	
A05	10.0	1.0	1.89	23.2	09:24:11.7	
A06	10.0	2.0	1.87	25.5	09:46:25.1	
A07	10.0	Vak.	1.86	37.3	14:30:38.1	
B02	30.0	3.0	1.84	28.0	16:15:53.7	
B03	30.0	3.0	1.89	31.3	16:44:12.7	
B05	30.0	1.0	1.86	27.3	10:46:10.9	
B06	27.3	25.7	1.85	29.4	11:07:48	Datenerfassung DHVA verspätet gestartet (ca. 5 - 10 s)
B07	30.0	Vak.	1.86	34.0	14:15:41.5	
C04	49.8	4.94	1.86	17.9	11:04:41.9	
C05	50.0	5.0	1.86	19.1	11:21:21.5	
C06	49.9	5.1	1.89	20.9	12:10:26.1	
C07	50.0	10.0	1.88	23.0	12:37:21.5	
C08	50.0	3.0	1.83	24.8	15:29:21.1	
C09	50.0	3.0	1.87	26.4	15:53:46.8	
C10	50.0	1.1	1.86	30.6	14:01:27.1	
C11	50.0	Vak.	1.85	22.4	15:48:19.5	
D02	70.0	10.0	1.86	23.6	12:45:41.7	
D03	70.0	6.9	1.83	24.6	13:09:55.5	
D04	70.0	5.0	1.86	26.2	13:29:40.7	
D05	70.0	3.0	1.85	28.8	13:50:32.1	
D06	69.9	1.1	1.86	24.0	16:25:10.5	Ausfall NTS 1
D07	70.0	Vak.	1.85	25.9	16:43:35.9	Ausfall NTS 1

Tabelle 4 Anfangsbedingungen im Druckbehälter von DHVA und im Versuchsrohr für die Experimente der Serie 2

## 7 Auswertung der Experimente

### 7.1 Allgemeine Bemerkungen

Die in den Bildern dargestellten Daten liegen als ASCII-Files mit einer Auflösung von 0.2 s vor. Sie können auf Anfrage bereitgestellt werden. Die Files tragen die Bezeichnung {Name}\_sync.asc, wobei {Name} für den Versuchspunkt nach Tabelle 3 steht (z.B. C11\_sync.asc). Die Namen der Messwerte ist in einer Kopfzeile gegeben:

Spalte	Messstelle	Größe	Einheit
time		Zeit	s
pdhva	p_DB	Druck im Druckbehälter DHVA	bar
lg	dp_grob	Füllstand im Druckbehälter DHVA	m
lf	dp_fein	Füllstand fein im Druckbehälter DHVA	m
lf1	dp_fein_l	2. Füllstand fein im Druckbehälter DHVA	m
ptube	p_V_Rohr	Druck im Versuchsrohr (keine Vakuumanzeige)	bar
dplg	dp_grob	Differenzdruck roh von dp_grob	mbar
dplf	dp_fein	Differenzdruck roh von dp_fein	mbar
dplf1	dp_fein_l	Differenzdruck roh von dp_fein_l	mbar
tddhva	TD_DB	Temperatur Dampf im Druckhalter	°C
twdhva	TW_DB	Temperatur Wasser im Druckhalter	°C
tout1	T_out_1	Temperatur im Becken	°C
tout2	T_out_2	Temperatur im Becken	°C
tout3	T_out_3	Temperatur im Becken	°C
tout4	T_out_4	Temperatur im Becken	°C
t1	T_1	Temperatur im Versuchsrohr	°C
t2	T_2	Temperatur im Versuchsrohr	°C
t4	T_4	Temperatur im Versuchsrohr	°C
t6	T_6	Temperatur im Versuchsrohr	°C
t9	T_9	Temperatur im Versuchsrohr	°C
s1	S_1	Void / Nadelsonde	%
s2	S_2	Void / Nadelsonde	%
stc1	NTS_1	Void / Thermoelementsonde	%
stc2	NTS_2	Void / Thermoelementsonde	%
stc3	NTS_3	Void / Thermoelementsonde	%
stc4	NTS_4	Void / Thermoelementsonde	%
ttc1	NTS_1	Temperatur / Thermoelementsonde	°C
ttc2	NTS_2	Temperatur / Thermoelementsonde	°C
ttc3	NTS_3	Temperatur / Thermoelementsonde	°C
ttc4	NTS_4	Temperatur / Thermoelementsonde	°C
tstube	p_V_Rohr	Sättigungstemperatur, berechnet aus p_V_Rohr	°C

Tabelle 5 Bedeutung der Spalten in den Datenfiles {Name}\_sync.asc

In einigen Fällen wurden Daten in höherer Zeitaufösung geplottet. Die entsprechenden Files können auf Anforderung ebenfalls bereitgestellt werden.

### 7.2 Korrektur der Temperaturmessung durch die Thermoelementsonden

Zu Zeitpunkten, an denen sich mehrere Thermoelementsonden gleichzeitig nacheinander in gesättigtem Dampf befanden und damit die gleiche Temperatur hätten

anzeigen müssen traten z.T. Diskrepanzen von bis zu 8 K auf. Deshalb wurde eine nachträgliche Korrektur der Temperaturwerte der Sonden NTS\_1 bis 4 durchgeführt. Als Vergleichswert wurde die Temperaturanzeige der Messstelle T\_6 benutzt. Es wurde nach Zeitintervallen gesucht, in denen alle vier Thermoelementsonden NTS\_1 bis 4 und die Thermoelemente T\_4 und T\_6 sich gleichzeitig in gesättigtem Dampf befanden. Dies ist in einigen Versuchen (A04, A07, B07, C10, D07) kurz nach dem Öffnen der Einspeisearmatur und nach Erreichen des Druckplateaus der Fall. Alle der genannten Temperaturen zeigen ein deutlich abgegrenztes Plateau (vgl. Anlage A). Für die Kalibrierung wurden die folgenden Zeitintervalle genutzt:

Versuch	t <sub>1</sub> , s	t <sub>2</sub> , s	T <sub>6</sub> , °C	P <sub>V</sub> Rohr, bar	T <sub>S</sub> , °C
A04 kalt	-2*	-1*	20.35	1 (Luft)	
A04	4	5	166.70	7.06	165.28
A07	6	7	159.39	5.91	158.27
B07	4	5	221.92	23.56	220.84
C10	3	4	255.96	43.38	255.23
D07	3**	4**	280.17	63.90	279.72

\* Die Rohwerte von NTS\_1 bis 4 für diesen Punkt stammen aus dem Intervall 0 - 0.06 s

\*\* Für NTS\_1 wurde bei Versuch D07 t<sub>1</sub> = 2 s, t<sub>2</sub> = 2.4 s gewählt

Tabelle 6 Signalsamples für die Kalibrierung der Thermoelementsonden

Der Kalibrierpunkt bei 20.35 °C wurde erhalten, indem die Signale der Sonden NTS\_1 bis 4 aus den Rohdaten (Auflösung 500 Hz) im Zeitbereich von 0 bis 0.06 s gemittelt wurden. Zu diesem Zeitpunkt war noch kein Temperaturanstieg zu beobachten, so dass mit der Temperatur an T\_6 kurz vor Öffnen der Einströmarmatur verglichen werden konnte.

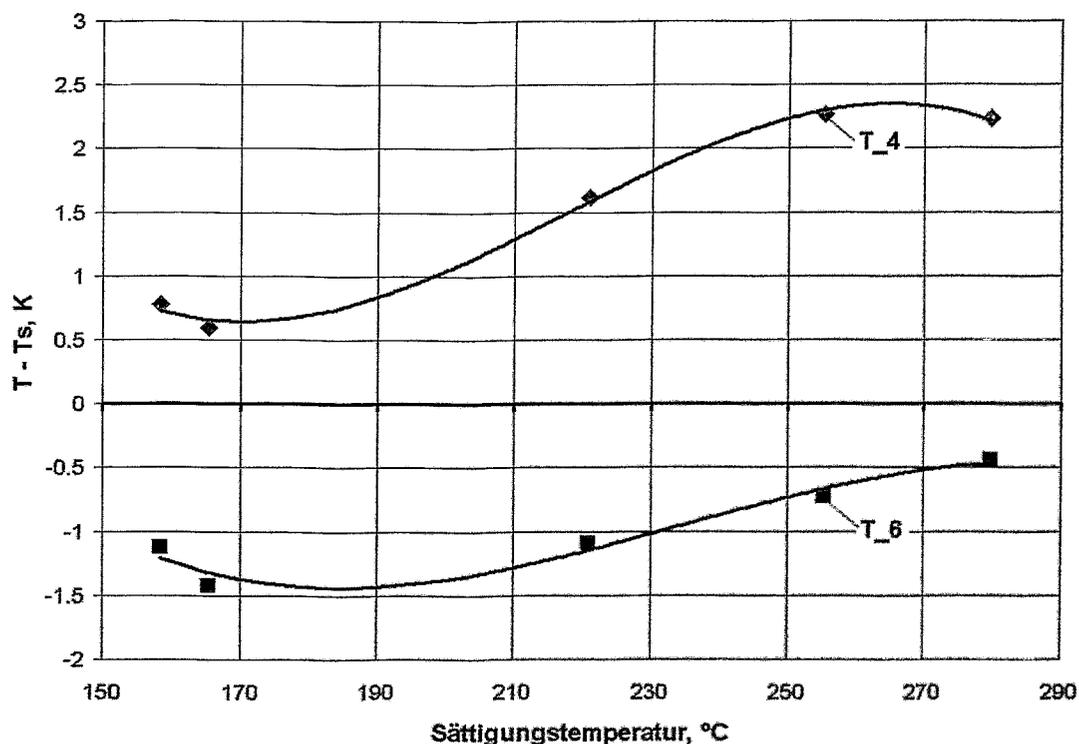


Bild 18 Vergleich der Temperaturanzeigen von T\_4 und T\_6 mit dem Sättigungswert

Die Entscheidung für T\_6 fiel auf Grund eines Vergleichs mit der Sättigungstemperatur. Auch das Thermoelement T\_4 hätte als Vergleichswert zur Verfügung gestanden, es hat jedoch eine etwas höhere Abweichung vom Sättigungswert aufzuweisen (s. Bild 18).

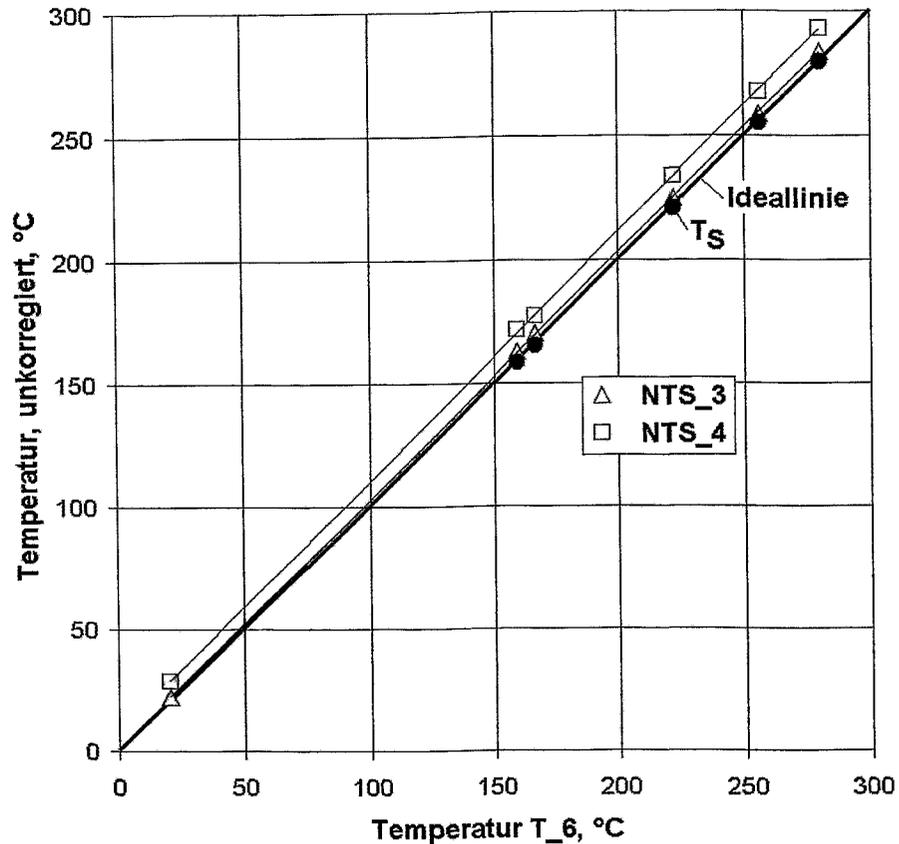


Bild 19 Kalibriergeraden am Beispiel von NTS\_3 und NTS\_4

Das Ergebnis des Vergleichs zwischen T\_6 und den unkorrigierten Werten von NTS\_3 und 4 ist in Bild 19 gezeigt (NTS\_1 und 2 verhalten sich ähnlich, wie NTS\_3). Es wurden Regressionsgeraden angepasst und als Korrekturfunktion verwendet. Im weiteren werden nur noch korrigierte Werte für NTS\_1 bis 4 angegeben. Die beigefügten Datenfiles enthalten ebenfalls korrigierte Werte. Die Korrekturfunktion lautet:

$$T_{\text{corr}} = (T - b)/a$$

Sonde	a, 1	b, K
NTS_1	1.0065	2.17
NTS_2	1.0048	1.38
NTS_3	1.0045	2.27
NTS_4	1.0155	8.38

Tabelle 7 Korrekturkoeffizienten für die Temperatursignale der Thermoelementsonden

## 7.3 Prozessverlauf

### 7.3.1 Druck und Füllstand

Im Druckbehälter DB kommt es während der Transiente nur zu einer geringen Füllstandsabnahme (Bild 20), der angestrebte Anfangsfüllstand von 1.86 m konnte gut reproduziert werden. Infolge der Druckentlastung kam es zu einem Aufwällen des Zweiphasengemischs im Druckbehälter DB. Dabei ist gesichert, dass der Gemischspiegel die kopfseitige Anschlussleitung zum Versuchsrohr bei keinem der Versuche erreicht hat und stets einphasiges Medium aus dem Druckbehälter ausströmte. Dies wurde mit Hilfe der in den Druckbehälter eingebauten Nadelsonden nachgewiesen, indem die obere Sonde NS6 zu jeder Zeit nur Dampfphase angezeigt hat.

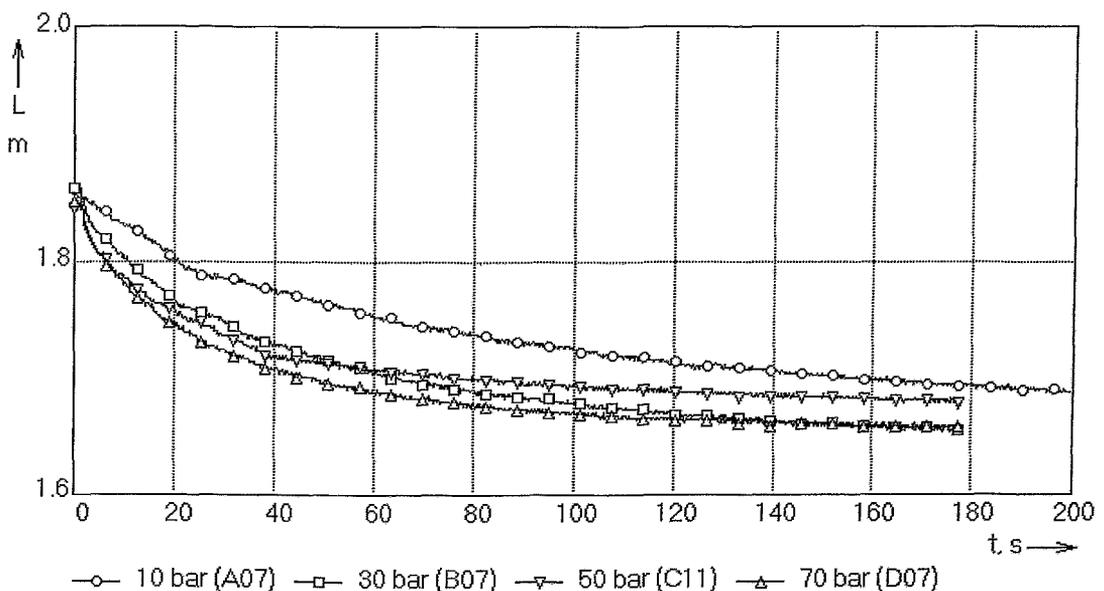


Bild 20 Verläufe des Grobfüllstands im Druckbehälter DB von DHVA für die Experimente mit evakuiertem Versuchsrohr (A07, B07, C11, D07)

Der Druck im Druckbehälter fällt während der Transiente signifikant ab (Bild 21). Der Abfall ist umso höher, je größer der Anfangsdruck ist. Gleichzeitig steigt der Druck im Versuchsrohr an. Nach wenigen Sekunden ist der Druckanstieg beendet und der Druck beginnt auch im Versuchsrohr wieder abzufallen. Dabei setzt sich die Annäherung der beiden Drücke fort. Je höher der Anfangsdruck im Druckbehälter ist, um so schneller vollzieht sich die Angleichung der Drücke, da höhere Dampfmassenströme realisiert werden.

Neben der Abhängigkeit vom Anfangsdruck im Druckbehälter ist der Enddruck außerdem vom Vordruck des Gases im Versuchsrohr abhängig (Bild 22). In der Tendenz nimmt der Druckabfall mit wachsendem Anfangsdruck des nichtkondensierbaren Gases ab, da die Kondensationskapazität infolge der Blockierung eines Teils des Innenvolumens des Versuchsrohrs zurück geht. Leider ist die Abweichung der Versuchspunkte von den Trendkurven teilweise erheblich, was auf Schwierigkeiten bei der Reproduzierbarkeit der Versuche hindeutet.

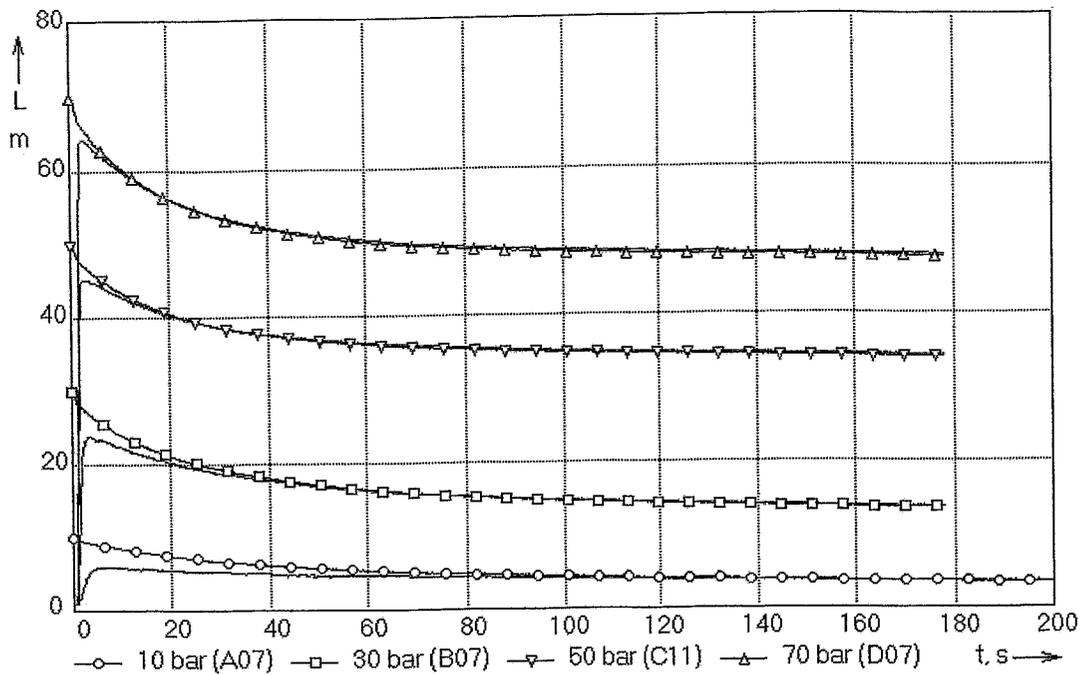


Bild 21 Druckverläufe für die Experimente mit evakuiertem Versuchsrohr (A07, B07, C11, D07), schwarz - Druckbehälter DB, rot - Versuchsrohr

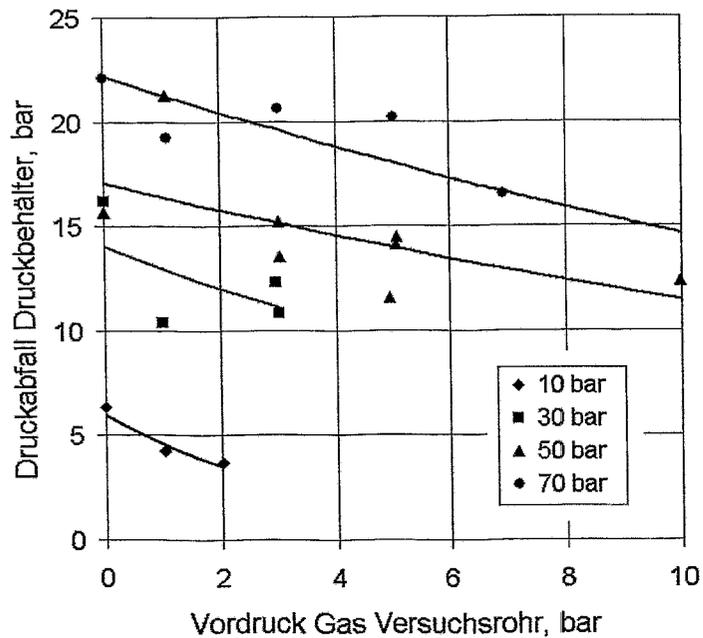


Bild 22 Druckabfall im Druckbehälter bei Variation des Anfangsdrucks des nichtkondensierbaren Gases (Luft) im Versuchsrohr, Parameter: Anfangsdruck im Druckbehälter

### 7.3.2 Evakuiertes Versuchsrohr, typischer Prozessverlauf

Am überschaubarsten ist der Versuchsverlauf bei einem Experiment mit evakuiertem Versuchsrohr, da sich in diesem Fall kein nichtkondensierbares Gas vorhanden ist. Zur Diskussion ausgewählt wurde der Versuch C11 mit einem Anfangsdampfdruck von 50 bar. Der Verlauf der in der Mitte des Rohrquerschnittes mit den Thermoelementsonden gemessenen Temperaturen und Dampfgehalte ist in Bild 23 dargestellt.

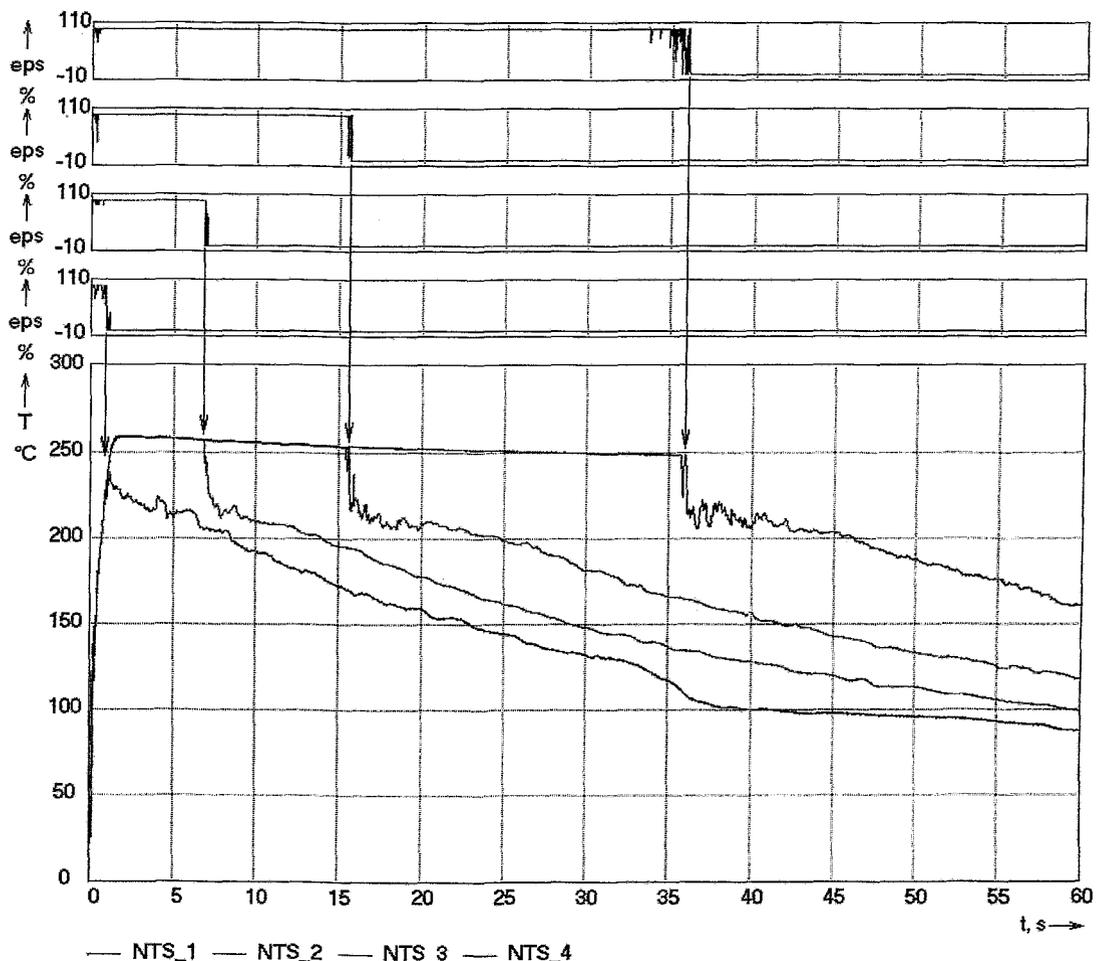


Bild 23 Phasenindikation und Temperatursignale der Thermoelementsonden NTS\_1 bis NTS\_4 bei Versuch C11 ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 0 \text{ bar}$ )

Es ist zu erkennen, dass das Versuchsrohr sich von der tiefer liegenden Seite (NTS\_1) her mit Kondensat füllt. Der Anstieg des Füllstandes vollzieht sich weitgehend ohne das Auftreten komplexerer Strömungsformen, d.h. Abfolgen von Phasenwechseln, wie sie beim Auftreten von Flüssigkeitsschwällen bzw. Wellen gehäuft zu beobachten sein müssten, treten - wenn überhaupt - nur wenige Sekunden vor dem Spiegeldurchgang in Erscheinung (s. Sonde NTS\_4). Kurz nach dem Öffnen der Einspeisearmatur werden kurzzeitig kleinere Flüssigkeitsanteile beobachtet, die möglicherweise Kondensatreste aus der Zuleitung darstellen.

Die Temperaturen steigen sehr schnell auf die dem Momentanwert des Drucks entsprechende Sättigungstemperatur an. Abweichungen, wie die bei Sonde NTS\_4,

deuten auf Messfehler, die durch Kalibrierung der Thermoelemente beseitigt werden können. Hierfür bieten sich die Temperaturverläufe bei den Versuchen mit anfänglicher Evakuierung des Versuchsrohrs an.

Der Druck (s. Bild 21) und dementsprechend die Temperatur erreichen infolge eines raschen Druckausgleichs zwischen Druckbehälter und Versuchsrohr schon nach 1-2 Sekunden ein Plateau. Eine Ausnahme bildet beim Versuch C11 der Temperaturverlauf an der am weitesten von der Einspeisestelle entfernten Sonde NTS\_1. Die Temperatur erreicht das Plateau nicht, da die Sonde schon vorher vom Kondensat erreicht wird. In diesem Moment nimmt die Temperatur nahezu sprunghaft ab, was in Folge auch bei den drei weiteren Sonden im Moment des Phasenübergangs eintritt.

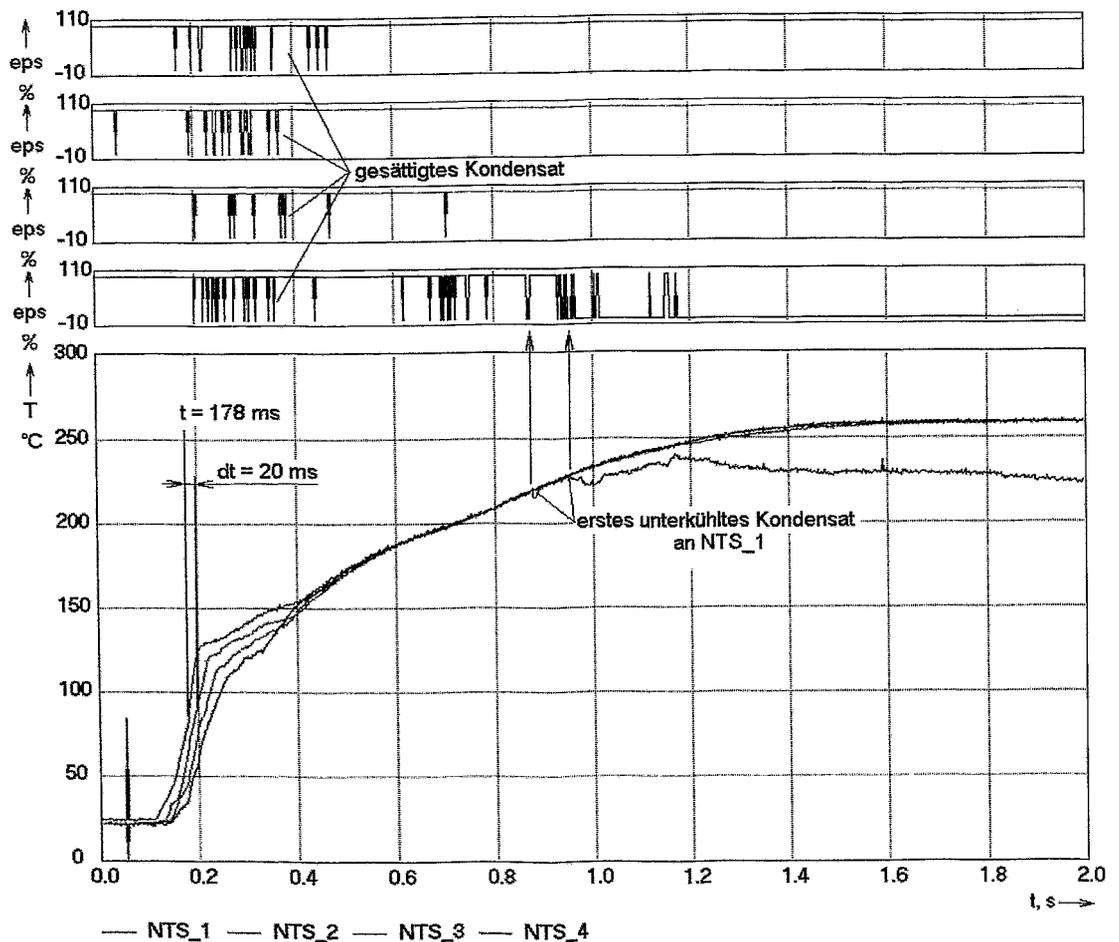


Bild 24 Phasenindikation und Temperatursignale der Thermoelementsonden NTS\_1 4 bei Versuch C11 ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 0 \text{ bar}$ ), Zeitbereich 0 - 2 s

Durch die Bedienung der Einspeisearmatur mit Hilfe eines elektrischen Schraubendrehers ist die Öffnungszeit nicht genau bekannt. Sie dürfte nach Schätzungen jedoch unterhalb von 2 s liegen. Hinzu kommt, dass der Widerstandsbeiwert der Armatur zu Beginn des Öffnungsvorgangs schneller abnimmt als gegen Ende des Öffnens. Der rasche Temperaturanstieg zu Beginn des Versuchs bestätigt die kurze

Öffnungszeit. So steigt die Temperatur an Sonde NTS\_4 schon nach ca. 0.2 s auf den momentanen Sättigungswert an (Bild 24). Bis zum Erreichen von Sonde NTS\_3 verstreichen nur weitere 20 ms. Bei einem Abstand von 1.165 m beträgt die Einströmgeschwindigkeit des Dampfes zu diesem Zeitpunkt somit ca. 60 m/s.

Bei den in den ersten 1.5 s beobachteten Flüssigkeitsanteilen, die die Sondenspitzen kurz benetzen (s. Bild 24), muss es sich um gesättigtes Wasser handeln, da keine Temperatureinbrüche zu beobachten sind. Das trifft bis zu einem Zeitpunkt von 0.85 s auch für die am weitesten von der Einspeisestelle entfernte Sonde NTS\_1 zu. Kurz danach wird dort bei einer kurzzeitig auftretenden Benetzung eine Temperaturabnahme beobachtet. Hierbei muss es sich um eine kleine Menge Kondensat gehandelt haben, das Kontakt mit der Rohrwandung gehabt haben muss. Bei 0.95 s schließlich erreicht der Kondensatspiegel die Sonde und die Temperatur entfernt sich für den gesamten restlichen Versuchsverlauf von der Sättigungstemperatur.

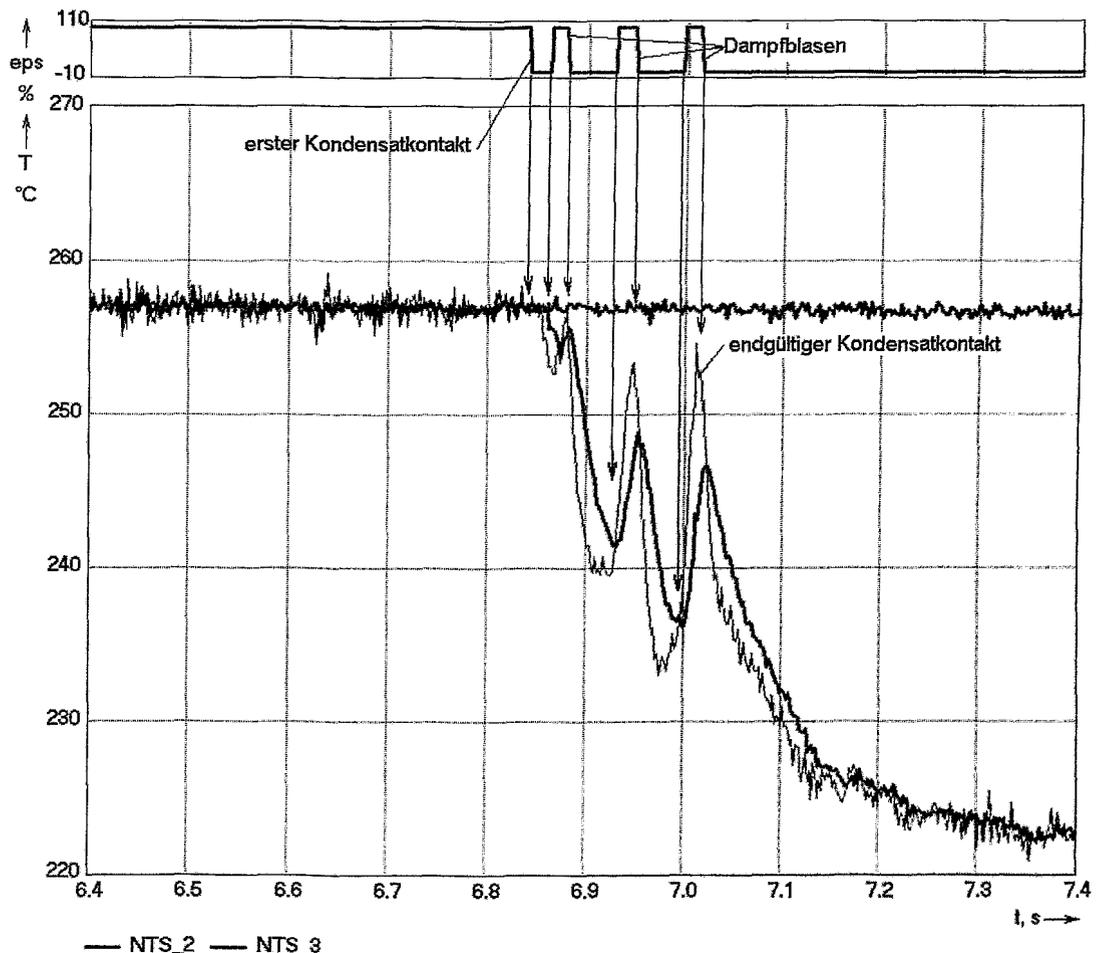


Bild 25 Mehrfache Be- und Entnetzung von Sonde NTS\_2 bei Versuch C11 ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 0 \text{ bar}$ ), Zeitbereich 6.4 - 7.4 s

Für alle Experimente mit Evakuierung des Versuchsrohrs wird an allen Thermoelementsonden genau zum Zeitpunkt des Füllstandsdurchgangs an der jeweiligen Einbauposition eine rasche Temperaturabnahme um einige 10 - 50 K auf die Tempera-

tur des Kondensats beobachtet (vgl. Bild 23). Bis zu diesem Zeitpunkt entspricht die Temperatur Sättigungsbedingungen. Dieses Verhalten ist typisch für die Abwesenheit von nichtkondensierbaren Gasen.

Die schnelle Reaktion der Thermoelemente wird in Bild 25 demonstriert. Während des Kondensatspiegeldurchgangs wechselt die Sonde mehrfach zwischen Dampf und Flüssigkeit. Dabei werden entsprechend schnelle Temperaturänderungen mit hoher Amplitude beobachtet. Wenn das Temperatursignal unter Zugrundelegung der Zeitkonstante von 17 ms dynamisch korrigiert wird, ergibt sich der im Bild als dünne Linie dargestellte Verlauf. Die Korrektur erfolgte durch Invertierung eines Verzögerungsglieds erster Ordnung:

$$T_{\text{corr}} = \tau \cdot \frac{dT}{dt} + T \quad (?)$$

Durch das Fehlen von nichtkondensierbaren Gasen erreicht die Temperatur innerhalb der Dampfblasen wieder nahezu den Sättigungswert, der zu diesem Zeitpunkt an Sonde NTS\_3 noch konstant ansteht.

### 7.3.3 Nichtkondensierbares Gas im Versuchsrohr, typischer Prozessverlauf

Hierzu wird der Versuch C09 betrachtet. Die Signale der Thermoelementsonden sind in dargestellt. Der Hauptunterschied zwischen diesem und dem Experiment mit evakuiertem Versuchsrohr besteht darin, dass die Temperatur bereits lange vor dem Kondensatspiegeldurchgang unter den Sättigungswert abfällt. Dies ist auf das Eintreffen von nichtkondensierbarem Gas an der Sondenposition zurückzuführen.

Der gesamte Versuchsablauf lässt sich wie folgt umreißen: Nach Öffnen der Einspeisearmatur tritt Satttdampf in das Versuchsrohr ein, der die dort vorhandene Luft in den hinteren bzw. unteren Teil des Rohres verdrängt und dort komprimiert. Die Temperatur an den Sonden im vorderen Teil (NTS\_2 - 4) erreicht - ähnlich wie bei evakuiertem Versuchsrohr - schnell den Sättigungswert. Im vorderen Teil setzt sofort Kondensation an der Rohrwand ein. Das Kondensat fließt im geneigten Rohr nach unten, d.h. in Richtung Rohrende. Dies verursacht einen Flüssigkeitsschwall, der von Sonde NTS\_1 registriert wird. Das Kondensat beginnt, die am Rohrende angesammelte Luft wieder nach vorn, d.h. in Richtung Dampfeintritt zu verdrängen. Dadurch trifft die Luft nacheinander an den Sondenpositionen ein, so dass die Temperatur absinkt, ohne dass die Sonden Flüssigphase detektieren. Da sich das Rohr kontinuierlich mit Kondensat füllt, erreicht später auch der Kondensatspiegel die Sondenpositionen, was durch die Phasendetektion nachgewiesen wird.

Zum Zeitpunkt des Kondensatspiegeldurchgangs wird ein Temperaturanstieg um 30 bis 40 K beobachtet, d.h. das Kondensat ist in Rohrmitte wärmer, als das nichtkondensierbare Gas. Die Luft kann sich bei adiabatischer Kompression von 3 auf 50 bar theoretisch auf ca. 380 °C aufheizen, da die Rohrwand jedoch kalt ist, wird diese Temperatur bei weitem nicht erreicht, d.h. die Kompression erfolgt polytrop. Die Temperaturen im nichtkondensierbaren Gas liegen bei Versuch C09 zwischen 100 und 200 °C. Die höhere Temperatur des Kondensats ist auf dessen Wärmekapazität zurückzuführen. Es wurde bei nahezu Sättigungstemperatur gebildet und kann sich in Rohrmitte nur langsam abkühlen.

Nach dem Eintreffen der Luftpfropfen wird an den Sonden wahrscheinlich eine Zone aus einem Dampf-Luft Gemisch vorbeigeschoben. Dadurch nimmt die Temperatur rasch ab, wobei in der Mischzone charakteristische Temperaturluktuationen (s. insbesondere NTS\_4) beobachtet werden. Im weiteren beruhigen sich die Verläufe, die Temperaturen fallen langsam weiter ab, da sich das Gas an der Rohrwand abkühlt.

Bei allen Versuchen mit Luft im Rohr wurden jedoch die charakteristischen Temperatursprünge beim Kondensatspiegeldurchgang vorgefunden, d.h. das Kondensat war in jedem Fall wärmer, als das nichtkondensierbare Gas.

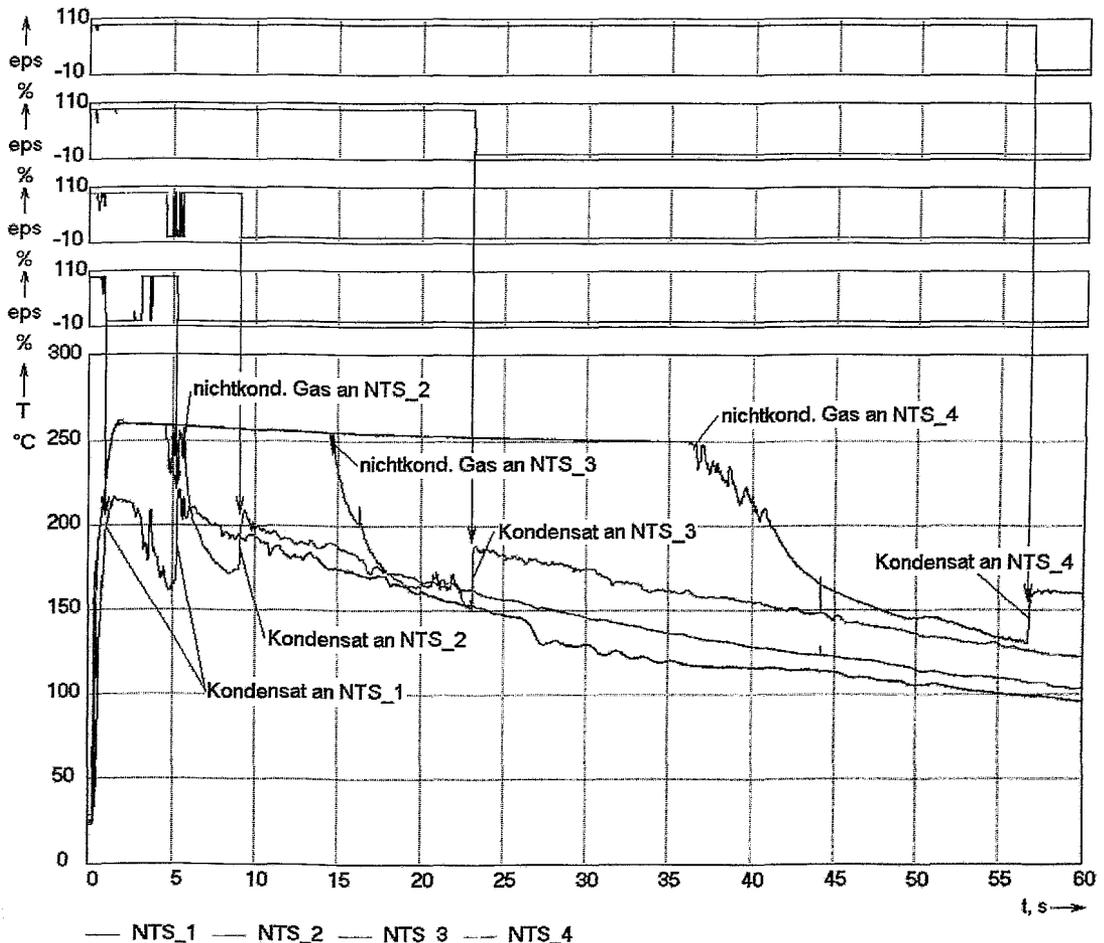


Bild 26 Phasenindikation und Temperatursignale der Thermoelementsonden NTS\_1 bis NTS\_4 bei Versuch C09 ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 3 \text{ bar}$ )

Interessant ist es, sich in diesem Zusammenhang den Zeitbereich zwischen 4.4 und 6.4 s in höherer Zeitaufösung anzusehen, da an Sonde NTS\_2 wiederholt Anteile der Kondensatphase auftreten (Bild 27). Ähnlich wie in Bild 25 steigt die Temperatur im Innern der einzelnen beobachteten Blasen wieder nahezu auf Sättigungstemperatur an, d.h. es handelt sich um Dampfblasen. Nach der letzten Benetzungsphase stellt sich wieder Sättigungstemperatur ein. Kurz danach kommt es jedoch zu einem steilen Temperaturabfall ohne Detektion von Flüssigphase, was auf das Eintreffen

des nichtkondensierbaren Gases zurückzuführen ist. Hier zeigt sich deutlich, welchen Detailinformationen die Signale der Thermoelementsonden beinhalten.

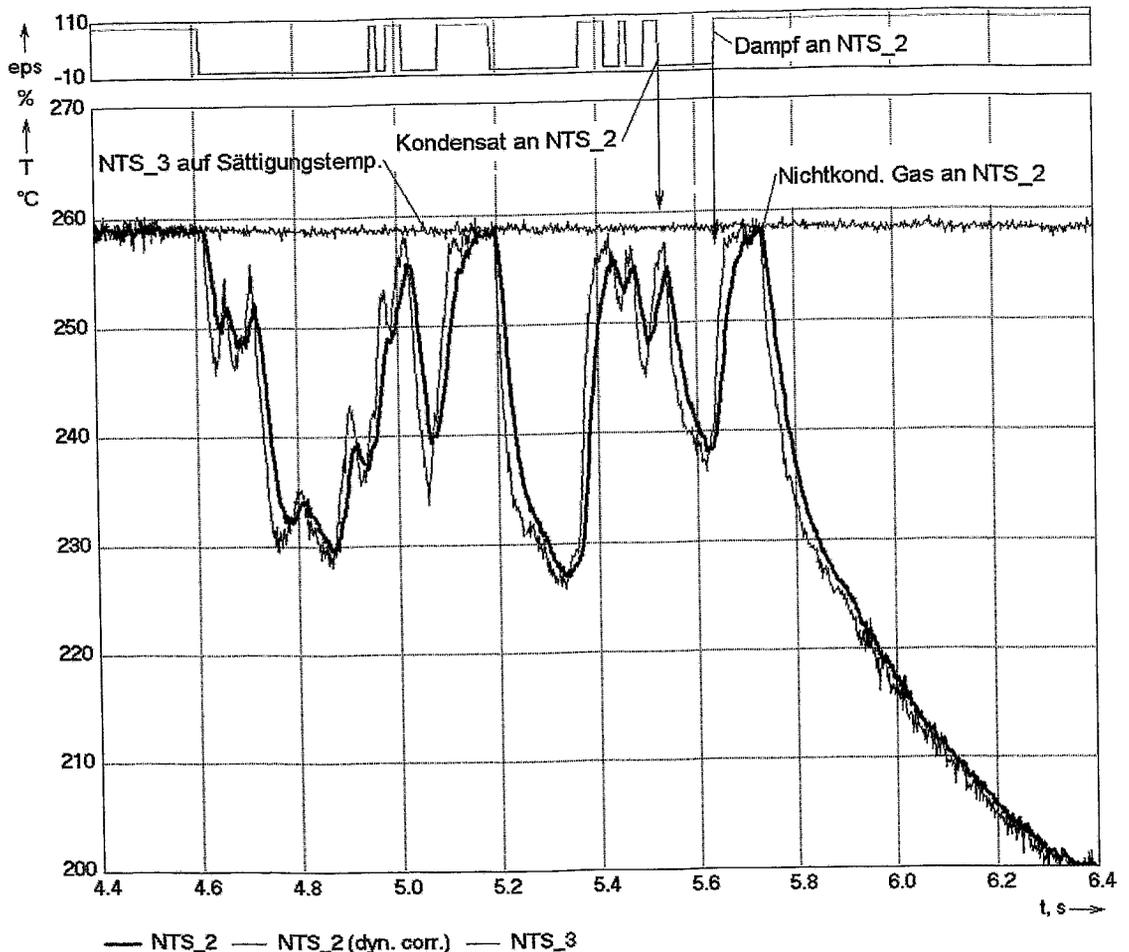


Bild 27 Phasenindikation und Temperatursignal der Thermoelementsonde NTS\_2 bei Versuch C09 ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 3 \text{ bar}$ ) in höherer Zeitauflösung

In der Anfangsphase des Prozesses sind ebenfalls deutliche Unterschiede zu den Experimenten mit evakuiertem Versuchsrohr zu erkennen. Wie in Bild 28 gezeigt, führt das Eindringen des Dampfs in das Rohr zu nacheinander erfolgenden Temperaturanstiegen an den Sonden. Hierbei tritt jedoch eine deutliche Abnahme der Geschwindigkeit auf. Während zwischen den Sprüngen an den Sonden NTS\_4 und NTS\_3 nur 30 ms vergehen, was einer mittleren Geschwindigkeit der Dampffront von ca. 40 m/s entspricht, sind es zwischen NTS\_2 und NTS\_1 schon 140, was nur ca. 7 m/s entspricht. Die Dampffront wird demzufolge durch die Kompression der Luft im hinteren Teil des Rohres abgebremst. Der durch diese Kompression verursachte Temperaturanstieg ist ansatzweise an den Sonden NTS\_1 und NTS\_2 zu erkennen, an denen die Temperatur bereits vor Eintreffen des Dampfs ansteigt.

Wesentlich deutlicher werden diese Effekte, wenn man ein Experiment mit höherem Gasvordruck betrachtet. Beim Versuch C07 betrug der Vordruck der Luft 10 bar.

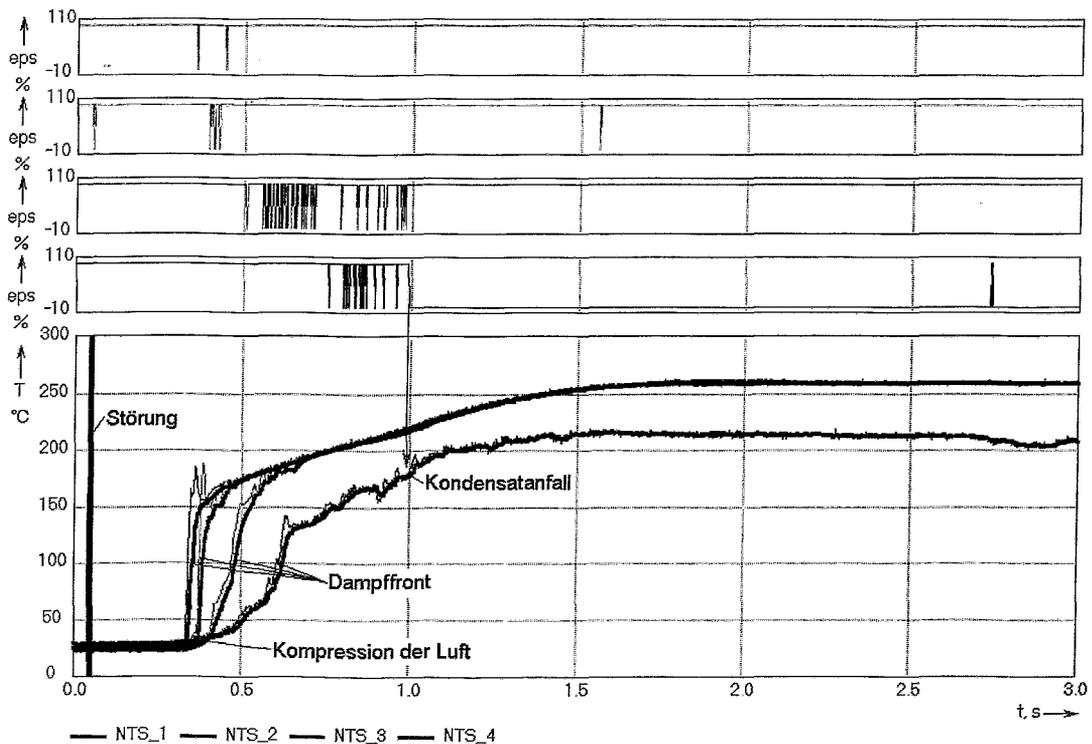


Bild 28 Phasenindikation und Temperatursignale (dünne Linien = dynamische Korrektur) der Thermoelementsonden NTS\_1 bis NTS\_4 bei Versuch C09, Anfangsphase des Versuchs ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 3 \text{ bar}$ )

Unter diesen Verhältnissen ist die Dampffront noch wesentlich langsamer (Bild 29). So erreicht der Dampf die Sonde NTS\_3 bei ca.  $t = 0.4 \text{ s}$ , vorher steigen aber bereits die Temperaturen auch an den dahinter liegenden Sonden, was nur auf die Erwärmung durch die Kompression zurückgeführt werden kann. Bis ca.  $t = 0.64 \text{ s}$  steigt die Temperatur an den beiden Sonden NTS\_1 und 2 synchron an, erst danach schert Sonde NTS\_2 infolge des Eintreffens des Dampfes aus. Auch dieser Effekt kann nur durch die polytrope Kompression des Gases erklärt werden.

#### 7.3.4 Informationen über das Strömungsregime aus den Gittersensordaten

Trotz der eingeschränkten Verfügbarkeit des Gittersensors können aus Serie 1 Informationen über das Strömungsregime im Versuchsrohr abgeleitet werden. Bei diesen Experimenten waren die Thermoelementsonden zusammen mit dem Gittersensor im Einsatz. Leider war nur eine Zeile der Messmatrix funktionsfähig. An den verfügbaren Kreuzungspunkten zeigt sich eine Zunahme des gemessenen Stroms beim Durchgang des Kondensatspiegels. In Bild 30 ist hierzu der Versuch C01 dargestellt. Hierbei handelt es sich um ein Experiment mit 50 bar Anfangsdruck Dampf und 1 bar Luftvordruck. Der vom Gittersensor registrierte Spiegeldurchgang ordnet sich entsprechend der Einbauposition des Gittersensors chronologisch in die von den Sonden signalisierten Durchgänge ein.

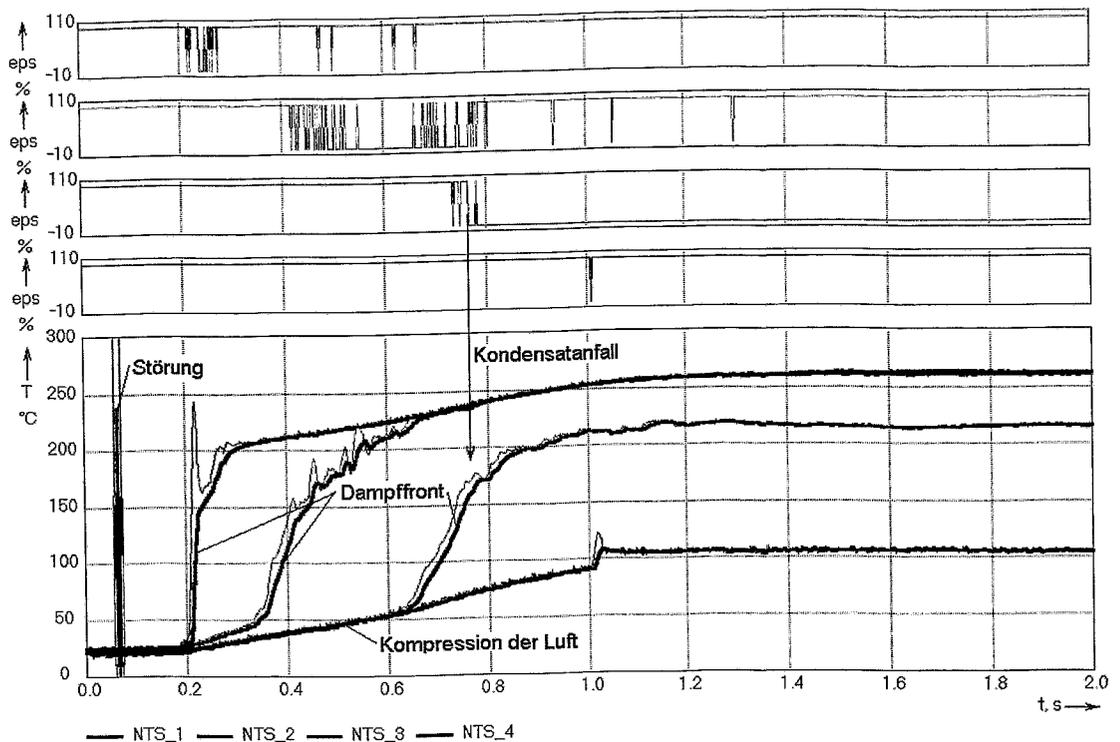


Bild 29 Phasenindikation und Temperatursignale (dünne Linien = dynamische Korrektur) der Thermoelementsonden NTS\_1 bis NTS\_4 bei Versuch C07, Anfangsphase des Versuchs ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 10 \text{ bar}$ )

Dies wird in Bild 31 deutlich, indem der jeweilige Zeitpunkt des Eintreffens von Kondensat am Messpunkt in Abhängigkeit von dessen absoluter Höhenposition dargestellt wird. Die Höhe wurde dabei unter Berücksichtigung der Neigung des Versuchsröhrs und der Position des Messpunkts innerhalb des Rohrleitungsquerschnitts ermittelt. Einbezogen wurden die Signale der Thermoelementsonden NTS\_1 bis 4, der beiden Nadelsonden S\_1 und S\_2 sowie die verfügbaren Kreuzungspunkte in der Gittersensormatrix. Nur an den Sonden NTS\_4 und S\_2 in Nähe der Dampfeinspeisung wurden Benetzungszeitpunkte ermittelt, die aus der allgemeinen Tendenz einer kontinuierlichen Füllstandszunahme herausfallen. Es wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass sich ein relativ ruhiger Füllstandsanstieg vollzieht, bei dem es kaum zu einer von der Horizontalen abweichenden Lage des Spiegels kommt. Wasserschwälle oder andersartige schnelle Phasenwechsel konnten mit Ausnahme von drei Dampfblasen, die den Sensor zwischen  $t = 30$  und  $35 \text{ s}$  erreichten, bei diesem Versuch nicht beobachtet werden.

Bei einem Experiment mit 5 bar Luftvordruck (C02) wurde ein ähnliches Verhalten beobachtet (Bild 32). Allerdings trat hier in der Anfangsphase eine Folge von raschen Phasenwechseln auf, die sowohl vom Gittersensor als auch von den Thermoelementsonden kurz nach dem Öffnen der Einspeisearmatur nachgewiesen wurden.

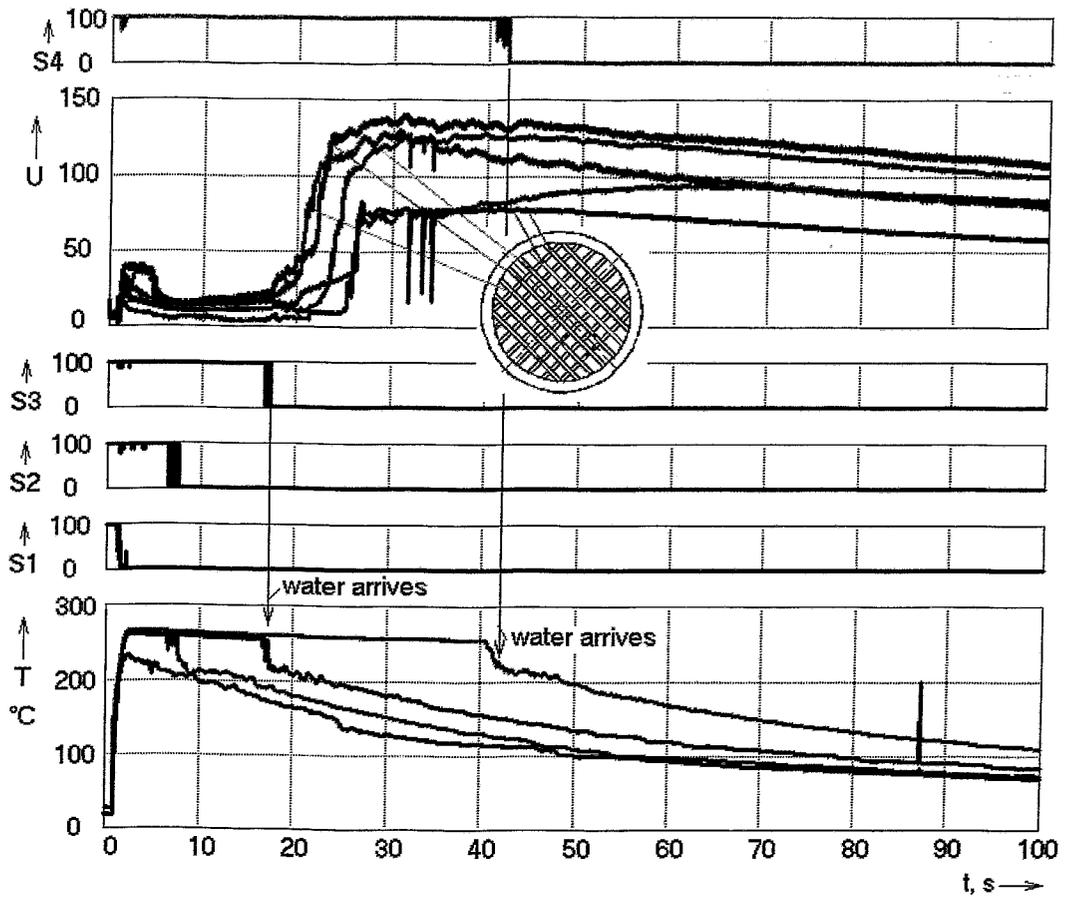


Bild 30 Phasenindikation und Temperatursignale der Thermoelementsonden NTS\_1 bis NTS\_4 (hier S1 - S4) und Primärsignale der verfügbaren Gittersensorzeile in Versuch C01 ( $\rho_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $\rho_{0, \text{Luft}} = 1 \text{ bar}$ )

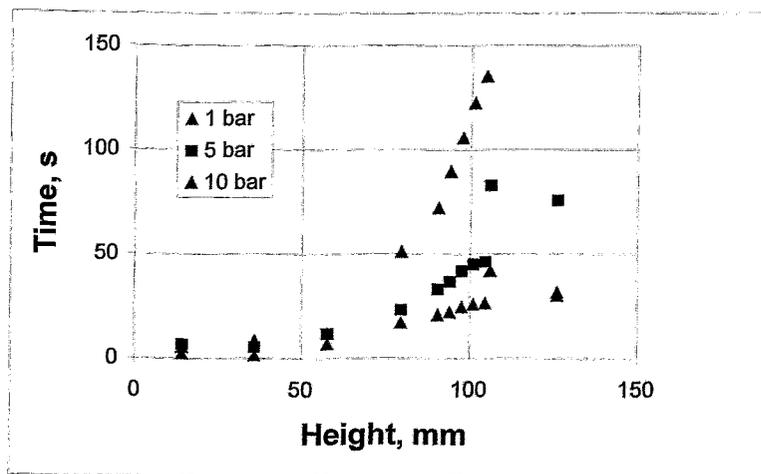


Bild 31 Chronologie des Kondensatspiegeldurchgangs in Abhängigkeit von der absoluten Höhenposition der Messpunkte von Thermoelementsonden und Gittersensor in den Versuchen C01, C02 und C03 (Parameter: Luftvordruck)

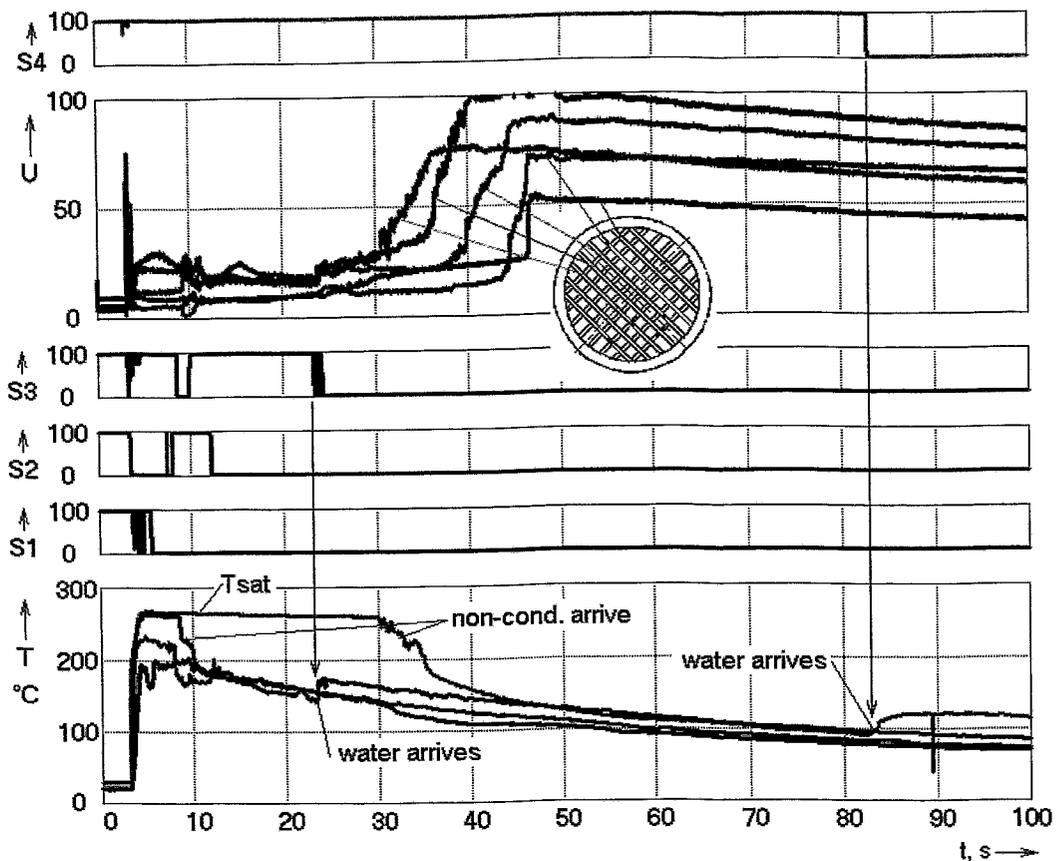


Bild 32 Phasenindikation und Temperatursignale der Thermoelementsonden NTS\_1 bis NTS\_4 (hier S1 - S4) und Primärsignale der verfügbaren Gittersensorzeile in Versuch C02 ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 5 \text{ bar}$ )

In den Experimenten der Serie 3, bei der der Gittersensor vollständig verfügbar war, wurde ebenfalls der kontinuierliche Füllstandsanstieg beim Durchgang des Kondensatpiegels beobachtet (s. z.B. Versuch C12 in Bild 33), ohne dass dabei rasche Phasenwechsel auftraten. Das Auftreten der Flüssigphase ist am Anstieg des am jeweiligen Kreuzungspunkt des Sensors gemessenen Stroms zu erkennen. Im weiteren Verlauf sinken die Ströme kontinuierlich ab, was auf die Abnahme der Leitfähigkeit des Wassers bei sinkender Temperatur während der Abkühlphase zurückzuführen ist.

Typisch ist die Ausprägung einer Gerinneströmung nach Einsetzen der Dampfkondensation. Dieses Kondensatgerinne wird vom Gittersensor registriert. Hierzu zeigt Bild 34 den Anfang von Versuch C12 in erhöhter Zeitaufösung. Vor Eintreffen des Spiegels verursachen einige kleine Flüssigkeitsportionen kurze Peaks im Sensorstrom. Dieser Effekt wurde bei Versuchen mit höherem Vordruck des nichtkondensierbaren Gases verstärkt beobachtet (Bild 35). Die höchsten Peaks treten hierbei an den unteren Kreuzungspunkten auf. Weiter oben im Messquerschnitt nimmt die Amplitude rasch ab, woraus auf Flüssigkeitswellen geschlossen werden kann, die am Boden des Versuchsrohrs entlang laufen. Eine Sequenz von Phasenverteilungen im Messquerschnitt des Gittersensors beim Durchgang des Kondensatpiegels zeigt Bild 36.

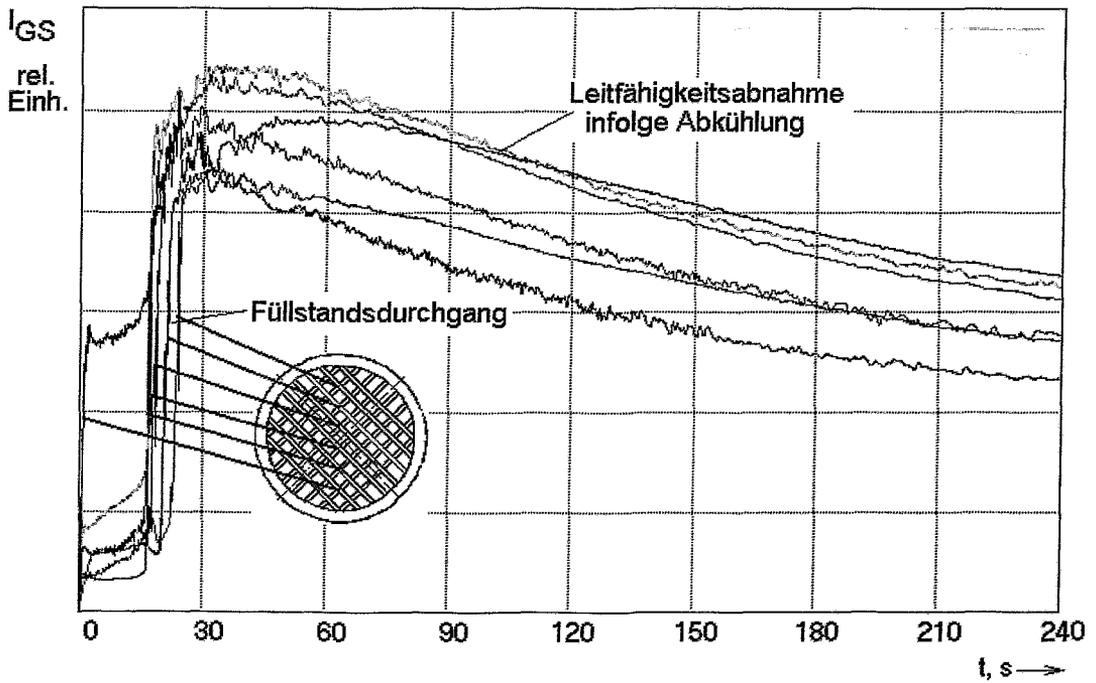


Bild 33 Darstellung des Kondensatspiegeldurchgangs anhand der Rohsignale (Ströme) an ausgewählten Kreuzungspunkten des Gittersensors, Versuch C12 ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 1 \text{ bar}$ )

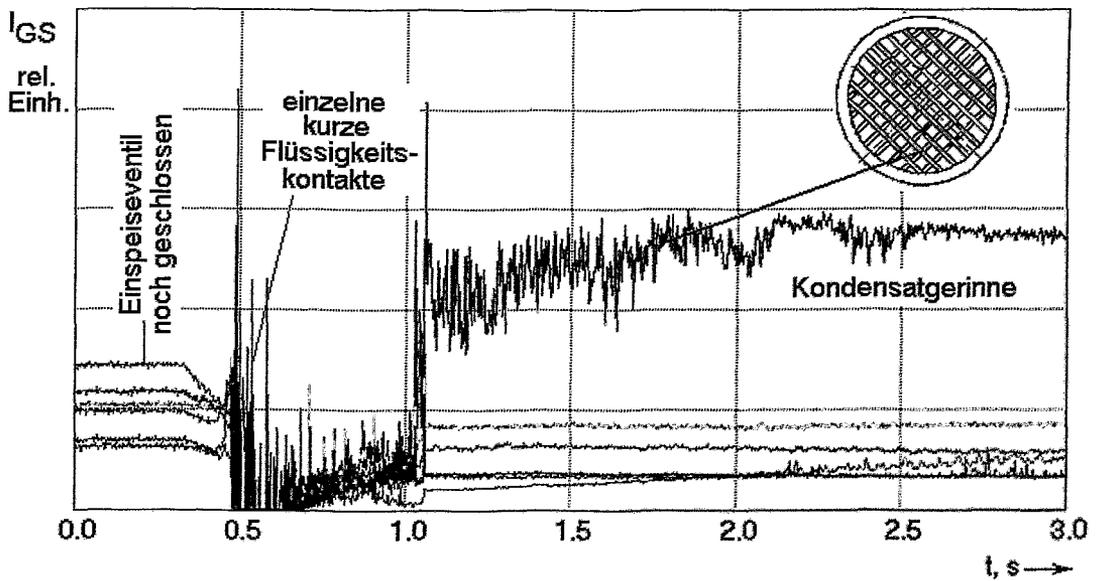


Bild 34 Gerinneströmung im Messquerschnitt des Gittersensors, Versuch C12 ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 1 \text{ bar}$ )

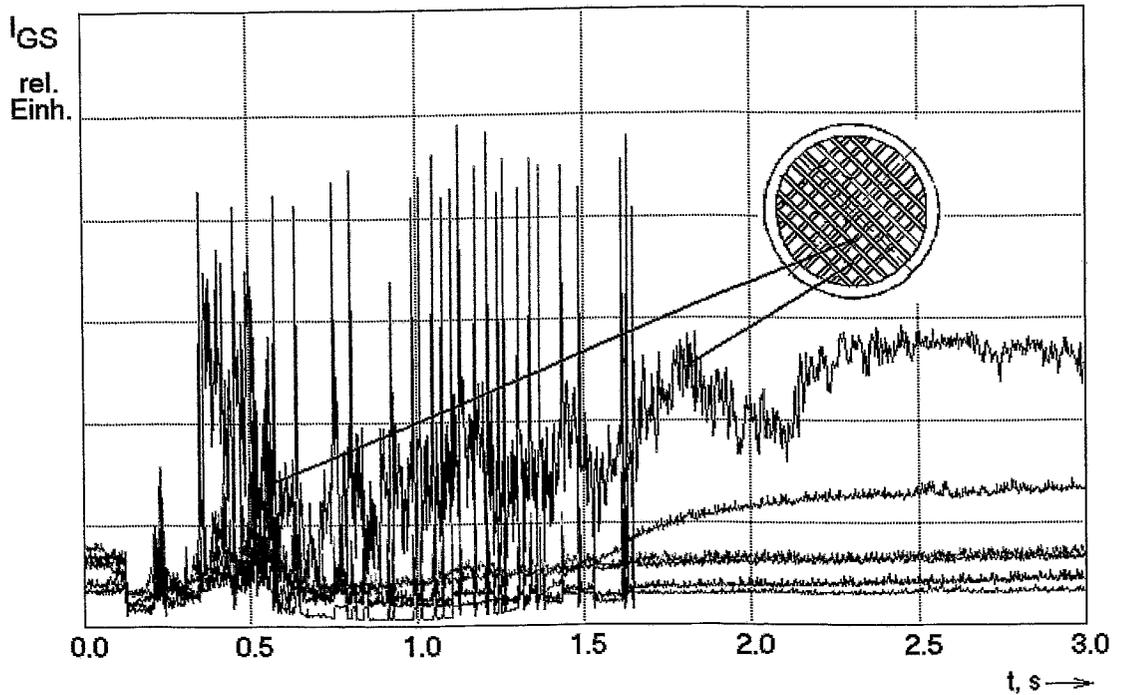


Bild 35 Wellen vor Einsetzen der Gerinneströmung im Messquerschnitt des Gittersensors, Versuch C14 ( $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 5 \text{ bar}$ )

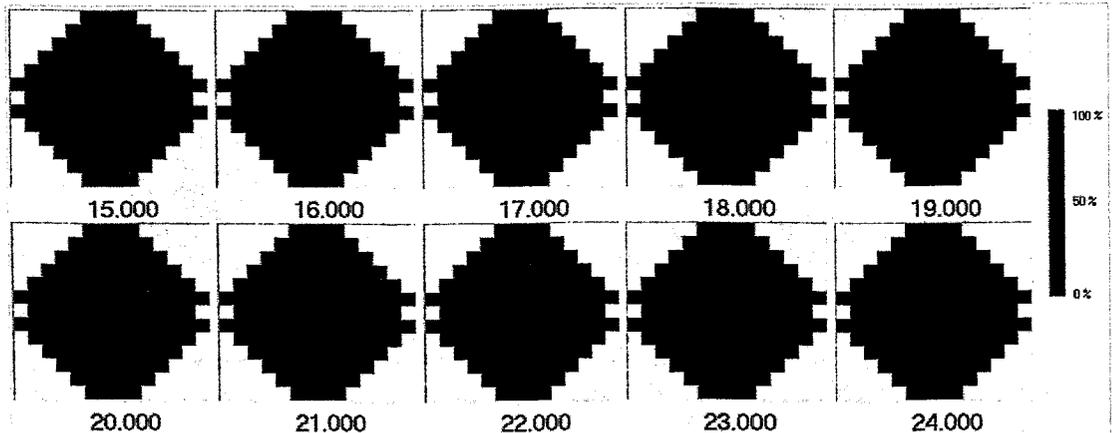


Bild 36 Sequenz von Dampfgehaltsverteilungen im Messquerschnitt des Sensors beim Durchgang des Kondensatspiegels in Versuch C12

#### 7.4 Übersicht über alle Versuche der Hauptserie (Serie 2)

Die mit den Thermoelementsonden ermittelten Durchgangszeiten des Kondensatspiegels sind in Bild 37 bis Bild 40 gegenübergestellt. Es sollte in der Tendenz zu erwarten sein, dass sich das Versuchsrohr bei kleinerem Gasvordruck schneller füllt. In einigen Fällen wurde jedoch beobachtet, dass der Kondensatspiegeldurchgang bei den Vakuumversuchen etwas später auftritt, als bei den Versuchen mit einem Luftvordruck von 1 bar. Über die Ursache hierfür können nur Vermutungen geäußert

werden. Es wäre einerseits möglich, dass bei zunehmenden Dampfgeschwindigkeiten, wie sie bei Verringerung des Luftvordrucks zu erwarten sind, der Flüssigkeitsspiegel im Versuchsrohr mehr und mehr von der Horizontalen abweicht und damit der Füllstandsdurchgang später eintritt, obwohl mehr Kondensat pro Zeiteinheit anfällt. Andererseits könnte auch eine Durchsatzbegrenzung in der Leitung zur Dampfung infolge des Auftretens von kritischen Ausströmbedingungen an einer weiter vorn in der Leitung liegenden Engstelle die Ursache sein.

Die Zeitintervalle, in denen nichtkondensierbares Gas an den Positionen der Thermoelementsonden beobachtet wurde, sind in Bild 41 bis Bild 44 zusammengefasst. Sie erstrecken sich vom Zeitpunkt des Abfalls der Temperatur unter den Sättigungswert bis zum Eintreffen der Kondensatfront. Bei den Versuchen mit einem Anfangsdruck des Dampfs von 10 bar erreicht der Kondensatspiegel die Sonde NTS\_1 nur noch im Versuch mit evakuiertem Rohr. Deshalb sind in Bild 41 nur die Sonden NTS\_2 bis 4 dargestellt. Bei den übrigen Versuchen tritt an der Sonde NTS\_1 meist kein Dampf mehr auf, weshalb ein Übergang Dampf - Luft nicht beobachtet werden kann. Deshalb wurde bei diesen Versuchen die Sonde NTS\_1 weggelassen.

Es zeigt sich eine klare Tendenz einer Erhöhung der Dauer des Luftkontakts der Sonden mit wachsendem Luftvordruck, da die räumliche Ausdehnung des Pfropfens aus nichtkondensierbarem Gas anwächst. Auch wächst die Zeitspanne von der jeweils vorderen Sonde zu den weiter hinten gelegenen an, weil der Kondensationsvorgang zunehmend langsamer verläuft und somit auch die Verlagerung des Gaspfropfens im Versuchsrohr an Geschwindigkeit verliert.

Von Bild 45 bis Bild 48 ist eine Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten der Dampffront zu Beginn des Einströmvorgangs gegeben. Sie wurde als Mittelwert zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sonden ermittelt. Hierfür wurde die Mitte der Flanke des raschen Temperaturanstiegs an Sonde NTS\_4 bestimmt und als Schwellwert verwendet. Der Zeitpunkt des Eintreffens von Dampf wurde anhand der Überschreitung dieses Schwellwerts ermittelt.

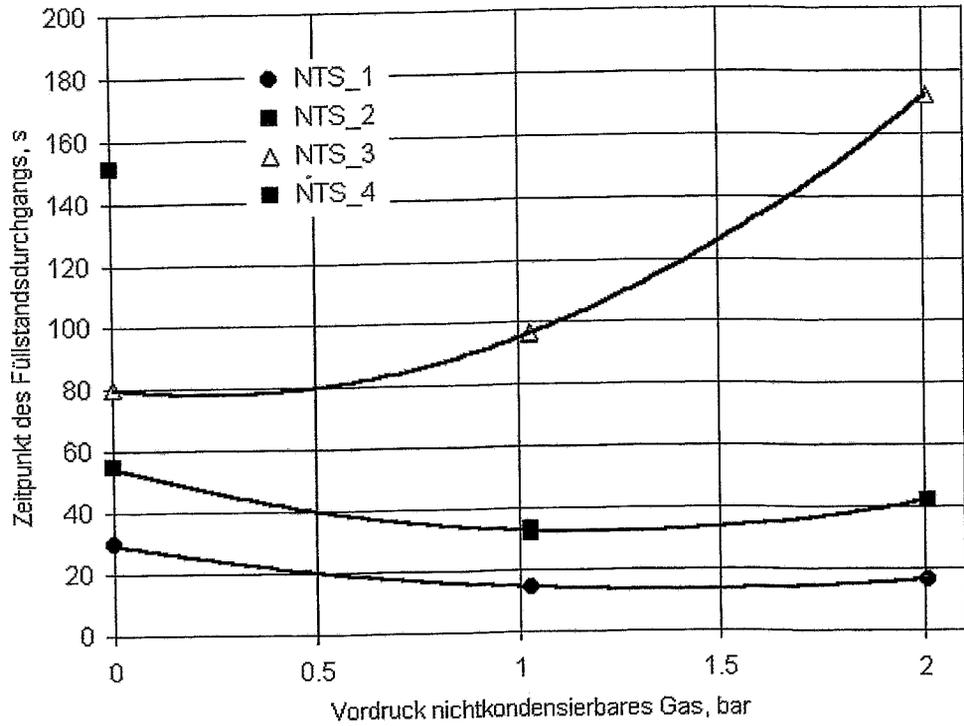


Bild 37 Zeitpunkt des Kondensatdurchgangs an den Thermoelementsonden in Abhängigkeit vom Vordruck der Luft im Versuchsrohr (Anfangsdruck 10 bar)

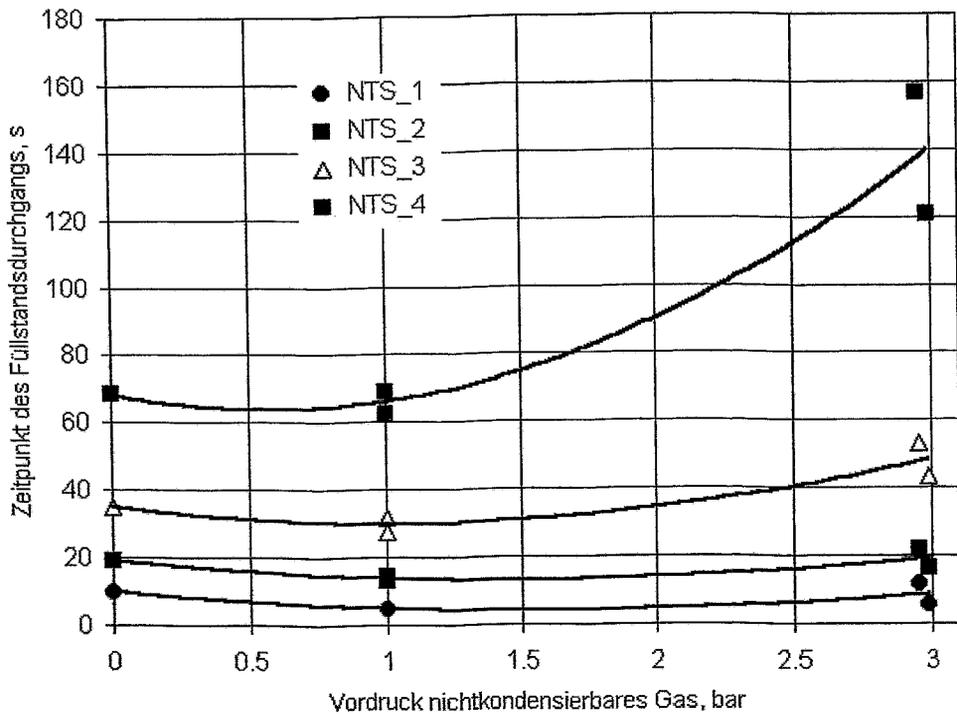


Bild 38 Zeitpunkt des Kondensatdurchgangs an den Thermoelementsonden in Abhängigkeit vom Vordruck der Luft im Versuchsrohr (Anfangsdruck 30 bar)

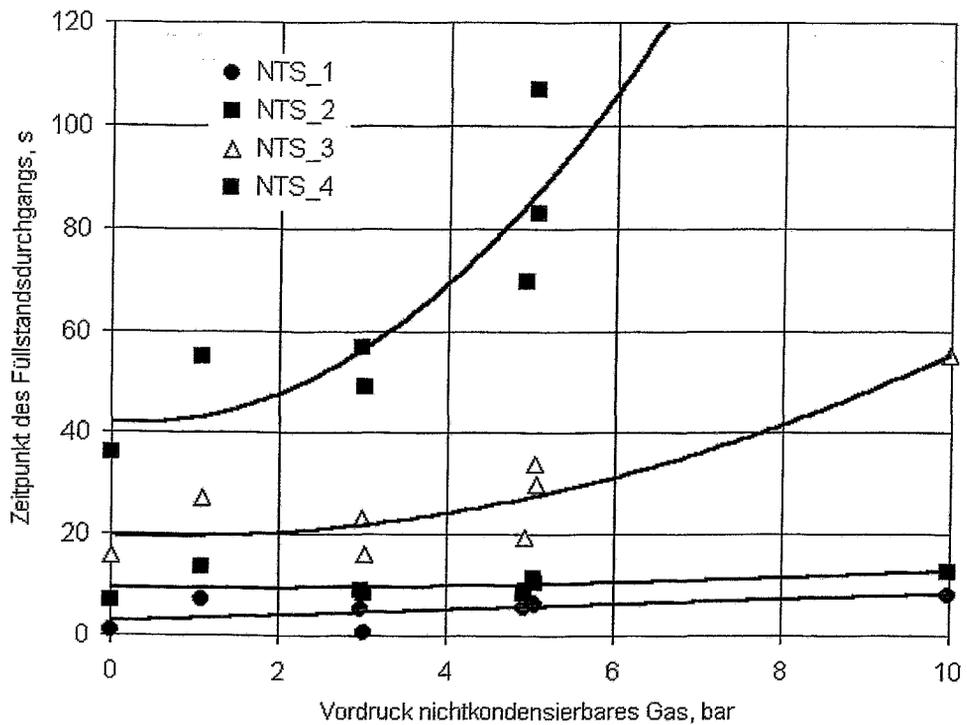


Bild 39 Zeitpunkt des Kondensatdurchgangs an den Thermoelementsonden in Abhängigkeit vom Vordruck der Luft im Versuchsrohr (Anfangsdruck 50 bar)

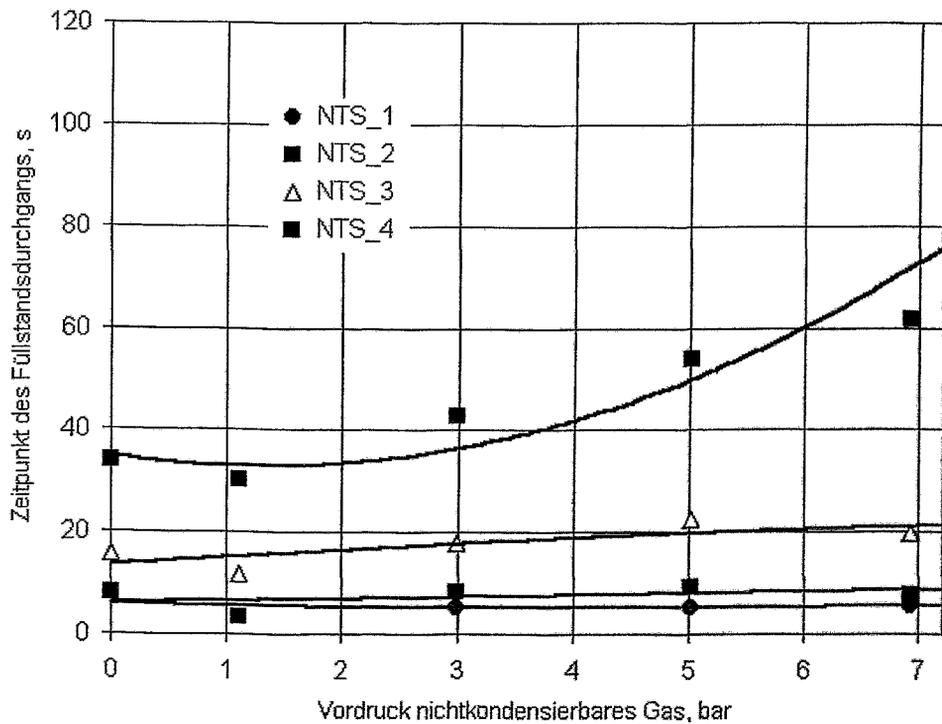


Bild 40 Zeitpunkt des Kondensatdurchgangs an den Thermoelementsonden in Abhängigkeit vom Vordruck der Luft im Versuchsrohr (Anfangsdruck 70 bar)

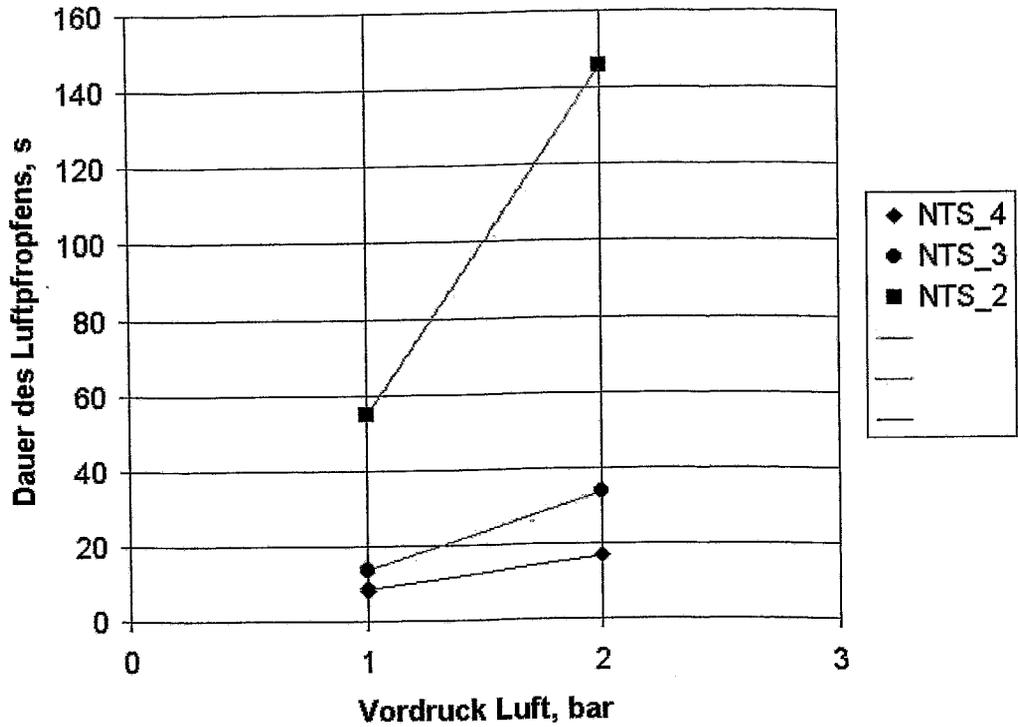


Bild 41 Dauer des Luftpfropfens an den Sonden NTS\_2 bis 4 bei den Versuchen bei 10 bar Anfangsdampfdruck (Serie 2, A)

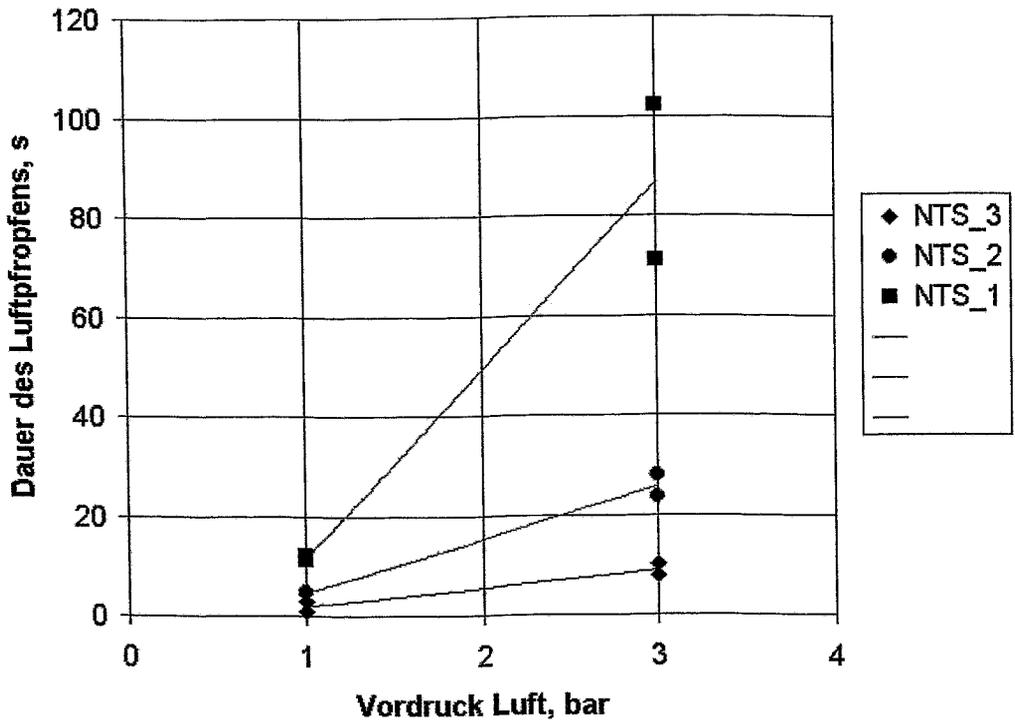


Bild 42 Dauer des Luftpfropfens an den Sonden NTS\_1 bis 3 bei den Versuchen bei 30 bar Anfangsdampfdruck (Serie 2, B)

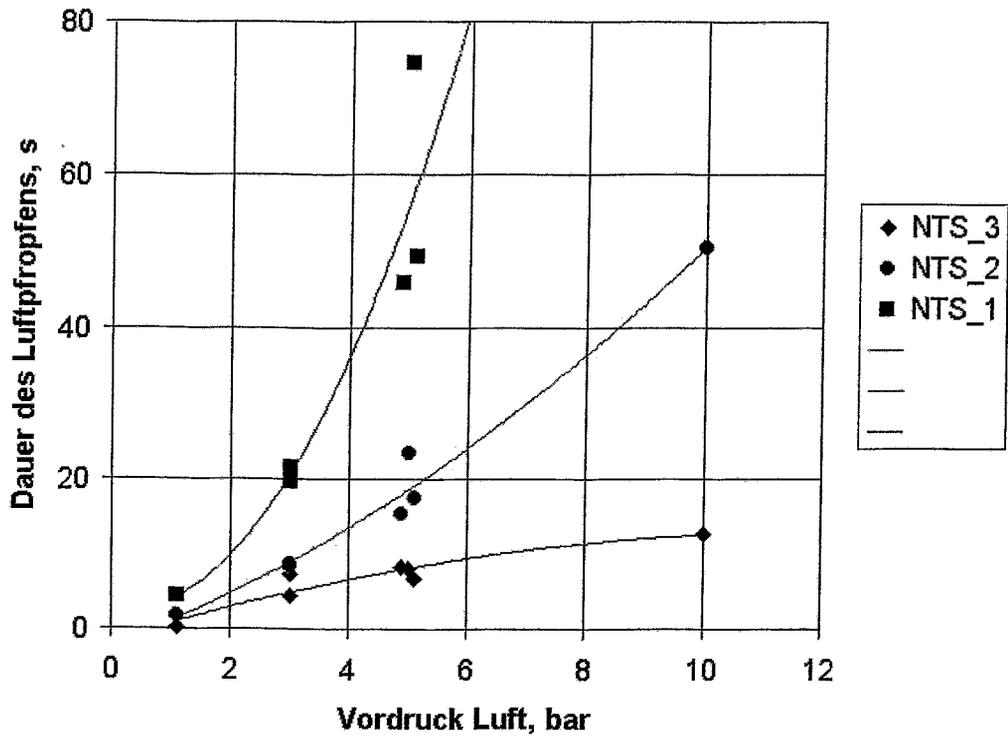


Bild 43 Dauer des Luftpfropfens an den Sonden NTS\_1 bis 3 bei den Versuchen bei 50 bar Anfangsdampfdruck (Serie 2, C)

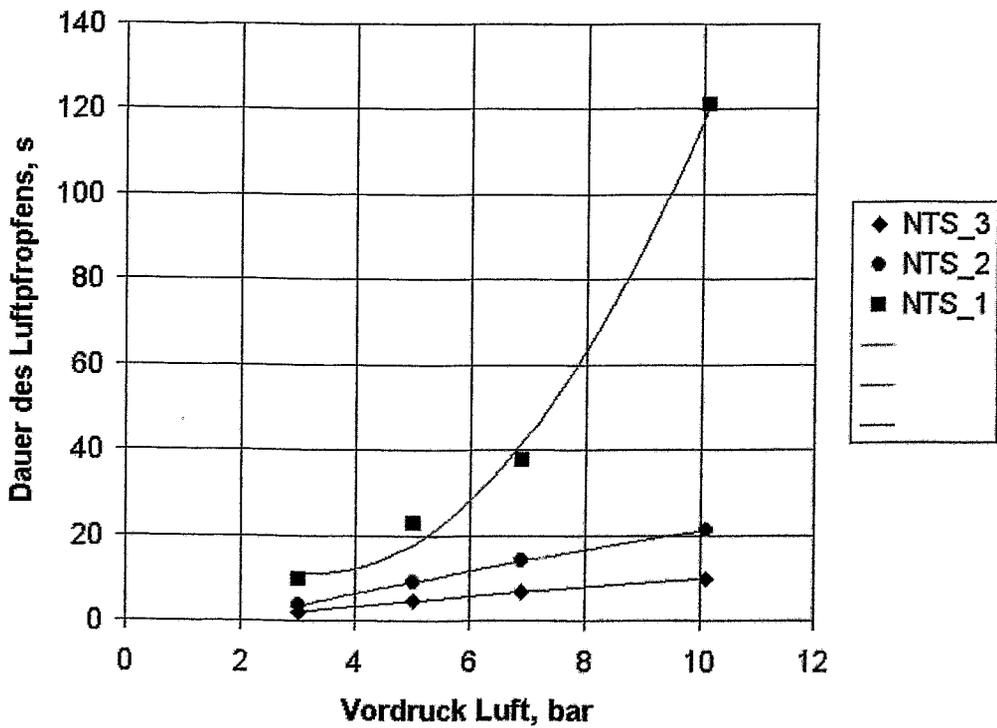


Bild 44 Dauer des Luftpfropfens an den Sonden NTS\_1 bis 3 bei den Versuchen bei 70 bar Anfangsdampfdruck (Serie 2, D)

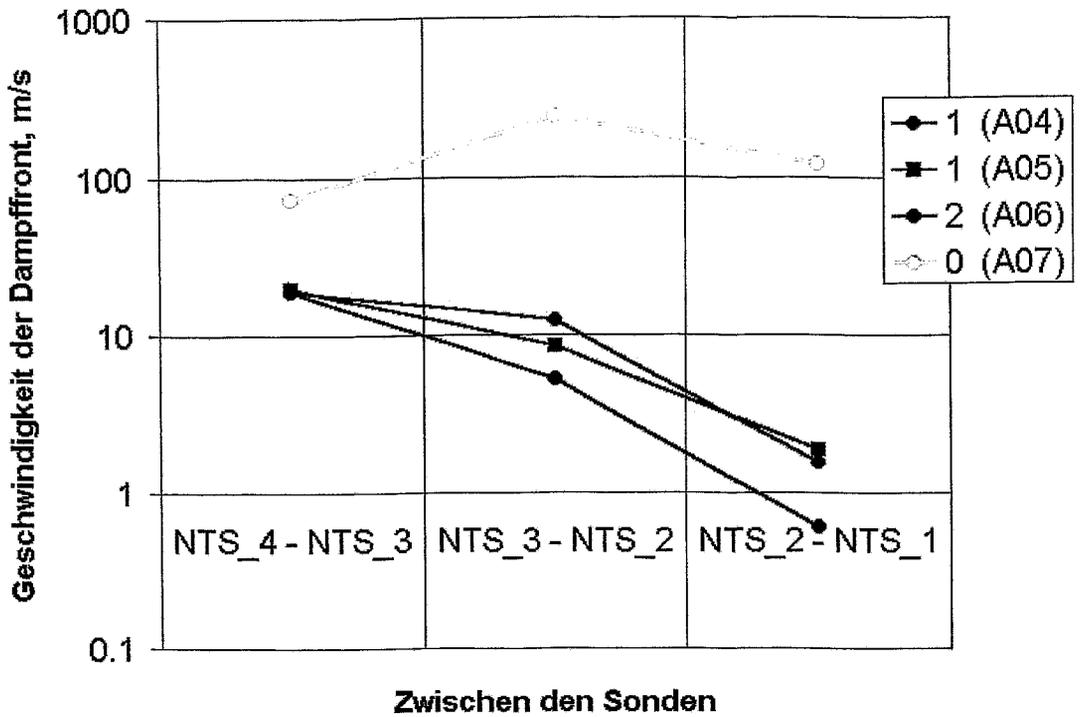


Bild 45 Mittlere Geschwindigkeit der Dampffront zwischen zwei Thermoelementsonden bei den Versuchen mit 10 bar Dampfdruck (Serie 2, A)

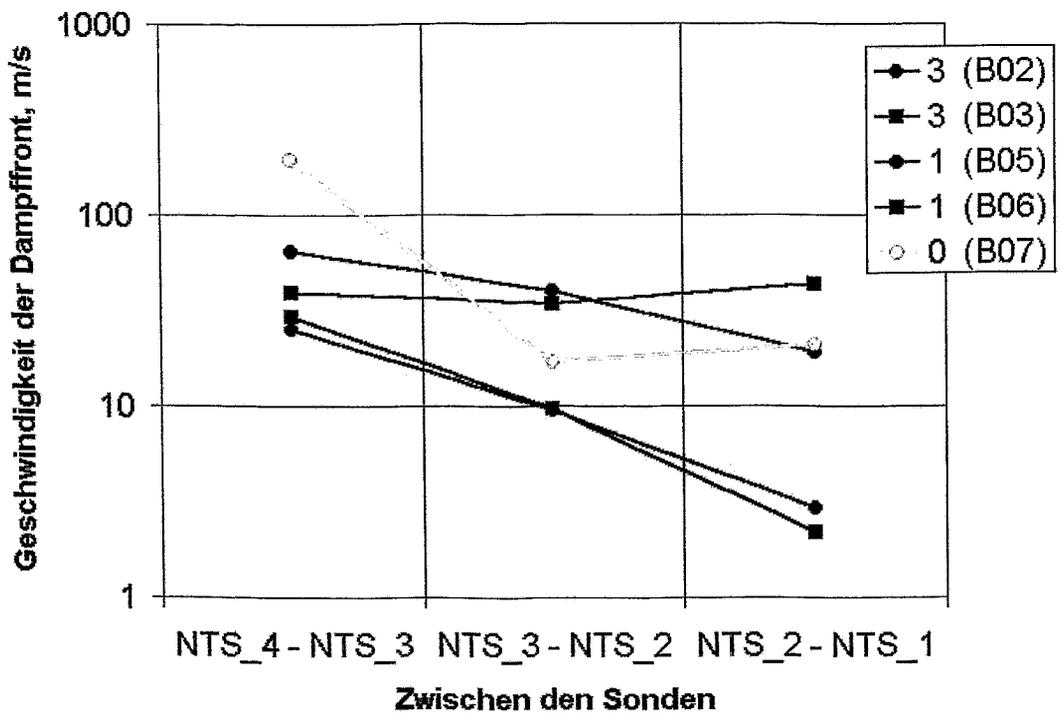


Bild 46 Mittlere Geschwindigkeit der Dampffront zwischen zwei Thermoelementsonden bei den Versuchen mit 30 bar Dampfdruck (Serie 2, B)

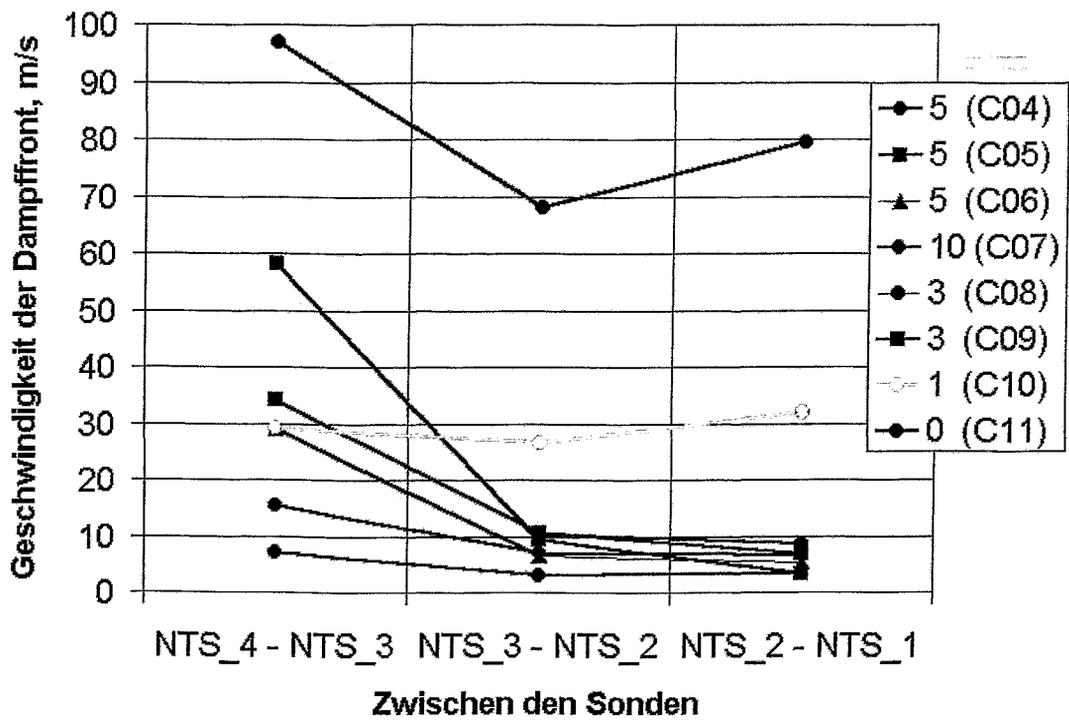


Bild 47 Mittlere Geschwindigkeit der Dampffront zwischen zwei Thermoelementsonden bei den Versuchen mit 50 bar Dampfdruck (Serie 2, C)

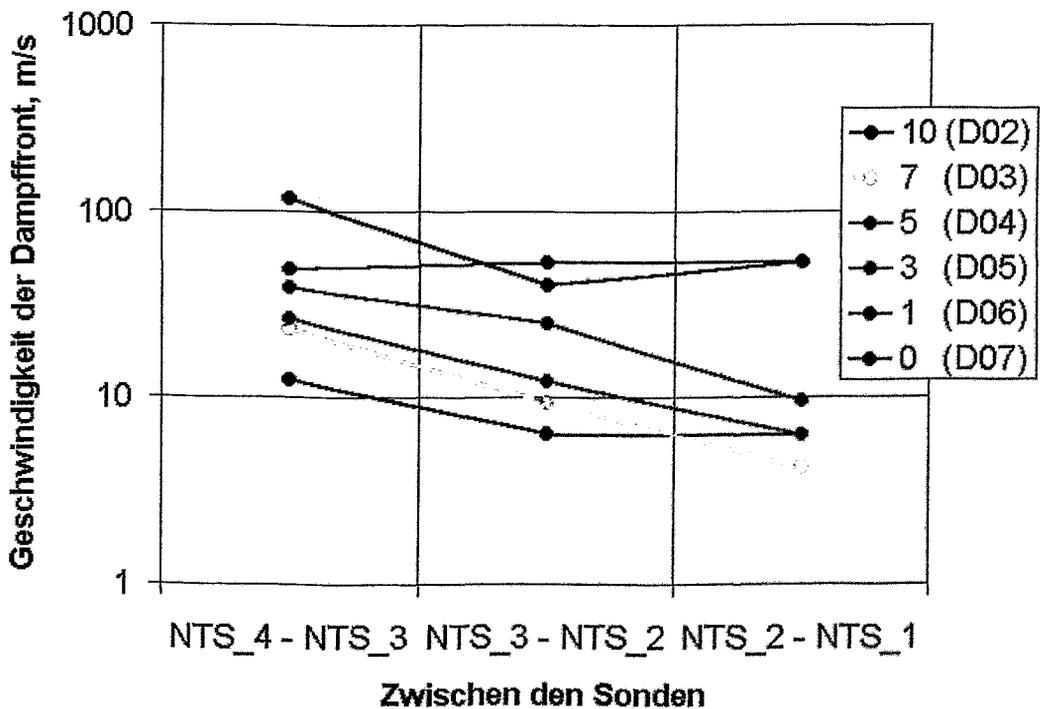


Bild 48 Mittlere Geschwindigkeit der Dampffront zwischen zwei Thermoelementsonden bei den Versuchen mit 70 bar Dampfdruck (Serie 2, D)

In der Tendenz nimmt die Geschwindigkeit mit zunehmendem Gasvordruck ab. Weiterhin tritt bei den Versuchen mit höherem Gasvordruck zunehmend eine Tendenz zur Abnahme der Geschwindigkeit von den vorderen (NTS\_4 - NTS\_3) zu den hinteren Sonden (NTS\_2 - NTS\_1) auf. Die Dampffront wird durch den Gegendruck abgebremst, der sich bei der Kompression des nichtkondensierbaren Gases aufbaut.

In der Anlage wird ein Überblick über die gesamte Versuchsserie gegeben, wobei die Signale der Nadelsonden, der Thermoelementsonden und der reinen Thermoelemente im Versuchsrohr sowie die Druckverläufe gemeinsam dargestellt wurden.

## 7.5 Sondenausfälle

Die Versuche wurden in einer Reihenfolge durchgeführt, bei der mit den Experimenten begonnen wurde, die für die Sonden weniger starke Belastungen erwarten ließen, d.h. es wurde mit Versuchen bei niedrigem Dampf- und höherem Luftvordruck begonnen. Bei Versuch D06 mit 70 bar Dampf- und 1 bar kam es schließlich zum Bruch der Sonde NTS\_4, die den höchsten Belastungen ausgesetzt war. Dabei war das Temperatursignal noch weiterhin verfügbar, lediglich die Phasendetektion war ausgefallen und somit auch bei dem letzten Versuch D07 der Hauptserie nicht verfügbar.

Auch während der Serie 1 kam es zu Sondenausfällen. Die gebrochenen Sonden wurden jedoch vor Beginn der Hauptserie durch neue ersetzt. Fotos von zerstörter Sonde sind in Bild 49 gezeigt. Der Gittersensor hat die Versuche ohne Beschädigung überstanden.

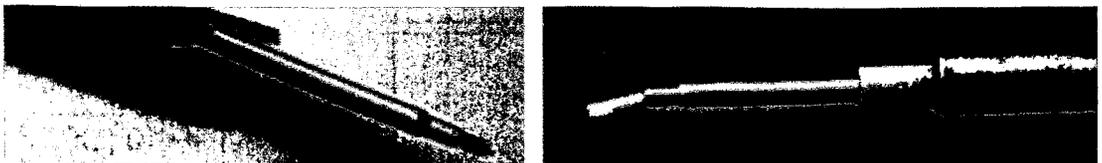


Bild 49 Abbildungen von Thermoelement-Sonden, die bei den Kondensationsversuchen zerstört wurden

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Kondensationsversuche liefern Datenmaterial für die Validierung von thermohydraulischen Systemcodes bezüglich der Modelle für die Kondensation in horizontalen bzw. schwach geneigten Wärmeübertragerrohren und für die Ausbreitung und den Einfluss nichtkondensierbarer Gase unter den Bedingungen hoher treibender Temperaturdifferenzen. Durch eine neuartige Instrumentierung konnte die Verlagerung des aus nichtkondensierbarem Gas bestehenden Pfropfens während der transienten Kondensationsvorgänge beobachtet werden. Dabei traten folgende Effekte auf:

- Nach Beginn der Dampfeinspeisung in das Kondensationsrohr bildet sich Kondensat, das im Rohr nach unten, d.h. der Neigung des Rohrs entsprechend zum hinteren Ende fließt.

- Durch den eindringenden Dampf wird das Gas komprimiert. Es heizt sich dabei durch polytrope Kompression auf.
- Das Gas wird durch das herablaufende Kondensat nach vorn, d.h. in Richtung Dampfeintrittsstutzen verlagert.
- Die Behinderung des Kondensationsprozesses durch das nichtkondensierbare Gas führt zur Abnahme der Prozessgeschwindigkeit.
- Transiente Zweiphasenerscheinungen, wie Schwälle oder Dampfblasen, wurden nicht beobachtet. Bis auf wenige rasche Phasenwechsel zu Beginn der Einspeisung verläuft das Auffüllen des Rohrs mit Kondensat ruhig.
- Das Kondensat hat eine höhere Temperatur als das ihm vorgelagerte nichtkondensierbare Gas, d.h. bei Kondensatspiegeldurchgang kommt es zu einem Temperaturanstieg. Eine Fehlinterpretation dieses Effekts lässt sich nur durch die synchrone Temperatur- und Leitfähigkeitsmessung mit den Thermoelementsonden vermeiden.

Durch die nur schwache Neigung des Versuchsrohrs können jedoch nur ungenaue Aussagen zum transienten Kondensatanfall gemacht werden. Der Zeitpunkt des Kondensatspiegeldurchgangs wird zwar sehr genau erfasst, es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Lage des Spiegels nicht immer horizontal bleibt. Wünschenswert ist eine Instrumentierung mit mehreren, verschieden hoch positionierten Thermoelementsonden je Messquerschnitt. Auch ist eine zeitlich höher auflösende Druckmesstechnik erforderlich, um einen genauen Vergleich der Temperaturen mit dem momentanen Sättigungswert insbesondere in der schnellen Anfangsphase des Prozesses zu ermöglichen. Weiterhin sollte eine schneller öffnende Einspeisearmatur zum Einsatz kommen. Es wird daher empfohlen, weitere Versuche einzuplanen.

## 9 Referenzen

- [1] Li, W.; Hicken, Enno F.; David, Paul H.; Prasser, H.-M.; Baldauf, D.; Zschau, J.: Messung der Kondensatfilmdicken in einem dampfdurchströmten horizontalen Rohr, *Jahrestagung Kerntechnik 2001, Dresden, 15./17. Mai 2001*
- [2] Chochlov, V. N.; Ducev, A.; Ivanov, V. V.; Kontelev, V. V.; Melnikov, V. I.; Stoppel, L. K.; Prasser, H.-M.; Zippe, W.; Zschau, J.; Zboray, R.: Local and integral ultrasonic gauges for two-phase flow instrumentation in nuclear reactor and safety technology, *Wissenschaftlich-Technische Berichte / Forschungszentrum Rossendorf, FZR-303 November 2000.*
- [3] H.-M. Prasser, A. Böttger, J. Zschau: Entwicklung von Zweiphasenmesstechnik für vergleichende Untersuchungen zur Beschreibung von transienten Strömungen in Rohrleitungen, *Abschlußbericht FZR, FZR-233 zum BMBF-Vorhaben 11ZF9504/1, August 1998.*
- [4] Dudlik, A.; Prasser, H.-M.; Schlüter, S.: Visualization of cavitating liquid flow behind fast acting valve, *ECCE 2 - Second European Congress of Chemical Engineering - Montpellier 05.-07.10.1999, paper CDROM 11270003.pdf.*
- [5] H.-M. Prasser, A. Böttger, J. Zschau (1998). A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows, *Flow Measurement and Instrumentation* **9**, pp. 111-119.

## A1 Anlage, Zusammenstellung der Experimente der Hauptserie

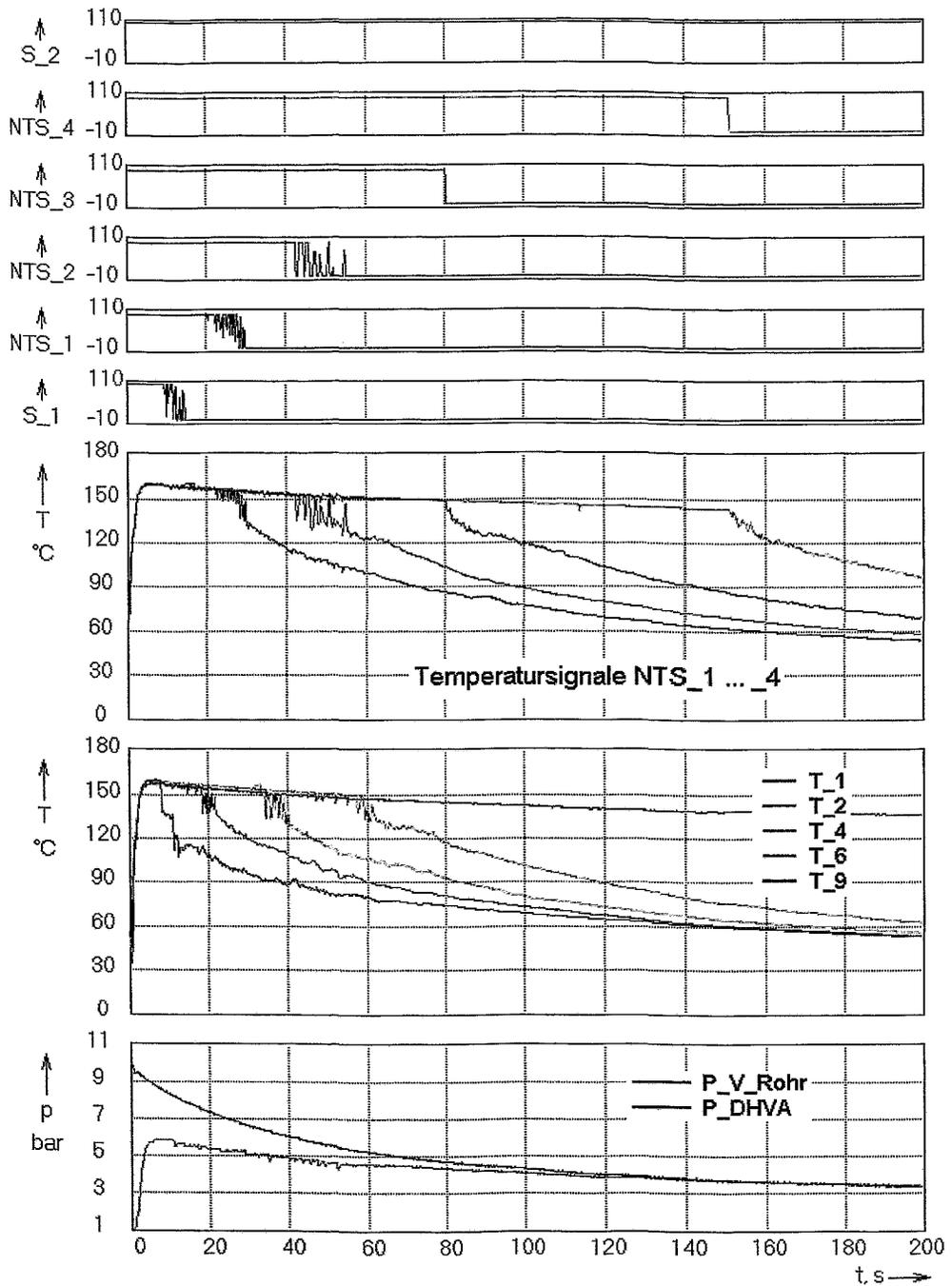


Bild A1 Versuch A7,  $p_{0, \text{Dampf}} = 10 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 0 \text{ bar}$

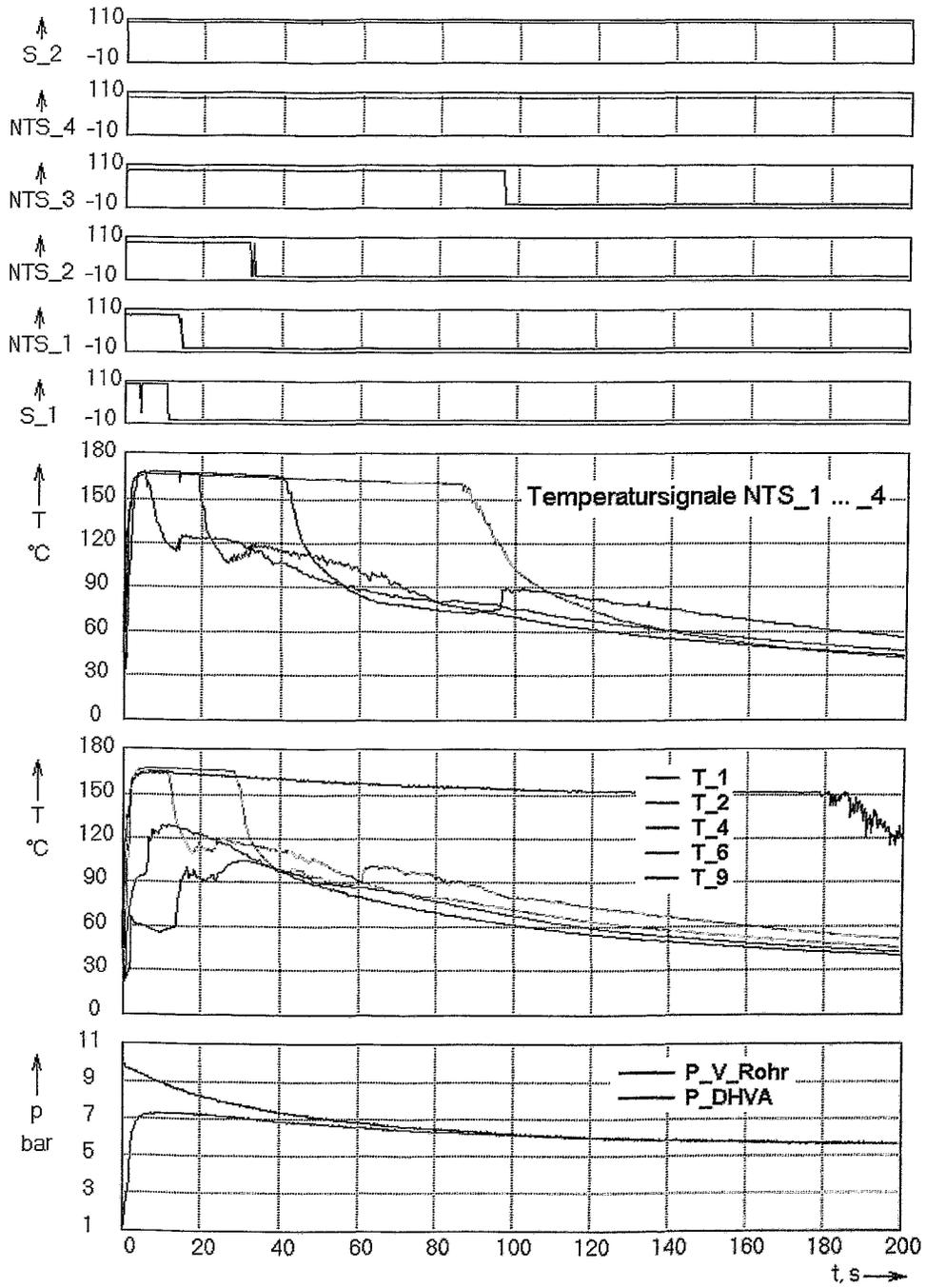


Bild A2 Versuch A4,  $p_{0, \text{Dampf}} = 10 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 1 \text{ bar}$

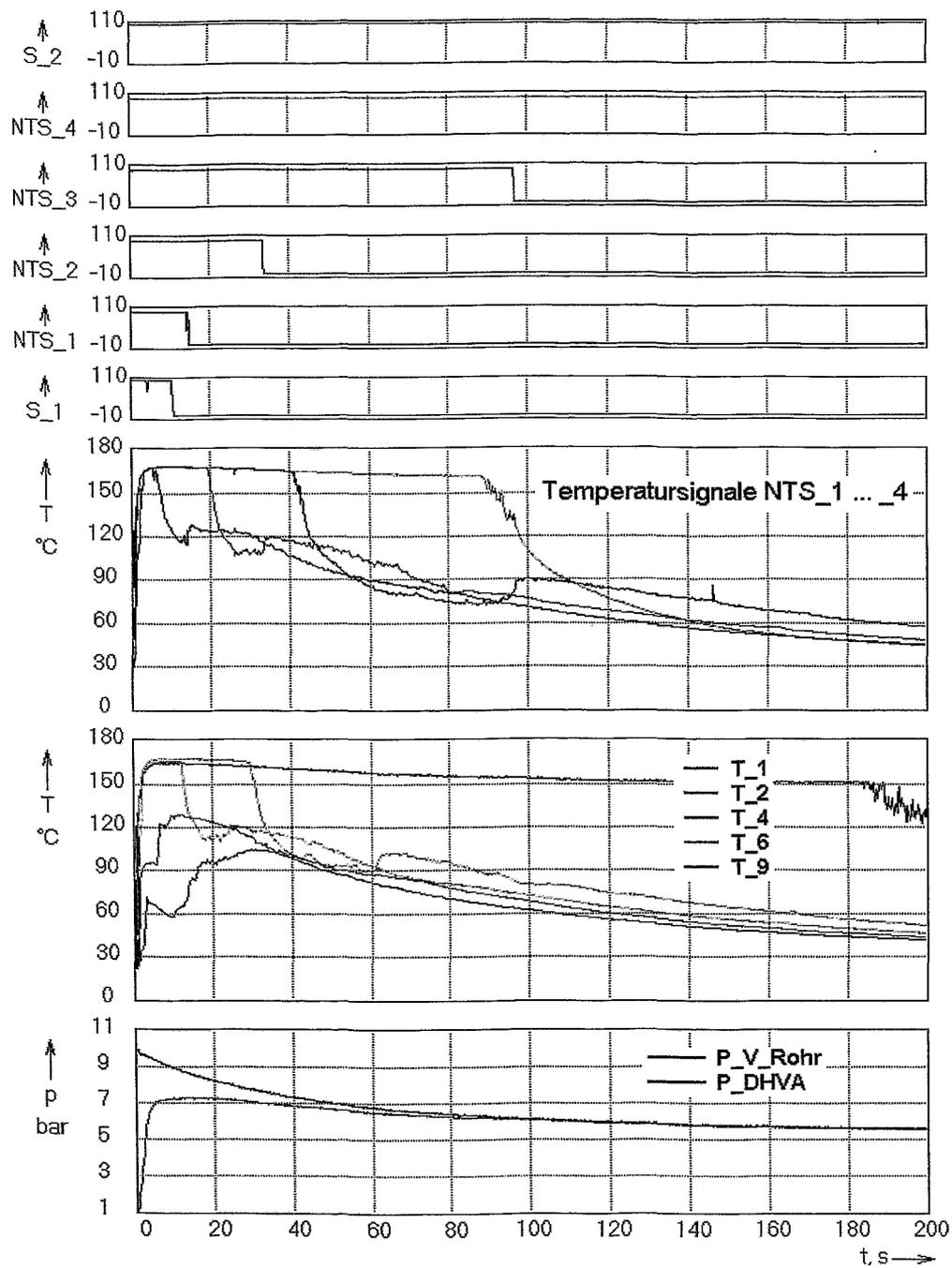


Bild A3 Versuch A5,  $p_{0, \text{Dampf}} = 10 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 1 \text{ bar}$

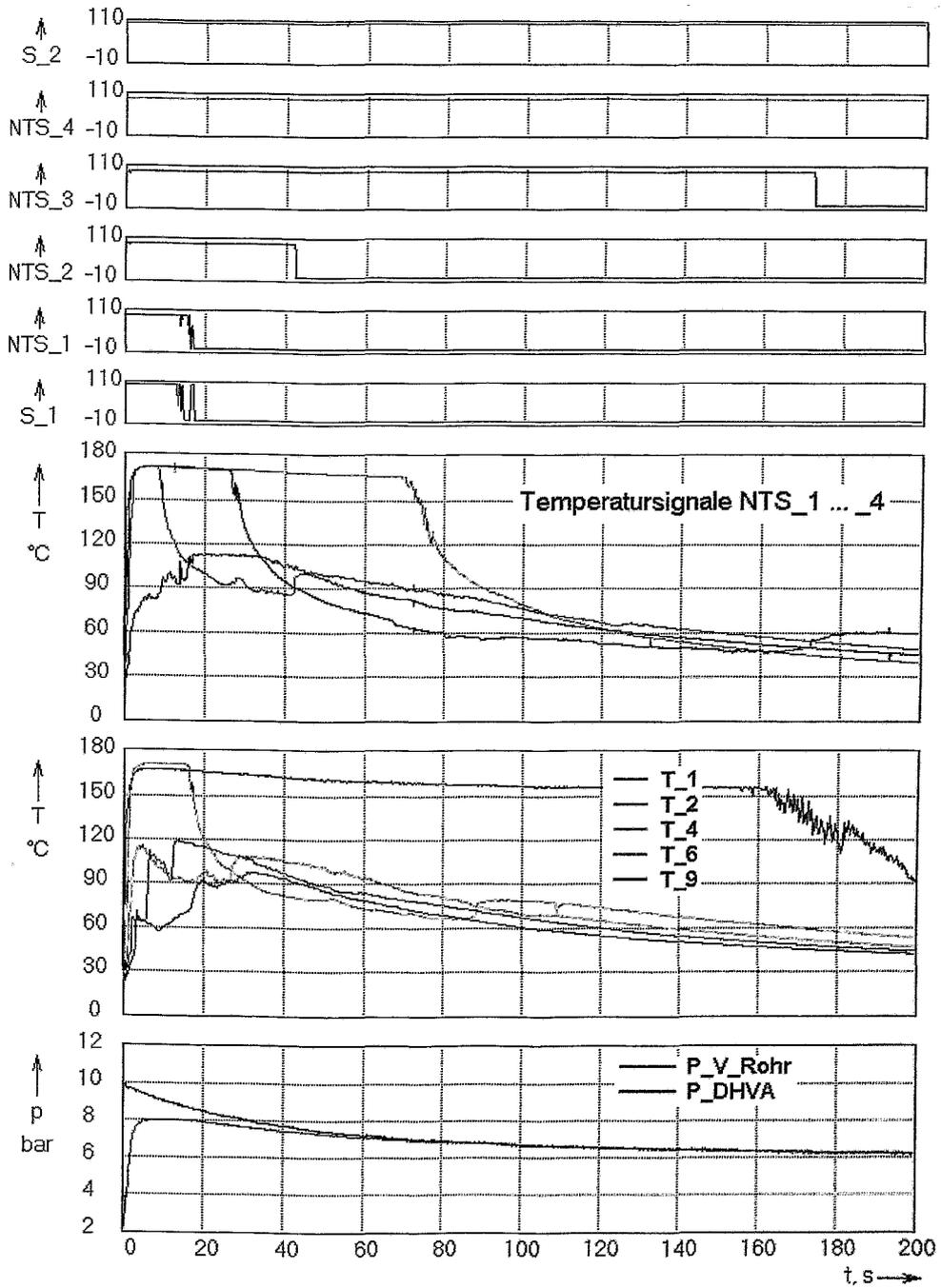


Bild A4 Versuch A6,  $p_{0, \text{Dampf}} = 10 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 2 \text{ bar}$

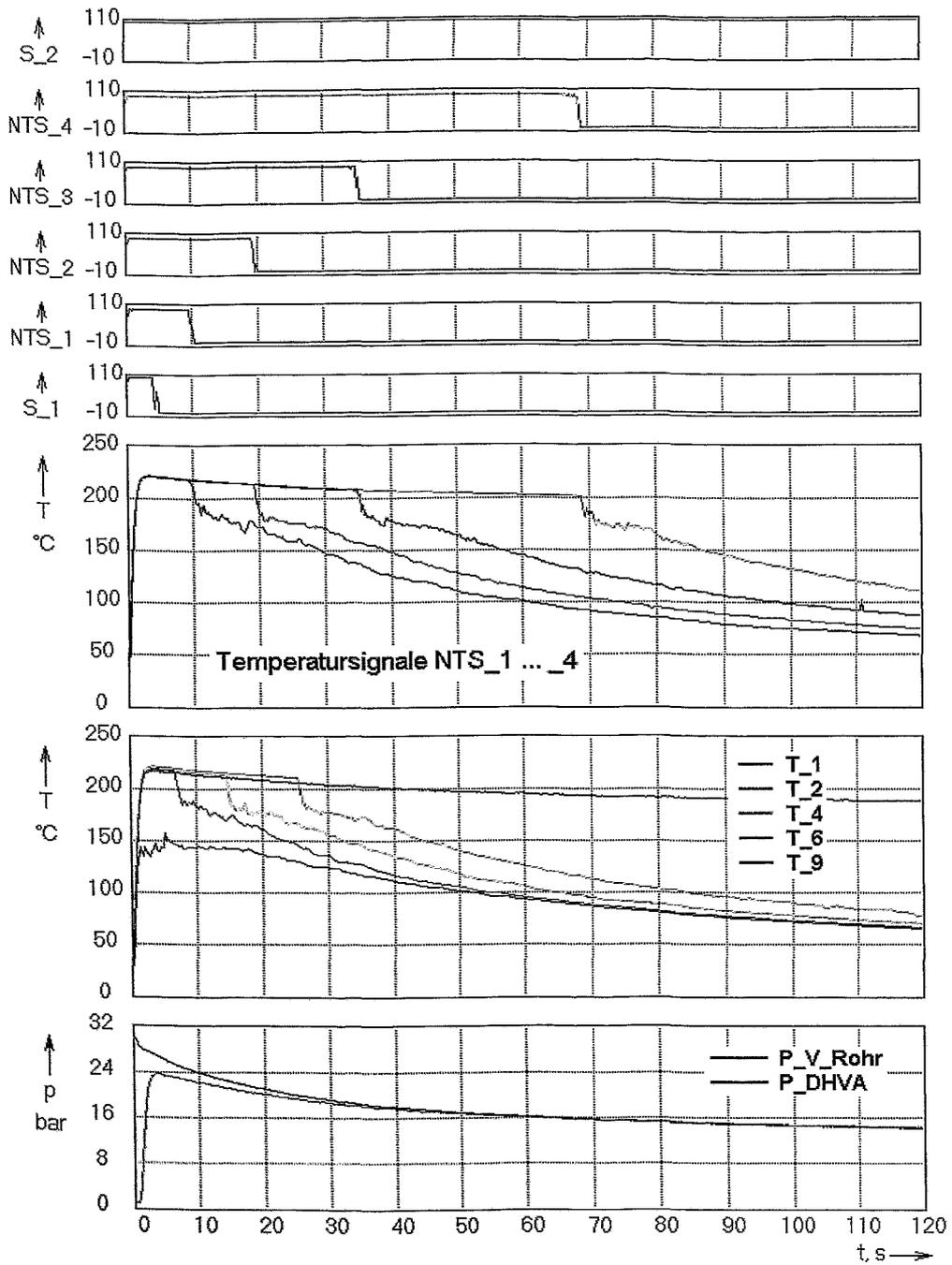


Bild A5 Versuch B7,  $p_{0, \text{Dampf}} = 30 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 0 \text{ bar}$

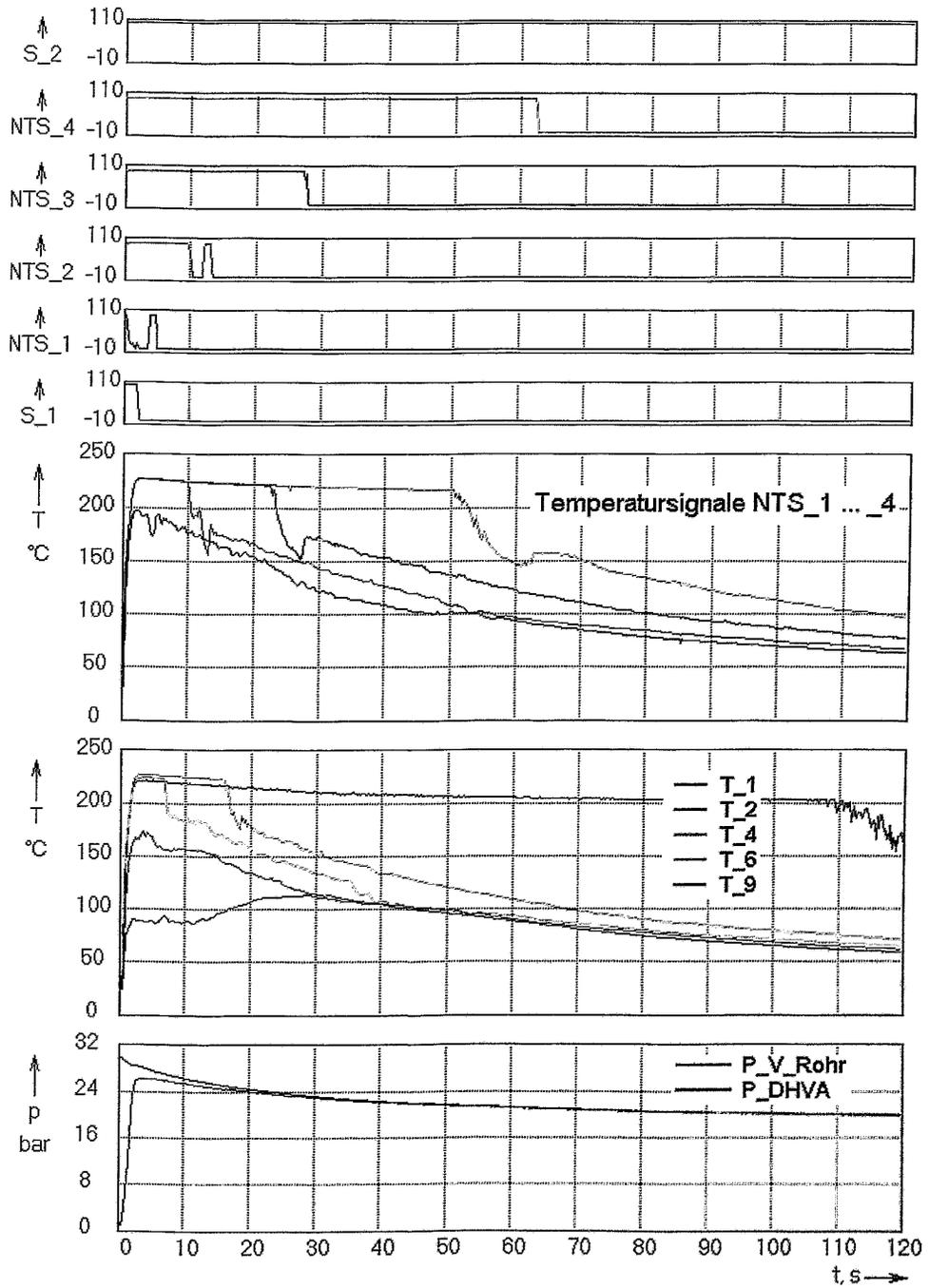


Bild A6 Versuch B5,  $p_{0, \text{Dampf}} = 30 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 1 \text{ bar}$

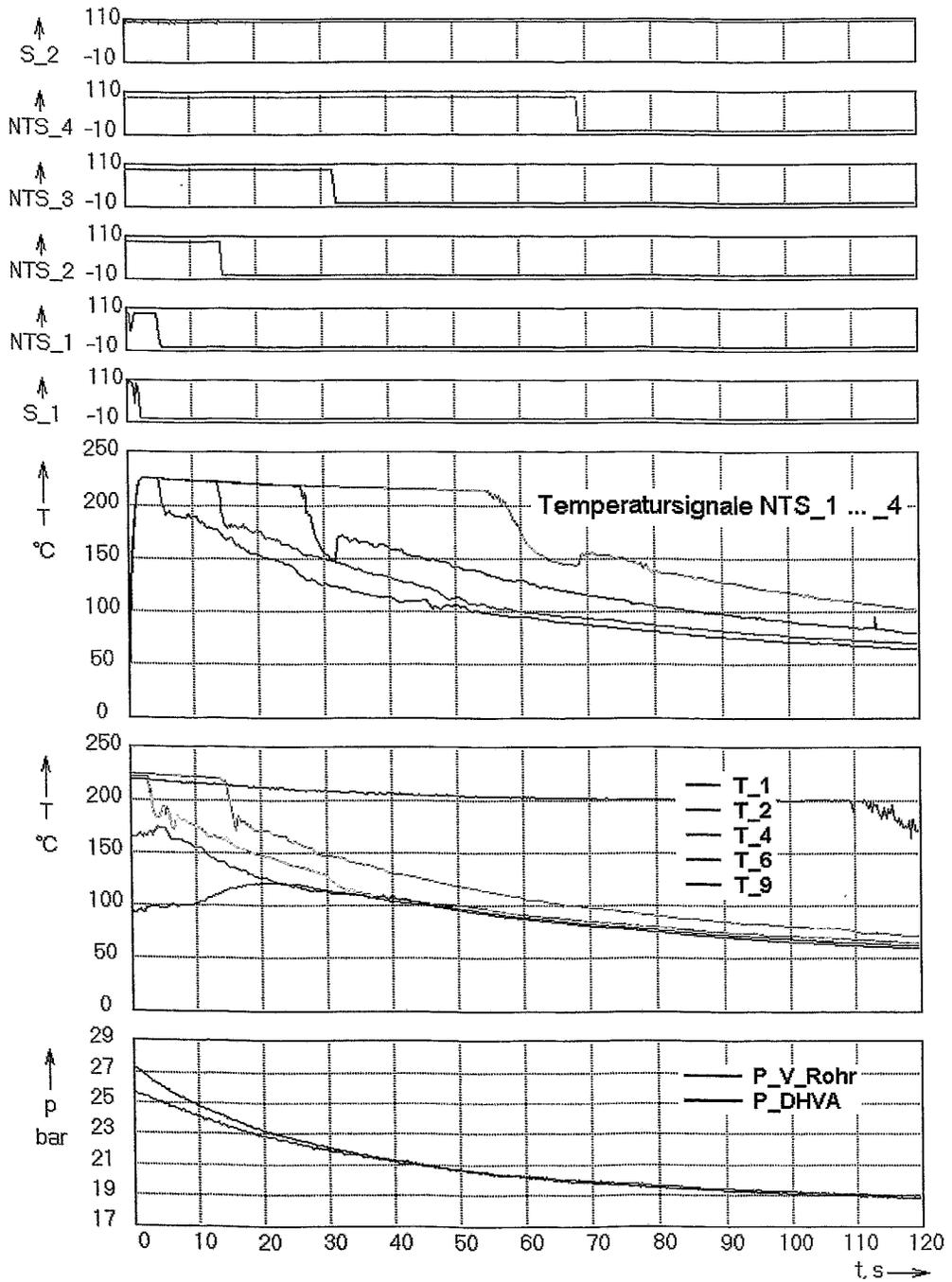


Bild A7 Versuch B6,  $p_{0, \text{Dampf}} = 30 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 1 \text{ bar}$

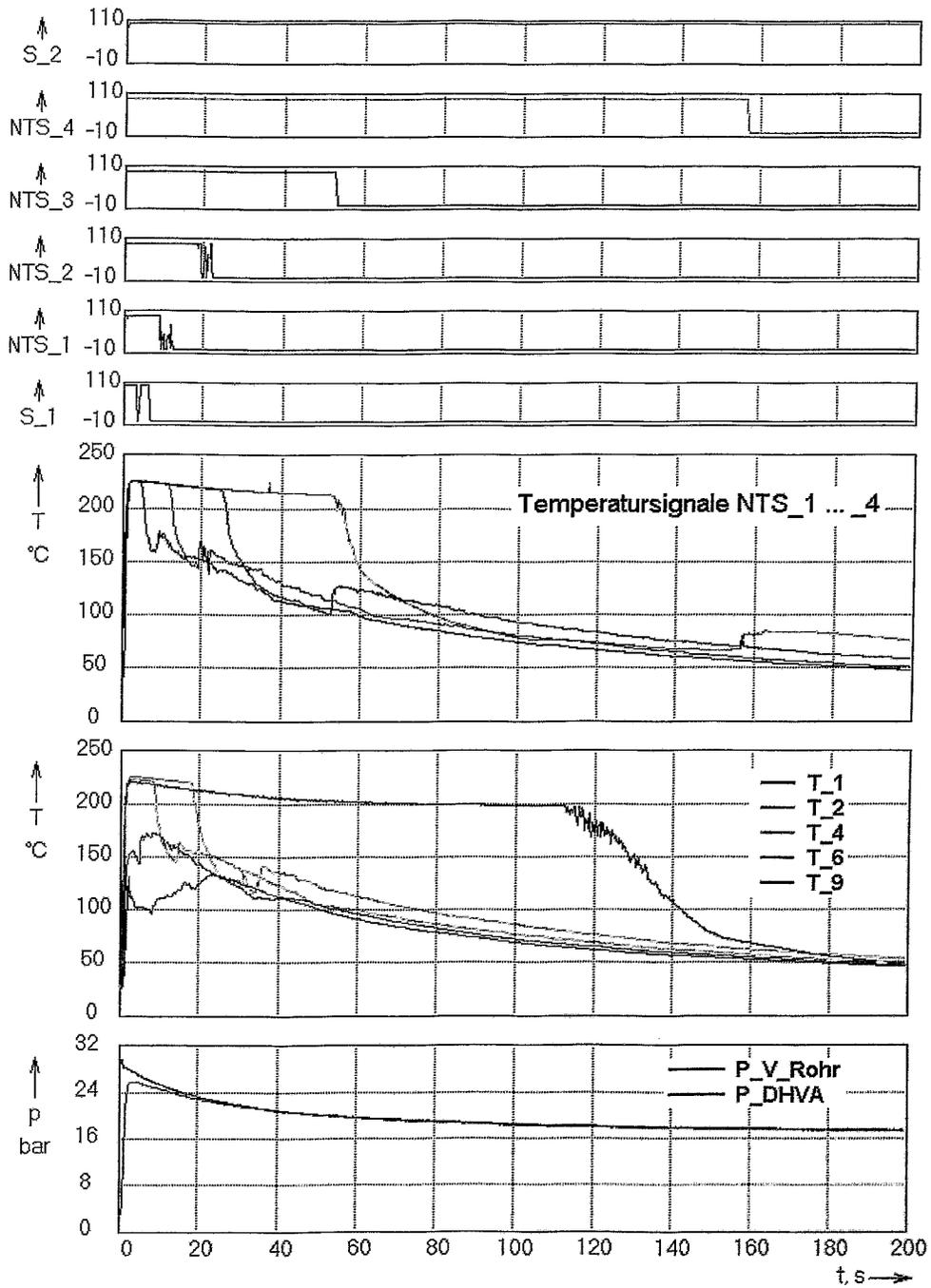


Bild A8 Versuch B2,  $p_{0, \text{Dampf}} = 30 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 3 \text{ bar}$

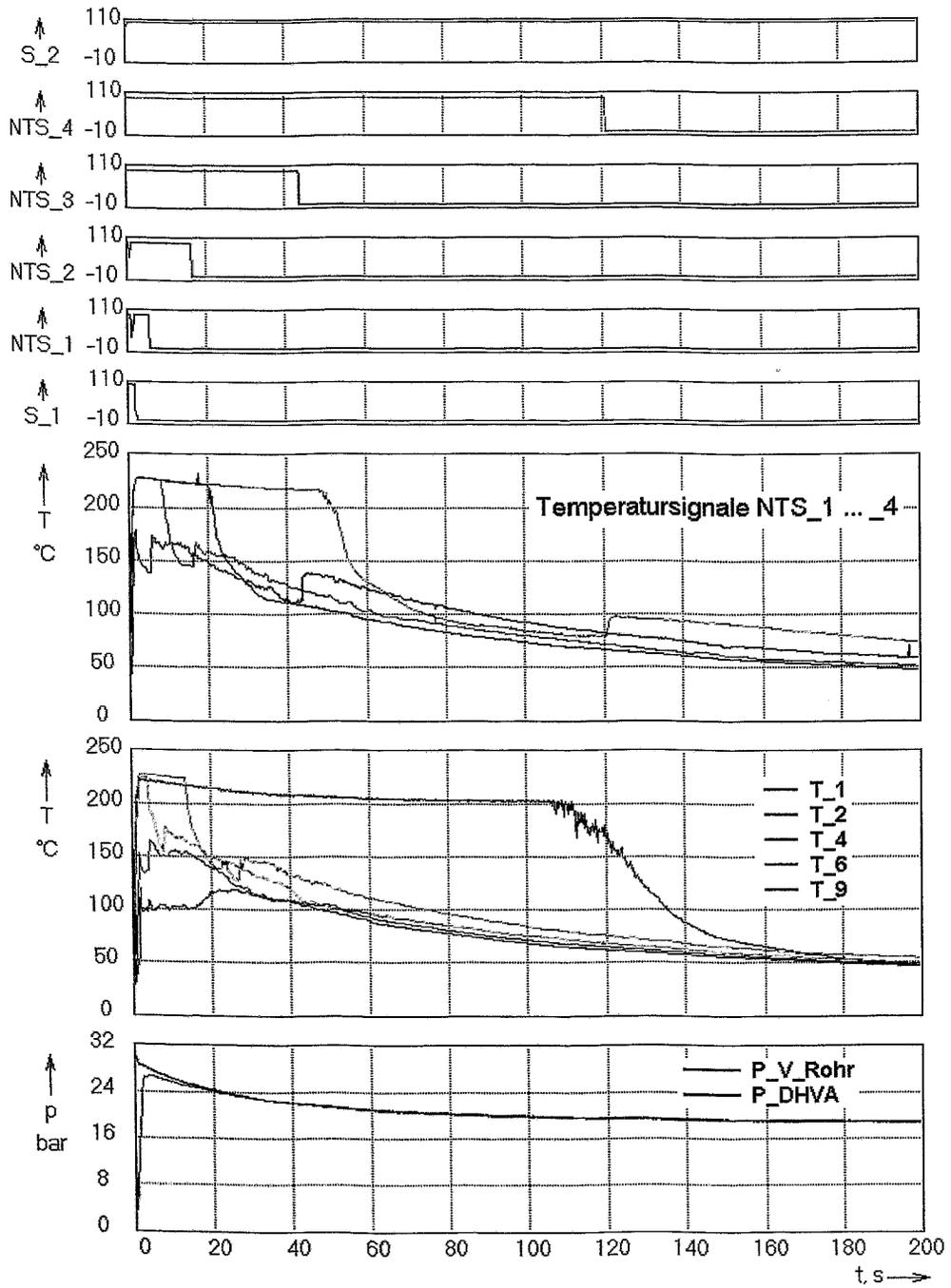


Bild A9 Versuch B3,  $p_{0, \text{Dampf}} = 30 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 3 \text{ bar}$

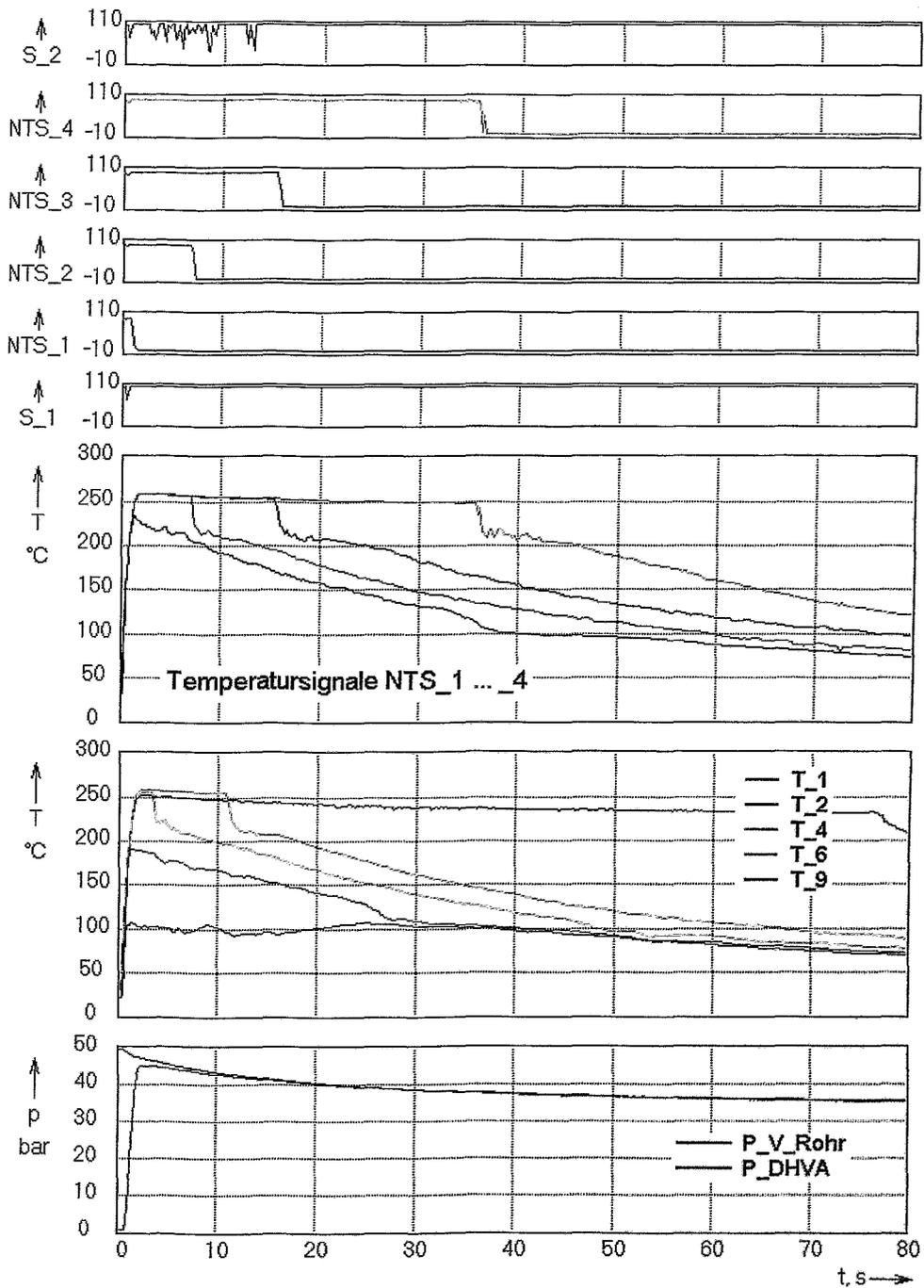


Bild A10 Versuch C11,  $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 0 \text{ bar}$

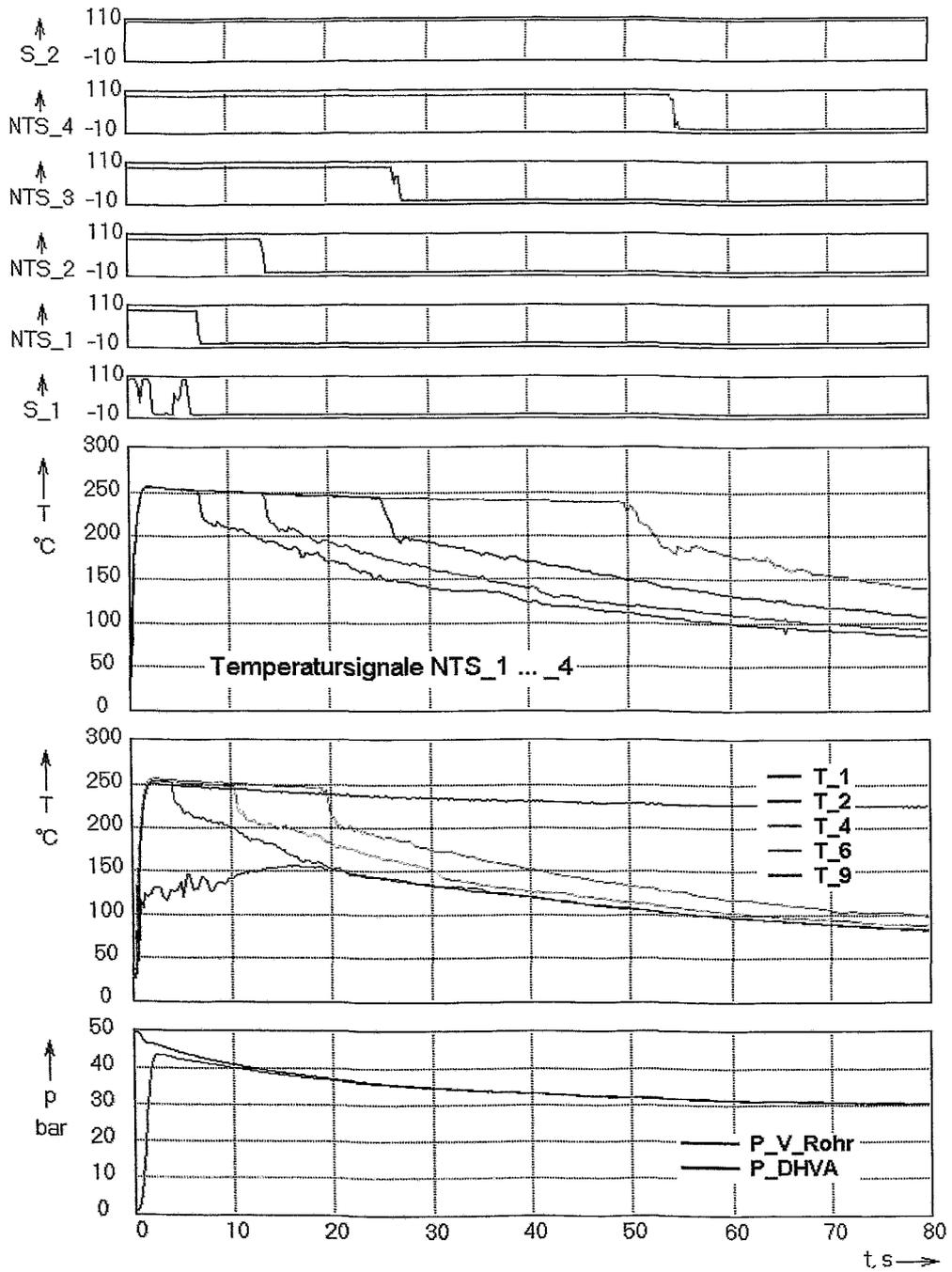


Bild A11 Versuch C10,  $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 1 \text{ bar}$

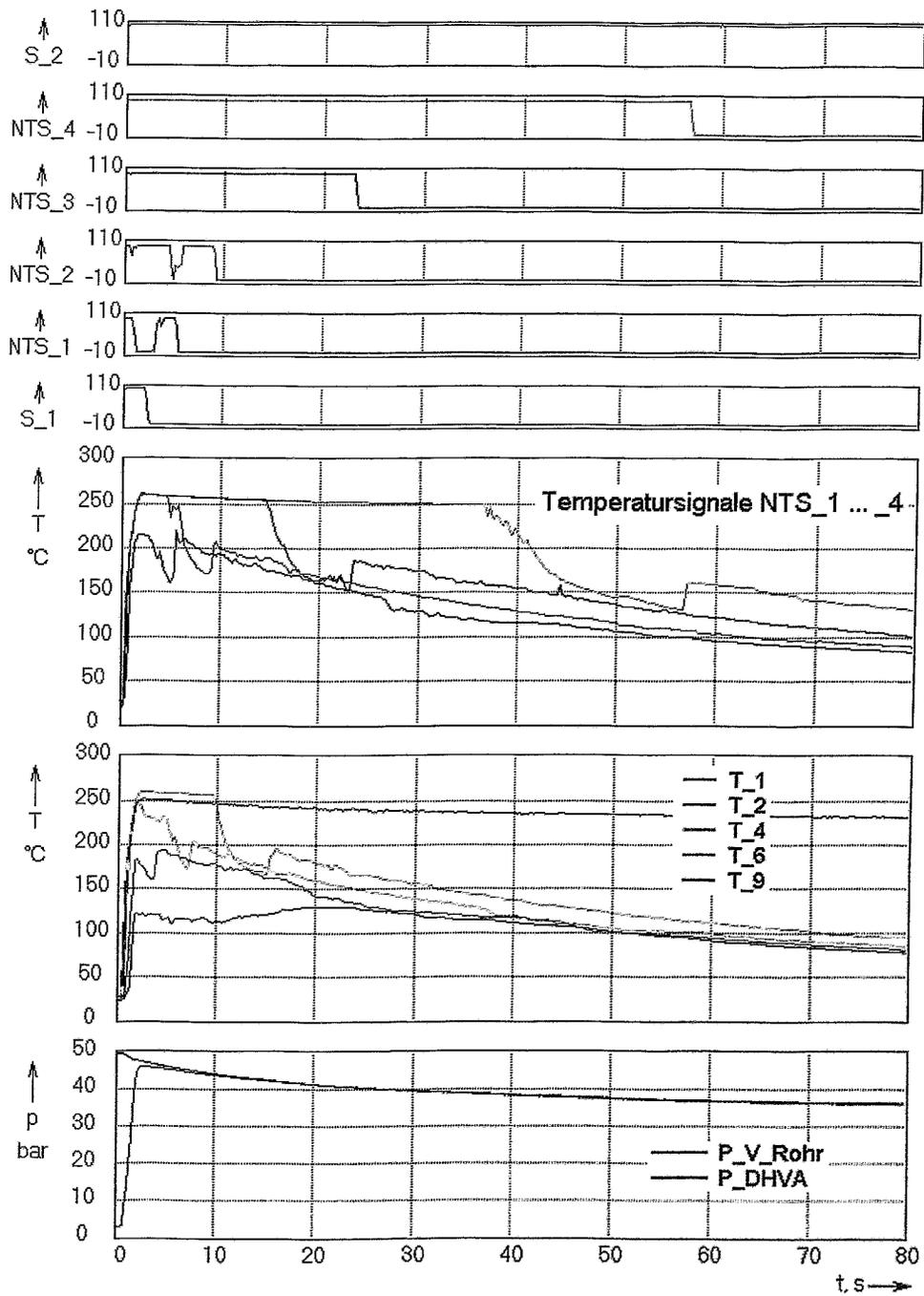


Bild A12 Versuch C09,  $p_0, \text{Dampf} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_0, \text{Luft} = 3 \text{ bar}$

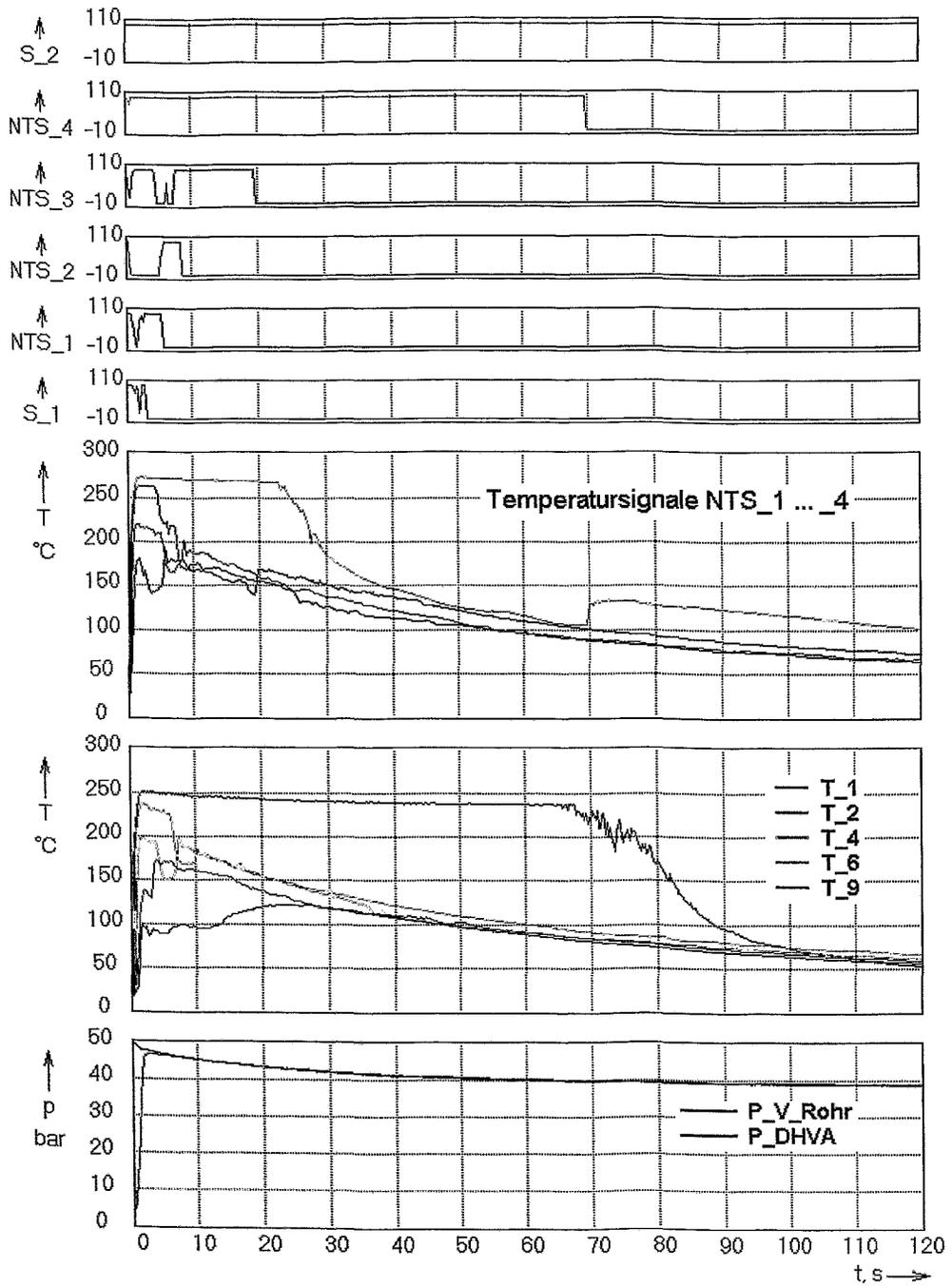


Bild A13 Versuch C04,  $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 5 \text{ bar}$

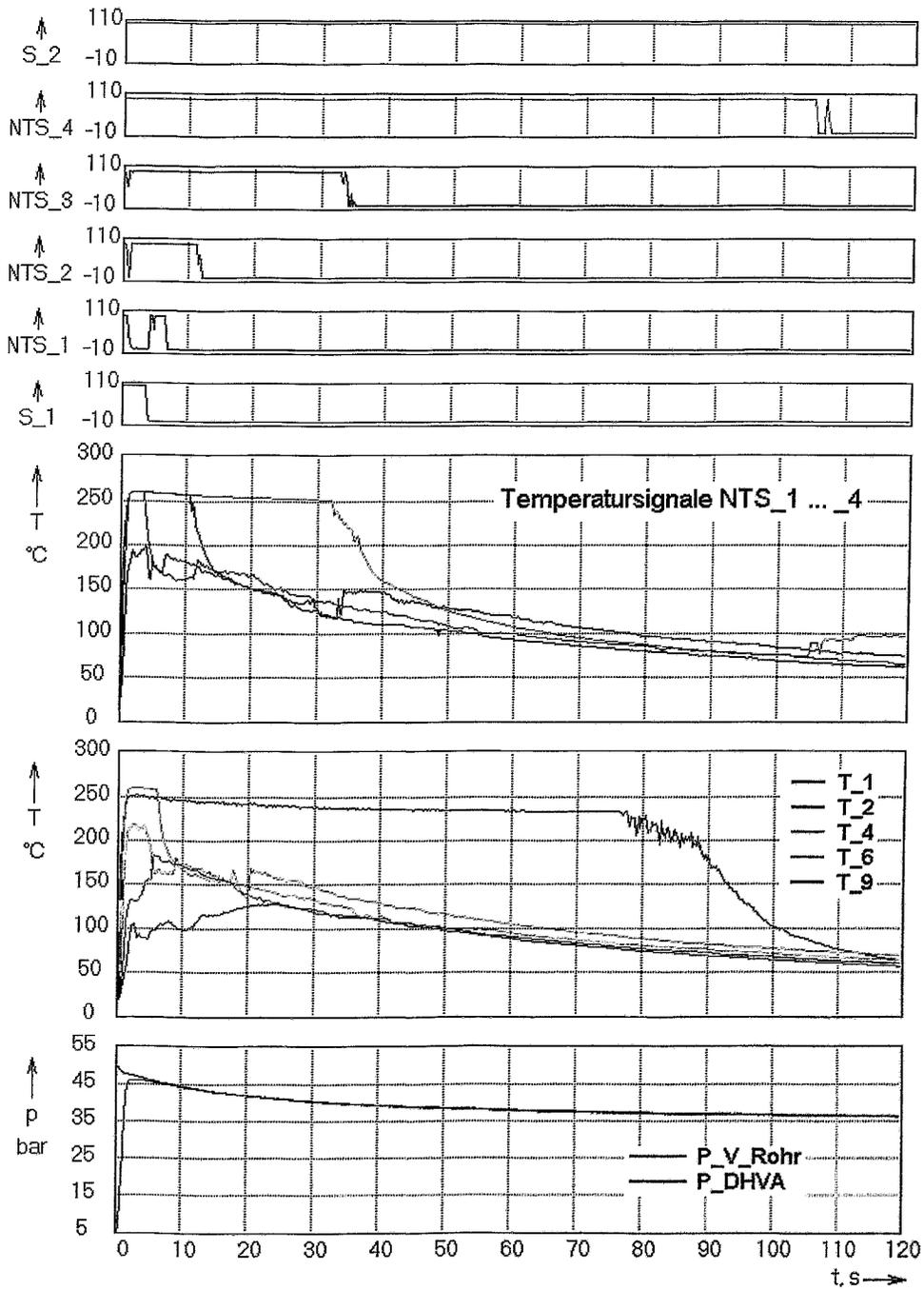


Bild A14 Versuch C05,  $p_{0,Dampf} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0,Luft} = 5 \text{ bar}$

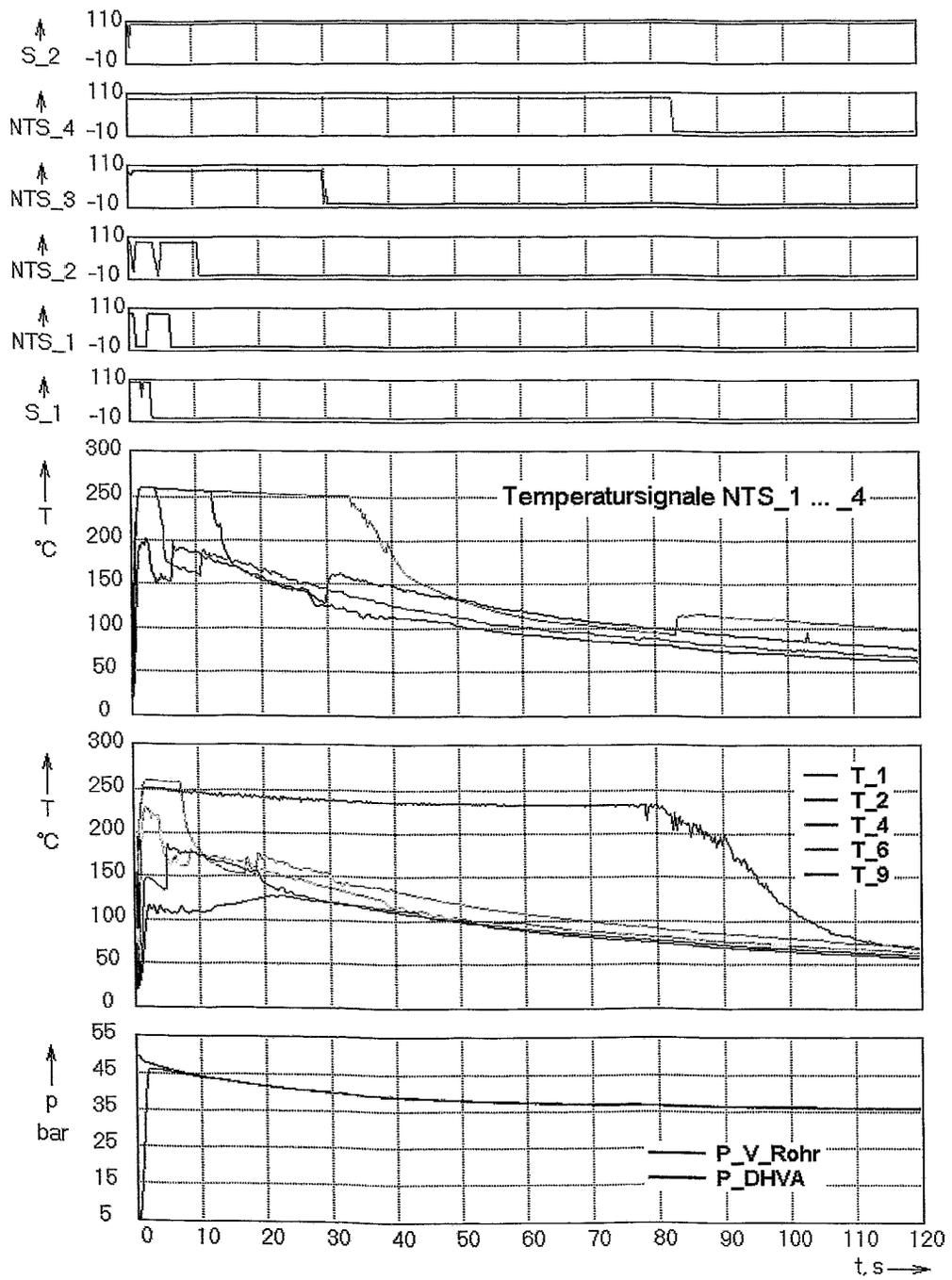


Bild A15 Versuch C06,  $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 5 \text{ bar}$

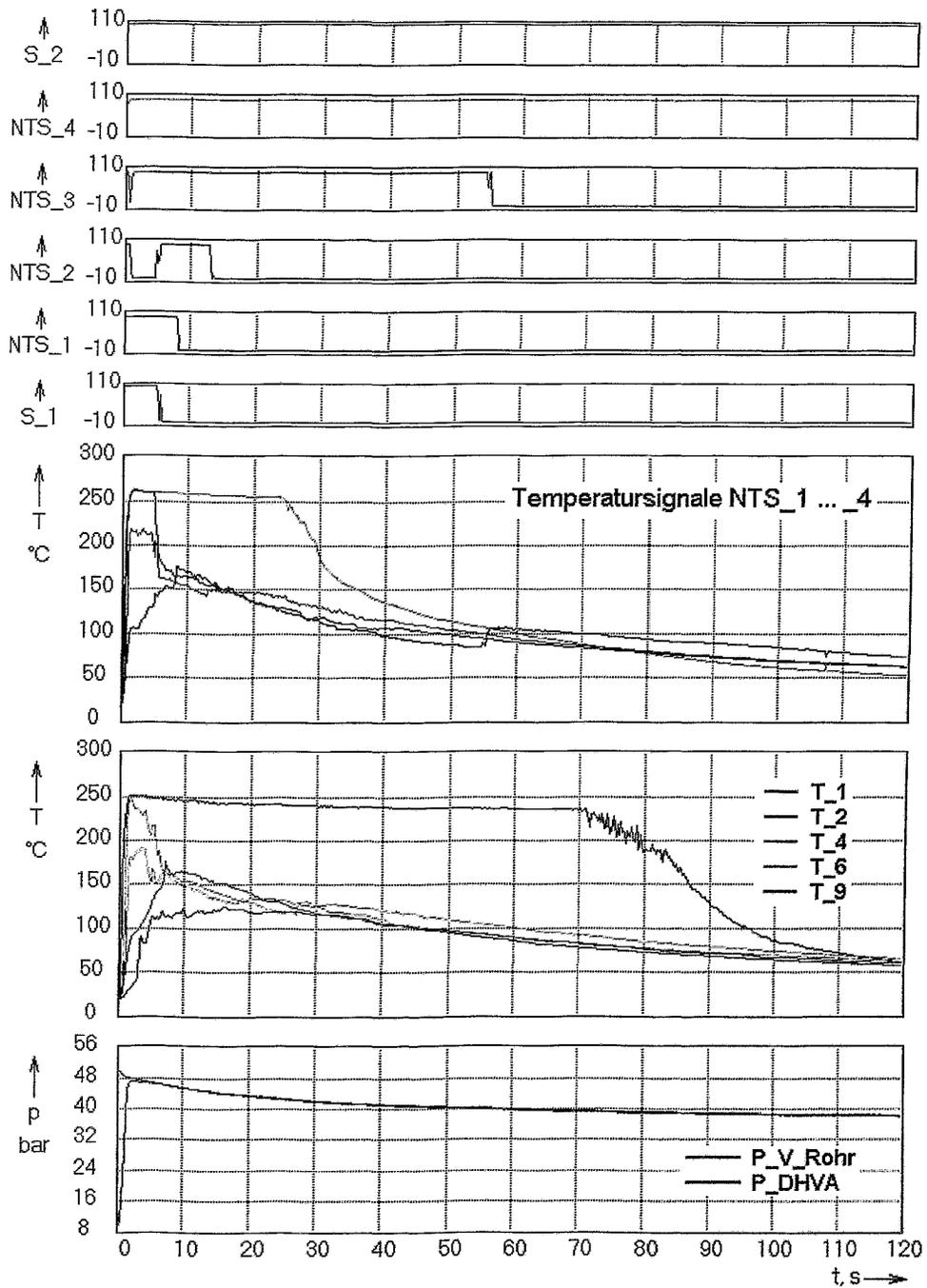


Bild A16 Versuch C07,  $p_{0, \text{Dampf}} = 50 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 10 \text{ bar}$

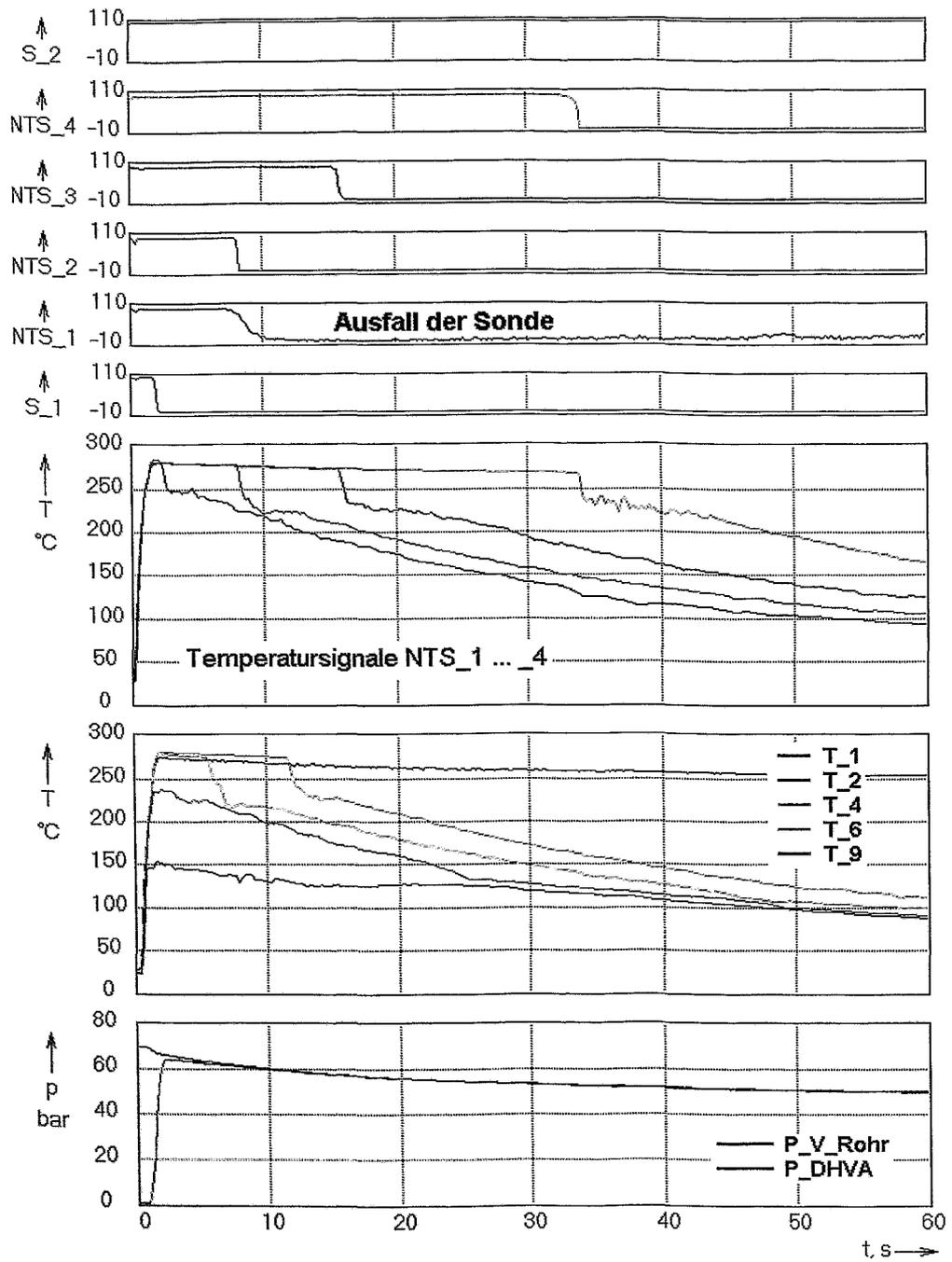


Bild A17 Versuch D07,  $p_{0, \text{Dampf}} = 70 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 0 \text{ bar}$

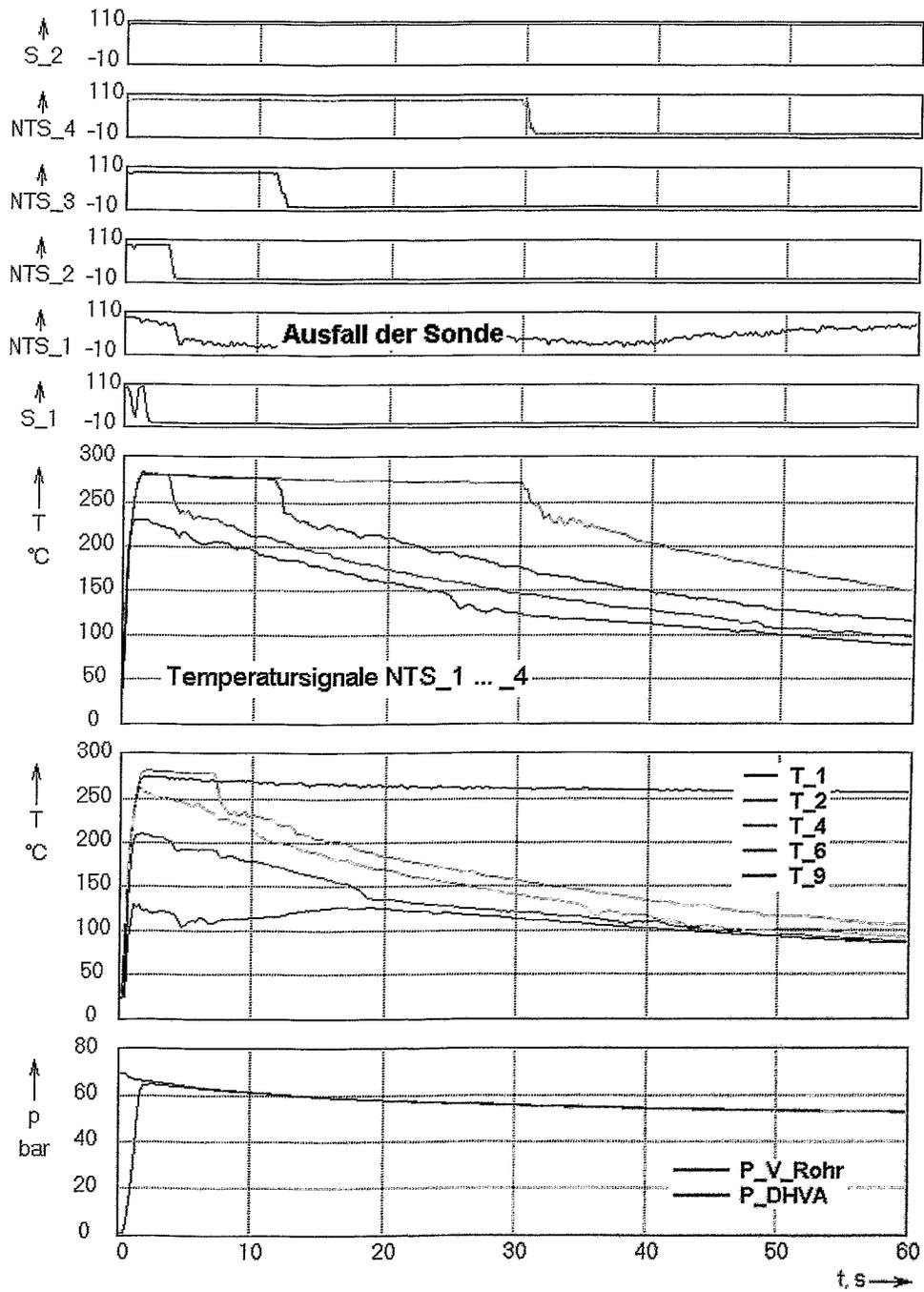


Bild A18 Versuch D06,  $p_{0, \text{Dampf}} = 70 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 1 \text{ bar}$

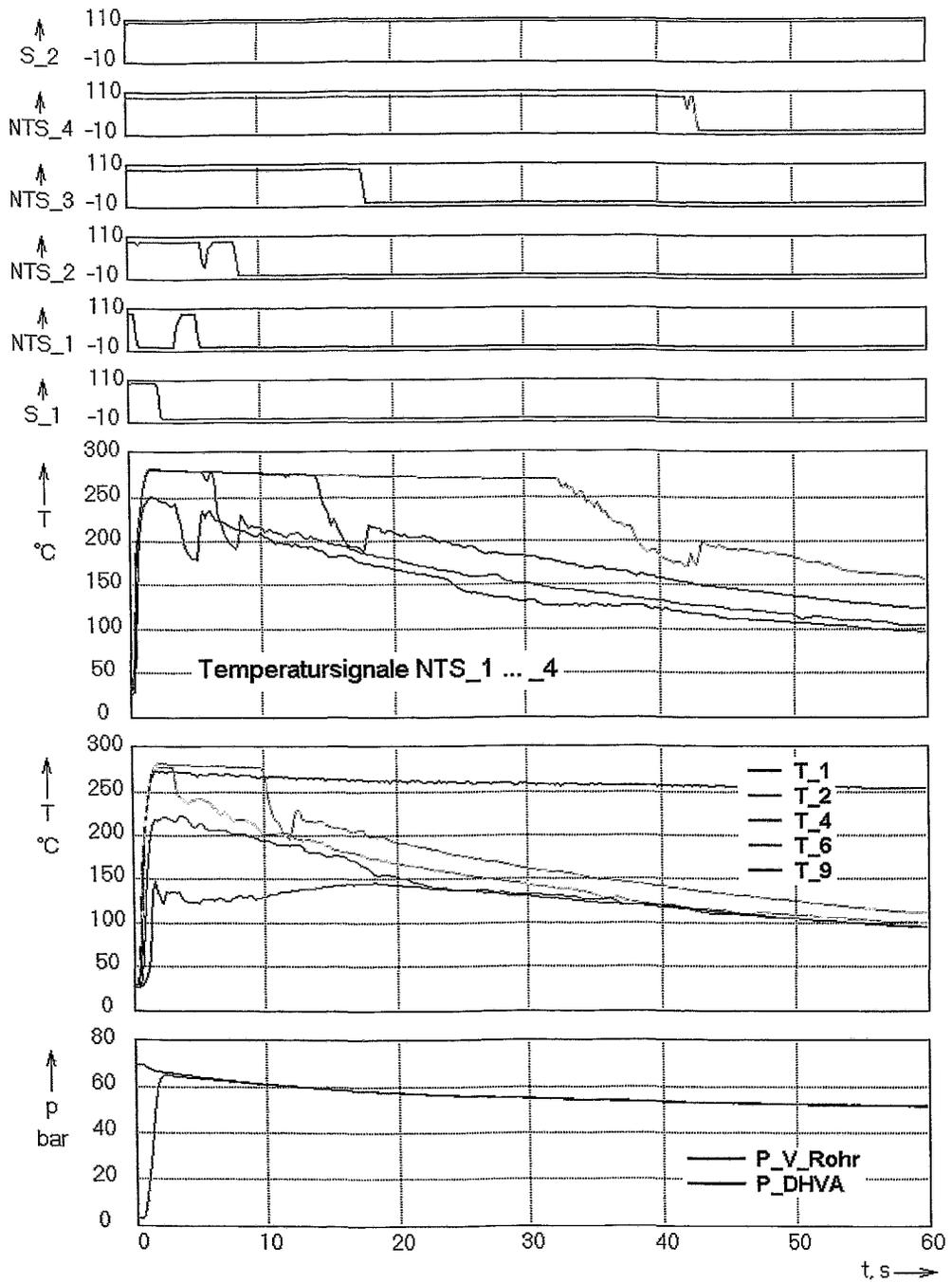


Bild A19 Versuch D05,  $p_{0, \text{Dampf}} = 70 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 3 \text{ bar}$

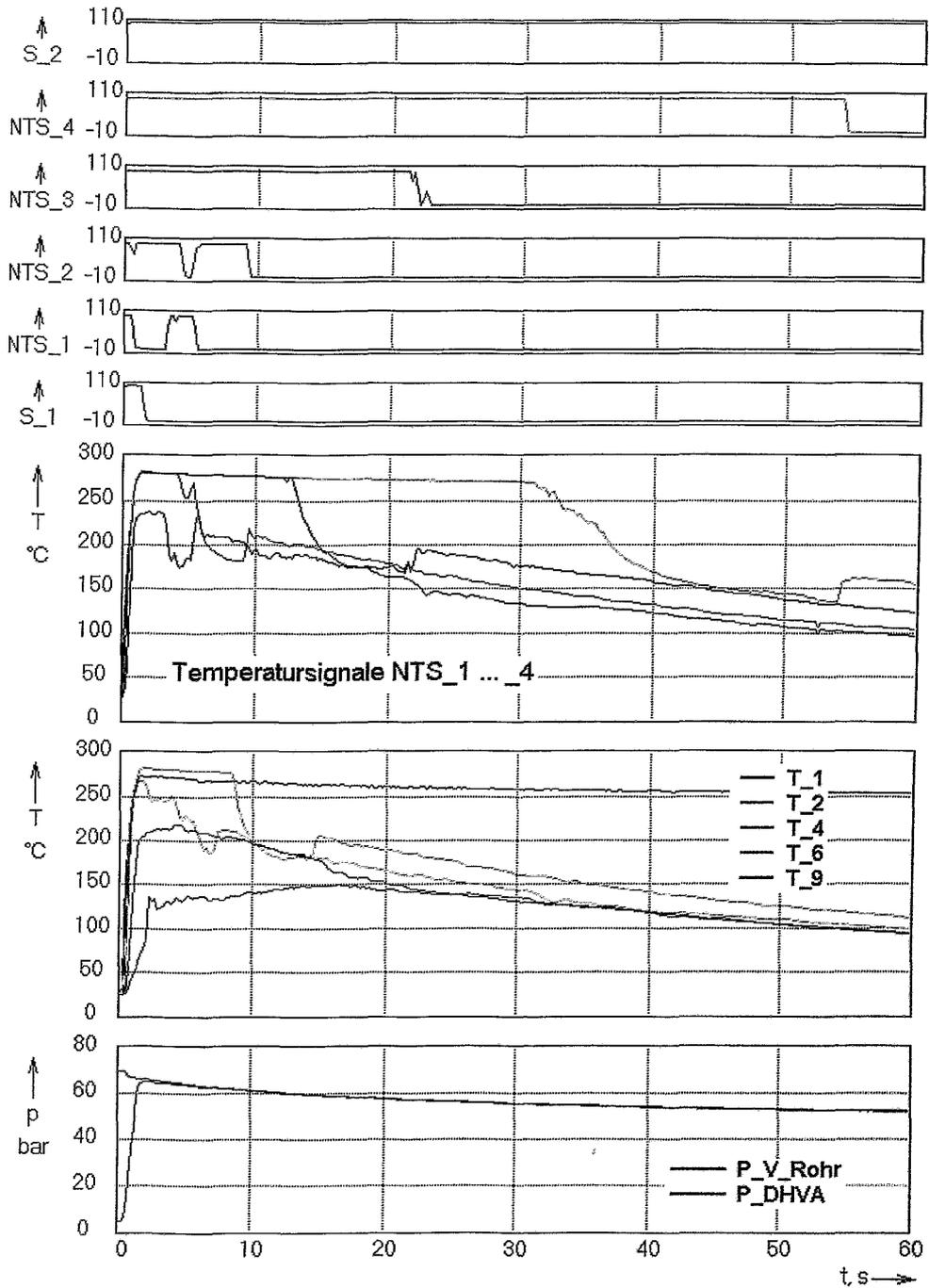


Bild A20 Versuch D04,  $p_{0, \text{Dampf}} = 70 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 5 \text{ bar}$

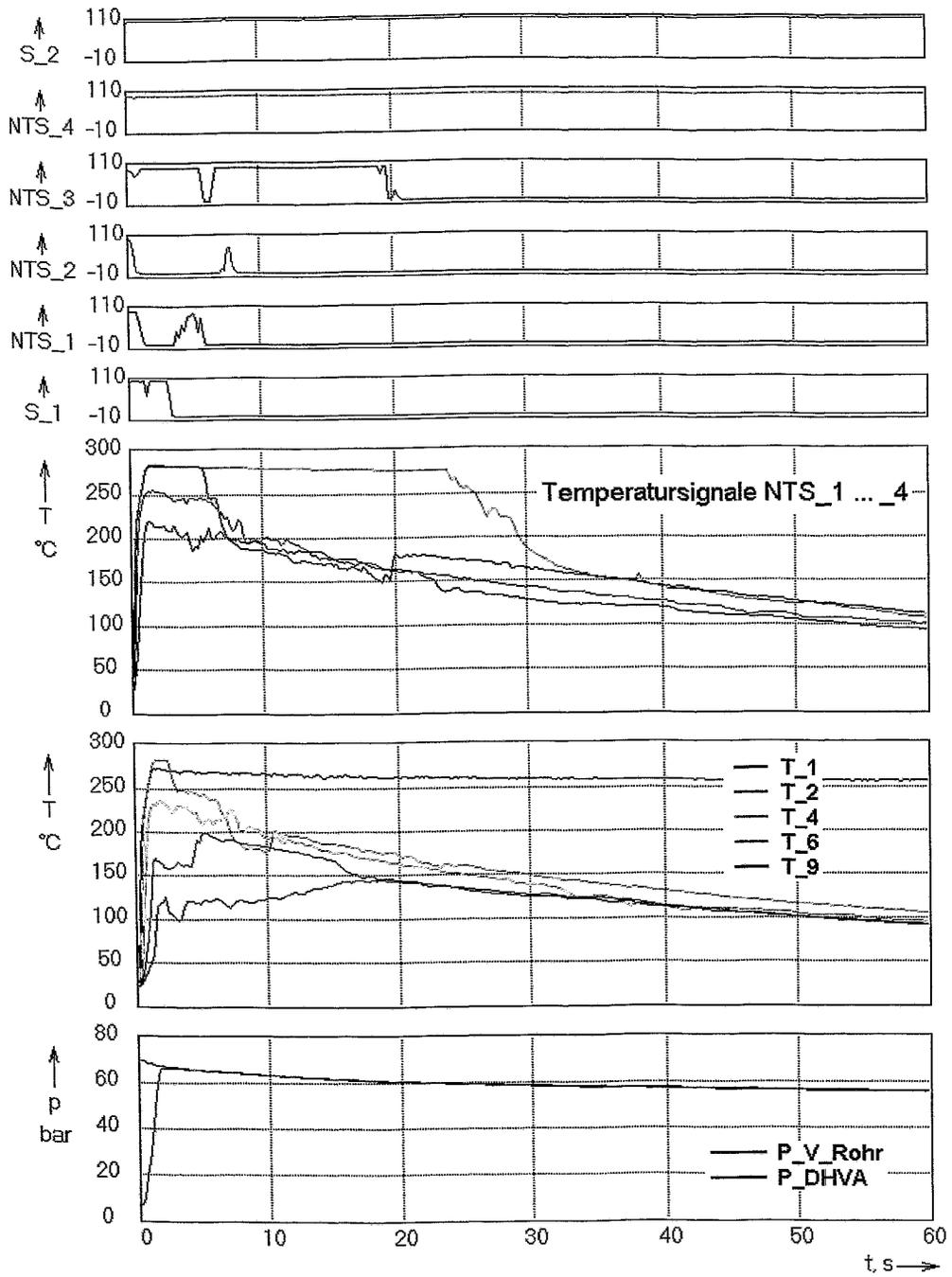


Bild 21 Versuch D03,  $p_{0, \text{Dampf}} = 70 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 7 \text{ bar}$

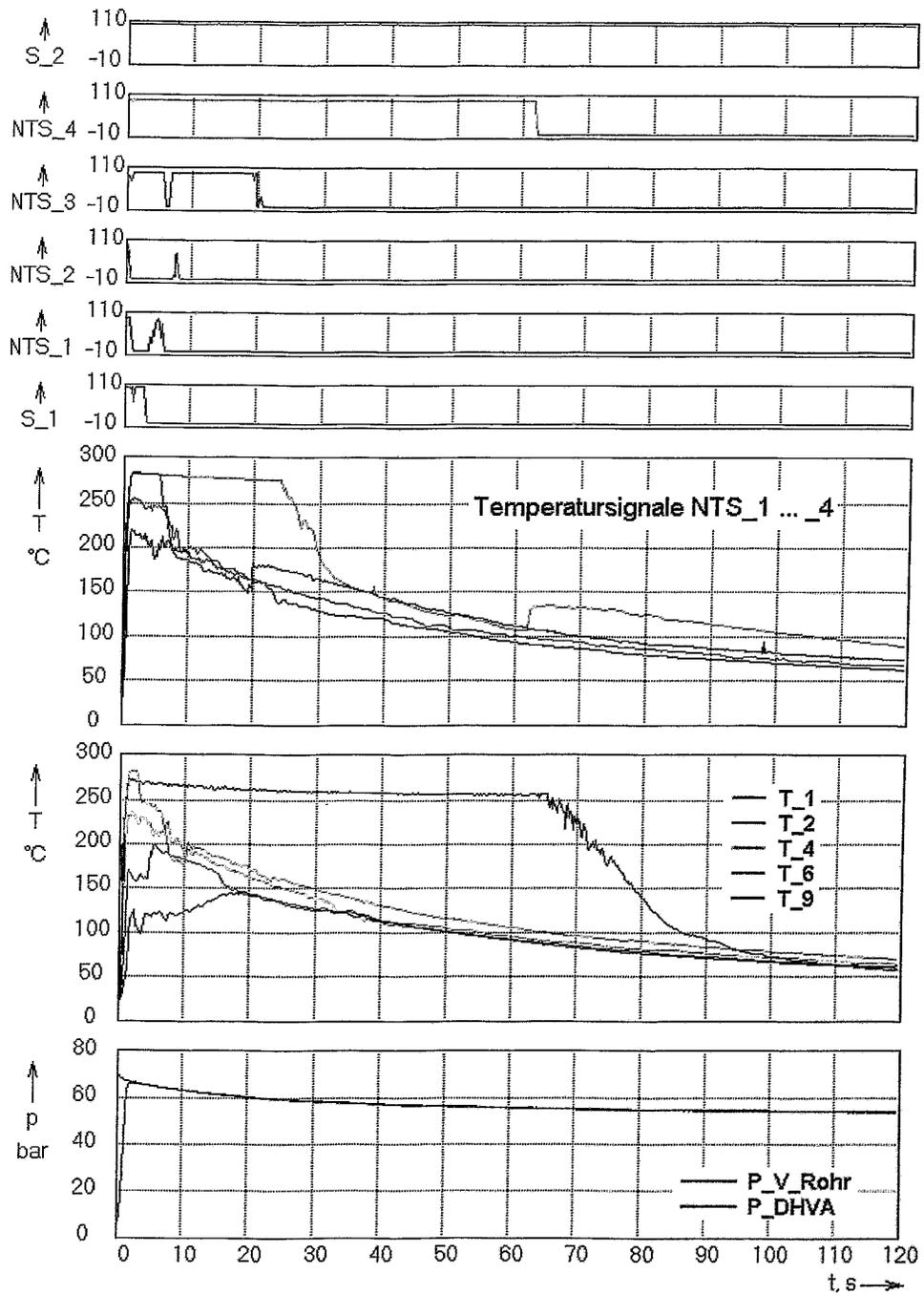


Bild 22 Versuch D03,  $p_{0, \text{Dampf}} = 70 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 7 \text{ bar}$ , vergrößerter Zeitbereich

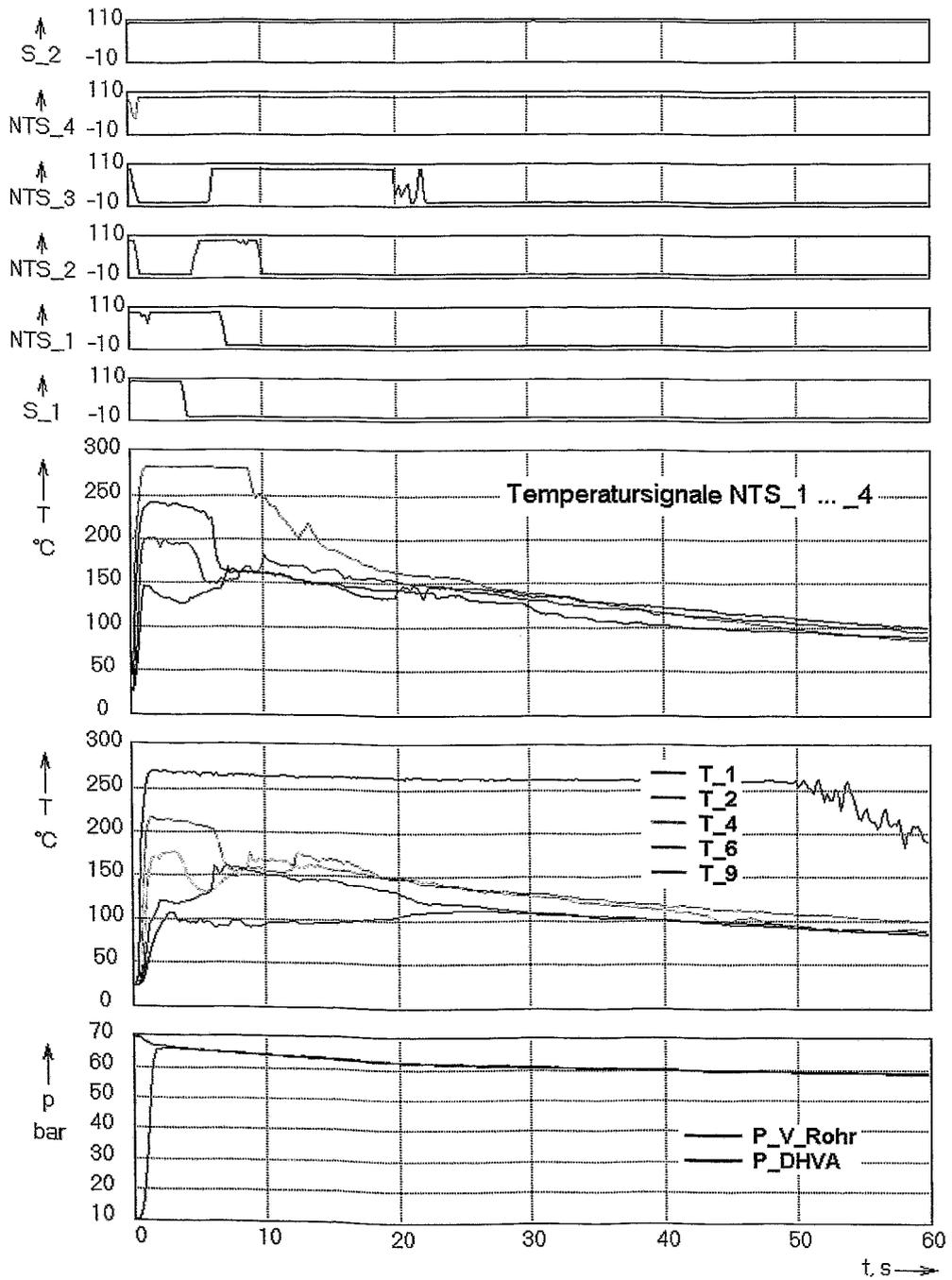


Bild 23 Versuch D02,  $p_{0, \text{Dampf}} = 70 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 10 \text{ bar}$

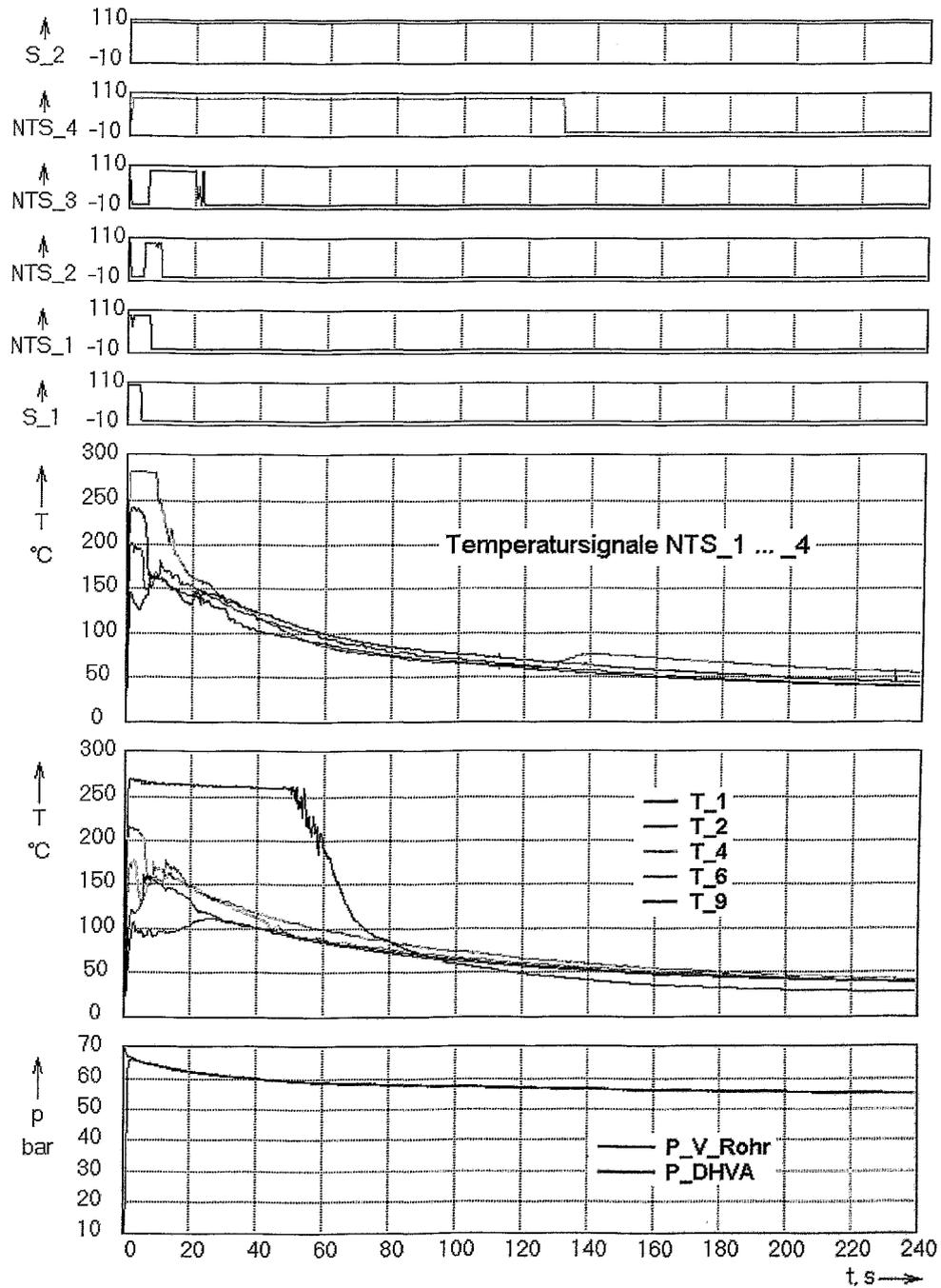


Bild 24 Versuch D02,  $p_{0, \text{Dampf}} = 70 \text{ bar}$ ,  $p_{0, \text{Luft}} = 10 \text{ bar}$ , vergrößerter Zeitbereich