

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

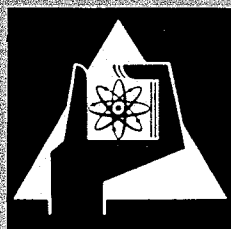
Oktober 1971

KFK 1348

Labor für Elektronik und Meßtechnik
Projekt Schneller Brüter

Kriterien zur Unterscheidung von Brennstoff- und Plenumschäden
an Reaktorbrennelementen mit einvibriertem Brennstoff

W. Golly, S. Jacobi



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Oktober 1971

KFK 1348

Labor für Elektronik und Meßtechnik

Projekt Schneller Brüter

Kriterien zur Unterscheidung von Brennstoff- und
Plenumschäden an Reaktorbrennelementen mit ein-
vibriertem Brennstoff^{+))}

von

W. Golly

S. Jacobi

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H., KARLSRUHE

^{+))}

In Kurzfassung vorgetragen auf der Reaktortagung
des Deutschen Atomforums, Bonn, 1971

Zusammenfassung

Für Experimente mit beschädigten Brennstäben wurde am FR 2 der Hüllenschaden-Dampfkreislauf = HSD-Loop erstellt. Dieser Bericht beschreibt den Betrieb mit zwei Brennstäben vom HDR-Typ. Die Stäbe hatten Hüllenfehler im Brennstoffbereich bzw. im Plenum. Es werden Kriterien angegeben, wie mittels eines Präzipitators diese beiden Fehlerarten unterschieden werden können.

Abstract

For research with failed fuel elements the HSD-Loop was installed at the FR 2. The operation with two pins of the HDR-type is described. The pins were failed in the fuel region and at the plenum resp. Criteria are specified to discriminate these two types of defect by means of a precipitator.

Inhalt

1. Einleitung
2. Der Versuchskreislauf
 - 2.1. Kreislaufbeschreibung
 - 2.2. Spaltproduktnachweis
3. Die Brennstabprüflinge
4. Beschreibung der Experimente und Abbildungen
 - 4.1. Leistungsänderungen
 - 4.1.1. Leistungserhöhungen
 - 4.1.1.1. Brennstoffschaden
 - 4.1.1.2. Plenumschaden
 - 4.1.2. Schrittweise Leistungsänderungen
 - 4.1.3. Leistungsreduzierungen
 - 4.2. Druckänderungen
 - 4.2.1. Druckerhöhungen
 - 4.2.2. Druckreduzierungen
 - 4.2.2.1. Brennstoffschaden
 - 4.2.2.2. Plenumschaden
 - 4.2.2.3. Vergleich zwischen Brennstoff- und Plenumschaden
5. Bemerkungen
6. Acknowledgement
7. Verzeichnis der Abbildungen
8. Literatur

1. Einleitung

Bei der Entwicklung neuer Reaktorkonzepte ist das Brennelement und seine Betriebszuverlässigkeit nach wie vor das zentrale Problem. Solange nicht ausreichende Betriebserfahrungen vorliegen, müssen die Brennelemente während des Reaktorbetriebes überwacht werden. Da Schadensablauf und -folgen in etwa vorhersehbar sein sollen, müssen auftretende Hüllenschäden möglichst frühzeitig erkannt werden und hinsichtlich der Schadensart beurteilt werden können. Die Art und Größe des Schadens entscheiden über den weiteren Reaktorbetrieb.

Handelt es sich - wie im Falle des HDR - um Brennelemente mit pulverförmigem Brennstoff, dann gewinnt die Schadensart ausschlaggebende Bedeutung, da die Spaltproduktfreisetzung gegenüber Brennstäben mit pelletiertem Brennstoff um eine halbe bis eine Größenordnung intensiver ist. Während ein Schaden in Höhe des Spaltgasplenums eine Zeitlang toleriert werden kann, sollte bei einem Schaden im Brennstoffbereich der Reaktor möglichst bald abgeschaltet und das defekte Brennelement ausgetauscht werden. Andernfalls werden eine große Kontamination des Primärkreislaufs und Folgeschäden an benachbarten Brennstäben riskiert.

Diese Erfahrungen gelten allgemein. Um insbesondere für dampfgekühlte Reaktoren eine geeignete Meßmethode zur Schadenserken- nung zu erproben und das möglicherweise unterschiedliche Verhalten verschiedener Schäden zu untersuchen, wurde im FR 2 des Kern- forschungszentrums Karlsruhe der Hüllenschaden-Dampfkreislauf (HSD-Loop) installiert und betrieben [1].

Der vorliegende Bericht behandelt Spaltproduktausbrüche bei nichtstationärem Reaktorbetrieb.

Wesentliche Erhöhungen der Spaltprodukt-Freisetzungsraten, insbesondere für Spaltgase bei Temperaturänderungen wurden bereits durch Grundlagenuntersuchungen mit UO_2 bekannt, Belle [2] und Carroll [3] berichteten darüber. Wegen des ausgeprägten Temperatureffektes wurden diese Effekte heating- und cooling-bursts genannt. Obwohl anfangs bei Nachuntersuchungen beobachtet, ließen sich diese bursts im Reaktor sehr einfach durch Leistungsänderungen und der damit verbundenen Temperaturänderung realisieren. Daher wurden sie sehr bald zur besseren Detektion oder Lokalisierung defekter Brennelemente benutzt. Durch Leistungsänderungen von mehr als 25 % der vollen Leistung werden nach Palmer [4] im CANDU defekte Brennelemente lokalisiert. In einem Druckwasserloop des SRX wurden durch Allison und Robertson [5] Untersuchungen für den NPD durchgeführt: Messung der Freisetzungsraten von Kr 88, J 131, J 133, J 135 und Xe 138 bei Leistungsänderungen.

Abrams et al [6] berichteten über heating bursts an der Shippingport Atomic Power Station bei Leistungsänderungen von 1 auf 40 MW. Wegen der Detektionsmethode mit verzögerten Neutronen waren Br 87 und J 137 die einzigen beobachteten Spaltprodukte. Für die gleiche Methode wurden durch Palmer [7] an einem SRX-Loop für den CANDU Experimente durchgeführt. Danach sollten 30 % Leistungsänderung des CANDU für eine Schadenslokalisierung ausreichend sein. Flury [8] berichtete über heating-bursts am DIORIT in Würenlingen. Golly und Jacobi [9] konnten bei Experimenten am FR 2 mit einem angebohrten Testelement heating-bursts nachweisen.

Bei gasgekühlten Reaktoren wurde zusätzlich durch Reduzierung des Kühlmitteldruckes eine Erhöhung der Spaltprodukt-Freisetzungsraten erreicht. Nach Cartwright [10] werden an englischen gasgekühlten Reaktoren, insbesondere bei Neubeladungen, Fehlertests durch Druckreduzierung durchgeführt. Michizuki und Ikeda [11] berichteten über bursts bei Start und Abschaltung des JPDR sowie

bei Druckänderung von 16 auf $1,5 \text{ kg/cm}^2$.

In allen diesen bisher bekannten Arbeiten wurden bursts durch Temperatur-, Leistungs- oder Druckänderungen nur zum Nachweis verwendet, daß überhaupt ein Schaden vorliegt. Zusätzlich über die Art des Schadens eine Aussage zu erhalten, sollte bei den im folgenden beschriebenen Experimenten erarbeitet werden.

Zwei Schadensarten einheitlicher Größe wurden ausgewählt. Dabei wurden die im normalen Reaktorbetrieb am häufigsten vorkommenden Schäden berücksichtigt:

Schäden im Brennstoffbereich, meist in Höhe des Leistungsdichtemaximums - Brennstoffschäden genannt - und Schäden am Spaltgasplenum, meist an der Schweißnaht des oberen Endstopfens - Plenumschäden genannt. Für möglichst kleine Schäden gab es zwei Gründe:

Die Kreislaufkontamination mußte möglichst klein gehalten werden. Außerdem war ein wesentliches Ziel der Arbeit die Entwicklung eines Nachweisverfahrens, welches bereits die herstellungsbedingte Urankontamination der Brennelementhüllen von ca. 10^{-8} g/cm^2 zu detektieren gestattet. Die Schadensgröße wurde deshalb und auch zum Vergleich mit früheren Experimenten [9] auf 1 mm^2 festgelegt.

2. Der Versuchskreislauf

Der Versuchskreislauf wurde zum Testen von Brennstäben für den HDR und für dampfgekühlte Brutreaktoren konzipiert. Dichtigkeit, Abschirmungen und Leitungsführungen wurden derart gewählt, daß die Spaltprodukt-Aktivität als geschlossener Strahler zu betrachten ist und die Dosisleistung in den begehbaren Räumen unter $2,5 \text{ mr/h}$ liegt. Die wesentlichen Kreislaufdaten sind in Tabelle 1

zusammengestellt.

Tabelle 1: Daten des HSD-Loops [1]

Dampfdruck	50 bis 190 atü
Dampftemperatur	Sattdampftemperatur bis 550 °C
Dampfdurchsatz	max. 100 kg/h
Heizleistung	max. 126 kW
Dampfgeschwindigkeit an der Prüflingsoberfläche	12 m/s
Leistung des HDR-Stabprüflings	5,4 kW bzw. 361 W/cm

Neutronenfluß im Reaktoreinsatz

	Thermischer Fluß 1/cm ² s	Schneller Fluß (E > 0,1 MeV) 1/cm ² s
ungestört	$3 \cdot 10^{13}$	$2,5 \cdot 10^{12}$
mit Prüfling	$2 \cdot 10^{13}$	$5,5 \cdot 10^{12}$

Der Kreislauf wurde mit vollentsalztem Wasser betrieben, das mittels Kondensat-, Einspritz- und Speisepumpen in die Dampferzeugungsanlage gefördert wird, Abb. 1. Die elektrischen Heizungen im Vorwärmer, Verdampfer und Überhitzer erzeugten Heißdampf innerhalb der o. a. Grenzen. Der Heißdampf wurde in den Reaktoreinsatz (Nebenloop 1, Pos. 40/12) geleitet, in welchem er sich mit den Spaltprodukten des jeweiligen Brennstabprüflings vermischt. Das Spaltprodukt-Dampfgemisch, das den Reaktoreinsatz verläßt, wurde in dem Enthitzer enthitzt und im nachfolgenden Kondensator kondensiert. Das entgaste Kondensat wurde über die Kondensatpumpen und Filter dem Kreislauf wieder zugeführt. Die Kondensation erfolgte bei einem Unterdruck von 0,12 ata und ca. 50 °C. Die nichtkondensierbaren Gase, unter ihnen die gasförmigen

gen Spaltprodukte sowie ein über die Temperatur einstellbarer Dampfanteil, der für sinnvolle Transportzeiten notwendig ist, wurden mit der Abgaspumpe durch das Aktivitätsmeßgerät, den Präzipitator, abgesaugt.

Als Aktivitätsmeßmethode wurde die Präzipitation angewandt [12]: Während des Transportes vom Kondensator zum Präzipitator zerfallen die gasförmigen Spaltprodukte Kr 88, Kr 89, Kr 90 und Xe 138. Es entstehen die festen Folgeprodukte Rb 88, Rb 89, Rb 90 und Cs 138. Die Folgeprodukte sind eine kurze Zeitdauer nach ihrer Entstehung ionisiert und werden unter dem Einfluß eines elektrischen Gleichfeldes zwischen dem Präzipitatorgefäß und der Kathode des Zählrohres auf dieser präzipitiert. Die beim weiteren Zerfall emittierte Beta- und Gammastrahlung wird mit dem Zählrohr detektiert. Die Zählrate ist eine Funktion der Präzipitationsrate und der Zerfallsrate, bei konstanter Spaltproduktentweichrate des Prüflings entspricht sie einem Gleichgewichtszustand. Veränderungen in der Freisetzungsrates sind sofort erkennbar, da das Gleichgewicht gestört ist und entweder die Präzipitation oder der Zerfall überwiegen.

Die Präzipitationsmethode ist eine kontinuierliche Aktivitätsmeßmethode. Mit dieser Präzipitationsmeßmethode lagen gute Erfahrungen vor, die sich jedoch nur auf die Verwendung von Inertgasen als Transportmedium bezogen. Bei dampfgekühlten Reaktoren lag die Verwendung von Dampf als Transportmedium für die gasförmigen Spaltprodukte zum Präzipitator nahe, jedoch konnte nicht ausgeschlossen werden, daß die Effektivität der Präzipitation möglicherweise durch Anlagern von Wassermolekülen an die festen, ionisierten Folgeprodukte geringer wird oder die Präzipitation nahezu völlig verhindert wird. Eine theoretische Behandlung des Problems war nicht möglich, da die Rekombinationskoeffizienten der ionisierten Folgeprodukte nicht bekannt sind. Experimentelle Erkenntnis zu diesem Problem zu erhalten, war eine weitere Aufgabe des Kreislaufes.

3. Die Brennstabprüflinge

In der Zeit vom 16. 10. 1969 bis zum 16. 3. 1970 wurden mit dem Kreislauf HDR-bezogene Experimente durchgeführt. Die verwendeten Prüflinge entsprachen im wesentlichen der HDR-Spezifikation [13]. Lediglich die mit Brennstoff gefüllte Länge, die radialen Abmessungen sowie teilweise die Brennstoffkonfiguration wichen von dem originalen HDR-Brennstab ab. Die Brennstabprüflinge verfügten insbesondere über die originalen Konstruktionselemente und die originale Höhe des Spaltgasraumes, Abb. 2.

Die brennstoffgefüllte Länge wurde auf 150 mm festgelegt, da der Versuchskreislauf für eine maximale Prüflingsleistung von 7 kW ausgelegt war. Die Prüflinge wurden innen und außen mit aufwärts strömendem Dampf gekühlt. Die Testlecks mit einem Querschnitt von ca. 1 mm² befanden sich sämtlich im äußeren Hüllrohr, also an der Siedeseite des HDR-Brennelementes. Es wurden Experimente mit folgenden Brennstabprüflingen durchgeführt:

Tabelle 2 Brennstabprüflinge

Prüflings-Nr.	Brennstoff	Lage des Testlecks
1	UO ₂ -Ringtabletten 2,6 % U 235	im Plenum
2	UO ₂ -Ringtabletten 2,6 % U 235	in der Brennstoffmitte
3	UO ₂ -Pulver, einvibriert 3,15 % U 235 85 % theoret. Dichte	im Plenum
4	UO ₂ -Pulver, einvibriert 3,15 % U 235 85 % theoret. Dichte	in der Brennstoffmitte

Die Numerierung der Prüflinge entspricht der zeitlichen Folge ihrer Verwendung. Die gewählte Reihenfolge in der Art des Brennstoffes und in der Schadensart ergab sich aus dem Prinzip der Risikosteigerung für den Experimentier- und Reaktorbetrieb. Die Prüflinge mit UO_2 -Pulver fanden erst an dritter und vierter Stelle Verwendung, da bei einem Brennstoffschaden mit ein-vibriertem UO_2 -Pulver Brennstoffaustrag im voraus nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden konnte⁺⁾ .

Setzt man die Spaltprodukt-Emissionsrate bei pelletiertem Brennstoff mit Plenumschaden gleich eins, so ergeben sich zu den anderen Prüflingen etwa die in Tabelle 3 angegebenen Relationen.

Tabelle 3: Spaltprodukt-Emissionsraten

Pelletierter Brennstoff mit Plenumschaden gleich eins

	Plenumschaden	Brennstoffschaden
UO_2 -Pellets	1	3
UO_2 -Pulver	3	10

4. Beschreibung der Experimente und Abbildungen

Mit den im HSD-Loop eingesetzten HDR-Brennstabprüflingen wurden eine Reihe von Experimenten durchgeführt; hierüber zu berichten wird Gegenstand eines weiteren Berichtes sein.

Im vorliegenden Bericht sollen lediglich die Experimente dargelegt werden, die für die Erkennung von Brennstoff- und Plenum-

⁺⁾

Durch optische Kontrolle und Wiegen des Prüflings Nr. 4 mit seiner Masse von $564,55 \pm 0,05$ g konnten nach den Experimenten keine Veränderungen am Prüfling festgestellt werden. Brennstoffaustrag kann damit ausgeschlossen werden.

schäden am HDR und ähnlichen Reaktoren interessant sind; deshalb werden nur Experimente mit den Prüflingen 3 und 4 beschrieben.

Es wurden Variationen der Prüflingsleistung und des Systemdruckes im Versuchskreislauf durchgeführt. Sie brachten wichtige Aufschlüsse zur Unterscheidung von Brennstabschäden im Brennstoff- und im Plenumbereich.

Die Abbildungen 5 bis 23 stellen den zeitlichen Verlauf der Reaktorleistung (entsprechend der Prüflingsleistung) und der Präzipitator-Zählrate sowie des Systemdruckes und der Präzipitator-Zählrate dar. Sie sind zusammengesetzt aus Linienschreiberaufzeichnungen. Der Druckverlauf wurde von 12-fach-Punkt-druckerstreifen abgezeichnet. Der Abbildungsmaßstab ist linear, die Abbildungen 12, 14, 16, 18 und 20 bis 23 enthalten in der Darstellung des Druckverlaufs zusätzlich eine Nullpunktsunterdrückung.

4.1. Leistungsänderungen

4.1.1. Leistungserhöhungen

Bei den Leistungserhöhungen wurden wegen des als Puffervolumen vorhandenen Plenums bei Plenumschäden und bei Brennstoffschäden unterschiedliche Zählratenverläufe erwartet. Diese Annahme hat sich bei den Experimenten bestätigt.

Anhand der Abbildungen 3 und 4 sollen die unterschiedlichen Spaltprodukt-Freisetzungsmechanismen verdeutlicht werden.

4.1.1.1. Brennstoffschaden

Bei der Leistungserhöhung setzt sich die Spaltproduktentweichrate aus dem Brennstoff aus zwei Anteilen zusammen, Abb. 3a bis e:

- Entsprechend der erhöhten Prüflingsleistung, Abb. 3a, wächst die Entweichrate durch recoil an, Abb. 3b.
- Die Erwärmung des Brennstabes infolge der erhöhten Leistung bewirkt während der Leistungserhöhung und eine Zeit danach die Austreibung von Spaltprodukten aus dem Brennstoff, Abb. 3c.

Die Summe der beiden genannten Effekte stellt beim Prüfling Nr. 4 mit Brennstoffschaden die Spaltproduktentweichrate aus dem Testleck dar, Abb. 3d. Der water-logging-Effekt konnte nicht auftreten, da der Prüfling vor dem Leistungsbetrieb mit Heißdampf über eine Zeitdauer von mehreren Stunden trocken geheizt wurde. Die Präzipitator-Zählrate bei Prüfling Nr. 4 ist in Abb. 3e dargestellt. Die nach beendeter Leistungserhöhung konstante Entweichrate durch recoil läßt den Verlauf der Präzipitator-Zählrate in eine Sättigungskurve laufen.

4.1.1.2. Plenumschaden

Bei Prüfling Nr. 3 mit Plenumschaden, Abb. 4a bis d, ist der zeitliche Verlauf der Spaltprodukt-Entweichrate ins Spaltgasplenum, Abb. 4b, identisch mit der in Abb. 3d ersichtlichen Kurve. Bis zum Entweichen der Spaltprodukte aus dem Testleck liegen nahezu 400 mm Plenumlänge, die die Entweichrate folgendermaßen beeinflussen:

- Das beim Eintritt ins Plenum kurzzeitig vorhandene Maximum der Spaltproduktkonzentration, Abb. 4b, wird während des Diffusions-Vorganges in seinem zeitlichen Verlauf verschliffen

und in seiner Höhe so verringert, daß es kaum noch in Erscheinung tritt.

- Ein Teil der gasförmigen Spaltprodukte bildet bereits im Plenum feste Folgeprodukte, die sich innen am Hüllrohr oder in nachfolgenden Kreislaufteilen niederschlagen. Sie liefern wegen des Entgasungsprozesses im Kondensator keinen Zählratenanteil am Präzipitator.
- Die Entweichrate aus dem Testleck wird durch Zerfall während des Diffusions-Vorganges verringert.

Die so entstehende Entweichrate ist in Abb. 4c, die Präzipitator-Zählrate in Abb. 4d dargestellt.

Die Leistungsänderungen wurden bei 70 atü Dampfdruck und 90 kg/h Dampfdurchsatz durchgeführt. In den Abb. 5 bis 10 ist das unterschiedliche Verhalten der Prüflinge Nr. 3 und 4 ersichtlich.

Beim Prüfling Nr. 3 mit Plenumschaden steigt die Präzipitator-Zählrate bei Leistungserhöhung ohne Maximum stetig an, Abb. 5.

4.1.2. Schrittweise Leistungsänderungen

Bei schrittweisen Leistungserhöhungen mit Prüfling Nr. 3 zeigt sich jeder Leistungsschritt in einem steileren Anstieg der Zählratenkurve, Abb. 7 und 9. Die stationäre Zählrate bei 44 MW Reaktorleistung ist bei Prüfling Nr. 3 geringer als bei Prüfling Nr. 4. Beim Prüfling Nr. 4 hat jeder positive Leistungsschritt einen ausbruchartigen Zählratenanstieg mit einem Maximum zur Folge, Abb. 6, 8 und 10. In Abb. 10 kommt der Ausbruch nach der Leistungserhöhung von 13,4 auf 23,6 MW zeitlich verzögert, jedoch ist die in das Zählratenmaximum fallende Leistungserhöhung von 23,6 auf 32,9 MW als zusätzliche Erhöhung der Zählrate sichtbar.

4.1.3. Leistungsreduzierungen

Bei den Leistungsreduzierungen wurde unterschiedliches Verhalten des Prüflings mit Brennstoffschaden gegenüber dem mit Plenumschaden weder erwartet noch nachgewiesen, Abb. 9 und 10.

4.2. Druckänderungen

4.2.1. Druckerhöhungen

Die Vorgänge bei Druckänderungen werden durch das Angleichen des Prüflingsinnendruckes an den geänderten Systemdruck bestimmt. Von den Druckerhöhungen wurden daher keine Aufschlüsse, die zur Unterscheidung von Plenum- und Brennstoffschäden beitragen können, erwartet. Diese Annahme hat sich in den Experimenten bestätigt. Die Druckerhöhung führt durch den in den Prüfling hineingerichteten Ausgleichsvorgang zu einer fast auf null reduzierten Spaltprodukt-Entweichrate aus dem Testleck. Die Präzipitator-Zählrate klingt nach dem Zerfallsgesetz der bis zum Beginn der Druckerhöhung präzipitierten festen Folgeprodukte ab.

4.2.2. Druckreduzierungen

Die Druckreduzierungen führen durch den aus dem Prüfling ins Kühlmittel gerichteten Ausgleichsvorgang zu einer Vergrößerung der Spaltprodukt-Entweichrate und damit zu einem deutlichen Zählratenanstieg. Das mit einem Gemisch aus Spaltprodukten und Wasserdampf gefüllte Spaltgasplenum wirkt als Druckspeicher, der sich über das Testleck auf den reduzierten Systemdruck entlädt. Die verschiedenen Druckausgleichswege der Prüflinge Nr. 3 und 4 ließen verschiedene Übergangsfunktionen der Spaltprodukt-Entweichrate und der Zählrate erwarten.

4.2.2.1. Brennstoffschaden

Beim Prüfling Nr. 4 mit Brennstoffschaden erfolgt bei Druckreduzierung das Angleichen des Plenumdruckes an den Systemdruck durch das Testleck und durch die obere Hälfte des Brennstoffbereiches. Es entsteht ein Spüleffekt in den durchströmten Bereichen. Dadurch werden Spaltprodukte aus Brennstoffbereichen mitgeführt, die im stationären Betrieb keinen Beitrag zur Entweichrate liefern. Die Folge ist ein steiler Anstieg der Entweichrate und der Zählrate bei Druckreduzierung.

Die in den Abbildungen 11 bis 23 dargestellten Druckreduzierungen wurden bei 44 MW Reaktorleistung und 90 kg/h Dampfdurchsatz durchgeführt.

4.2.2.2. Plenumschaden

Beim Prüfling Nr. 3 mit Plenumschaden kann der im Unterabschnitt 4.2.2.1. beschriebene Spüleffekt nicht auftreten. Die Druckreduzierung beschleunigt lediglich den Transportvorgang im Plenum. Die aus dem Brennstoff freigesetzten Spaltprodukte gelangen zwar schneller als bei stationärem Betrieb in das Kühlmittel, das Plenum wirkt jedoch als vorgeschaltetes Verzögerungsglied; Spaltprodukt-Bursts werden von der Brennstoffoberfläche bis zum Ausströmen aus dem Testleck in ihrer Amplitude kleiner und in ihrer Zeitdauer länger.

4.2.2.3. Vergleich zwischen Brennstoff- und Plenumschaden

Druckreduzierungen haben bei beiden Prüflingen eine Erhöhung der Zählrate zur Folge. Nach beendeter Druckreduzierung läuft die Präzipitator-Zählrate wieder auf den Wert des vorangegangenen stationären Betriebs zurück.

nären Betriebes ein.

Druckreduzierungen in mehreren Schritten haben bei Prüfling Nr. 3 lediglich eine Vergrößerung des Anstiegs der Zählrate zur Folge, Abb. 17 und 21, während sich bei Prüfling Nr. 4 jeder Druckreduzierschritt in einem Maximum der Zählrate abbildet, Abb. 12, 14, 18 und 22; sogar kleine Druckreduzierschritte zwischen 2 und 5 atü bewirken bei Prüfling Nr. 4 hervorstechende Zählratenmaxima, Abb. 14.

Die mittlere Änderungsgeschwindigkeit der Zählrate bis zum ersten Maximum aus den Abbildungen 11 bis 23 ist bei Prüfling Nr. 4 etwa zehnmal so groß wie bei Prüfling Nr. 3. Die Anstiegsgeschwindigkeiten streuen bei Prüfling Nr. 3 zwischen 0,8 und 4,2 % je Minute (Mittel 1,7 % je Minute) und bei Prüfling Nr. 4 zwischen 2,3 und 36 % je Minute (Mittel 19 % je Minute).

5. Bemerkungen

Für die Betriebsmannschaft dampfgekühlter Reaktoren, deren Brennelementhüllenüberwachungsanlage nach dem Präzipitationsprinzip arbeitet, soll dieser Bericht ein erstes Nachschlagwerk darstellen, um auftretende Brennelementschäden zu beurteilen.

Ist ein solcher Schaden lokalisiert, kann die Art des Schadens anhand seines Verhaltens während Druckreduzierungen oder Leistungserhöhungen festgestellt werden. Je nach Schadensart können daraufhin entsprechende betriebliche Maßnahmen getroffen werden.

Aus betrieblicher Sicht ist u. E. die Methode der Druckreduzierung das geeignetste Mittel, zwischen Brennstoff- und Plenumschaden zu unterscheiden. Da Brennelementdefekte sich zudem mit großer Wahrscheinlichkeit bei Leistungserhöhungen herausstellen, ist nach dem Lokalisieren der defekten Position im allgemeinen eine weitere Leistungserhöhung nicht sinnvoll. Vielmehr sollte der Neu-

tronenfluß konstant gehalten werden, bis Näheres über den Schaden bekannt ist. Gerade dazu eignen sich aber ein oder mehrere Druckreduzierschritte in sehr guter Weise.

Das Verhalten der Prüflinge wurde in Abschnitt 4 nur phänomenologisch behandelt. Der Aufwand für eine analytische Bearbeitung der Gasfreisetzung nach den Gesetzen der Strömungs- und Diffusionstheorie als Gastransport durch Pulverschüttungen, Pulvervolumina und enge Spalte erscheint jedoch - falls überhaupt - erst dann vertretbar, wenn ein standardisierter bzw. genormter Reaktor brennstab vorliegt.

Über die Experimente mit Ringpellets, d. h. mit den Prüflingen Nr. 1 und 2, wird eine weitere Arbeit berichten.

Obwohl bei den beschriebenen Experimenten ein dampfgekühlter Reaktor simuliert wurde, sind die Ergebnisse zweifellos auf gasgekühlte und Siedewasserreaktoren übertragbar, die Anwendung der Ergebnisse auf Druckwasserreaktoren ist nicht auszuschließen; ausreichend instrumentierte natriumgekühlte Reaktoren haben jedoch andere Kriterien zur Schadensdiagnose.

6. Acknowledgement

Für die bei derartigen Experimenten notwendige und umfangreiche Unterstützung und für die bereitwillige Erfüllung mancher Sonderwünsche möchten die Verfasser den Mitarbeitern der Abteilung Reaktorbetrieb und Technik ihren verbindlichsten Dank aussprechen.

7. Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1 HSD-Loop, Projekt FR 2/55
Prinzipschaltbild
- Abb. 2 Prüfling Nr. 3 und 4
- Abb. 3 Übergangsfunktionen bei Leistungserhöhung
mit Prüfling Nr. 4
- Abb. 4 Übergangsfunktionen bei Leistungserhöhung
mit Prüfling Nr. 3
- Abb. 5 - 10. FR 2-Leistung P und Präzipitator-Zählrate N
bei Leistungsänderungen

Abb.	Prüfling		Leistungsänderung		
	Nr. 3	Nr. 4	von ca. 50% auf 100%	von ca. 10% auf 100%	Schnellschluß u.anschl. Start
5	x		x		
6		x	x		
7	x			x	
8		x		x	
9	x				x
10		x			x

Abb. 11 - 23. Dampfdruck p und Präzipitator-Zählrate N bei Druckreduzierungen

Abb.	Prüfling		Druckreduzierungen					
	Nr. 3	Nr. 4	von 160 auf 140 atü	von 140 auf 120 atü	von 120 auf 100 atü	von 100 auf 85 atü	von 85 auf 70 atü	von 70 auf 50 atü
11	x		x					
12		x	x					
13	x			x				
14		x		x				
15	x				x			
16		x			x			
17	x					x		
18		x				x		
19	x						x	
20		x					x	
21	x							x
22		x						x
23		x						x

8. Literatur

- [1] Jacobi, S., Rautenberg, J. et al.:
Der Hüllenschaden-Dampfkreislauf (HSD-Loop)
KFK 1255, August 1970
- [2] Belle, J.:
Uranium Dioxide: Properties and Nuclear Applications
USAEC, Washington, 1961
- [3] Carroll, R. M.:
Continuous Release of Fission Gas from UO_2 during Irra-
diation. In: Symposium on Radiation Effects in Refractory
Fuel Compounds
Atlantic City, N. Y., 1961
- [4] Palmer, J. F.:
Finding Failed Fuel in CANDU
Nucleonics 22 (1964) No. 6, S. 39 - 44
- [5] Allison, G. M. and Robertson, R. F. S.:
Behaviour of Fission Products in Pressurized Water Systems
AECL 1338 (1964)
- [6] Abrams, C. S. et al.:
Evaluation of the PWR Core 1 Failed Element Detection and
Location System.
WAPD - TM - 330 (1962)

- [7] Palmer, J. F.:
Locating Failed Fuel at CANDU
Nucleonics 21 (1963) No. 12, S. 6 - 7
- [8] Flury, H.:
Besondere Probleme der Stabhüllenüberwachung
Neue Technik 4 (1962) 452 - 457
- [9] Golly, W. and Jacobi, S.:
Detection and Localization of a Fuel Element with a
Simulated Failure in the FR 2. In: Detection and Location
of Failed Fuel Elements.
PL - 265/7, IAEA, Vienna, 1968
- [10] Cartwright, D. K.:
Burst Cartridge Detection in U. K. Power Reactors. In:
Detection and Location of Failed Fuel Elements.
PL - 265/3, IAEA, Vienna, 1968

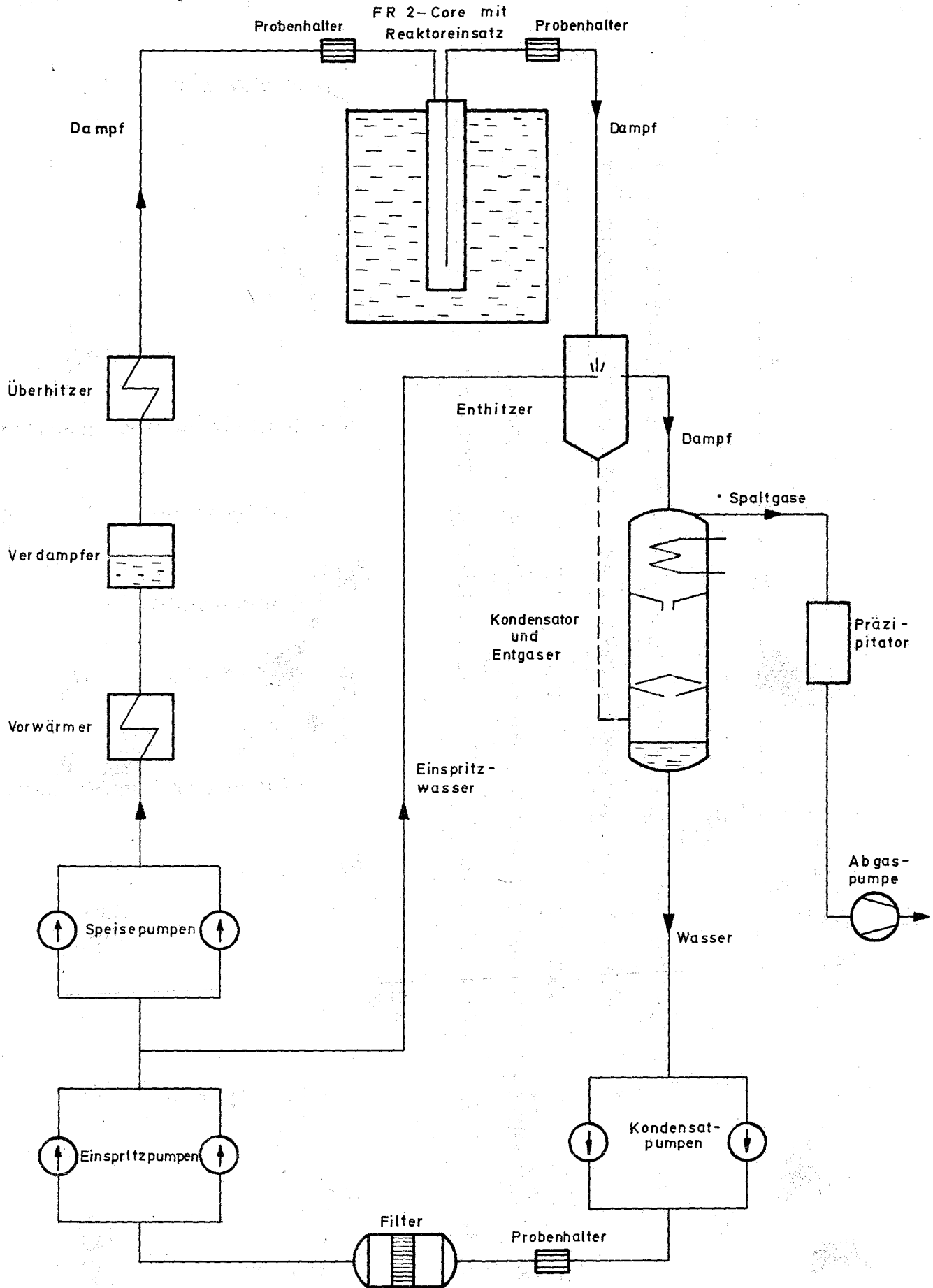


Abb.1. HSD-Loop Projekt FR 2/55
 Prinzipschaltbild

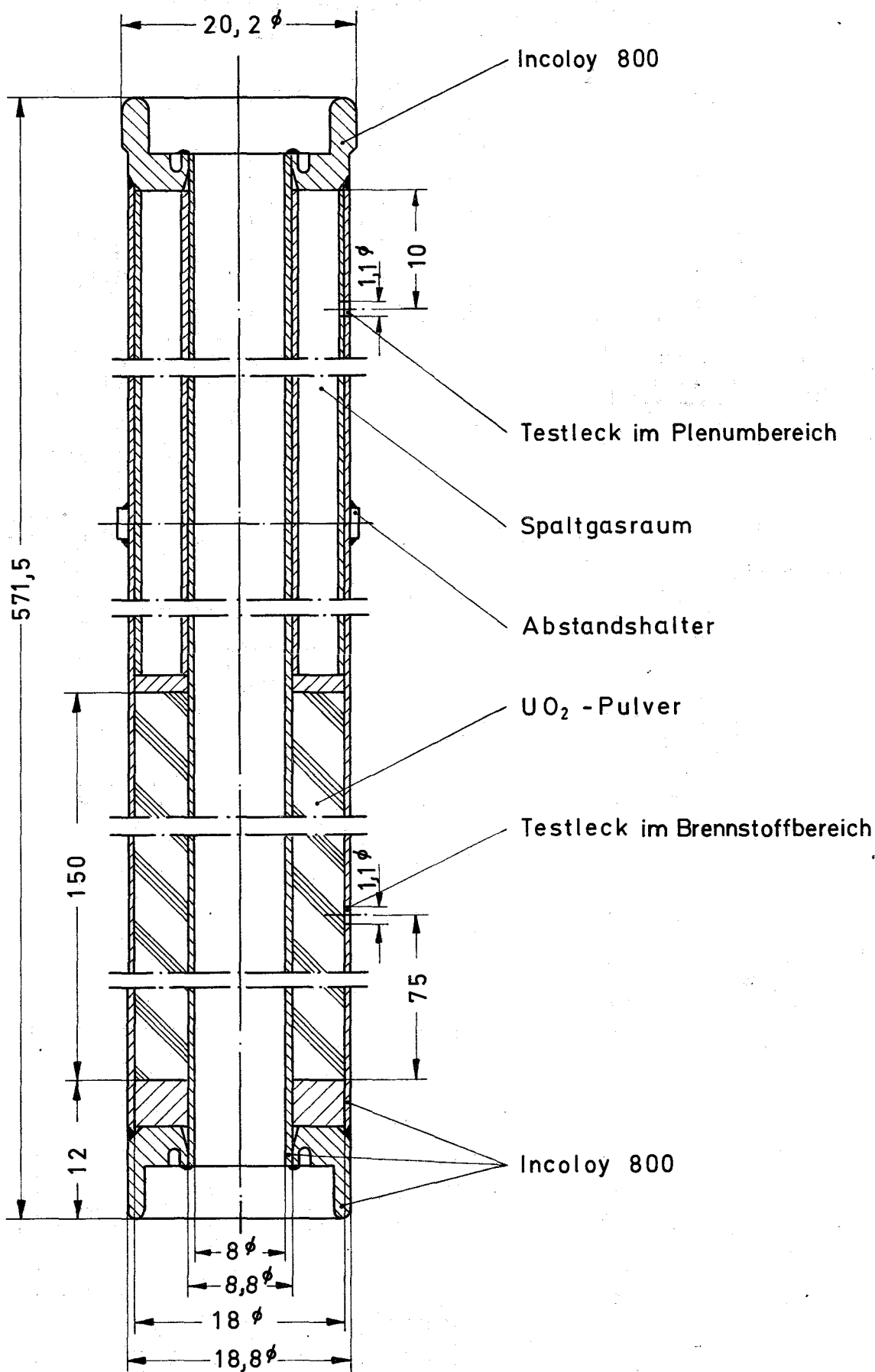
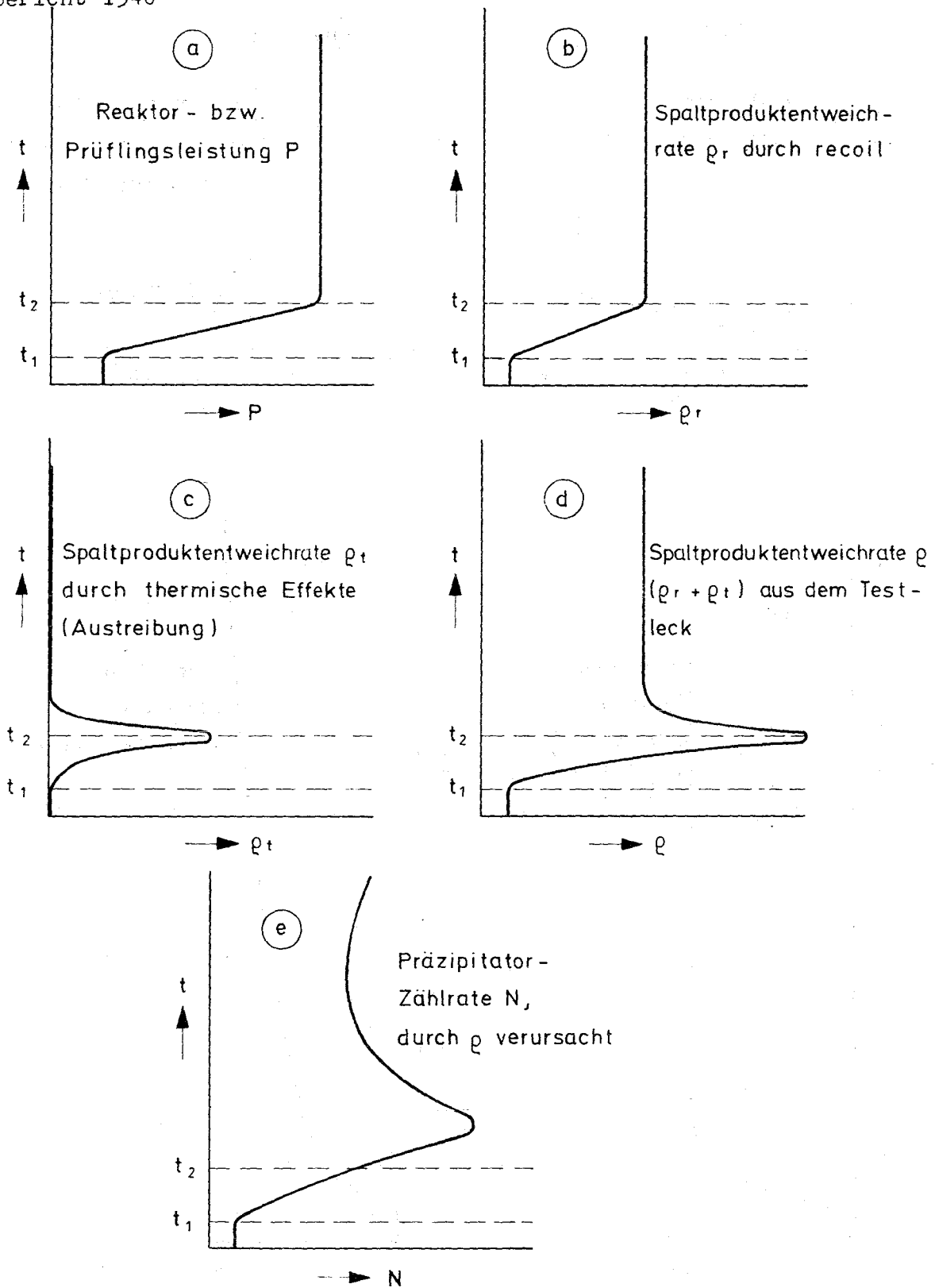


Abb. 2. Prüfling Nr.3 und 4. Maßstab 2:1



t_1 ... Beginn der Leistungserhöhung
 t_2 ... Ende der Leistungserhöhung

Abb. 3. Übergangsfunktionen bei Leistungserhöhung mit Prüfling Nr. 4

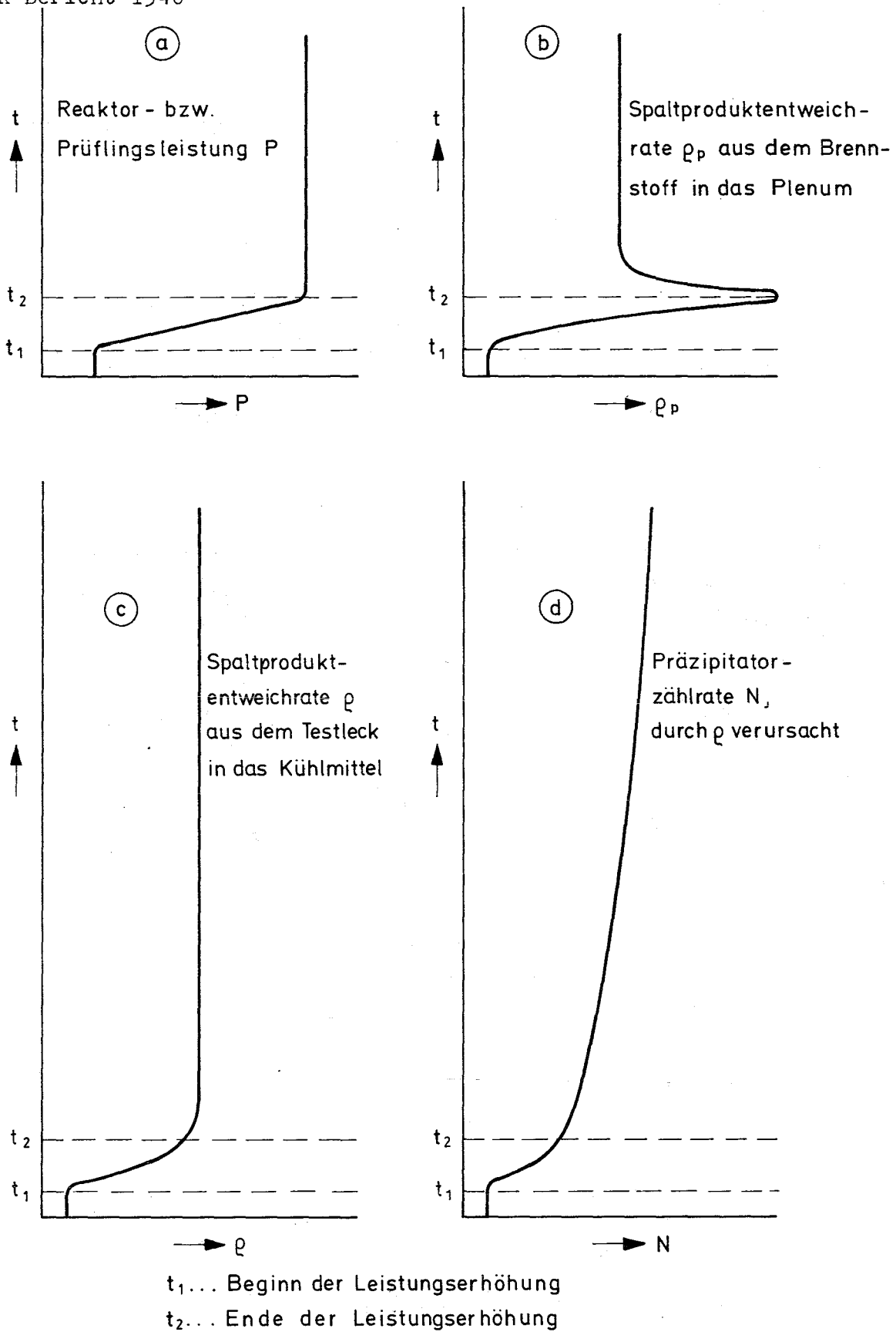


Abb.4. Übergangsfunktionen bei Leistungserhöhung mit Prüfling Nr.3

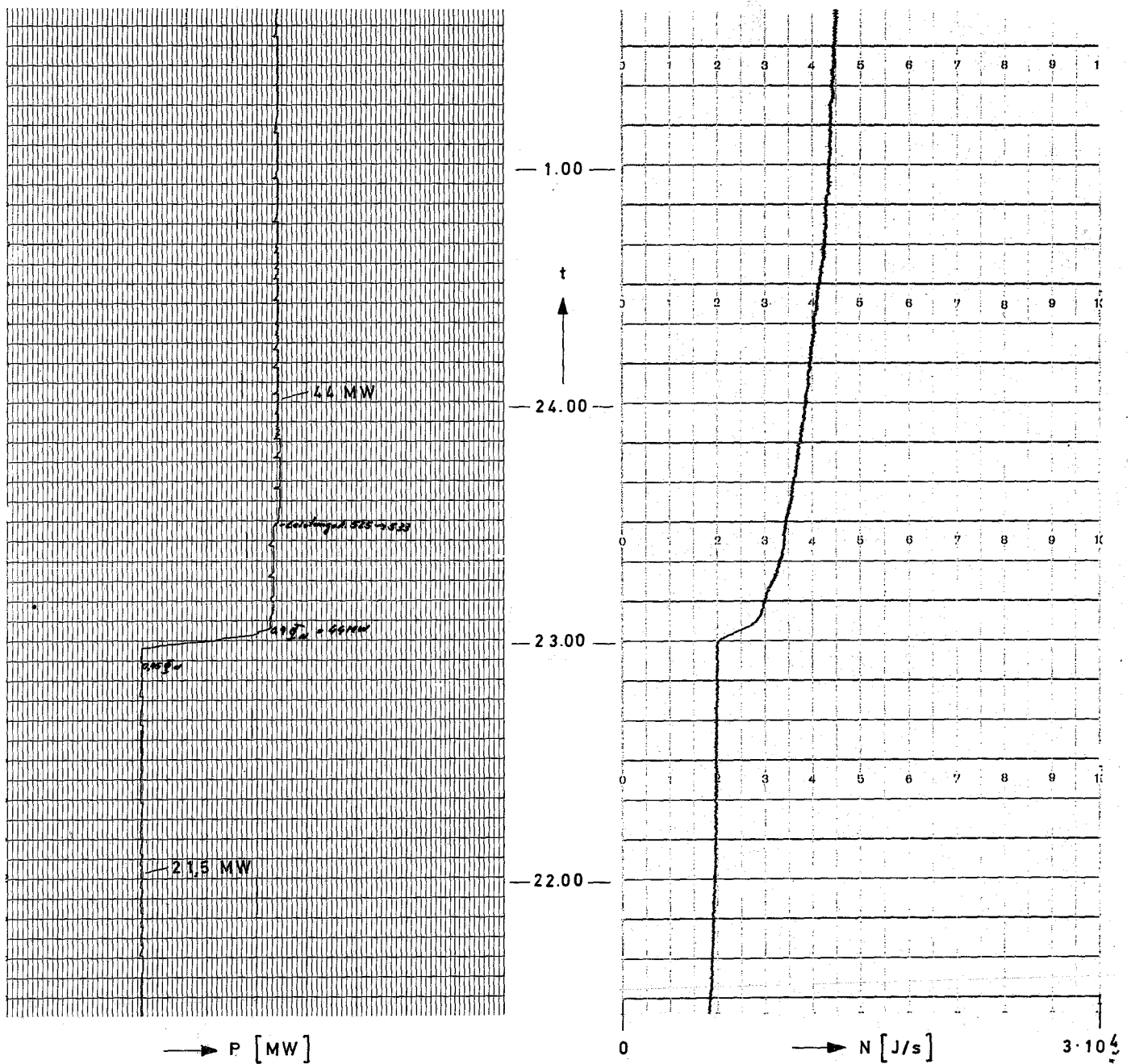


Abb. 5. FR 2 - Leistung P und Präzipitator - Zählrate N .
 Leistungserhöhung von ca. 50% auf 100% der
 Nennleistung am 28.1.1970 um 23.00 Uhr.
 Prüfling Nr. 3.

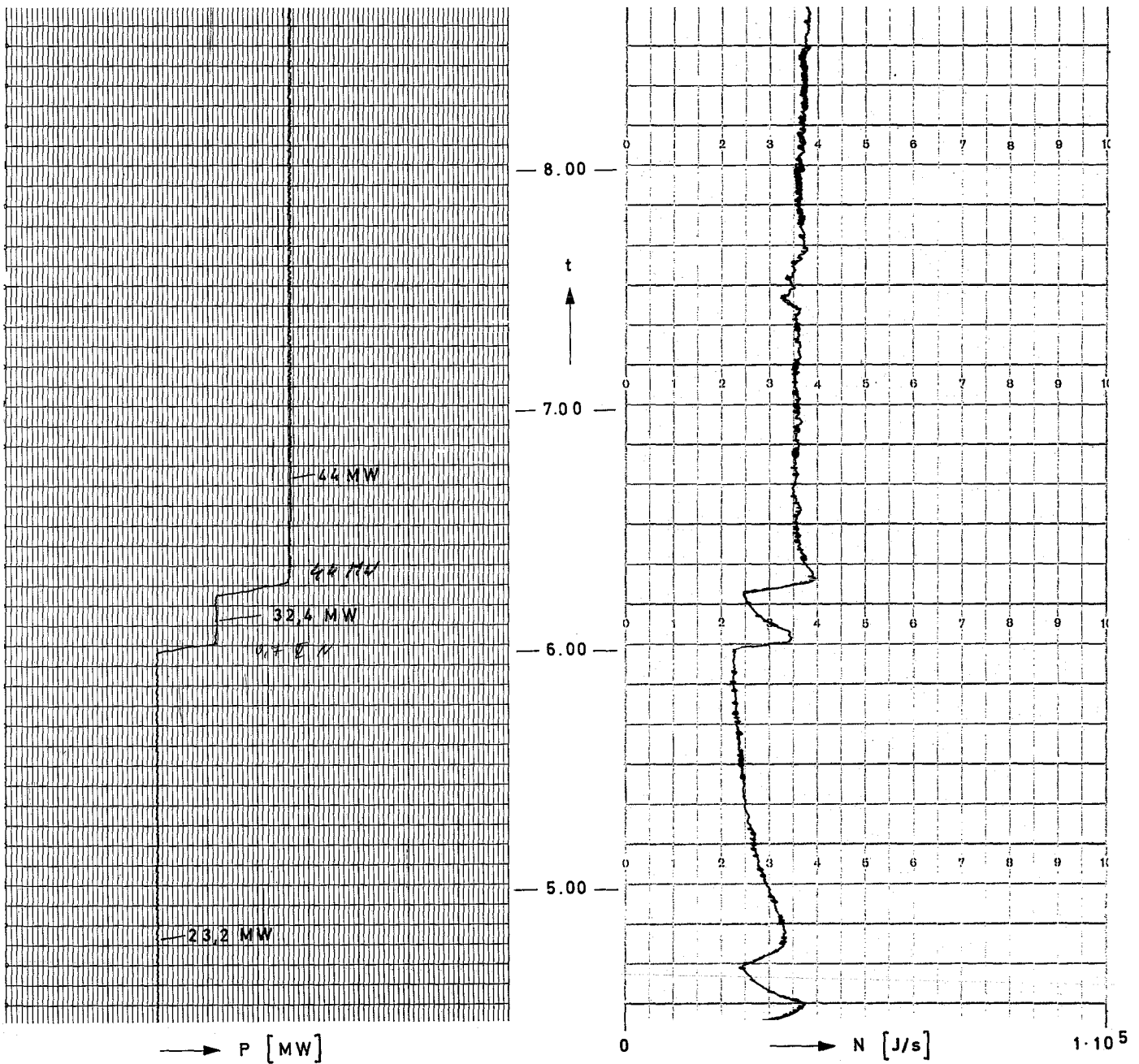


Abb. 6. FR 2 - Leistung P und Präzipitator - Zählrate N .
 Leistungserhöhung von ca. 50% auf 100% der
 Nennleistung am 13.3.1970 um 6.00 Uhr.
 Prüfling Nr. 4.

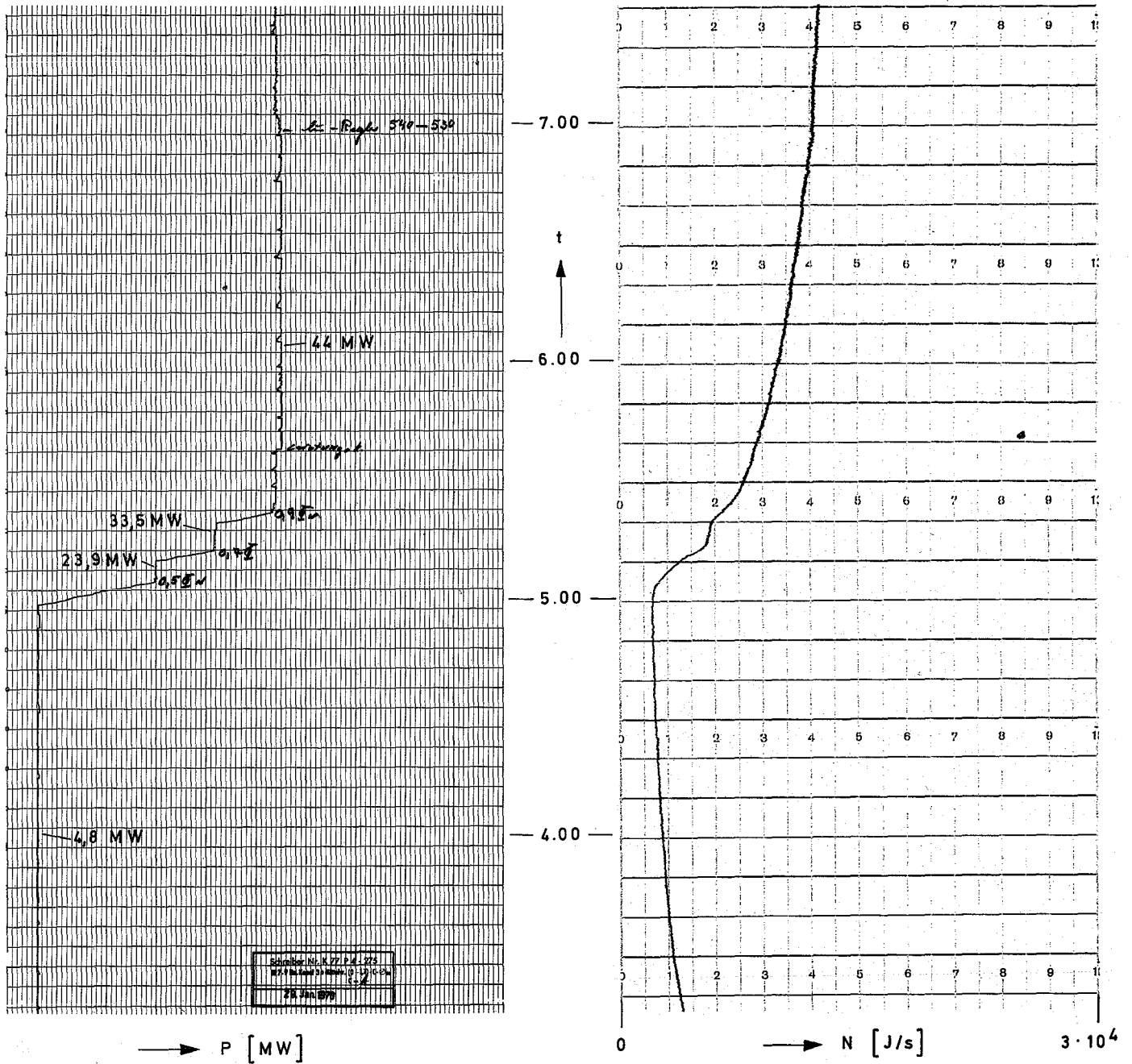


Abb. 7. FR 2 - Leistung P und Präzipitator - Zählrate N .
 Leistungserhöhung von ca. 10% auf 100% der
 Nennleistung am 29.1.1970 um 5.00 Uhr.
 Prüfling Nr. 3.

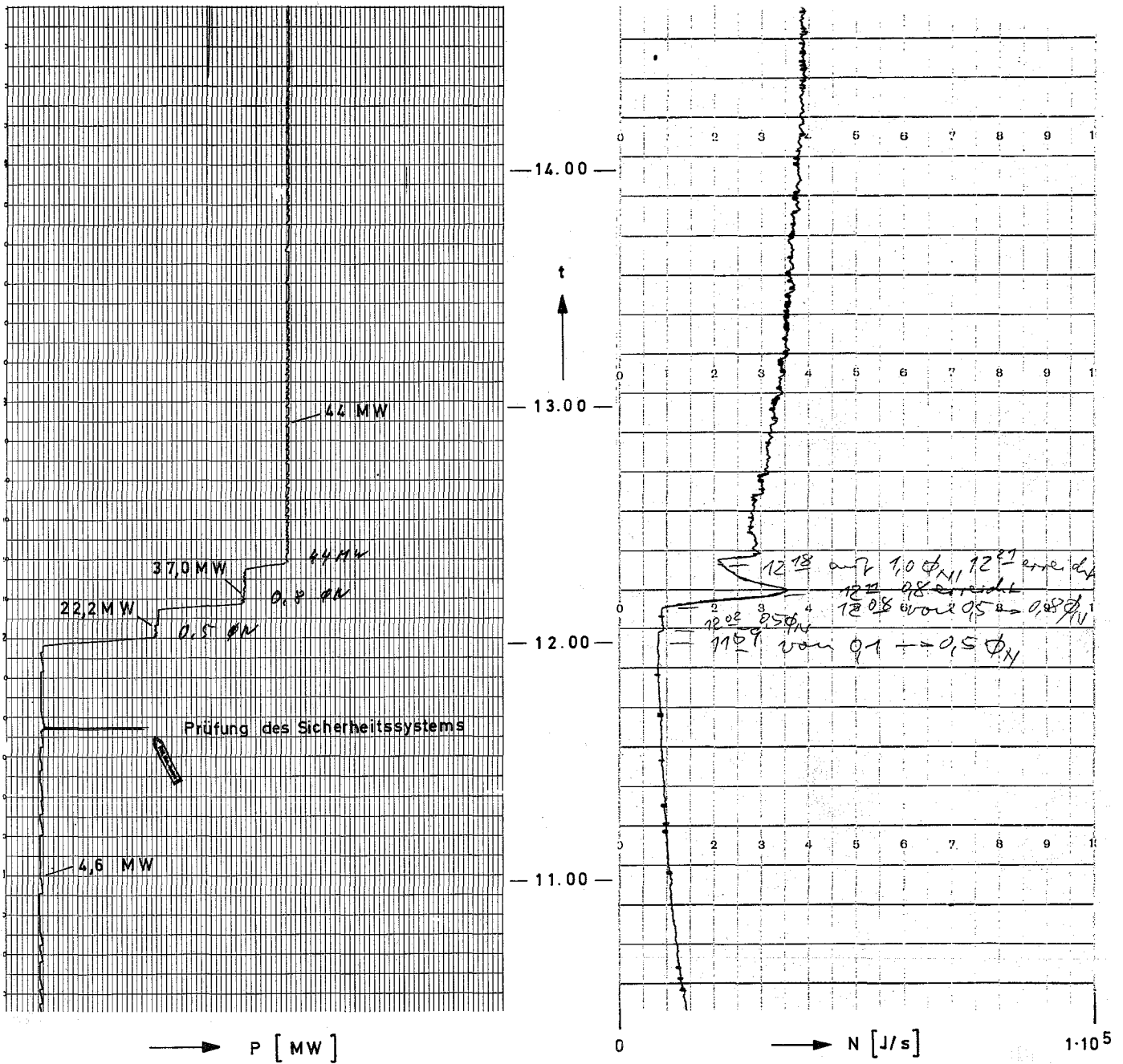


Abb. 8 FR 2 - Leistung P und Präzipitator - Zählrate N .
 Leistungserhöhung von ca. 10% auf 100% der
 Nennleistung am 13.3.1970 um 12.00 Uhr
 Prüfling Nr. 4.

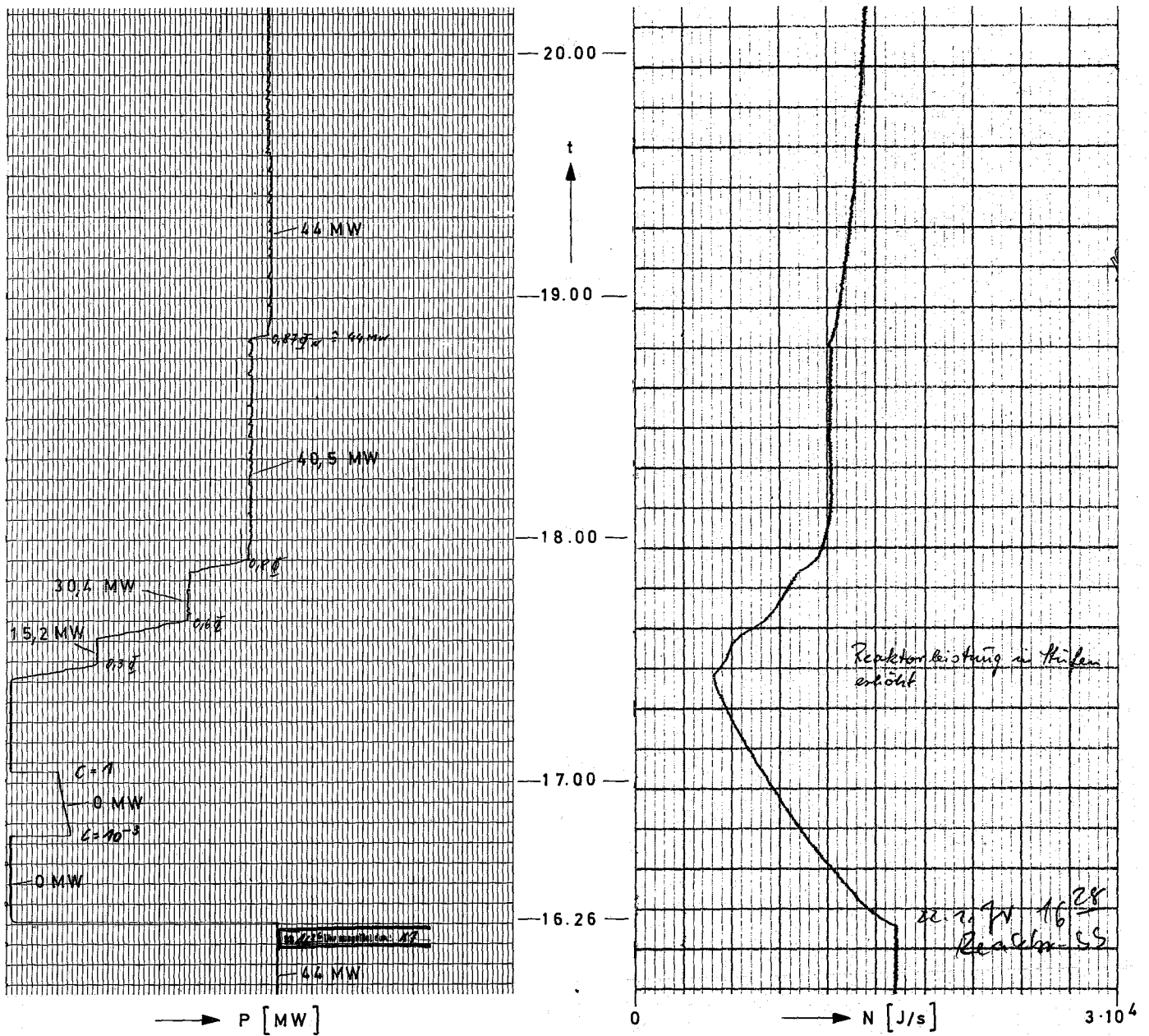


Abb. 9. FR 2 - Leistung P und Präzipitator - Zählrate N .
 Reaktorschnellschluß am 22.1.1970 um 16.26 Uhr und
 anschließender Reaktorstart. Prüfling Nr. 3.

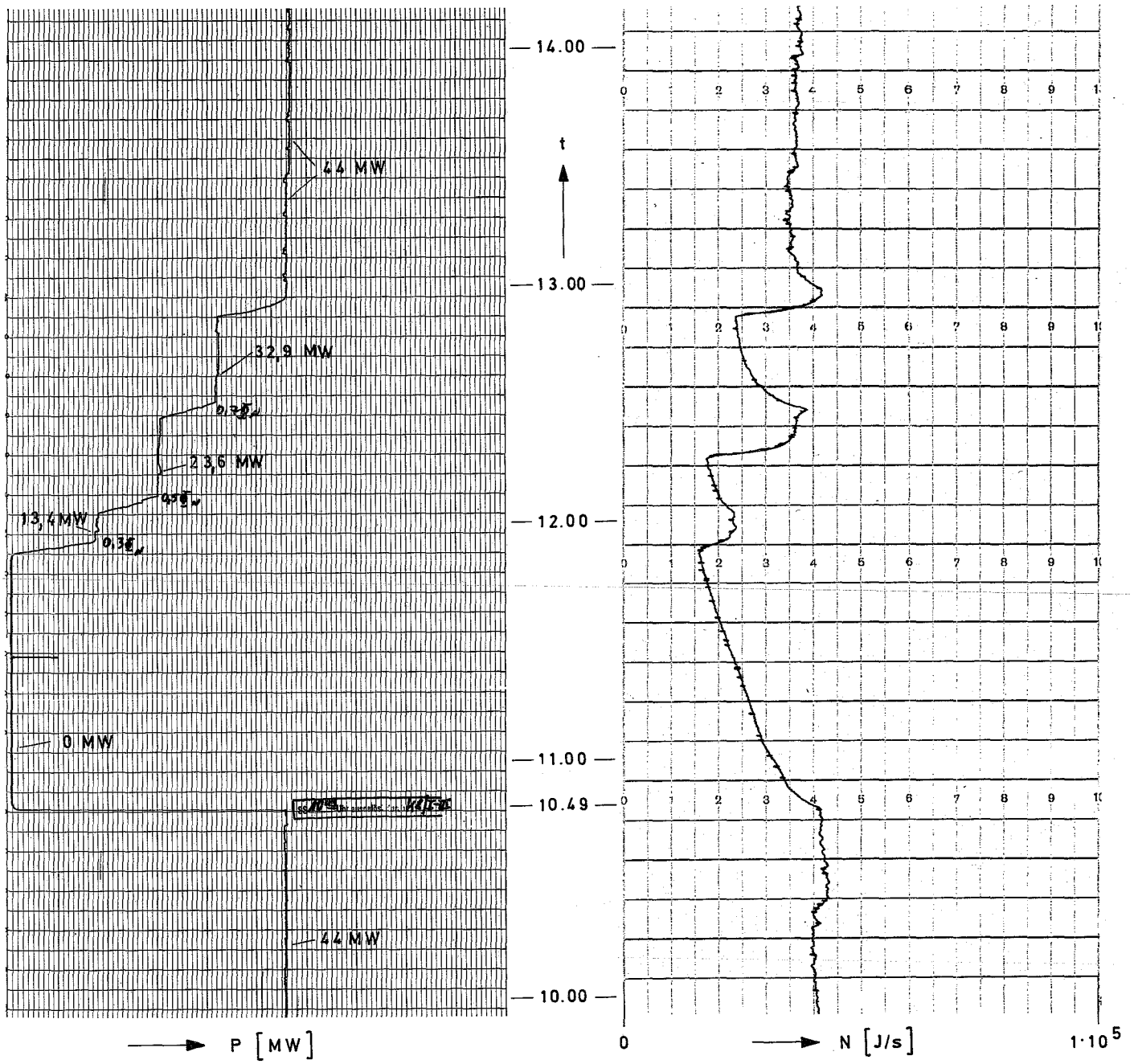


Abb.10. FR 2 - Leistung P und Präzipitator - Zählrate N .
 Reaktorschneßschluß am 10.3.1970 um 10.49 Uhr
 und anschließender Reaktorstart. Prüfling Nr. 4.

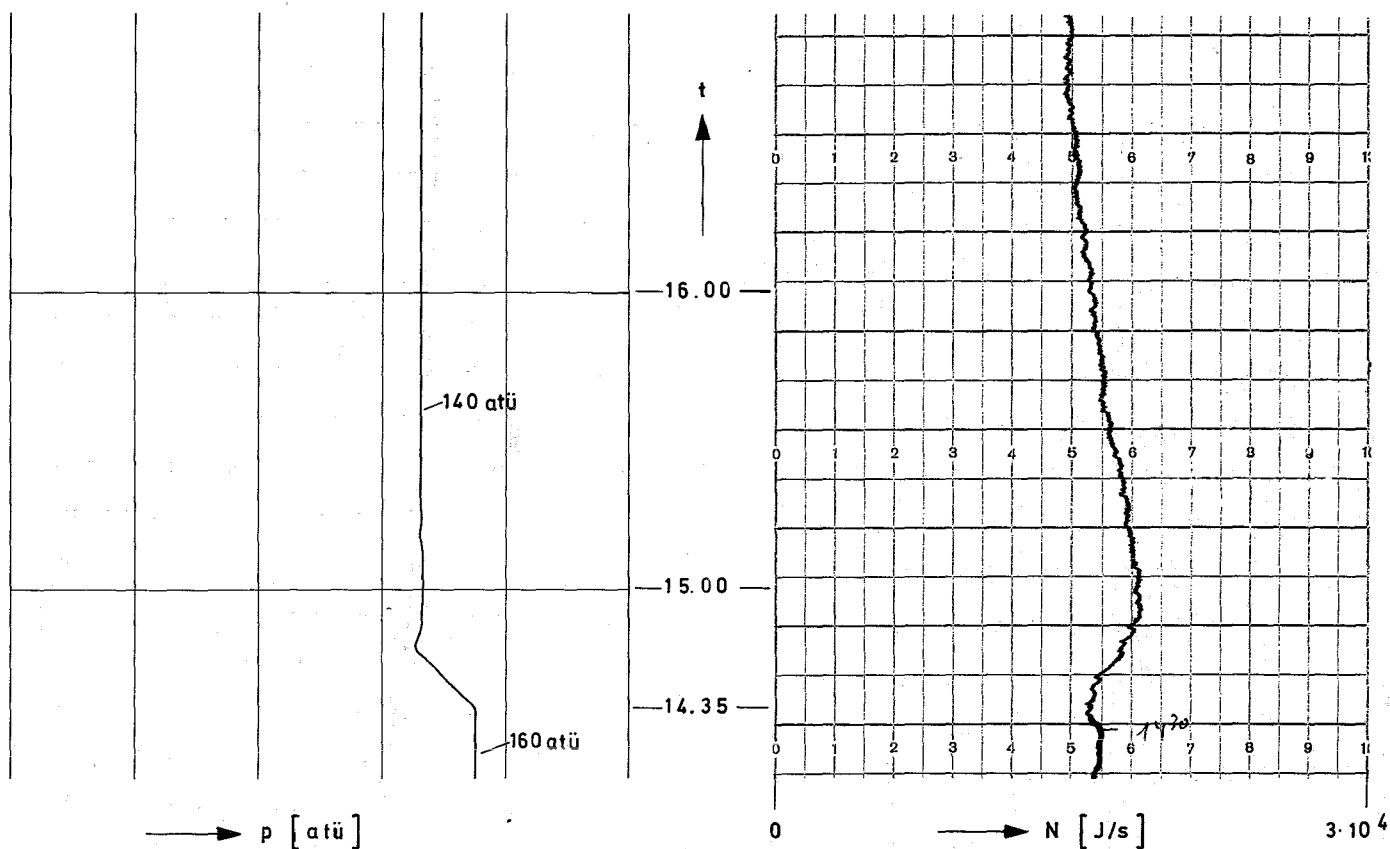


Abb.11. Dampfdruck p und Präzipitator - Zählrate N .
Druckreduzierung von 160 auf 140 atü am 30.1.1970
um 14.35 Uhr. Prüfling Nr. 3.

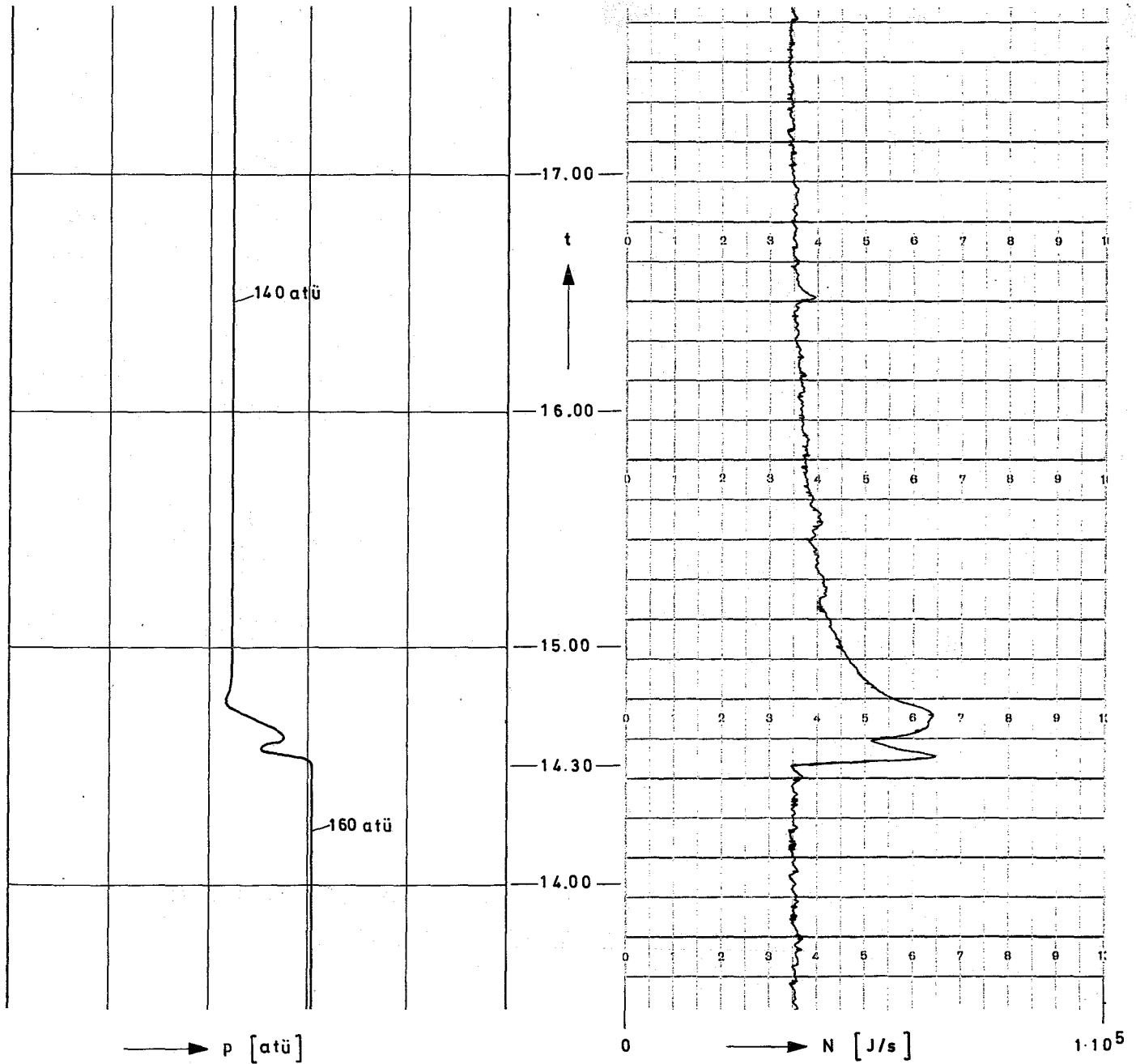


Abb.12. Dampfdruck p und Präzipitator - Zählrate N .
 Druckreduzierung von 160 auf 140 atü am 5.3.1970
 um 14.30 Uhr. Prüfling Nr. 4.

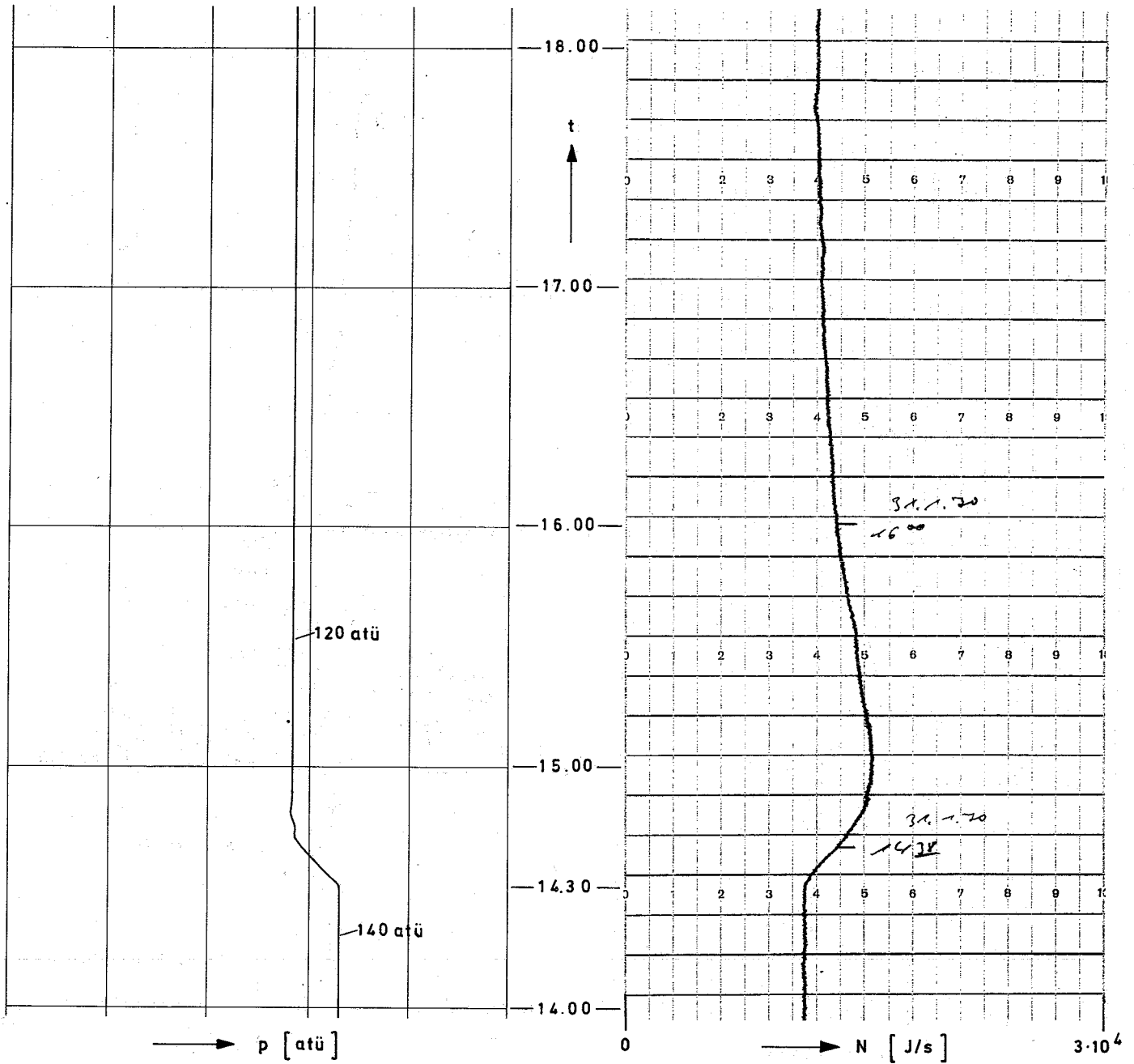


Abb.13. Dampfdruck p und Präzipitator - Zählrate N .
 Druckreduzierung von 140 auf 120 atü am 31.1.1970
 um 14.30 Uhr. Prüfling Nr. 3.

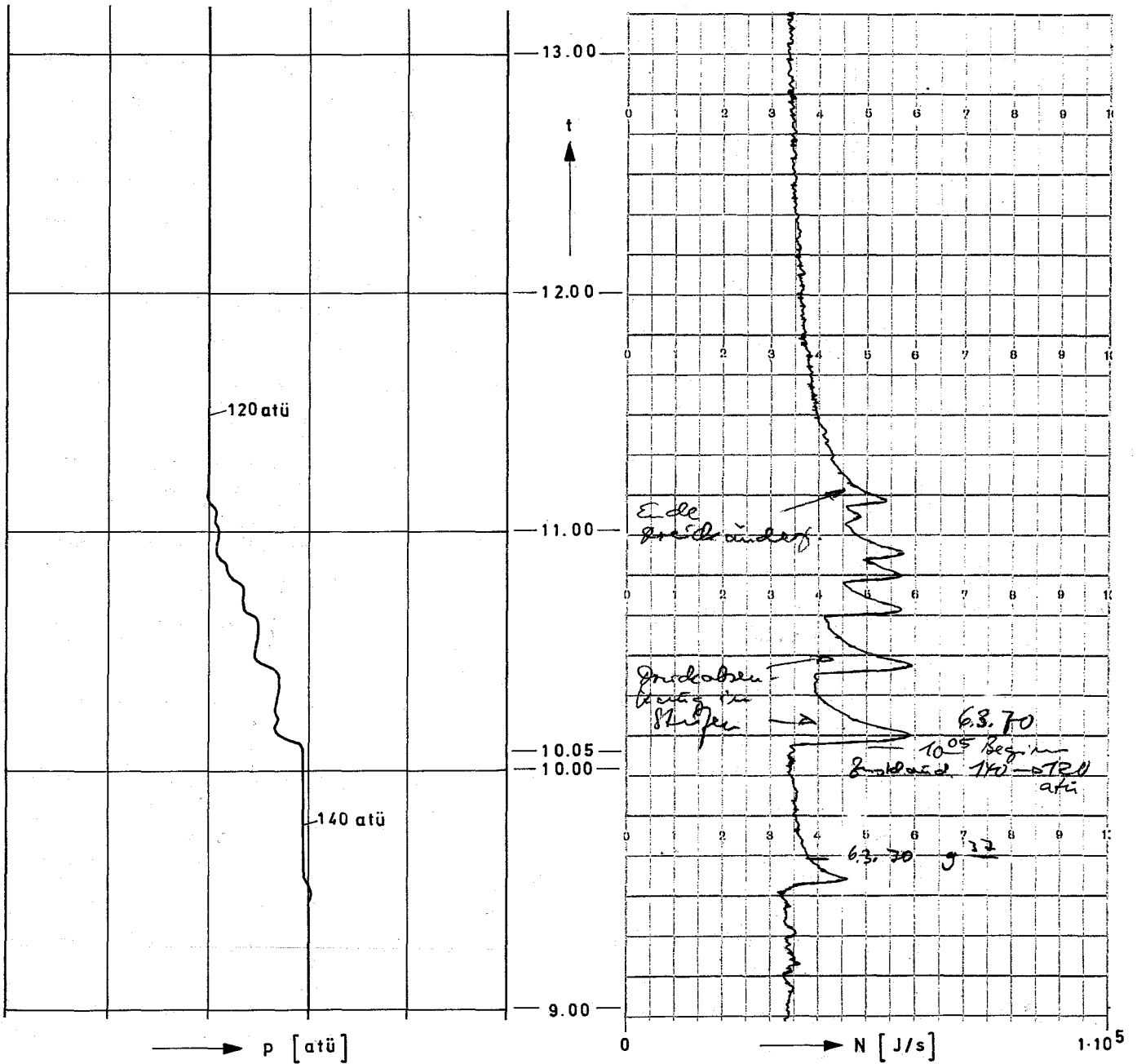


Abb. 14. Dampfdruck p und Präzipitator-Zählrate N.
 Druckreduzierung von 140 auf 120 atü am 6.3.1970
 um 10.05 Uhr. Prüfling Nr. 4.

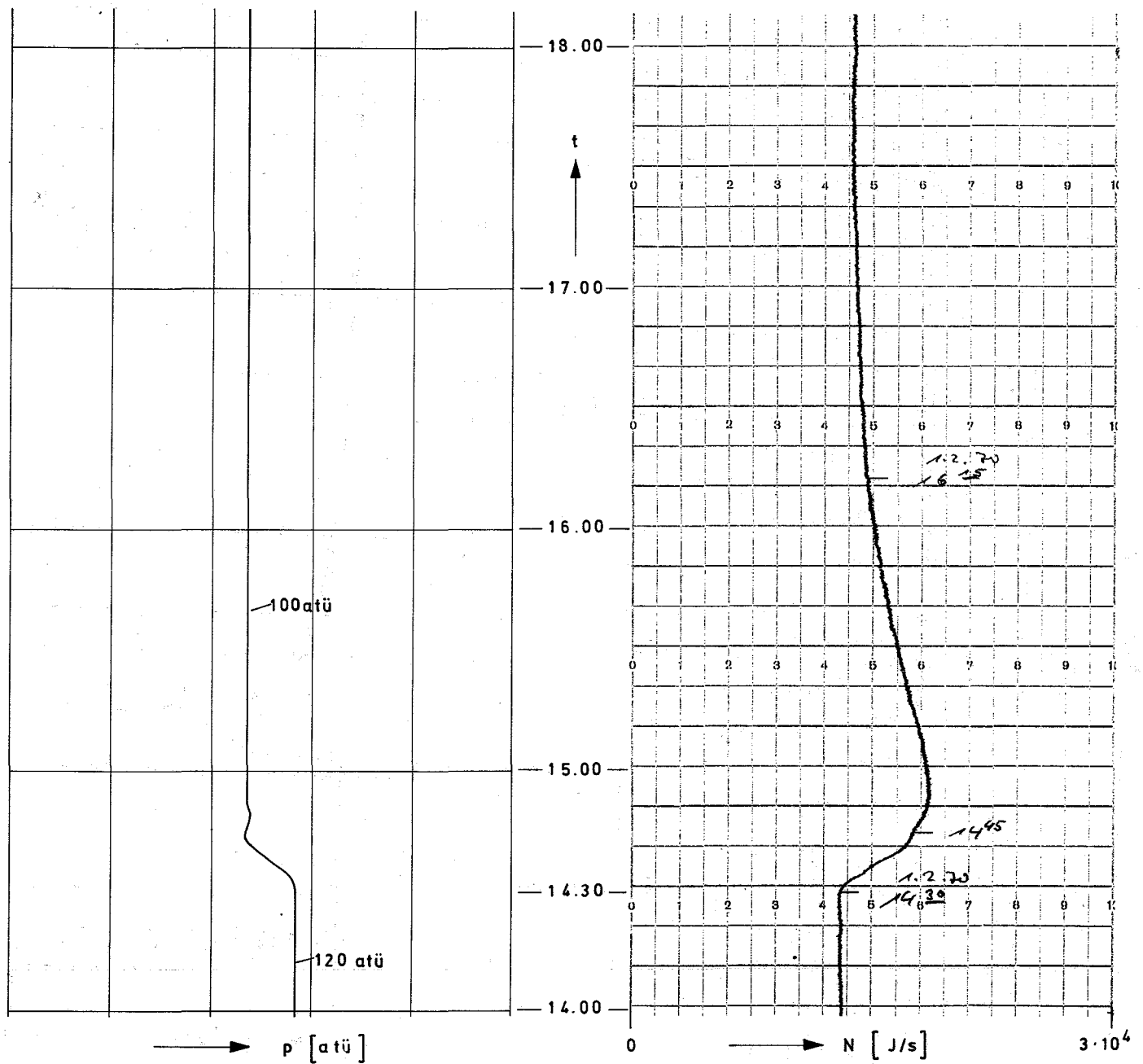


Abb. 15. Dampfdruck p und Präzipitator - Zählrate N .
 Druckreduzierung von 120 auf 100 atü am 1.2.1970
 um 14.30 Uhr. Prüfling Nr. 3.

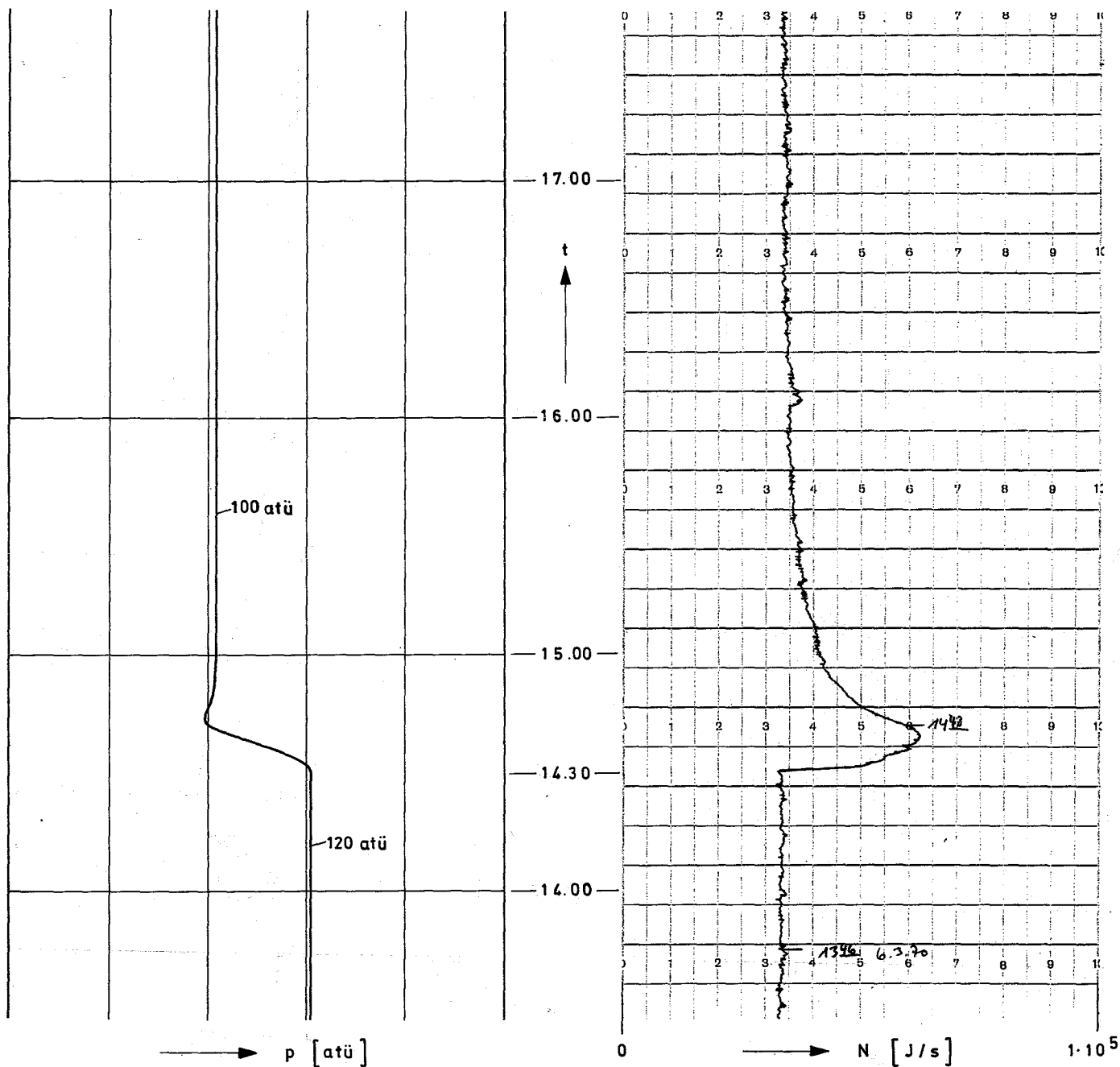


Abb. 16. Dampfdruck p und Präzipitator - Zählrate N .
 Druckreduzierung von 120 auf 100 atü am 6.3.1970
 um 14.30 Uhr. Prüfling Nr. 4.

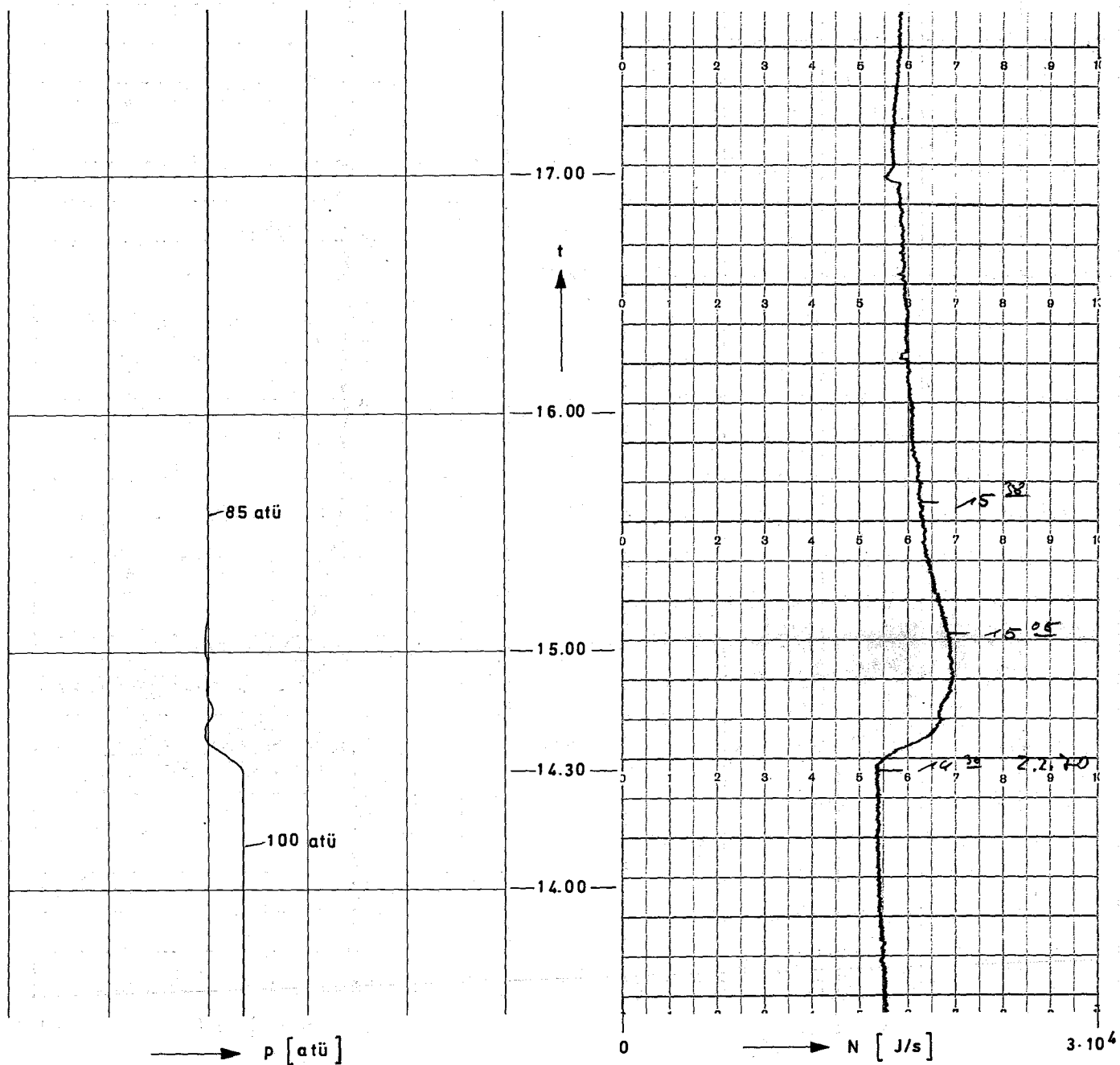


Abb. 17. Dampfdruck p und Präzipitator - Zählrate N .
 Druckreduzierung von 100 auf 85 atü am 2.2.1970
 um 14.30 Uhr. Prüfling Nr. 3.

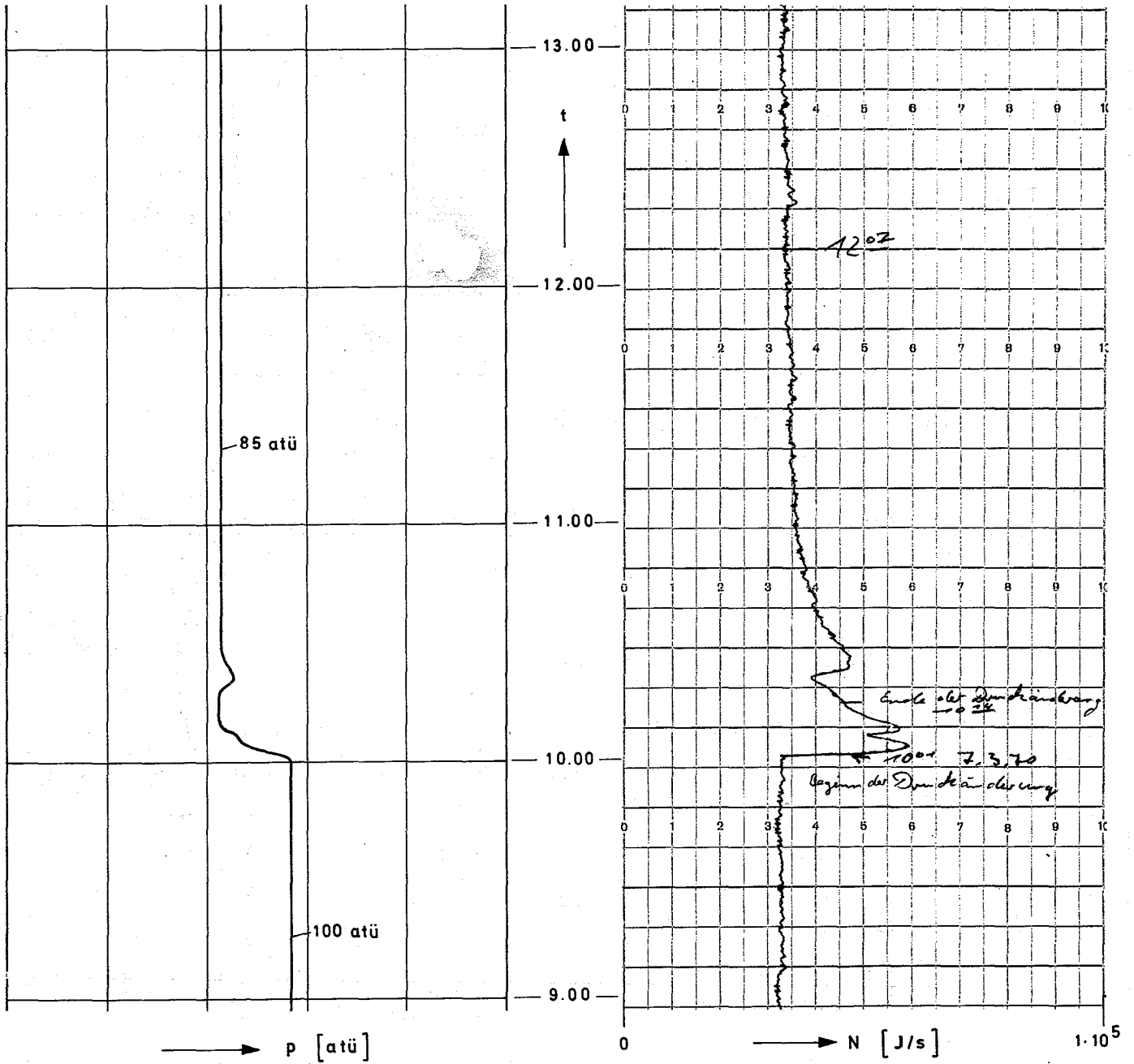


Abb.18. Dampfdruck p und Präzipitator - Zählrate N
 Druckreduzierung von 100 auf 85 atü am 7.3.1970
 um 10.00 Uhr. Prüfling Nr. 4.

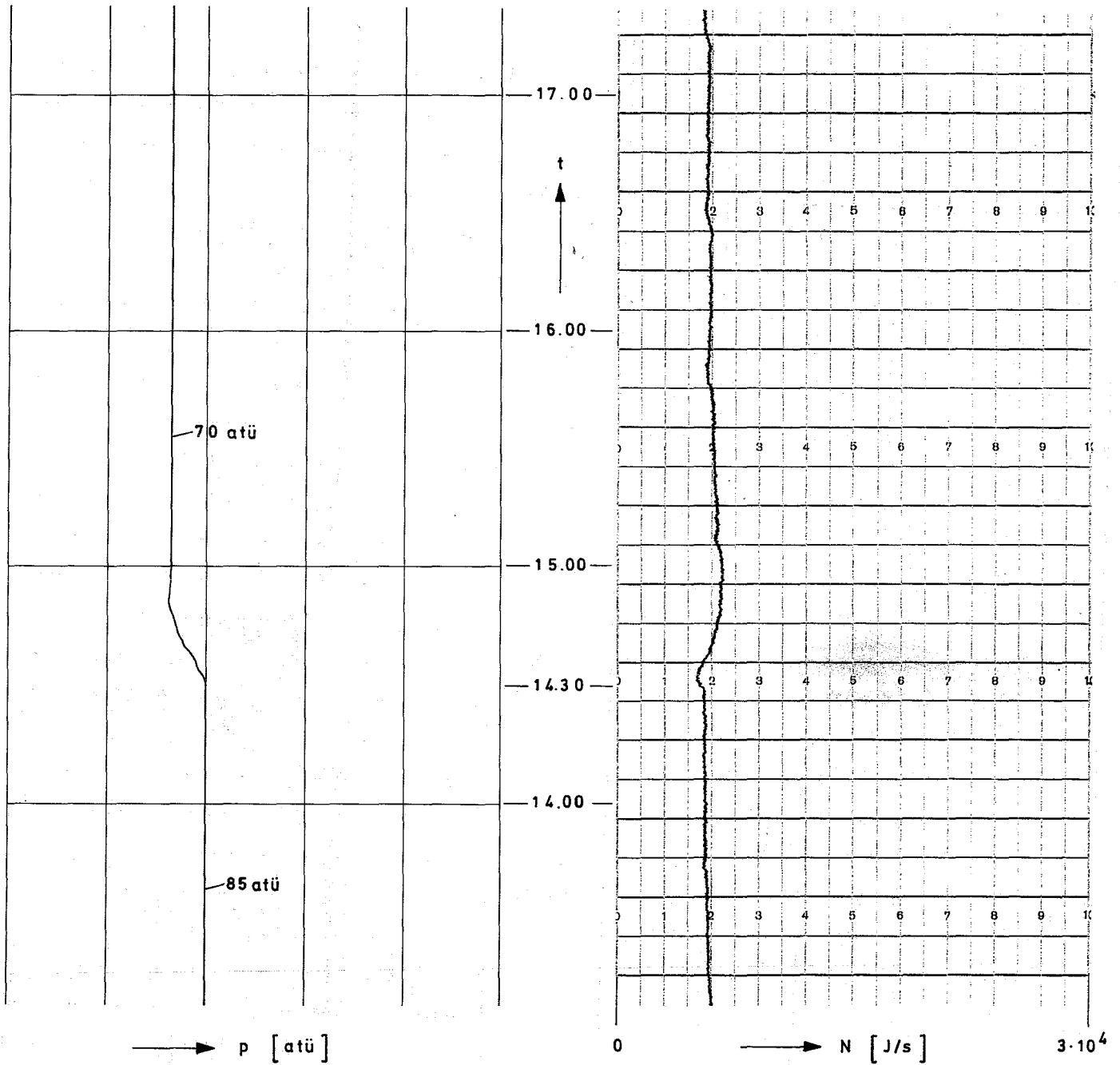


Abb.19. Dampfdruck p und Präzipitator - Zählrate N .
Druckreduzierung von 85 auf 70 atü am 3.2.1970
um 14.30 Uhr. Prüfling Nr. 3.

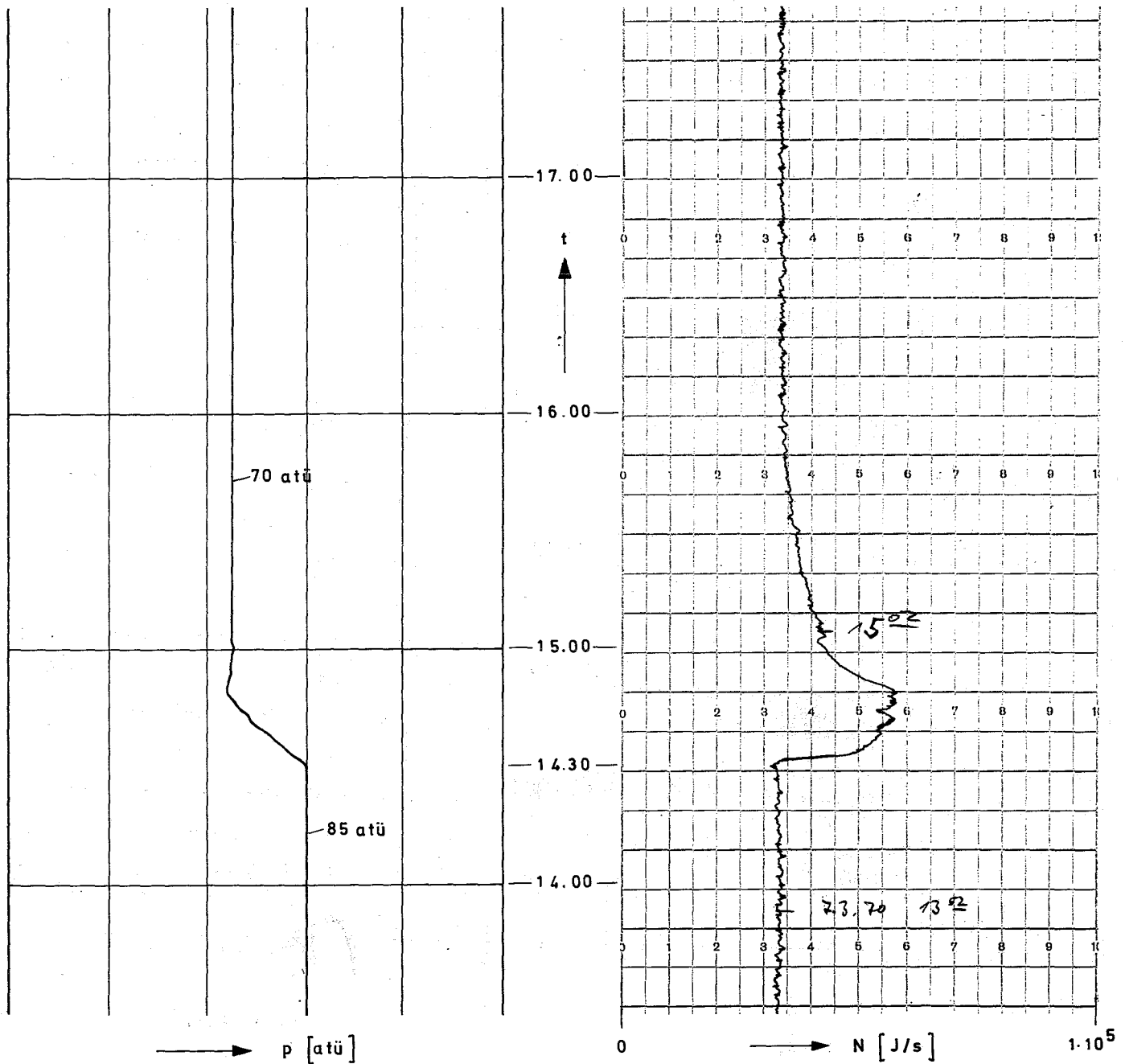


Abb. 20. Dampfdruck p und Präzipitator-Zählrate N .
 Druckreduzierung von 85 auf 70 atü am 7.3.1970
 um 14.30 Uhr. Prüfling Nr. 4.

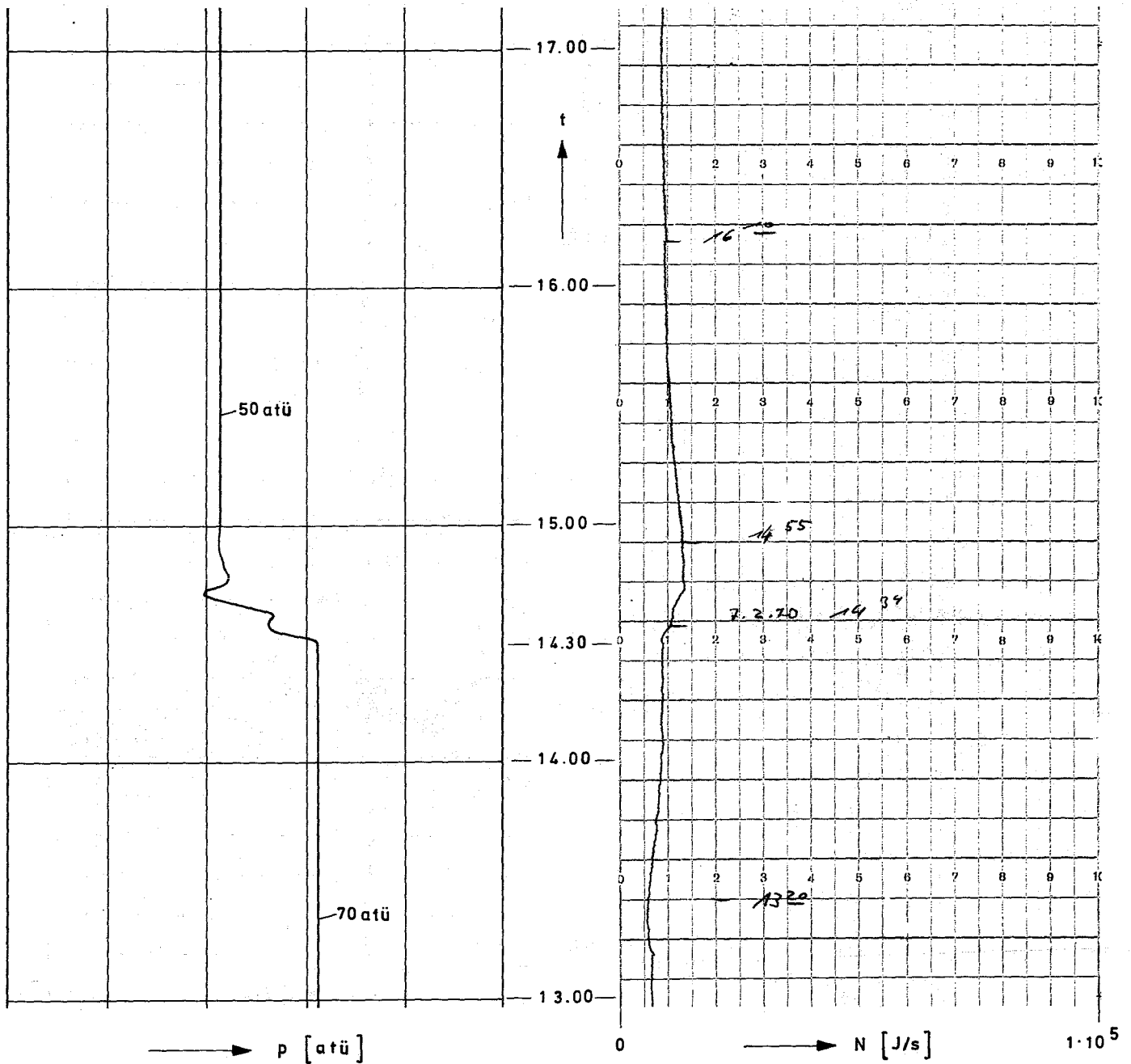


Abb. 21. Dampfdruck p und Präzipitator-Zählrate N.
 Druckreduzierung von 70 auf 50 atü am 7.2.1970
 um 14.30 Uhr. Prüfling Nr. 3.

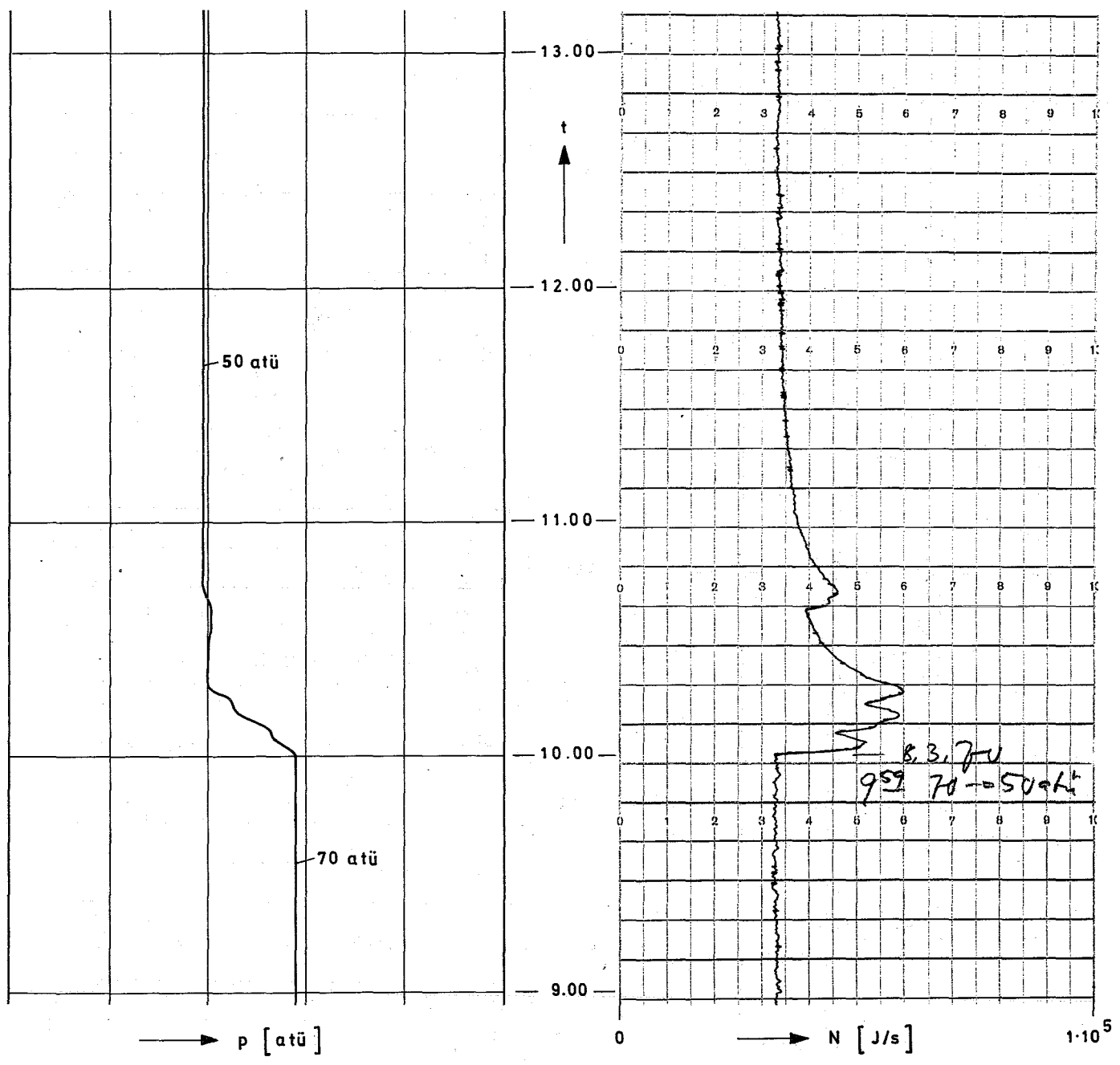


Abb.22. Dampfdruck p und Präzipitator - Zählrate N .
 Druckreduzierung von 70 auf 50 atü am 8.3.1970
 um 10.00 Uhr. Prüfling Nr. 4.

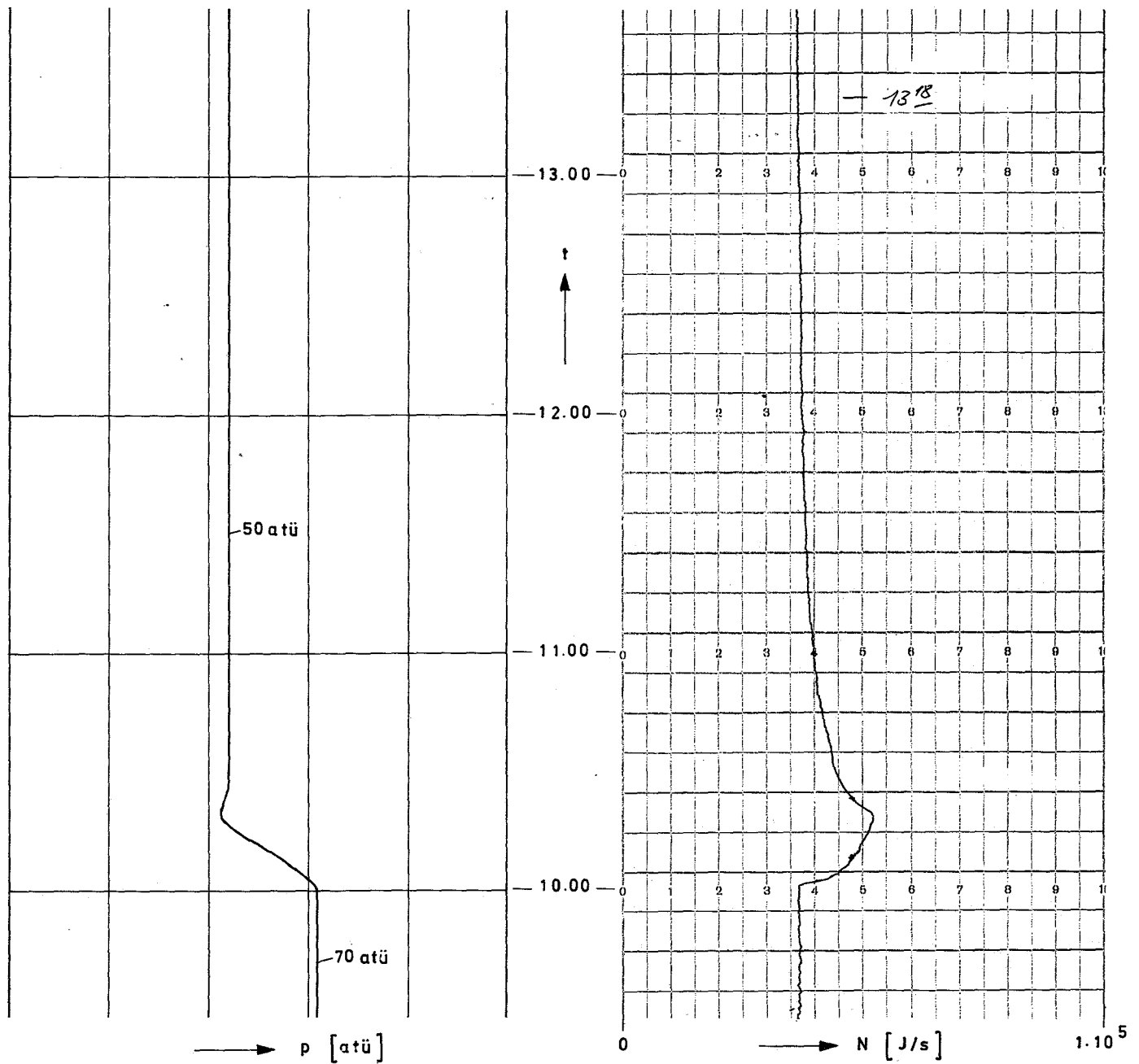


Abb. 23. Dampfdruck p und Präzipitator - Zählrate N.
 Druckreduzierung von 70 auf 50 atü am
 15.3.1970 um 10.00 Uhr. Prüfling Nr. 4.

