

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

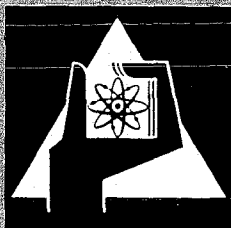
November 1971

KFK 1477

Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

Die Behandlung des mechanischen und thermischen Verhaltens  
von Brennstäben in SATURN 1

H. Kämpf, H. Elbel,  
F. Depisch, AEG-Großwelzheim



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

**Als Manuskript vervielfältigt**

**Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE**

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

November 1971

KFK 1477

Institut für Material- und Festkörperforschung

<sup>+</sup>AEG-Großwelzheim

Projekt Schneller Brüter

Die Behandlung des mechanischen und thermischen Verhaltens  
von Brennstäben in SATURN 1

---

von

H. Kämpf, H. Elbel, <sup>+</sup>F. Depisch

Vortrag gehalten auf der First International Conference on:  
Structural Mechanics in Reactor Technology, 20 - 24 September 1971

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

---

15.11.1971



## KURZFASSUNG

In SATURN 1 werden für einen Brennstab die radialen Verteilungen von Temperatur, Spannung, Porosität und der Geometrieänderungen in Abhängigkeit der Zeit berechnet. Die Betriebsbedingungen wie Stableistung, Hüllaußentemperatur und Außendruck sind zeitabhängige Eingabedaten. Entsprechend wird den stationären und den zyklischen Bedingungen Rechnung getragen. Die folgenden Materialphänomene, die für das mechanische und thermische Verhalten wesentlich sind, sind in SATURN 1 verknüpft: Kriechen von Brennstoff und Hülle, thermische Ausdehnung, Ribbildung, Spaltgasfreisetzung, Porenwanderung, Wärmedurchgang Brennstoff-Hülle. Drei thermisch-mechanische Zustände werden unterschieden: a) Brennstoff und Hülle in mechanischer Wechselwirkung, b) freistehender Brennstoff und Hülle unter Spannungen durch Gas- und Kühlmitteldruck, c) freistehende Hülle unter Spannungen mit und ohne Kontakt mit gerissenem Brennstoff, der frei von Spannungen vorausgesetzt wird. Drei Brennstoffzonen werden unterschieden, insbesondere im Hinblick auf unterschiedliches mechanisches Verhalten. Um die vielfältigen Möglichkeiten von SATURN 1 zu illustrieren, werden verschiedene Anwendungsbeispiele behandelt.

## ABSTRACT

In SATURN 1 the time history of a fuel pin concerning the radial distributions of temperature, stress, porosity and geometry changes is calculated. The operating fuel pin conditions such as linear rod power, outside temperature of the cladding and outside pressure are time dependent input data, so steady state and cyclic conditions are taken into account. The following material phenomena essential for the mechanical and thermal behaviour are interconnected in SATURN 1: creep of fuel and clad, swelling of fuel and clad, thermal expansion, crack formation, fission gas release, porosity migration, and heat transfer fuel-clad. Three thermal-mechanical states are distinguished: a) fuel and clad in mechanical interaction, b) freestanding fuel and clad stressed by gas and coolant pressure, and c) freestanding stressed clad in contact or not in contact with cracked fuel assumed to be free of stresses. Three fuel zones are distinguished especially with view to different mechanical behaviour. To demonstrate the manifold possibilities of SATURN 1 several illustrative applications are given.

## Inhalt:

1. Einleitung
2. Aufgabenstellung
3. Programmstruktur
  - 3.1 Mechanisch-thermische Phasen
  - 3.2 Zeitstruktur
  - 3.3 Kürzung von Rechenzeitintervallen
  - 3.4 Temperaturiterationen
4. Behandlung der Mechanik von Brennstoff und Hülle
  - 4.1 Voraussetzungen
  - 4.2 Lösungsverfahren
  - 4.3 Randbedingungen
  - 4.4 Zwei-Zonen-Brennstoff-Modell
  - 4.5 Spannungsfreie Volumenänderungen
5. Thermisches Verhalten von Brennstoff und Hülle
6. Anwendungen
  - 6.1 Beispiele zum mechanischen Verhalten
  - 6.2 Beispiele zum thermischen Verhalten
  - 6.3 Beispiele zum Zeitverhalten von Brennstäben für instationäre Betriebsbedingungen

## Literatur





## 1. Einleitung

Es ist offensichtlich geworden, daß die wesentliche Aufgabe der Brennstab-Modelltheorie die quantitative Behandlung des mechanischen und thermischen Verhaltens von Brennstäben in Abhängigkeit von der Betriebszeit für stationäre und zyklische Betriebsbedingungen darstellt.

Die verschiedenen Versionen des Rechenprogrammes SATURN (Schwellen Aabbrand Temperatur unter Reaktorbedingungen) verfolgen das Ziel, mit fortlaufenden Verbesserungen und Erweiterungen diese Aufgabe zu lösen. Die erste sehr grobe Näherung war die seit längerer Zeit fertiggestellte Version SATURN 0 [1]. Einen entscheidenden Fortschritt stellt die jetzige Version SATURN 1 dar. In SATURN 1 sind die für das mechanische und thermische Verhalten wesentlichen Phänomene in einer ersten Näherung modelltheoretisch verknüpft. Dabei beschränken wir uns in SATURN 1 auf die Behandlung einer Scheibe eines Brennstabes bzw. schließen die Betrachtung von Achsialabhängigkeiten aus. Eine einführende Vorstellung von SATURN 1 samt einiger Anwendungen erfolgte kürzlich [2]. Ein detaillierter Bericht mit Flußdiagrammen und ausführlicher Programmbeschreibung ist in Vorbereitung [3].

## 2. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung von SATURN 1 ist in Fig. 1 veranschaulicht. Ein Satz von Input-Daten liefert unter Verknüpfung der Materialphänomene die Output-Daten. Die Output-Daten bestehen im zeitlichen Verlauf der radialen Verteilungen von Temperatur, Spannung, Geometrie und Porosität, durch die ein mechanisch-thermischer Zustand bestimmt ist. Die Input-Daten sind einerseits durch die Startwerte von Geometrie und Porosität und durch die elementaren Materialdaten wie z.B. Wärmeleitfähigkeit der Hülle gegeben. Andererseits müssen die zeitabhängigen Brennstab-Betriebsbedingungen, d.h. Stabileistung, Hüllaußentemperatur und Außendruck eingegeben werden. Dies erfolgt tabellarisch zu bestimmten Zeitpunkten, wobei zwischen diesen Zeitpunkten linear interpoliert wird. Dadurch wird die Erfassung von stationären und zyklischen Betriebsbedingungen ermöglicht. Die in Fig. 1 aufgelisteten, für das thermische und mechanische Verhalten wesentlichen Materialphänomene sind einerseits durch analytische Beziehungen in Abhängigkeit von Temperatur, Spannung, Porosität u.a. gegeben, andererseits müssen die Phänomene durch geeignetes Modellieren der Behandlung zugänglich gemacht werden.

Die mechanisch-thermischen Zustände ändern sich einerseits durch Variation der Betriebsbedingungen, andererseits durch Ablaufen der materiellen Vorgänge bei konstanten äußeren Bedingungen. Dabei besteht die Schwierigkeit u.a. darin, daß durch Änderung der äußeren Bedingungen und Ablaufen der materiellen Vorgänge Temperatur, Spannung, Geometrie und Porosität sich gleichzeitig in gegenseitiger Abhängigkeit ändern. Dazu treten Komplikationen, wie die zur Rißbildung führende Sprödigkeit von oxidischem Brennstoff, großer radialer Plastizitätsgradient, Kompressibilität des Brennstoffes auf Grund seiner Porosität, Spannungsabhängigkeit des Gasschwellens u.a. auf. Nur durch Entwicklung von notwendigerweise umfangreichen Rechenprogrammen ist es möglich, die im Brennstab auftretenden Phänomene in ihrer wechselseitigen Beeinflussung zu behandeln und Aussagen über das komplexe Stabverhalten zu erhalten. Auf diesem Wege ist es möglich, Versagens- und Lebensdauer-Kriterien für Brennstabkonzepte herauszuarbeiten, die in gezielten Experimenten unter Beweis zu stellen sind.

### 3. Programmstruktur

Mittels des in Fig. 2 dargestellten Strukturdiagrammes wird gezeigt, wie in SATURN 1 die skizzierte Aufgabenstellung gelöst ist. Dabei wird in diesem Kapitel ausschließlich die externe Verknüpfung der Phänomene bzw. Unterprogramme behandelt, die interne Behandlung der Phänomene selbst erfolgt in den folgenden Kapiteln.

#### 3.1 Mechanisch-thermische Phasen

In SATURN 1 werden folgende drei mechanisch-thermische Phasen im Brennstab unterschieden, deren Auftreten von den "ja-kein"-Entscheidungen hinsichtlich der Existenz von Rissen, Kontaktdruck und Spalt Brennstoffhülle gesteuert werden.

- a) Mechanische Wechselwirkung von Brennstoff in Kontakt mit der Hülle. Spannungstheoretische Behandlung unter Berücksichtigung von Kriechen, Schwellen, thermischer Ausdehnung, Gasdruck im Falle eines Zentralkanals und Kühlmitteldruck.
- b) Sowohl Hülle als auch Brennstoff sind freistehend. Allgemeine spannungstheoretische Behandlung wie im vorhergehenden Fall, wobei aber beide Körper unter Gas- bzw. Kühlmitteldruck stehen.

- c) Vollständig oder partiell gerissener Brennstoff nach Maßgabe einer thermisch formulierten Rißbedingung mit oder ohne Kontakt mit der Hülle. Im Falle von Kontakt soll kein Kontaktdruck auftreten. Der Brennstoff in Form von Ringen und Keilen ist nur dem hydrostatischen Gasdruck ausgesetzt. Die Brennstoffvolumenänderungen durch thermische Ausdehnung und Schwellen erfolgen spannungsfrei. Die freistehende Hülle wird spannungstheoretisch wie im Fall b) behandelt.

### 3.2 Zeitstruktur

Zur Berechnung der zeitabhängigen mechanisch-thermischen Zustände wird die vorgegebene Betriebszeit in Rechenzeitintervalle aufgeteilt und sukzessive jeweils aus dem Anfangszustand eines Rechenzeitintervalles der Endzustand bestimmt. Da sich der mechanisch-thermische Zustand sowohl durch Variation der Betriebsbedingungen Stabileistung, Hüllaußentemperatur und Außendruck ändert als auch durch Ablaufen der materiellen Vorgänge, ist eine Trennung beider Einflüsse erstrebenswert. Dies wird dadurch ermöglicht, daß die Änderung der äußeren Bedingungen sprunghaft am Anfang des Zeitintervalls vorgenommen wird und die sprunghaften Änderungen des mechanisch-thermischen Zustandes berechnet werden. Diese bestehen in Änderungen der Temperatur und des elastischen Spannungs- und Verformungszustandes von Brennstoff und Hülle bzw. gegebenenfalls in der spannungsfreien thermischen Ausdehnung des Brennstoffes. Das Auftreten von Rissen wird nur bei diesen sprunghaften Änderungen der äußeren Bedingungen zugelassen. Von diesem so berechneten Anfangszustand dieses Zeitintervalls wird anschließend bei konstant gehaltenen äußeren Bedingungen der Endzustand des Rechenzeitintervalls auf Grund der Langzeiteffekte Kriechen, Schwellen und Porenwanderung berechnet.

### 3.3 Kürzung von Rechenzeitintervallen

In SATURN 1 treten zwei externe Kürzungen von Rechenzeitintervallen auf. Die erste Kürzung tritt ein, wenn ein Wechsel der Phase von freistehender Hülle und Brennstoff zur Kontaktphase dadurch auftritt, daß der berechnete Brennstoffradius unzulässig größer als der berechneten Hüllinnenradius ist. Dies gilt sowohl für den Fall von gerissenem Brennstoff als auch von unter Spannung stehendem Brennstoff. Die zweite Kürzung von externen Rechenzeitintervallen bezieht sich auf den Temperaturunterschied zwischen Anfangs- und Endzustand eines Zeitintervalls.

Ist dieser Temperaturunterschied auf Grund der ablaufenden Langzeiteffekte unzulässig groß, tritt eine Zeitintervallkürzung ein. In beiden Fällen muß ein Rücksprung an das Ende des vorhergehenden Zeitintervalls erfolgen, wenn sich in dem betreffenden Zeitintervall die äußeren Bedingungen ändern. Zu erwähnen ist, daß interne Zeitintervallkürzungen in den Mechanik- und Porositätswanderungs-Unterprogrammen möglich sind.

### 3.4 Temperaturiterationen

Bei der Konzeption von SATURN 1 wurde davon ausgegangen, daß die Temperatur der Parameter ist, von dem die Materialphänomene innerhalb eines Rechenzeitintervalls am empfindlichsten abhängen. Dies findet seinen Niederschlag in zwei externen Temperatur-Iterationsschleifen.

Die erste bezieht sich auf die Berechnung des Sprunges am Anfang des Zeitintervalls. Die Iteration der Temperatur erfolgt in Bezug auf den Wärmeübergang zwischen Brennstoff und Hülle, wobei im Kontaktfall der Kontaktdruck, bei Vorhandensein eines Spaltes die Spaltbreite ausiteriert wird. Im Falle des Spaltes wird mit der Ausgangsspaltbreite und den geänderten äußeren Bedingungen eine neue Temperaturverteilung und mittels der thermischen Ausdehnung eine neue Spaltbreite bestimmt. Da die wahre Spaltbreite zwischen beiden liegen muß, wird mit der mittleren Spaltbreite eine neue Temperaturverteilung bestimmt. Über die thermische Ausdehnung, die eine neue Spaltbreite ergibt, läßt sich eine weitere Temperaturverteilung bestimmen. Stimmen beide Temperaturverteilungen hinreichend überein, ist Konvergenz erreicht. Das Verfahren im Falle des Kontaktdruckes ist analog.

Die zweite externe Iterationsschleife bezieht sich auf die Berechnung innerhalb des Zeitintervalls bei konstanten äußeren Bedingungen. Die Langzeitvorgänge Kriechen, Schwellen und Porenwanderung ändern die Geometrie und damit auch die Temperaturverteilung. Überschreitet diese Änderung der Temperaturverteilung vom Anfangszustand bis zum Endzustand eine vorgegebene Schranke, so wird vor Berechnung einer neuen Mitteltemperatur für die Langzeitvorgänge der Endzustand analog dem Anfangszustand bezüglich der Temperatur ausiteriert.

#### 4. Behandlung der Mechanik von Brennstoff und Hülle

##### 4.1 Voraussetzungen

Die spannungstheoretischen Voraussetzungen für die in SATURN 1 möglichen Zustände sind Axialsymmetrie und ebene axiale Verformung. Dann ist das Zylinderkoordinatensystem das Hauptachsensystem, in dem Schubspannungen und Verformungen verschwinden und die verbleibenden Hauptdehnungen und Spannungen nur radiusabhängig sind. Unter diesen speziellen Voraussetzungen vereinfachen sich die Gleichgewichtsbedingungen und die Beziehungen zwischen den Gesamtdehnungen und den Gesamtverschiebungen.

Die weiterhin notwendigen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen sind dadurch gegeben, daß sich die Komponenten der Gesamtverformung aus folgenden Termen zusammensetzen:

- a) Einem elastischen Anteil, der durch das lineare Hookesche-Gesetz gegeben ist,
- b) einem bleibenden Anteil, dessen Zuwächse durch die Söderberg-Gleichungen nach Maßgabe eines sekundären Kriechgesetzes gegeben sind,
- c) einem thermischen Ausdehnungsterm und
- d) einem Schwellterm.

Die beiden Terme der thermischen Ausdehnung und des Schwellens sind die freien relativen Längenänderungen im Falle, daß ein nicht poröser Körper vorliegt und beide Ausdehnungen spannungsunabhängig sind. Im Falle porösen Materials und spannungsabhängiger Ausdehnung, z.B. durch Gas-schwellen, bedeuten diese Terme die relativen Längenänderungen bei hydrostatischem Druck. In SATURN 1 wird die Rückwirkung der Spannungsverteilung auf die thermische Ausdehnung und das Schwellen des porösen Brennstoffes nicht berücksichtigt. Zwei thermische Ausdehnungskoeffizienten und zwei Schwellraten tragen phänomenologisch der gleichzeitigen äußeren Längenänderung und der Porositätsänderung Rechnung. Dabei ist zu beachten, daß in den Spannungs-Dehnungs-Beziehungen nur die inhomogenen Anteile der thermischen Ausdehnungen und des Schwellens enthalten sind. Die homogenen, zu keinen Spannungen führenden Anteile ergeben mit der Startgeometrie die spannungsfreie Bezugsgeometrie.

## 4.2 Lösungsverfahren

Die oben erwähnten Beziehungen können in eine Differentialgleichung für die radiale Verschiebung zusammengefaßt werden. Die zweimalige Integration dieser Gleichung führt auf den dreiaxialen Dehnungs- und Spannungszustand in Abhängigkeit vom Radius und von der Zeit.

Die Lösung des Problems wird in enger Anlehnung an [4] mit Hilfe eines Dehnungsiterationsverfahrens erreicht. Dieses Verfahren ist folgendermaßen aufgebaut: Aus dem Anfangsspannungszustand werden Kriechdehnungen abgeleitet, die als erste Schätzwerte für die zu erwartenden Kriechdehnungen am Ende eines sog. Iterationszeitintervalles dienen. Unter Verwendung dieser Schätzwerte wird der Spannungszustand am Ende des Iterationszeitintervalls berechnet.

Im nächsten Schritt wird für das Zeitintervall aus Anfangs- und Endzustand ein mittlerer Spannungszustand bestimmt. Diesem entspricht eine mittlere Kriechrate, aus der neue Kriechdehnungen und somit ein neuer Spannungszustand für das Ende des Zeitintervalls folgen.

Dieses Verfahren wird solange wiederholt, bis Änderungen der Kriechrate unter eine vorgegebene Schranke fallen.

Die Länge des Iterationszeitintervalls wird anhand der notwendigen Voraussetzung bestimmt, daß der Unterschied des Spannungszustandes am Ende gegenüber dem am Anfang eine bestimmte Schranke nicht überschreitet. Das bedeutet eine Beschränkung der im Zeitintervall zulässigen Kriechdehnungen. Je nach Größe der Kriechrate folgt daraus eine bestimmte zulässige Länge des Iterationszeitintervalls. Eine Kürzung dieses Intervalls tritt ein, wenn entweder die Zahl der Iterationen einen bestimmten Wert oder wenn der absolute Kriechzuwachs eine vorgegebene Schranke überschreitet.

## 4.3 Randbedingungen

Im Falle der freistehenden Hülle und des Brennstoffes müssen die jeweils auftretenden drei Integrationskonstanten durch die folgenden drei Randbedingungen bestimmt werden:

- a) Für den Innenradius ist die radiale Druckkomponente gleich dem Innendruck im Falle des Hohlzylinders. Im Falle des Vollzylinders muß die radiale Verschiebung im Mittelpunkt verschwinden.

- b) Für den Außenradius ist die radiale Druckkomponente gleich dem Außendruck.
- c) Das Flächenintegral der axialen Spannungskomponente ist gleich der durch Innen- und Außendruck gegebenen Axialkraft.

Im Falle des Kontaktes zwischen Brennstoff und Hülle müssen sechs Integrationskonstanten aus sechs Randbedingungen ausgerechnet werden. a) und b) bleiben ungeändert. Weiterhin gelten für die Grenzfläche Brennstoff-Hülle die beiden radialen Randbedingungen: Radialspannung und -verschiebung von Brennstoff und Hülle müssen gleich sein. Die beiden restlichen Randbedingungen beziehen sich auf die axiale Wechselwirkung. Während der allgemeine Fall der Reibung in SATURN 1 nicht behandelt wird, können die zwei Grenzfälle der Haftung und des reibungslosen Gleitens erfaßt werden. Im Falle der Haftung sind die beiden axialen Randbedingungen dadurch gegeben, daß die axiale Gesamtverformung von Brennstoff und Hülle gleich ist und das gesamte Flächenintegral der axialen Spannungskomponente über Brennstoff und Hülle durch die Axialkraft gegeben ist. Im Falle des reibungsfreien Gleitens sind die einzelnen Flächenintegrale sowohl für den Brennstoff als auch für die Hülle jeweils durch die entsprechende Axialkraft gegeben.

#### 4.4 Zwei-Zonen-Brennstoff-Modell

Im Brennstoff treten im Vergleich zur Hülle i.A. deutlich höhere Kriechraten auf. Das kann dazu führen, daß in den inneren Bereichen die Kriechrate des Brennstoffes die Schwellgeschwindigkeit bzw. die Geschwindigkeit der Änderung der thermischen Ausdehnung stark übersteigt. In diesem Falle liegt in diesen Brennstoffzonen ein dem Gasdruck entsprechender hydrostatischer Spannungszustand vor. Der Brennstoff wird deshalb in zwei Zonen aufgeteilt. Nur die äußere Brennstoffzone muß spannungstheoretisch behandelt werden. Die Verformungen in der inneren unter hydrostatischem Druck stehenden Zone erfolgen spannungsfrei. Wegen der sehr starken Temperaturabhängigkeit der Kriechrate bei höheren Temperaturen ist die Grenze zwischen den beiden Zonen durch eine Temperatur charakterisiert. Der Wert dieser Grenztemperatur hängt davon ab, ob stationäre oder zyklische Betriebsbedingungen vorliegen. Numerische Ergebnisse werden in Kap. 6 angegeben.

#### 4.5 Spannungsfreie Volumenänderungen

Bevor die spannungstheoretische Behandlung der äußeren Brennstoffzone erfolgt, wird mit Hilfe folgender thermisch formulierter Rißbedingung überprüft, ob diese Zone im gerissenen Zustand vorliegt: Wenn die Temperaturänderung pro Zeiteinheit eine vorgegebene Schranke überschreitet und die mittlere Temperatur der äußeren Zone unterhalb einer kritischen Temperatur liegt, reißt der Brennstoff auf. Die Volumenänderung des gesamten Brennstoffs wird dann spannungsfrei berechnet. Der dabei auftretende spannungsfreie Zustand des gesamten Brennstoffes ist allgemein dadurch charakterisiert, daß oberhalb einer bestimmten Grenztemperatur eine rißfreie innere Zone vorliegt, an die sich nach außen hin beliebig viele radial gerissene Bruchstücke anschließen. Die durch die Rißbildung begrenzte plastische rißfreie Zone kann sich durch Porenwanderung und durch Ausheilen von Rissen auf Grund von Volumenzunahme vergrößern.

Die Geometrie zu einem bestimmten Zeitpunkt ist erstens durch freie thermische Ausdehnung bzw. durch freies Schwellen in der plastischen Zone und in den gerissenen Keilen bestimmt. Zweitens ist für die Geometrie ein Fixpunkt maßgebend, der gemäß Fig. 3 in differenzierter Weise bestimmt wird. Die zeit- und ortsabhängige Berechnung des Rißvolumens ermöglicht es, den Zeitpunkt zu ermitteln, ab dem die spannungstheoretische Behandlung des Brennstoffes einsetzen muß. Dieser Zeitpunkt ist erreicht, wenn die Risse bis zu einer vorgegebenen Temperatur ausgeheilt sind.

#### 5. Thermisches Verhalten von Brennstoff und Hülle

Unter der Voraussetzung des radialen Wärmeflusses wird sowohl für den Brennstoff als auch für die Hülle die radiale Temperaturverteilung ermittelt. Während die Hülle als quellenfrei vorausgesetzt wird, werden beim Brennstoff hinsichtlich der Wärmequellenverteilung zwei Varianten unterschieden. Für schnelle Flußbedingungen wird Proportionalität zwischen Wärmequellendichte und Porosität angenommen; für thermische Flußbedingungen wird die Wärmequellendichte als Polynom im Radius mit geraden Exponenten bis zum vierten Grad vorgegeben. Für die numerische Berechnung wird zunächst eine Ringaufteilung von Brennstoff und Hülle vorgenommen. Für vorgegebene Außen-



temperatur und Stableistung bzw. Quellendichte werden die Ringrandtemperaturen und die mittleren Ringtemperaturen von außen nach innen berechnet. Wegen der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit muß dabei iterativ verfahren werden. Weiterhin wird die Porositätsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes berücksichtigt. Während bei vorliegender Geometrie die Verteilung der Hülltemperatur durch die Außentemperatur und die Stableistung gegeben ist und praktisch unabhängig von Geometrieänderungen ist, hängt die Temperaturverteilung im Brennstoff empfindlich von Änderungen des Zentralkanals, der Porositätsverteilung, des Spaltes bzw. Kontaktdruckes ab [5].

Bei vorgegebener Hüllinnentemperatur ist die Brennstoffoberflächentemperatur nach Maßgabe des Wärmeübergangs Brennstoff-Hülle gegeben. Im Falle des Spaltes wird der Temperaturabfall im Spalt iterativ aus der "Spaltgleichung" [5] ermittelt. Im Kontaktfall wird insbesondere die Abhängigkeit der Wärmedurchgangszahl vom Kontaktdruck berücksichtigt.

In SATURN 1 ist die Kinetik der Porenwanderung mit den erheblichen thermischen Auswirkungen über die damit verbundene Zentralkanalbildung und Verdichtung integriert. Die Ausbildung des Zentralkanals wird nach folgendem numerischen Verfahren berechnet. Übersteigt die Porosität im innersten Ringelement einen vorgegebenen Maximalwert, so wird dieser Ring dem Zentralkanal zugeschlagen und die verbleibende Masse dieses Ringes dem benachbarten Ring hinzugefügt.

## 6. Anwendungen

### 6.1 Beispiele zum mechanischen Verhalten

In Fig. 4 und 5 ist der Ablauf der sprunghaft im freistehenden Brennstoff aufgetragenen thermischen Tangential- und Äquivalentspannung dargestellt. Es ist zu erkennen, daß in den gut kriechenden zentralen Brennstoffzonen der Spannungsabbau sehr schnell erfolgt.

In Fig. 6 bis 17 werden Ergebnisse bezüglich des mechanischen Verhaltens des in Kontakt mit der Hülle sich befindenden ungerissenen Brennstoffes dargestellt, wobei die thermische Ausdehnung eliminiert wurde. Wie aus Fig. 11 zu erkennen ist, liefert das von uns angewandte Kriechgesetz [6]

bis ca.  $950^{\circ}\text{C}$  ein temperaturunabhängiges Kriechen, oberhalb ca.  $950^{\circ}\text{C}$  ein mit der Temperatur stark ansteigendes Kriechen. Bei ca.  $1200^{\circ}\text{C}$  übersteigt bei einer Spannung von  $1 \text{ kp/mm}^2$  und einer Schwellrate von  $S = 1,5 \frac{V}{O} / \frac{a}{O}$  die Kriechrate die Schwellgeschwindigkeit schon um den Faktor 100.

Fig. 6 und 7 zeigen den Einfluß des Hüllwiderstandes auf den Kontakt-  
druck, wobei in Fig. 6 die Hülldicke und in Fig. 7 der Parameter K des  
Nortonschen-Kriechgesetzes der Hülle  $\dot{\epsilon} = K \cdot \sigma^n$  variiert wurde. In  
beiden Fällen nimmt der Kontakt-  
druck gemäß der linearen Schwellrate mit  
der Zeit zu, bis ein Gleichgewicht von Brennstoffschwellen und Kriechen  
des Brennstoffes und der Hülle erreicht ist. In beiden Fällen nähern  
sich die Gleichgewichtskontakt-  
drucke mit zunehmender Hülldicke bzw. ab-  
nehmendem K-Wert asymptotisch einem oberen Grenzwert. Zu beachten ist,  
daß bei den vorliegenden Bedingungen fast der gesamte Brennstoffquer-  
schnitt das niedrige Tieftemperaturkriechen aufweist, das relativ hohe  
Kontakt-  
drucke zur Folge hat. Dabei wurde nicht berücksichtigt, daß hohe  
Kontakt-  
drucke ein Kriechen in die Poren zur Folge haben und die effek-  
tive Schwellrate entsprechend vermindern. Wie aus Fig. 10 ersichtlich  
ist, hängt der Grenzwert für  $K = 0$  in Fig. 7 stark vom Brennstoffkriech-  
gesetz ab. Die Abnahme des Gleichgewichtskontakt-  
druckes in Fig. 10 ist  
eine Folge des abnehmenden Zentralkanalradius und des damit verbundenen  
Temperaturanstiegs, der zu einem besseren Brennstoffkriechen führt. In  
Fig. 8 sind die der Fig. 7 entsprechenden Änderungen des Hüllaußenradius  
und des Zentralkanalradius in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Für den  
Fall der nicht kriechfähigen Hülle  $K = 0$  wird im Gleichgewicht eine sich  
nicht mehr ändernde elastische Hüllverformung erreicht. Das Schwellen des  
Brennstoffes erfolgt über das Kriechen ausschließlich in den Zentralkanal.  
In Fig. 9 ist die starke Abhängigkeit des Kontakt-  
druckes von der Brennstoff-  
dicke dargestellt. Dabei muß beachtet werden, daß bei den gewählten Bedin-  
gungen der Brennstoffring jeweils das niedrige Tieftemperaturkriechen auf-  
weist. Fig. 10 zeigt, daß die Kontakt-  
drucke ganz erheblich abnehmen, wenn  
das Kriechverhalten des Brennstoffes zunimmt.

In Fig. 12 und 13 kommt das 2-Zonenverhalten des Brennstoffes deutlich  
zum Ausdruck. Man erkennt einen allmählichen Spannungsaufbau bis zu einem  
Sättigungskontakt-  
druck für Temperaturen unterhalb ca.  $1150^{\circ}\text{C}$ . Für Tempe-  
raturen größer als  $1150^{\circ}\text{C}$  liegt ein hydrostatischer Spannungszustand  
vor, entsprechend dem im Zentralkanal herrschenden Gasdruck. In Fig. 12

herrscht kein Zentralkanalgasdruck, in Fig. 13 liegt ein Gasdruck von 50 at im Zentralkanal vor. Kleine Spannungen, die bereits in der Rechenungenauigkeit liegen, führen bereits zu Kriechraten, die deutlich größer als die Schwellgeschwindigkeit sind. Da diese Bereiche zum Kontaktdruck praktisch nicht beitragen, aber zu nicht vertretbaren Rechenzeiten führen, ist die Einführung eines 2-Zonen-Brennstoffmodells zwingend, in dem nur die äußere Zone spannungstheoretisch behandelt wird. In Fig. 14 und 16 sind die auf diese Weise berechneten Kontaktdrücke in Abhängigkeit der Zeit für verschiedene Stabileistungen dargestellt. Für die Hülle wurden Kriechdaten des Stahles 4988 [6] verwendet, d.h. für  $450^{\circ}\text{C}$  Hüllaußentemperatur ist die Hülle praktisch nicht kriechfähig. Man erkennt in beiden Abbildungen den gravierenden Abfall des Kontaktdruckes mit wachsender Stabileistung. Dies wird aus Abb. 15 verständlich, in der die zu Abb. 14 gehörenden mechanischen, d.h. spannungstragenden Schichtdicken gegen die Zeit aufgetragen sind. Man sieht, daß mit wachsenden Stabileistungen die Breite der mechanischen Schichtdicken deutlich abnimmt. In Abb. 17 sind die bei  $650^{\circ}\text{C}$  und einem Zentralkanalgasdruck von 100 at auftretenden Hüllverformungen entsprechend Abb. 16 graphisch dargestellt.

In Abb. 18 ist der zeitliche Verlauf des Kontaktdruckes aufgetragen, der entsteht, wenn ausgehend von einer kontaktdrucklosen Berührung von Brennstoff und Hülle bei  $200\text{ W/cm}$  ein Leistungssprung von  $150\text{ W/cm}$  auftritt. Dabei ist bei  $650^{\circ}\text{C}$  Hüllaußentemperatur die Geschwindigkeit der Leistungsänderung Parameter. Auch in diesem Fall tragen nur äußere relativ kalte Brennstoffzonen, in denen die Kriechgeschwindigkeit vergleichbar mit der thermischen Ausdehnungsgeschwindigkeit ist, zum Kontaktdruckaufbau bei.

## 6.2 Beispiele zum thermischen Verhalten

In Fig. 19 bis 22 werden Ergebnisse bezüglich des thermischen Verhaltens dargestellt. In Fig. 19 und 20 sind charakteristische thermische Größen für den Fall eines He-Spaltes in Abhängigkeit der Stabileistung mit der Ausgangsspaltbreite als Parameter für Schnellbrüterbedingungen dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen die Leistungsfähigkeit der Temperaturiterationen. Dabei wurde vorausgesetzt, daß der Brennstoff spannungsfrei vorliegt und bis  $1700^{\circ}\text{C}$  gerissen ist. Weiterhin wurden Porenwanderung und Schwellen nicht berücksichtigt.

Fig. 21 und 22 sind Ergebnisse bezüglich der Porenwanderung. In Fig. 21 sind die zu der angegebenen Temperaturverteilung gehörenden Porenwanderungsgeschwindigkeiten gemäß der Beziehung von Nichols dargestellt.

$$v \left( \frac{\text{cm}}{\text{h}} \right) = 6 \cdot 10^{14} \frac{dT}{dr} \left( \frac{^\circ\text{C}}{\text{cm}} \right) \exp \left( - \frac{7,17 \cdot 10^4}{T (^\circ\text{K})} \right) \cdot (T (^\circ\text{K}))^{-5/2}$$

In Fig. 22 sind die mit Hilfe dieser Beziehung erhaltenen Ergebnisse bezüglich der Kinetik der Porenwanderung und der Zentralkanalbildung für die in Fig. 21 angegebenen Daten dargestellt.

### 6.3 Beispiele zum Zeitverhalten von Brennstäben für instationäre Betriebsbedingungen

In Fig. 23 ist der zeitliche Verlauf einiger typischer Brennstabgrößen wie Zentraltemperatur, Spalt, Zentralkanalradius und Kontaktdruck für folgende äußere Bedingungen dargestellt: Zwischen Ein- und Abschaltung ist die Stableistung 350 W/cm und die Hüllaußentemperatur 650°C jeweils konstant während 11000 h. Es wurde vorausgesetzt, daß als Gas He während der Betriebszeit vorlag. Man erkennt deutlich die verschiedenen, während der Betriebszeit auftretenden Phasen. Zwischen 0 und 1000 h liegt gerissener Brennstoff mit offenem Spalt vor. Zwischen 100 h und 7500 h befindet sich gerissener Brennstoff in Kontakt mit der Hülle, ohne Kontaktdruck auszuüben. Bei 7500 h erfolgt der Übergang von gerissenem Brennstoff in ungerissenen, wobei gleichzeitig Kontaktdruck entsteht. Beim Abschalten nach 11000 h treten wieder gerissener Brennstoff und ein Spalt auf. Der Anfangsspalt von 80 µ hat sich nach Erreichen des Endwertes der Stableistung nach 10 h verringert auf 40 µ. Gleichzeitig tritt die maximale Zentraltemperatur auf. Durch Wanderung der Sinterporosität tritt eine starke Vergrößerung des Zentralkanals und eine entsprechende Absenkung der Zentraltemperatur auf Grund des thermischen Zentralkanaleffektes auf. Dabei wurde angenommen, daß auf die gesamte anfänglich vorhandene Sinterporosität von 10 % die Nichols-Beziehung für den Verdampfungs-Kondensations-Mechanismus anwendbar ist, was streng nur für Porengrößen größer 10 µ gilt. Hinsichtlich des Schwellens wurden folgende Voraussetzungen getroffen: Für die in die spannungstheoretische Betrachtungen eingehenden Tieftemperaturschwellraten werden die Festkörperschwellraten eingesetzt und es werden hier keine Porositätsänderungen zugelassen. Für das spannungsfreie Schwellen wird angenommen, daß durch Schwellen sich sowohl das äußere Volumen als auch die Porosität ändern

kann. Die für die äußere Volumenänderung verantwortliche Schwellrate setzt sich aus zwei Termen zusammen, der festen und der Porositätsänderungsschwellrate.

Für dieses Beispiel wurde die in Fig. 25 ersichtliche Porositätsänderungsschwellrate I vorgegeben. D.h. unterhalb  $1600^{\circ}\text{C}$  liegt nur die feste Schwellrate vor, oberhalb  $1600^{\circ}\text{C}$  hat man einen sehr steilen Anstieg der Schwellrate mit der Temperatur. Weiterhin wird angenommen, daß die gesamte Porosität nach der Nichols-Beziehung wanderungsfähig ist.

Auf Grund dieser vorgegebenen Schwellratenverteilungen wird der Verlauf des Zentralkanalradius verständlich, der grob gesprochen etwa konstant bleibt trotz der sehr hohen Porositätsschwellraten oberhalb  $1600^{\circ}\text{C}$ . Das beruht darauf, daß die produzierte Porosität in diesem Bereich bis auf eine kleine Restporosität in den Zentralkanal wandert. Die Zunahme des Zentralkanals bis ca. 6500 h liegt daran, daß mit zunehmender Zeit auch relativ kalte Porosität nach innen wandert. Die Abnahme des Zentralkanalradius nach 6500 h liegt daran, daß jetzt das Festkörperschwellen den ersten Effekt überwiegt.

Der einzige Unterschied des in Fig. 24 dargestellten Zeitverhaltens zu dem vorhergehenden Fall besteht in der geänderten Porositätsschwellrate II, die in Fig. 25 dargestellt ist. Hier liegen auch bei tiefen Temperaturen schon merkliche Porositätsschwellraten vor. Da diese Porosität praktisch nicht wandern kann, ergibt sich nach der Zentralkanalbildung durch Wanderung der Sinterporosität allmähliches Schließen des Zentralkanals durch Schwellen.

In Fig. 26 sind die zeitlichen Veränderungen der radialen Porositätsverteilung ersichtlich, die zu den Fällen gehören, die in Fig. 23 und 24 graphisch dargestellt sind.

In Abb. 27 ist das Zeitverhalten von typischen Brennstabgrößen für folgende Betriebsbedingungen dargestellt: Die Hüllaußentemperatur wird innerhalb 10 Stunden von  $0^{\circ}\text{C}$  auf  $650^{\circ}\text{C}$  erhöht und bleibt konstant. Die Stabileistung wird auf  $200\text{ W/cm}$  eingeschaltet und nach 7000 h abgeschaltet, wobei eine Schnellabschaltung bei 1000 h erfolgt. Während der gesamten Betriebszeit erfolgte ein linearer Spaltgasdruckaufbau. Auch hier sind die verschiedenen Phasen graphisch dargestellt. Wegen der relativ niedrigen Brennstofftemperaturen erfolgt hier praktisch keine Porenwanderung, so daß nach Schließen des Spaltes und der Risse ein allmähliches Schließen des Zentralkanals durch Schwellen erfolgt. Nach ca. 3000 h tritt Kontaktdruck auf, der sich dem Spaltgasdruck überlagert.

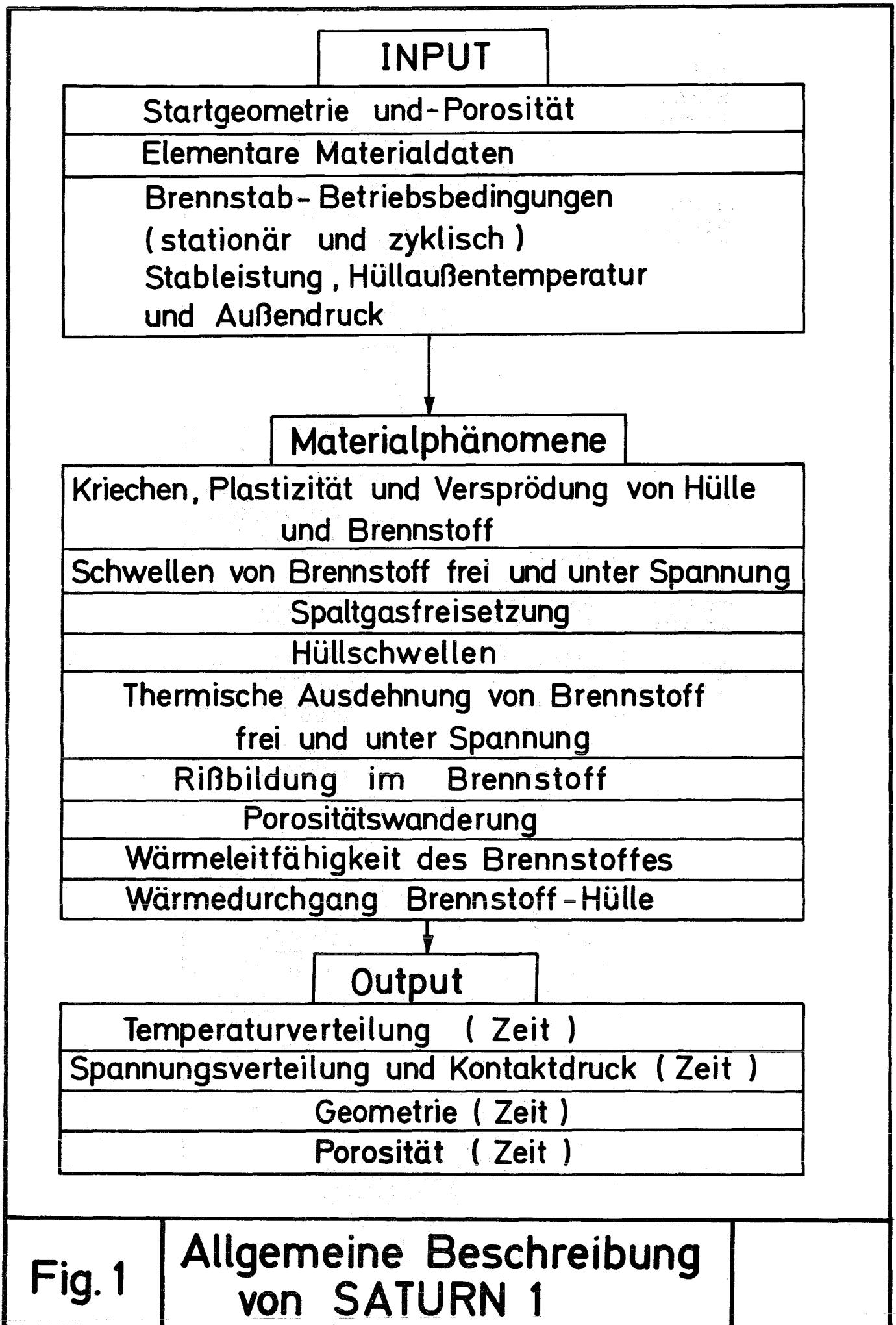


Literatur:

- [1] G. Karsten, H. Kämpf, A. Gerken, "Theoretical and Computer Analysis on the Behaviour of Fast Reactor Fuel pins and Related Parts of the Core under Operational Conditions", KFK-878-EUR 4158 e, Kernforschungszentrum Karlsruhe (November 1968)
- [2] K. Kummerer, F. Depisch, H. Elbel, H. Kämpf, " The SATURN Codes and Material Data Evaluation", Conference on Fast Fuel Element Technology, New Orleans, April 1971
- [3] H. Kämpf, F. Depisch, H. Elbel, "Das SATURN 1 Rechenprogramm für Brennstäbe", KFK-Bericht in Vorbereitung, Kernforschungszentrum Karlsruhe
- [4] M. Guyette, "Crash: A Computer Programme for the Analysis of Creep and Plasticity in Fuel Pin Sheaths", KFK 1050, Kernforschungszentrum Karlsruhe
- [5] H. Kämpf, G. Karsten, "Effects of Different Types of Void Volumes on the Radial Temperature Distribution of Fuel Pins", Nucl. Appl. and Techn. 9 (Sept. 1970) 288
- [6] H. Kämpf, H. Elbel, K. Kummerer (editors), "Brennstabtheorie, Modelle und Materialdaten", KFK 1400, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1971), Beitrag XX, D. Brucklacher; Beitrag XXVII, K.D. Cloß



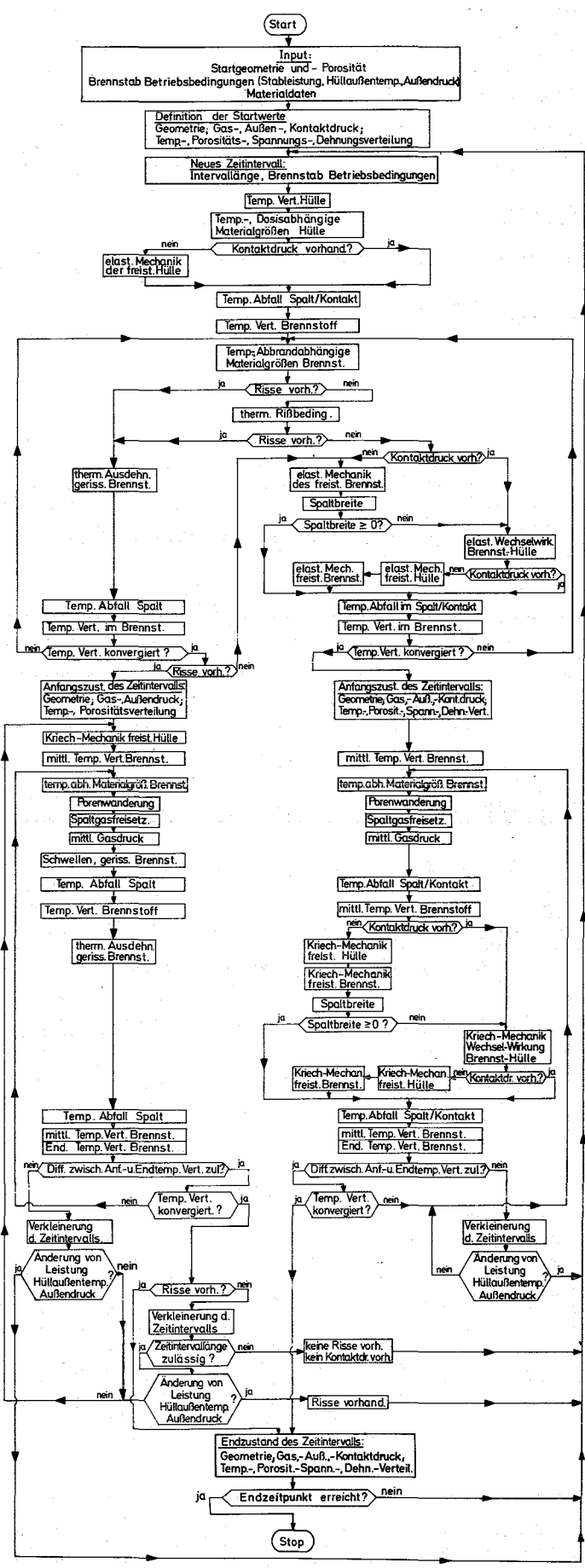




**Fig. 2**  
**SATURN 1**  
 Strukturdiagramm

Berechnung des Anfangszustandes des aktuellen Zeitintervalls aus dem Endzustand des vorhergehenden Zeitintervalls.

Berechnung des Endzustandes des aktuellen Zeitintervalls aus dem Anfangszustand des aktuellen Zeitintervalls.



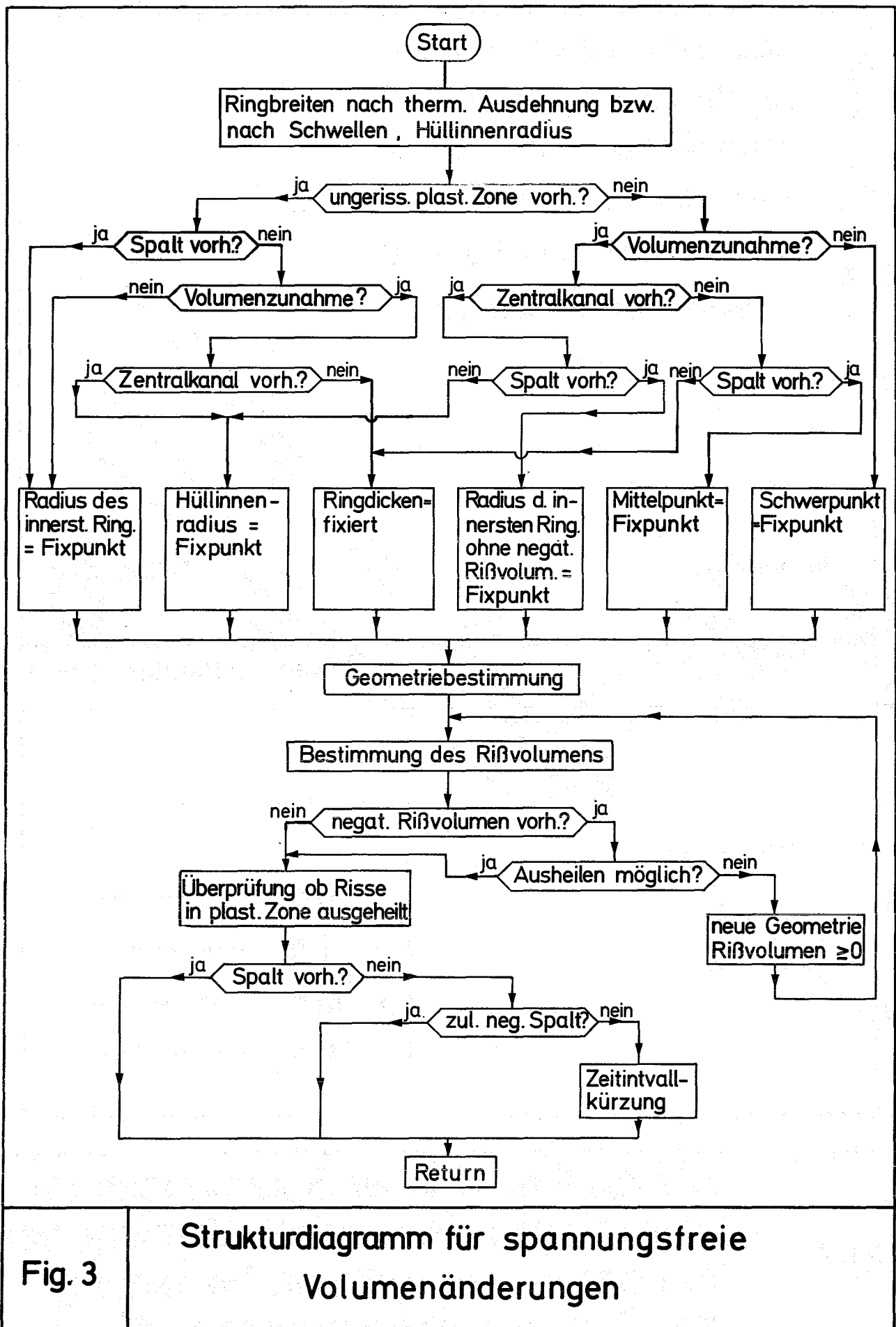


Fig. 3

Strukturdiagramm für spannungsfreie Volumenänderungen

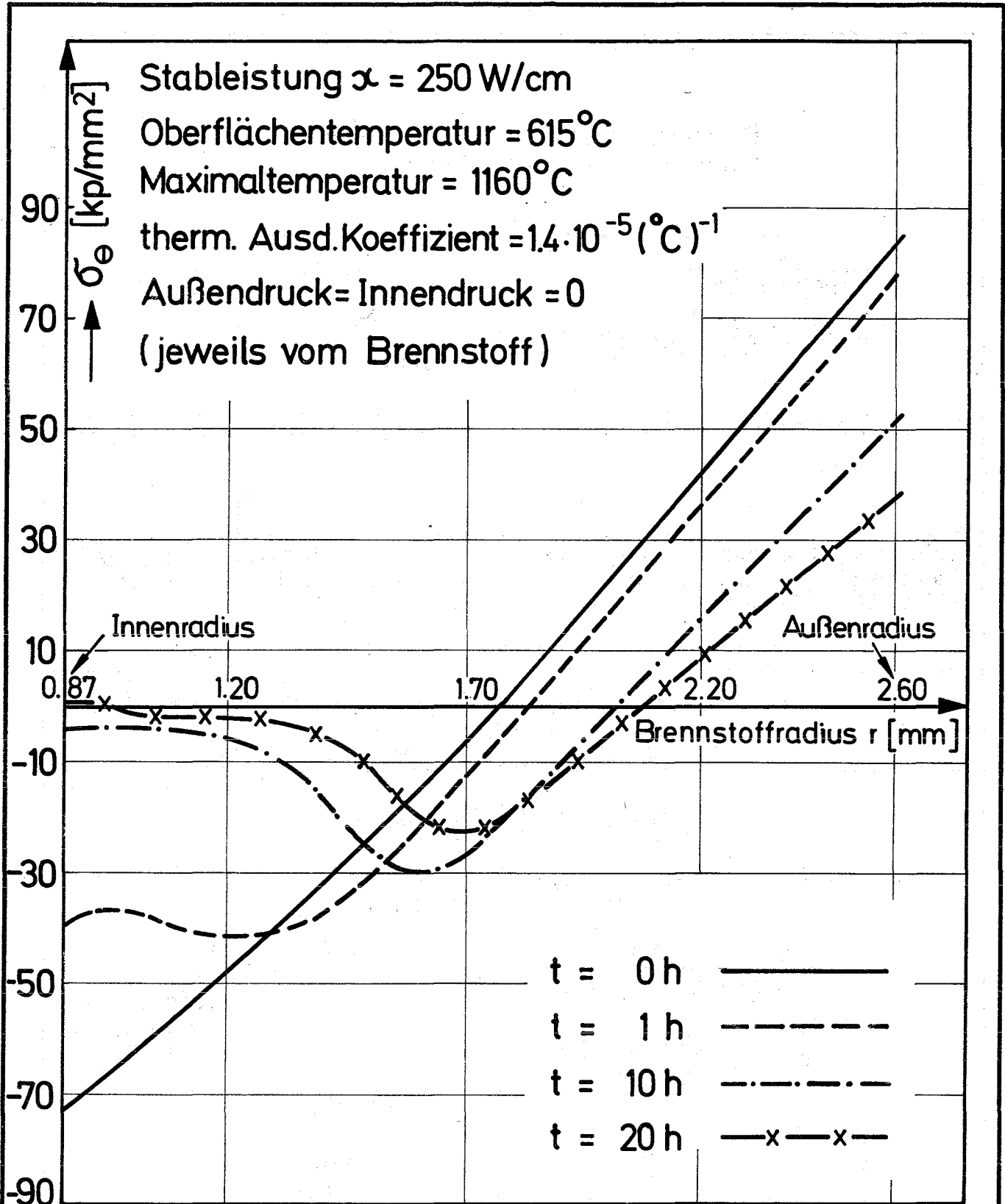


Fig. 4

Abbau thermischer Spannungen im unrestrained Brennstoff. Zeitliche Veränderung der radialen Verteilung der Tangentialspannungen  $\sigma_\theta$ .

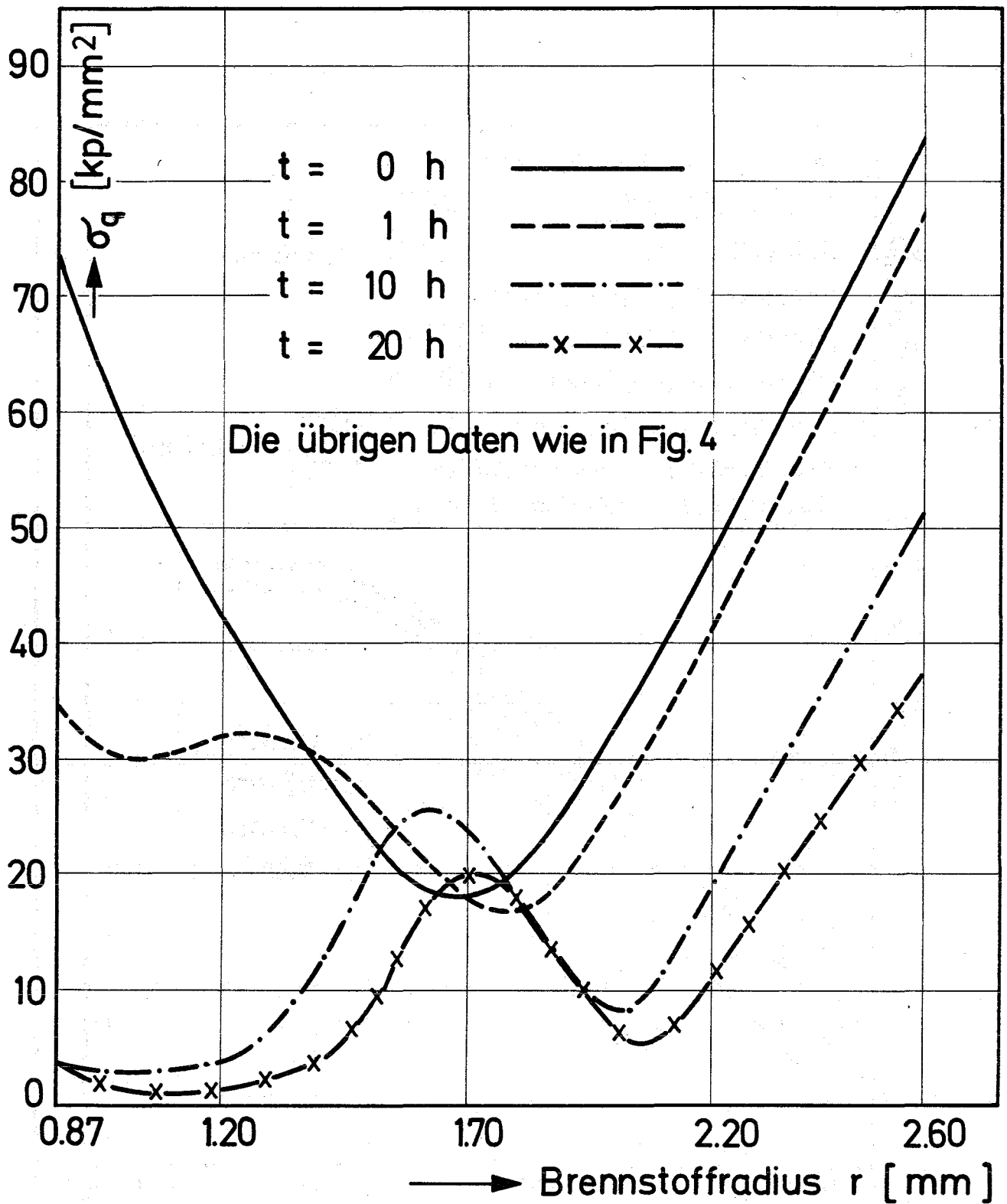


Fig. 5

Abbau therm. Spannungen im unre-strainten Brennstoff. Zeitliche Veränd. der rad. Verteil. der Vergleichsspann.  $\sigma_q$ .

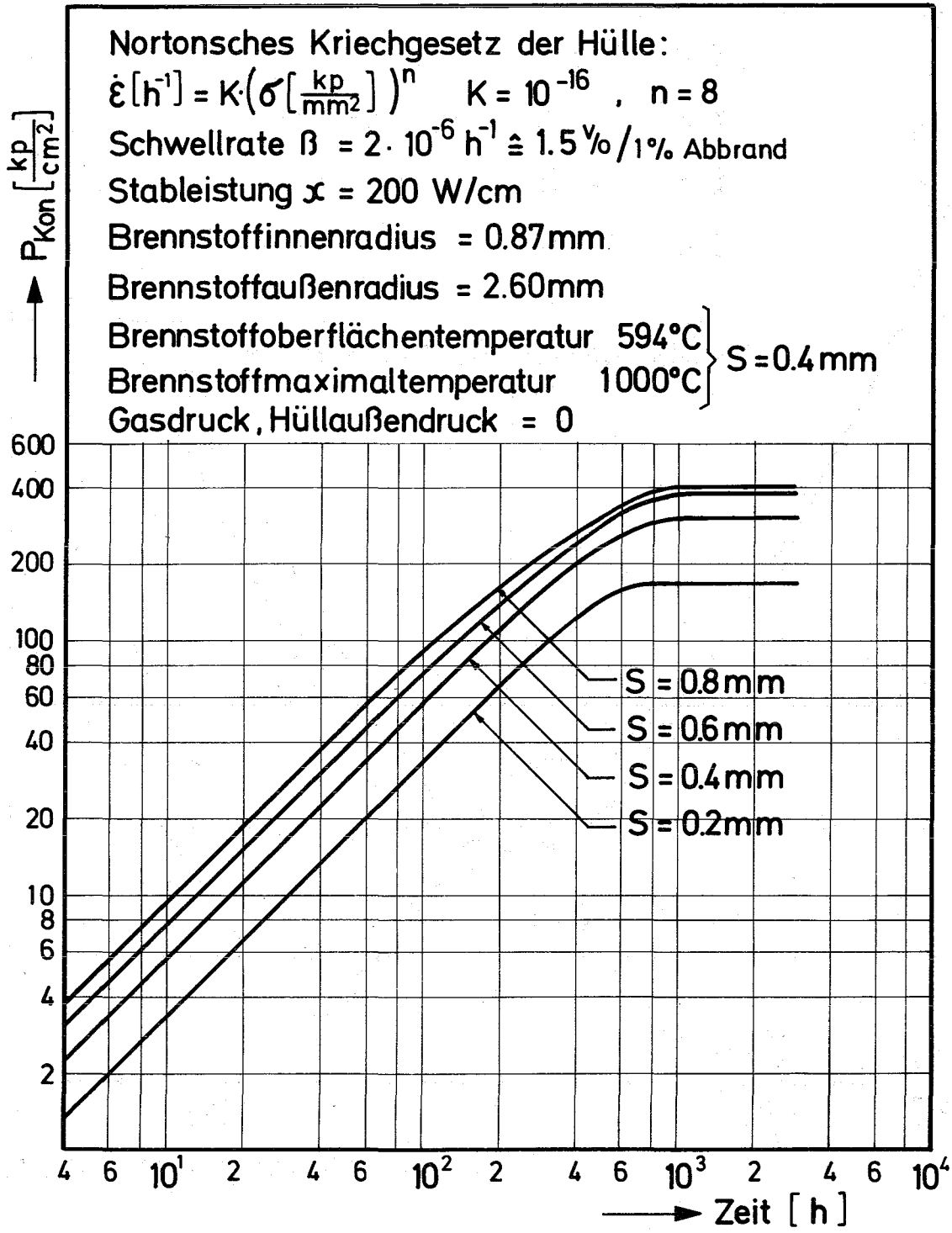


Fig. 6

Schwellender und kriechender Brennstoff in Kontakt mit der kriechenden Hülle. Zeitlicher Verlauf des Kontaktdruckes  $P_{Kon}$  in Abhängigkeit von der Hülldicke.

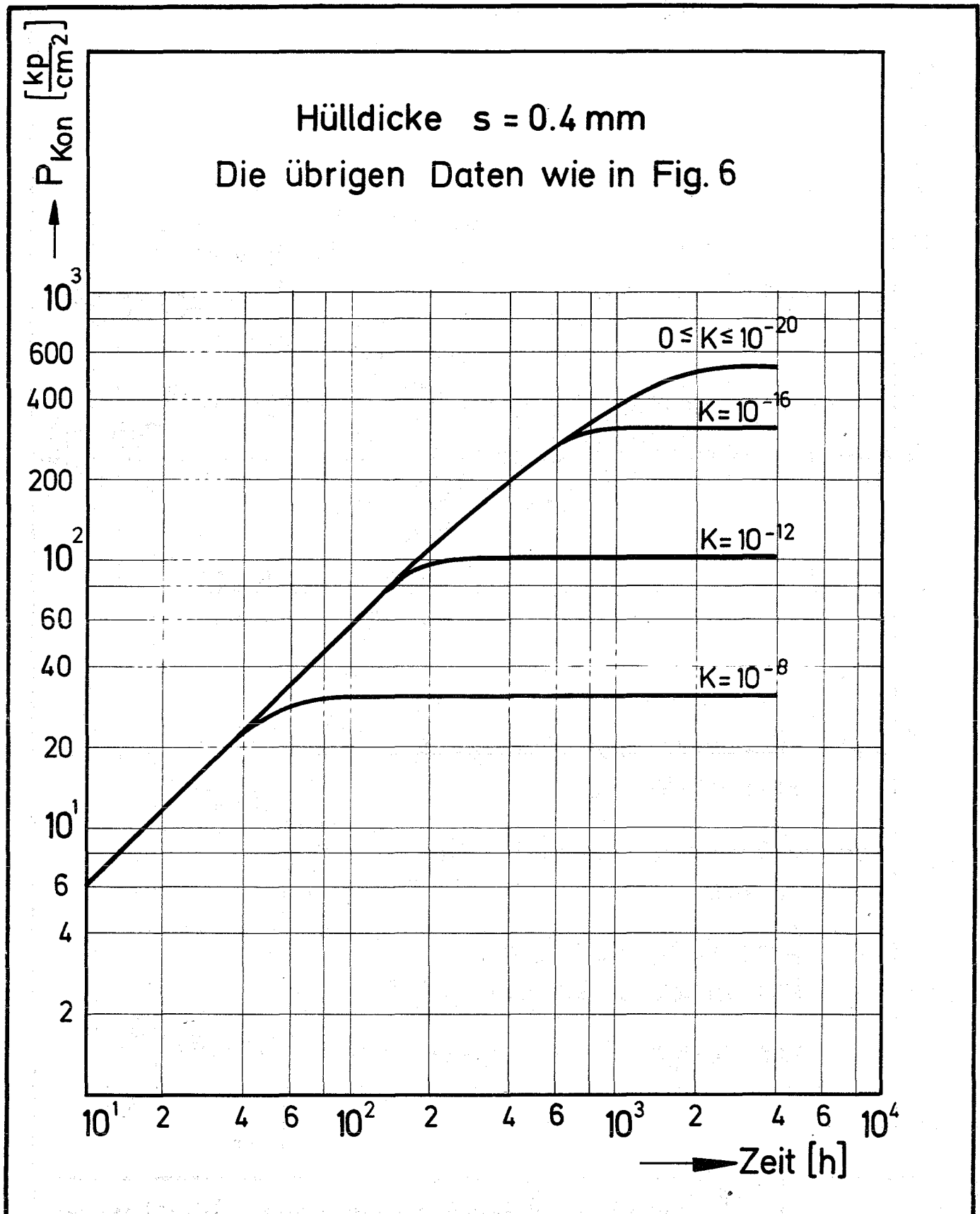


Fig. 7

Schwellender und kriechender Brennstoff in Kontakt mit d. kriechend. Hülle. Zeitlich. Verlauf d. Kontaktdr.  $P_{Kon}$  in Abhängigk. v. Nortonparam.  $K$  d.Hülle.

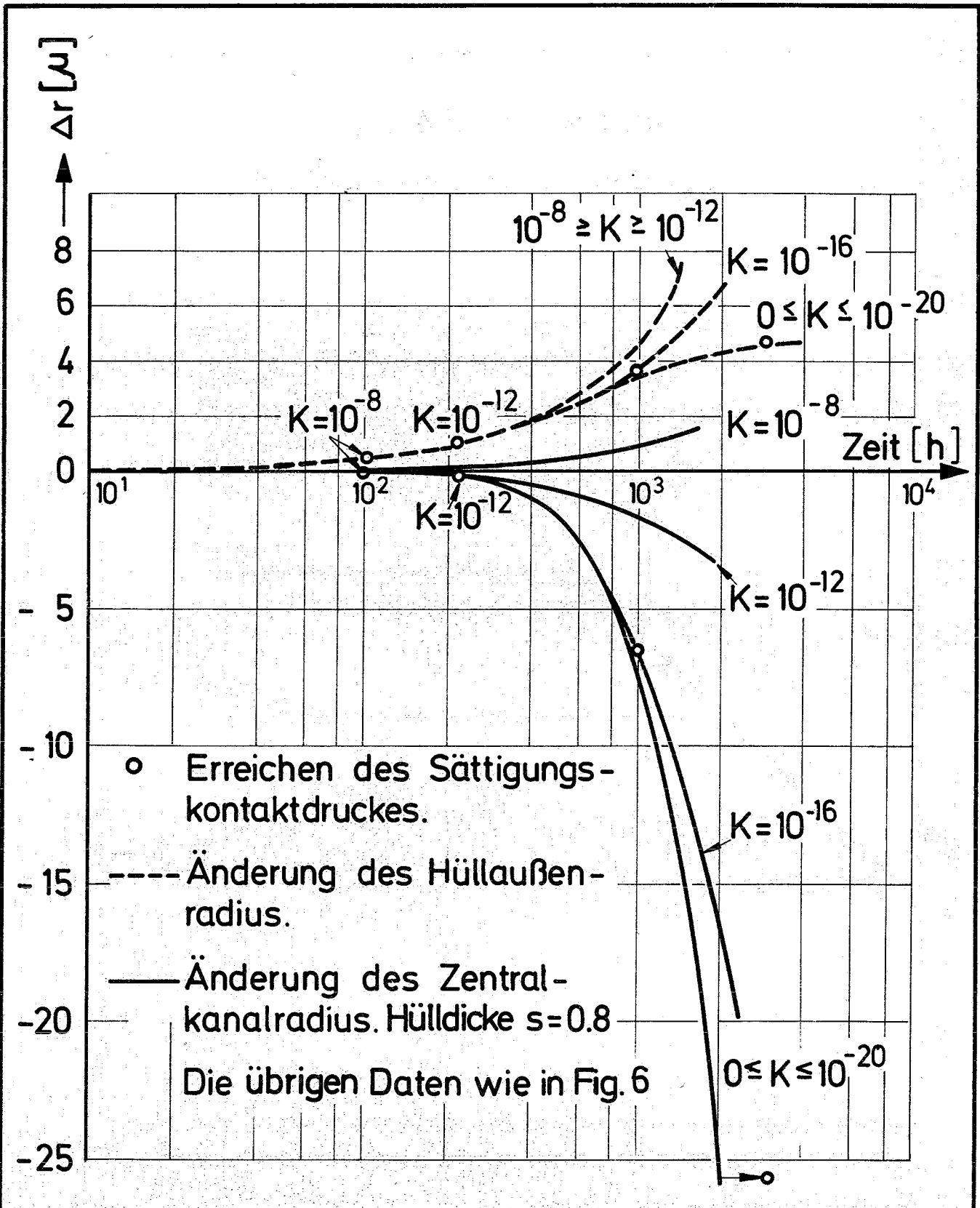
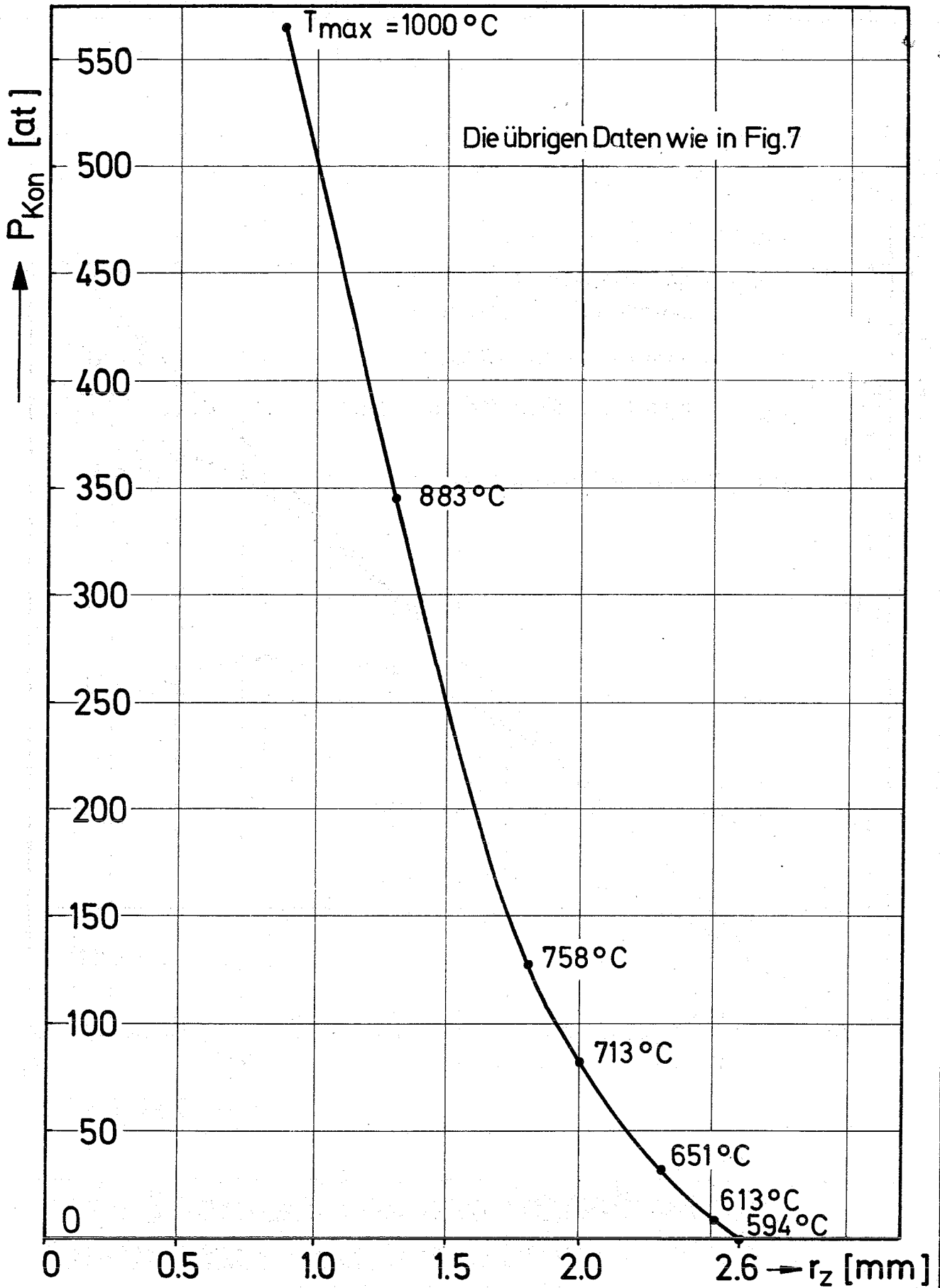


Fig. 8

Zeitliche Änderung von Hüllaußenradius und Zentralkanalradius in Abhängigkeit des Nortonparam.  $K$  der Hülle für den Kontaktfall.





**Fig. 9** Sättigungskontaktdruck  $p_{Kon}$  in Abhängigkeit des Zentralkanalradius  $r_z$ .

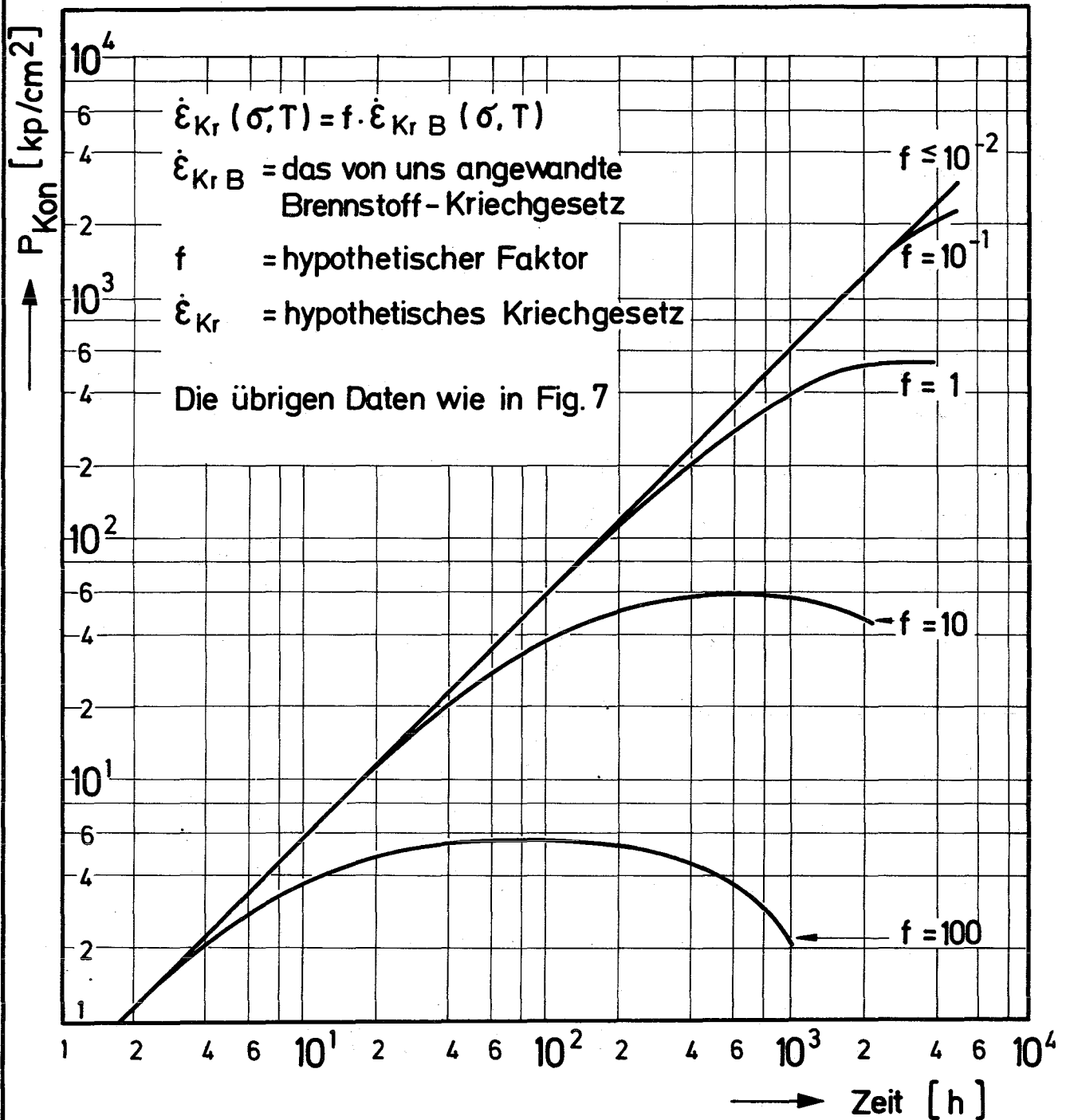


Fig. 10

Schwellender und kriechender Brennstoff in Kontakt mit einer nicht kriechfähigen Hülle  $K=0$ . Zeitlicher Verlauf des Kontaktdruckes in Abhängigkeit des Brennstoff-Kriechgesetzes.

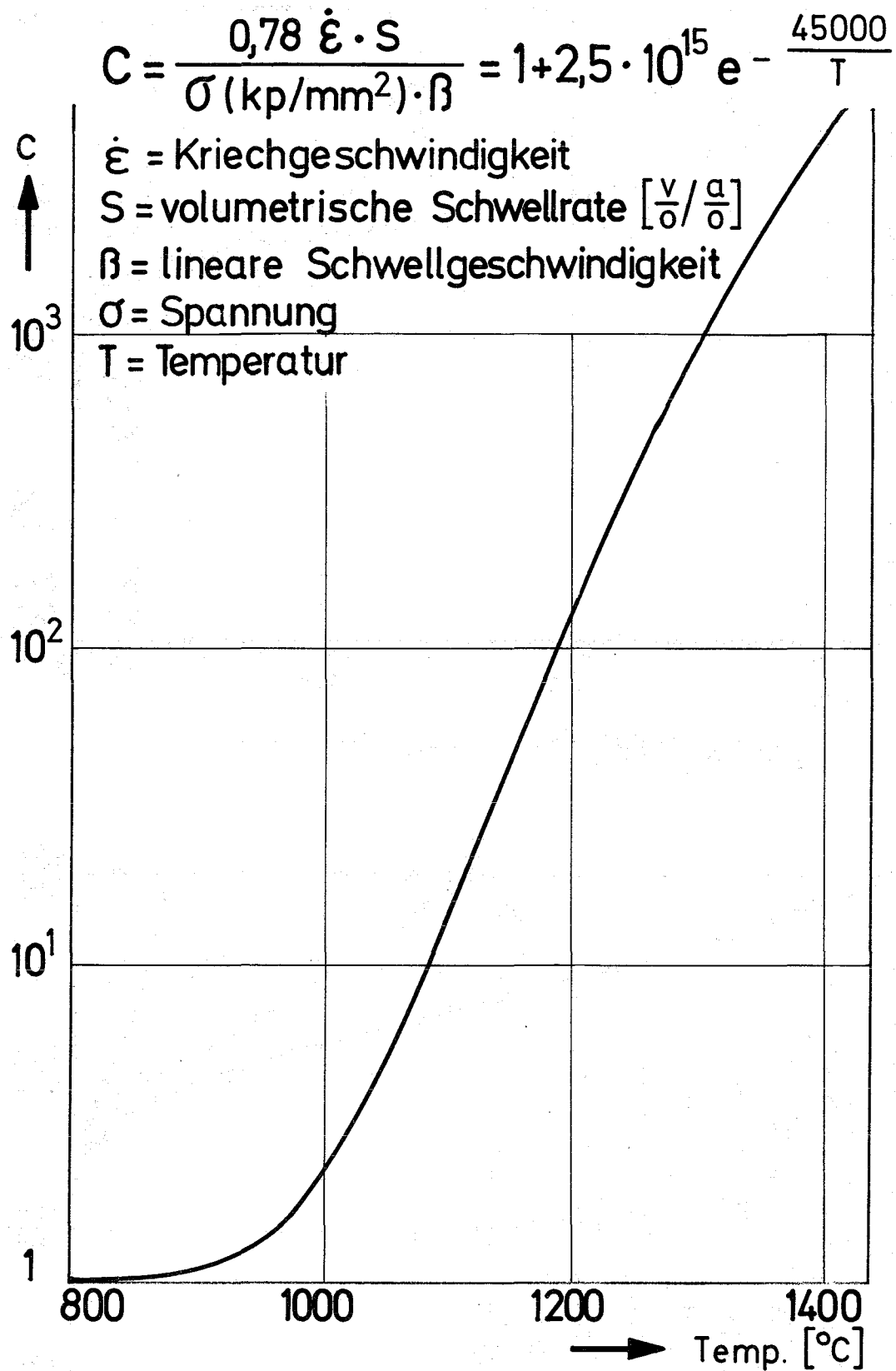


Fig. 11

Temperaturabhängigkeit des  
Brennstoff - Kriechgesetzes

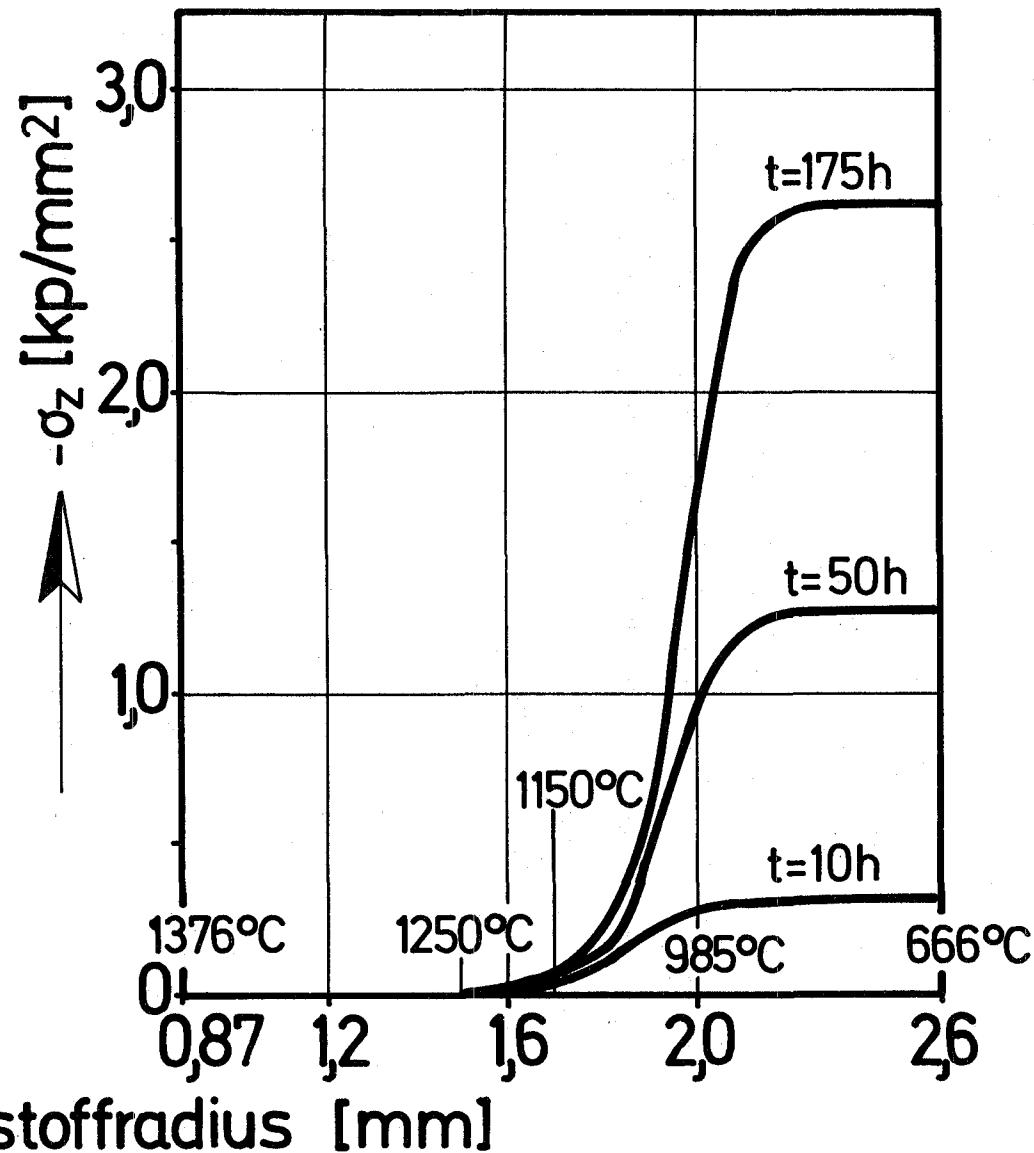
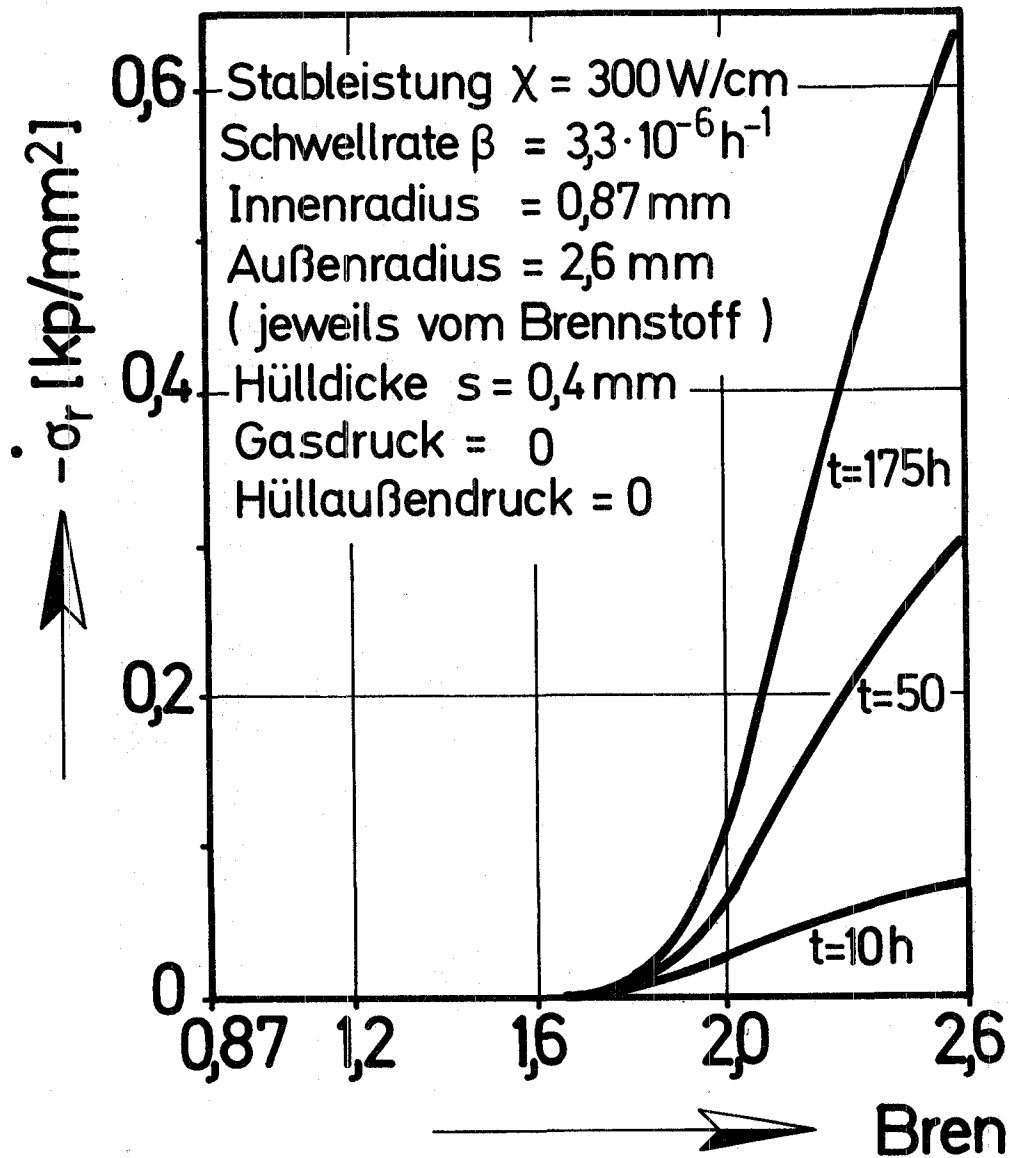


Fig. 12

Zweizonenmodell für Brennstoffschwellen in Kontakt mit der Hülle

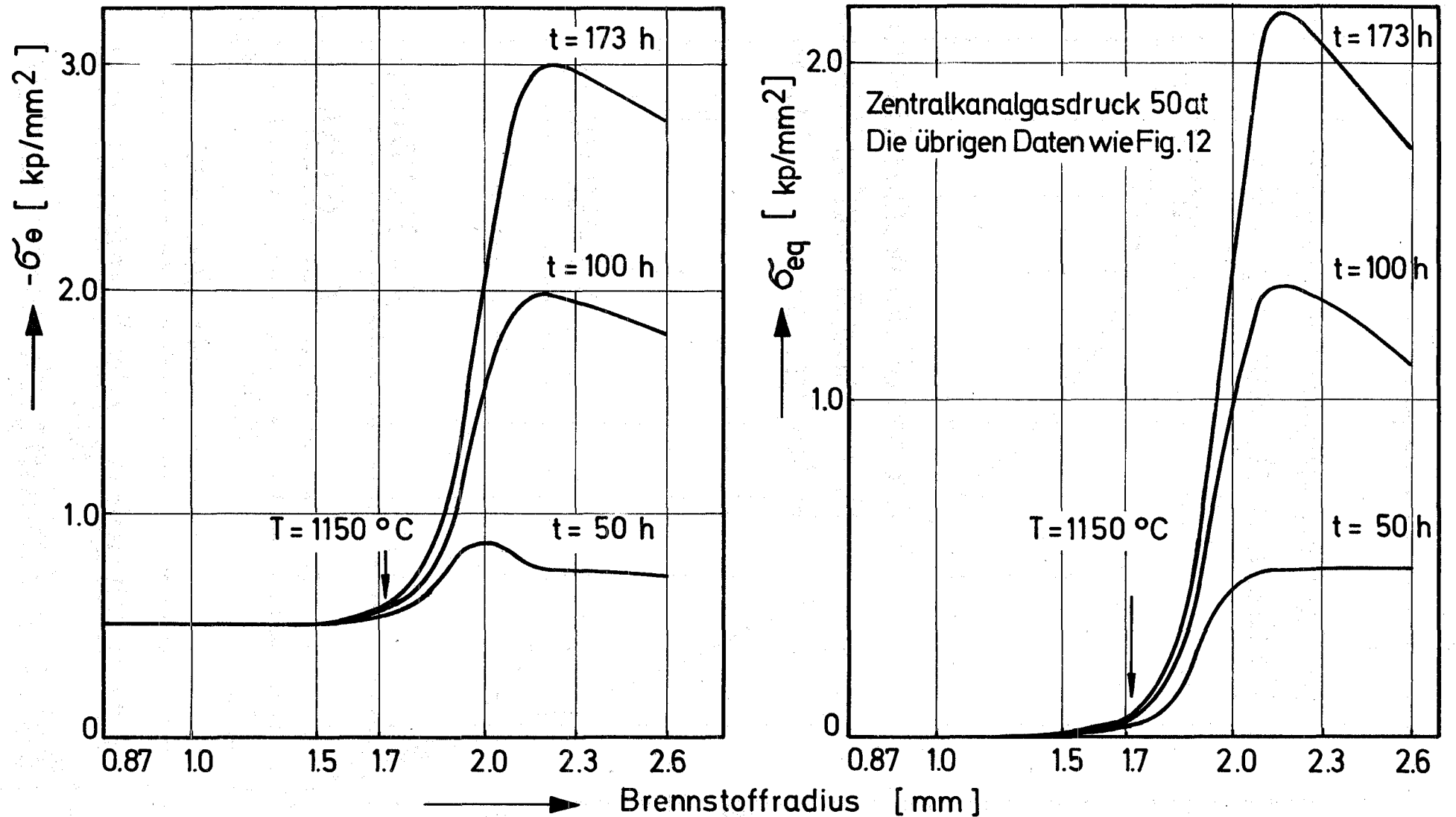


Fig. 13

Zweizonenmodell für Brennstoffschwellen in Kontakt mit der Hülle

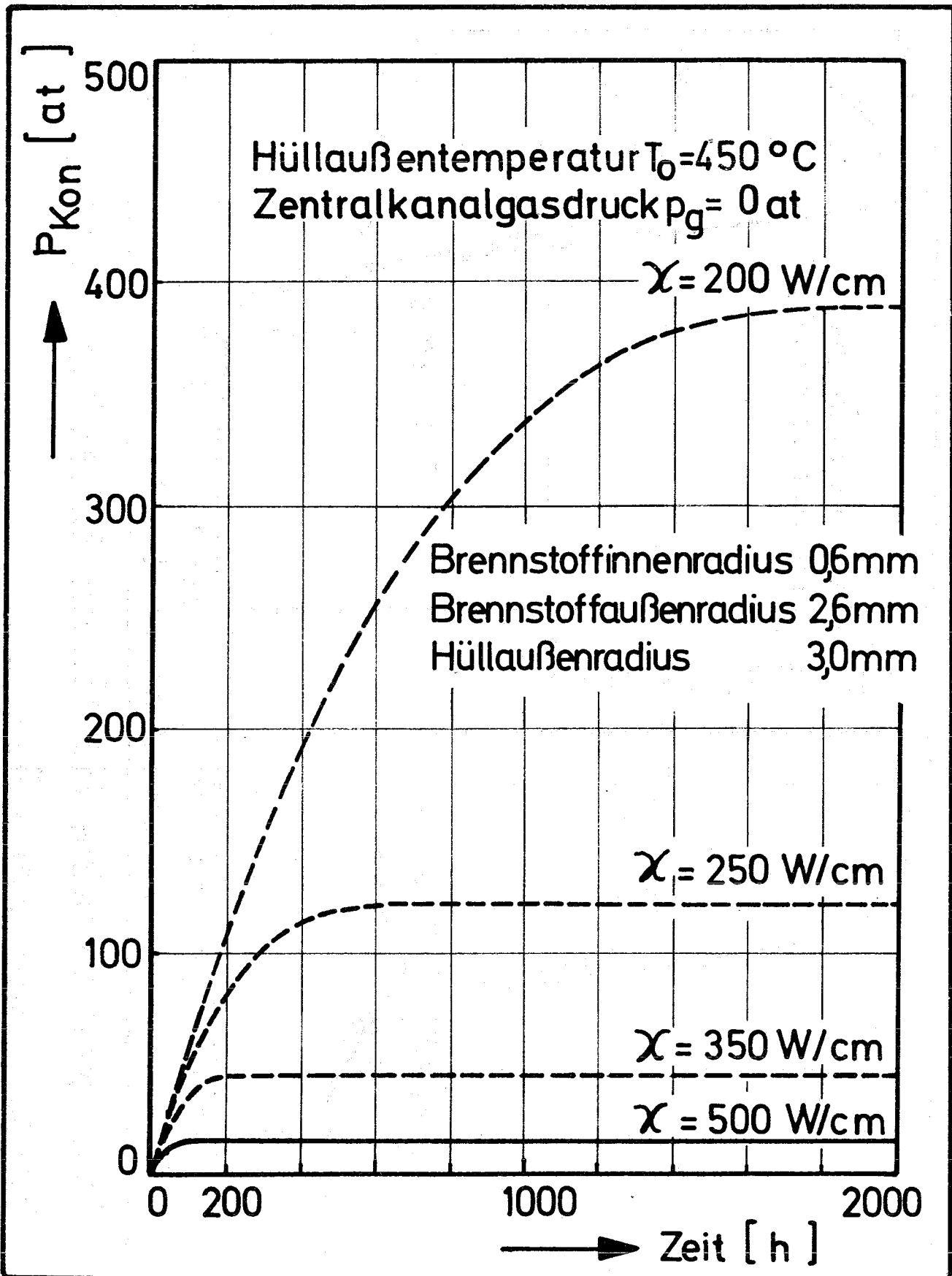
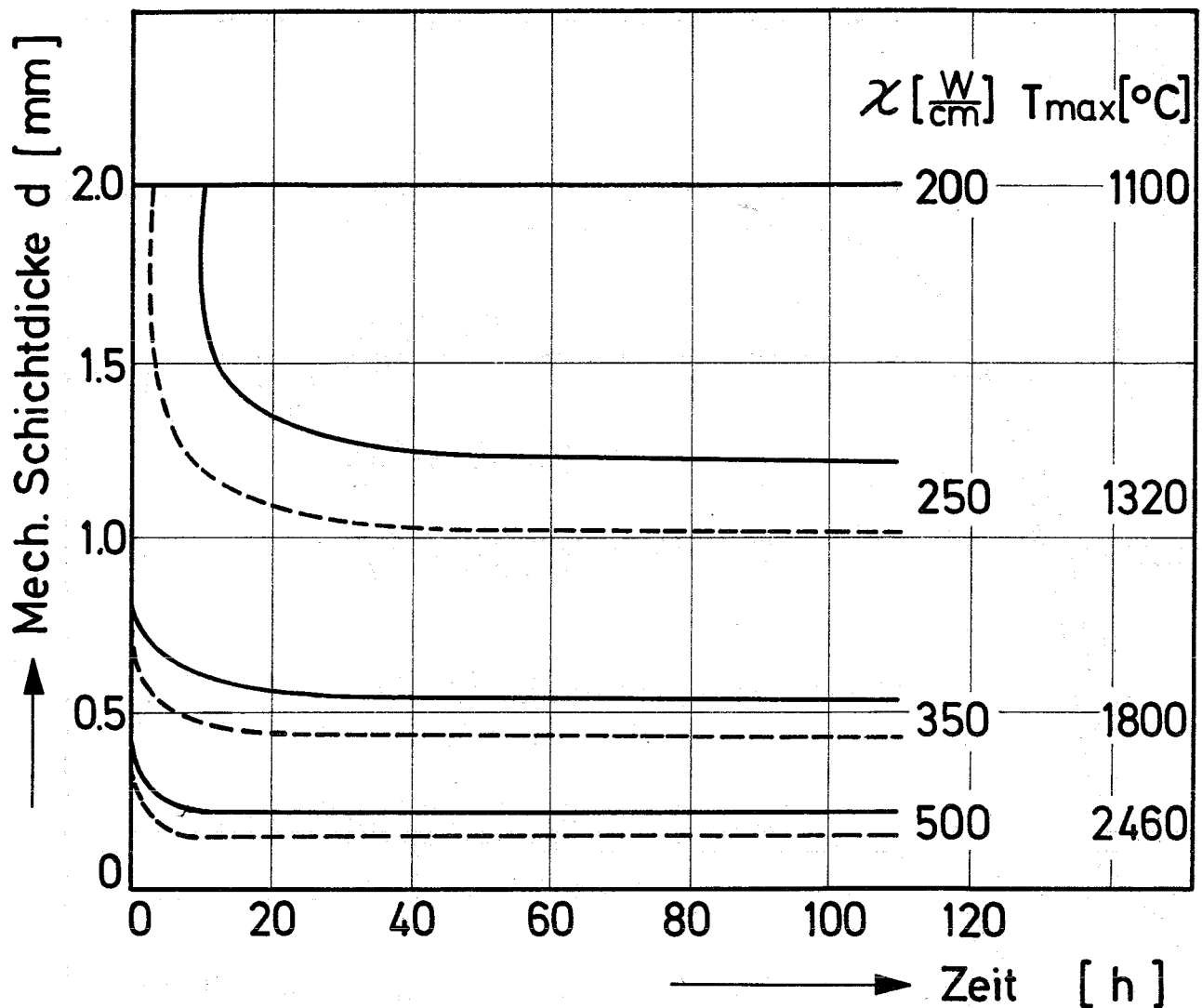


Fig. 14

Kontaktdruck  $p_{\text{Kon}}$  als Funktion der Zeit  $t$  in Abhängigk. von Stableist.  $\chi$



—  $p_g = 0 \text{ at}$

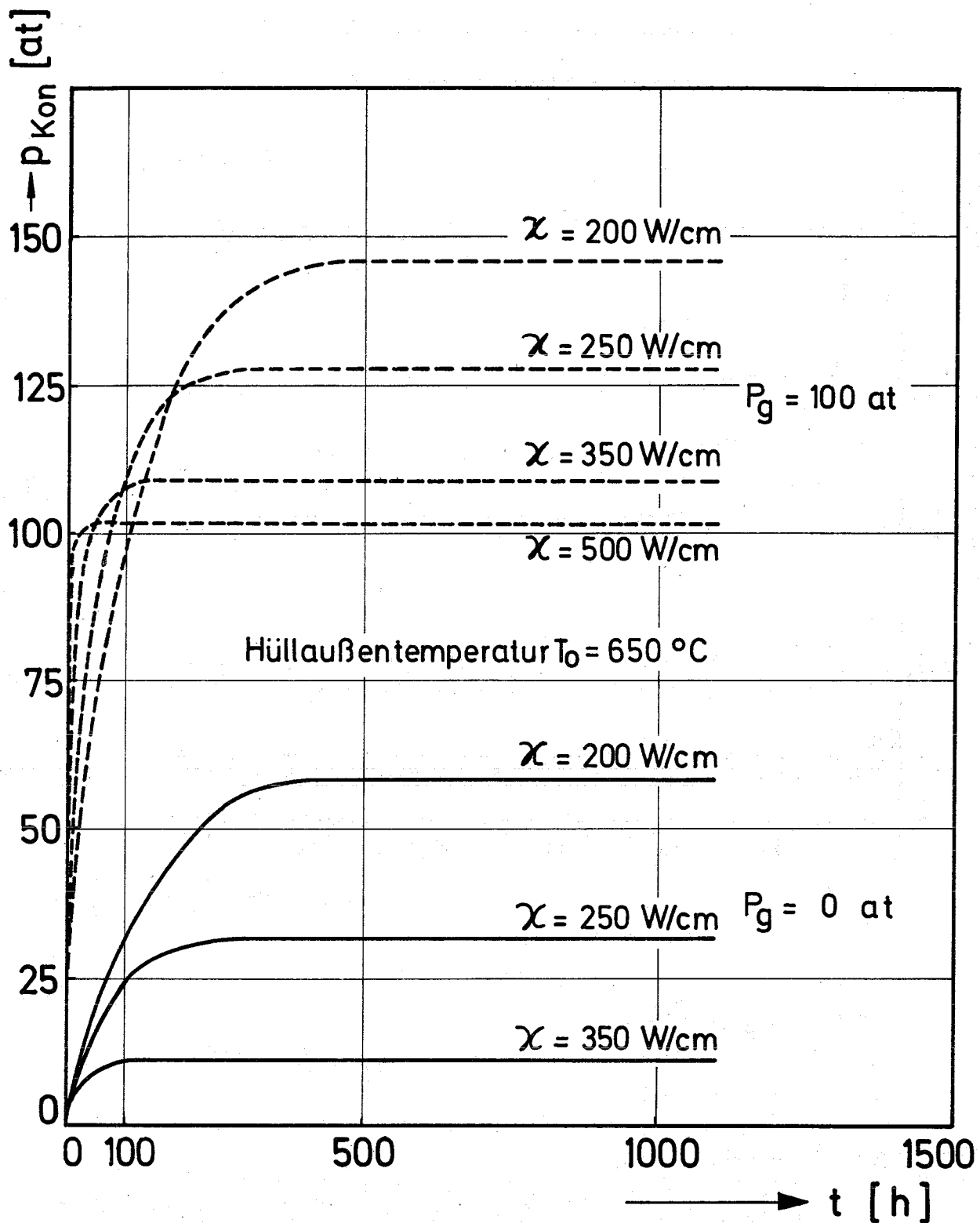
- - -  $p_g = 100 \text{ at}$

$T_0 = 450 \text{ }^{\circ}C$

Die übrigen Daten wie in Fig.14

Fig. 15

Zeitlicher Verlauf der „mechanischen“ Schichtdicken  $d$  in Abhängigkeit von Stableistung  $\chi$  und Zentralkanalgasdruck  $p_g$

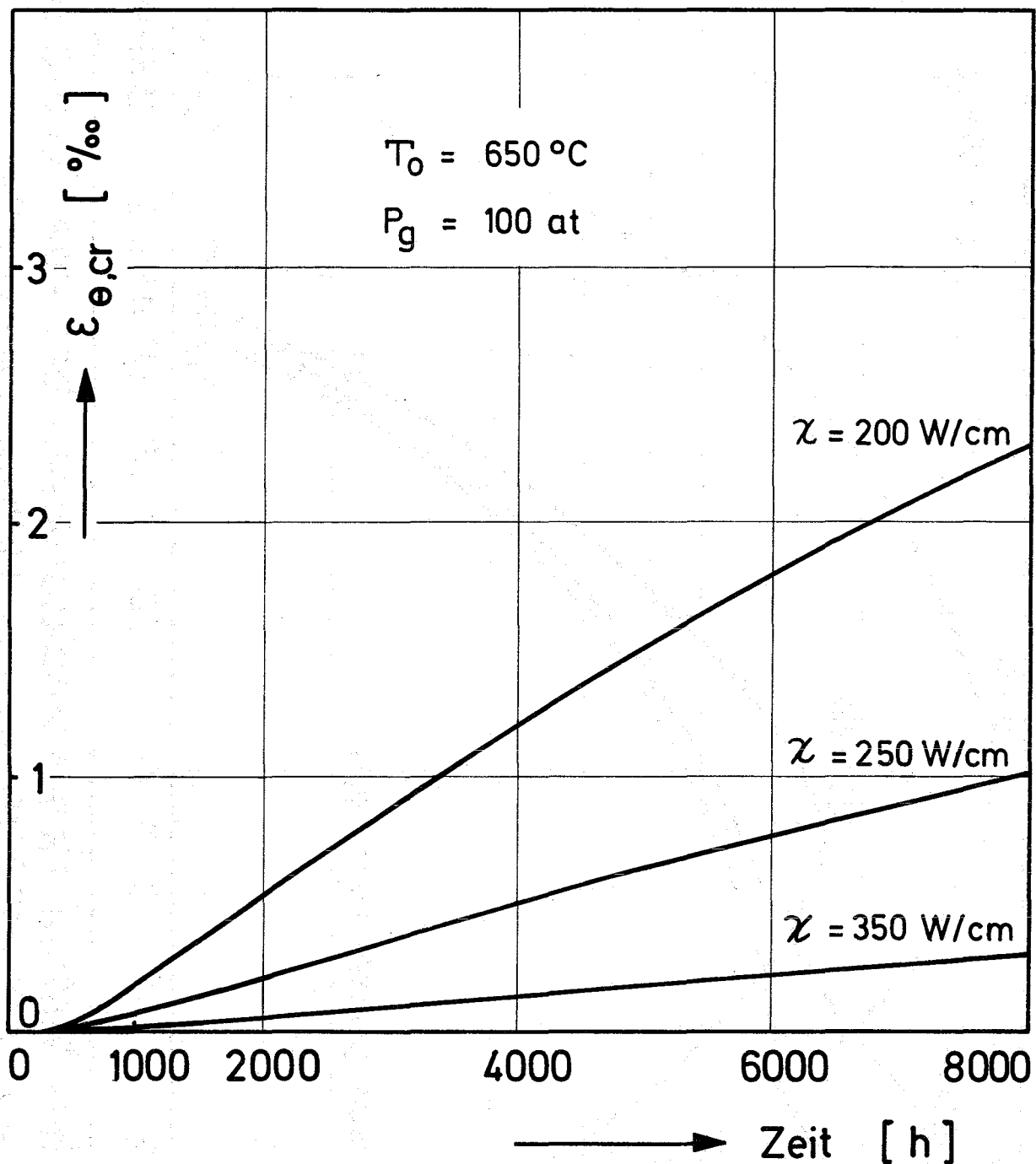


Die übrigen Daten wie in Fig. 14

Fig. 16

Kontaktdruck  $p_{Kon}$  als Funktion der Zeit  $t$  in Abhängigkeit der Stableistung  $\chi$  und des Zentralkanalgasdruckes  $p_g$





Die übrigen Daten wie in Fig. 14

Fig. 17

Zeitlicher Verlauf der tangential. Kriechdehnungen für schwellenden Brennstoff in Kontakt mit der Hülle

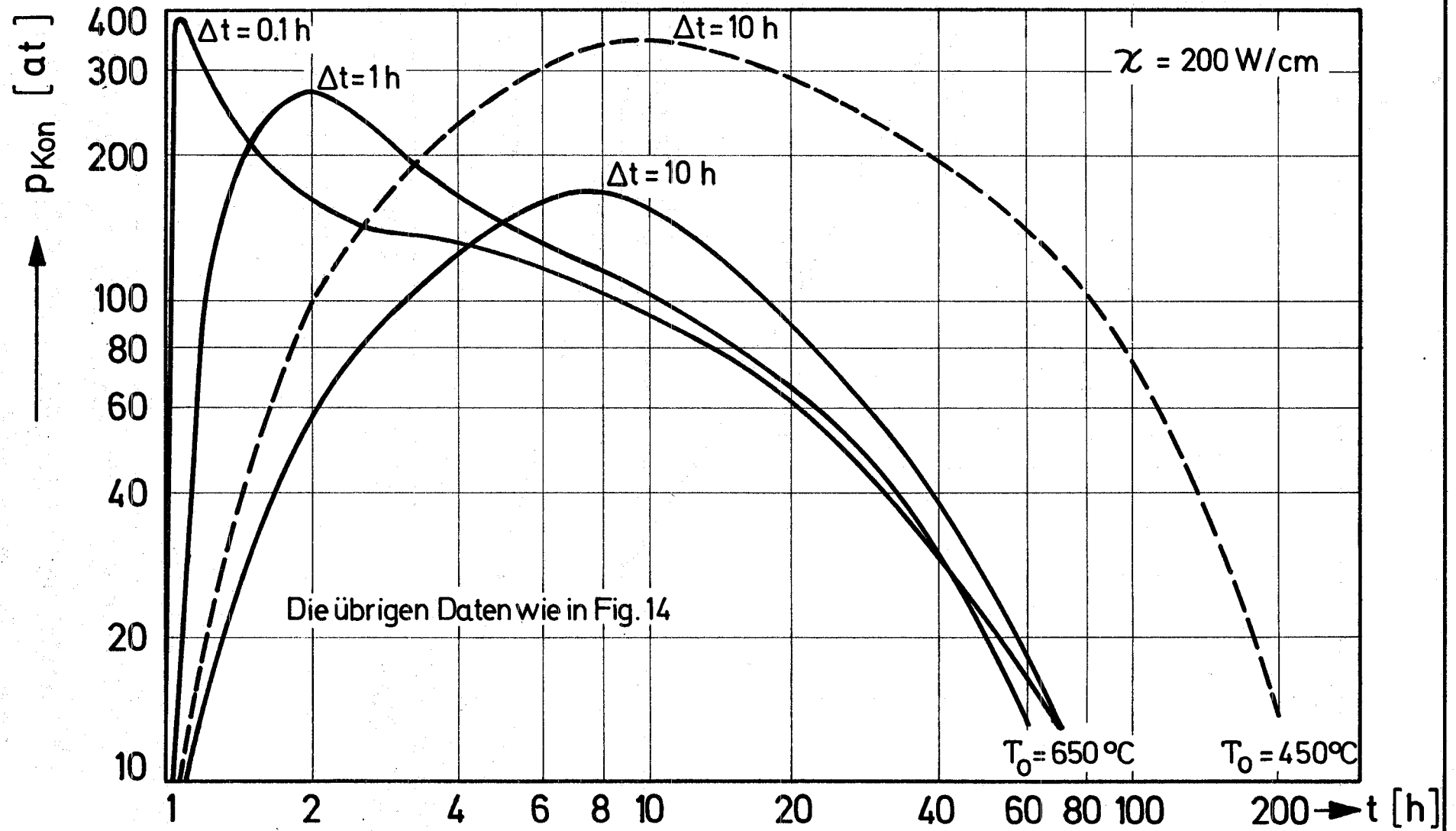


Fig. 18

Zeitlicher Verlauf des Kontaktdruckes bei einer Leistungsänderung  $\Delta\chi = 150 \text{ W/cm}$  mit Hülltemperatur  $T_0$  und Änderungsgeschwindigkeit als Parameter

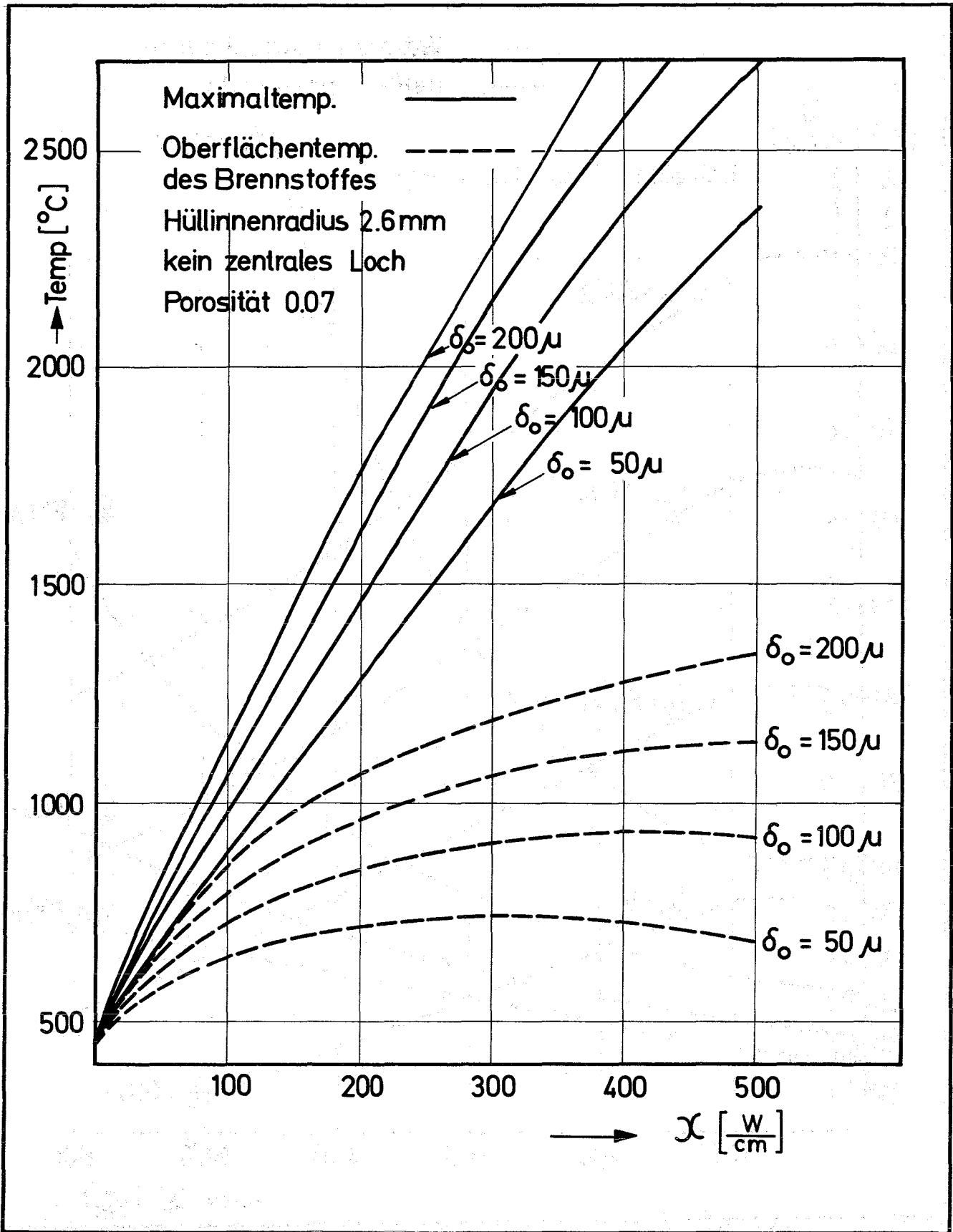


Fig. 19

Maximal- u. Oberflächentemperatur des Brennstoffes in Abhängigkeit der Stabileistung  $\chi$  mit kalter Ausgangspaltbreite  $\delta_0$  als Parameter für Schnellbrüterbedingungen.

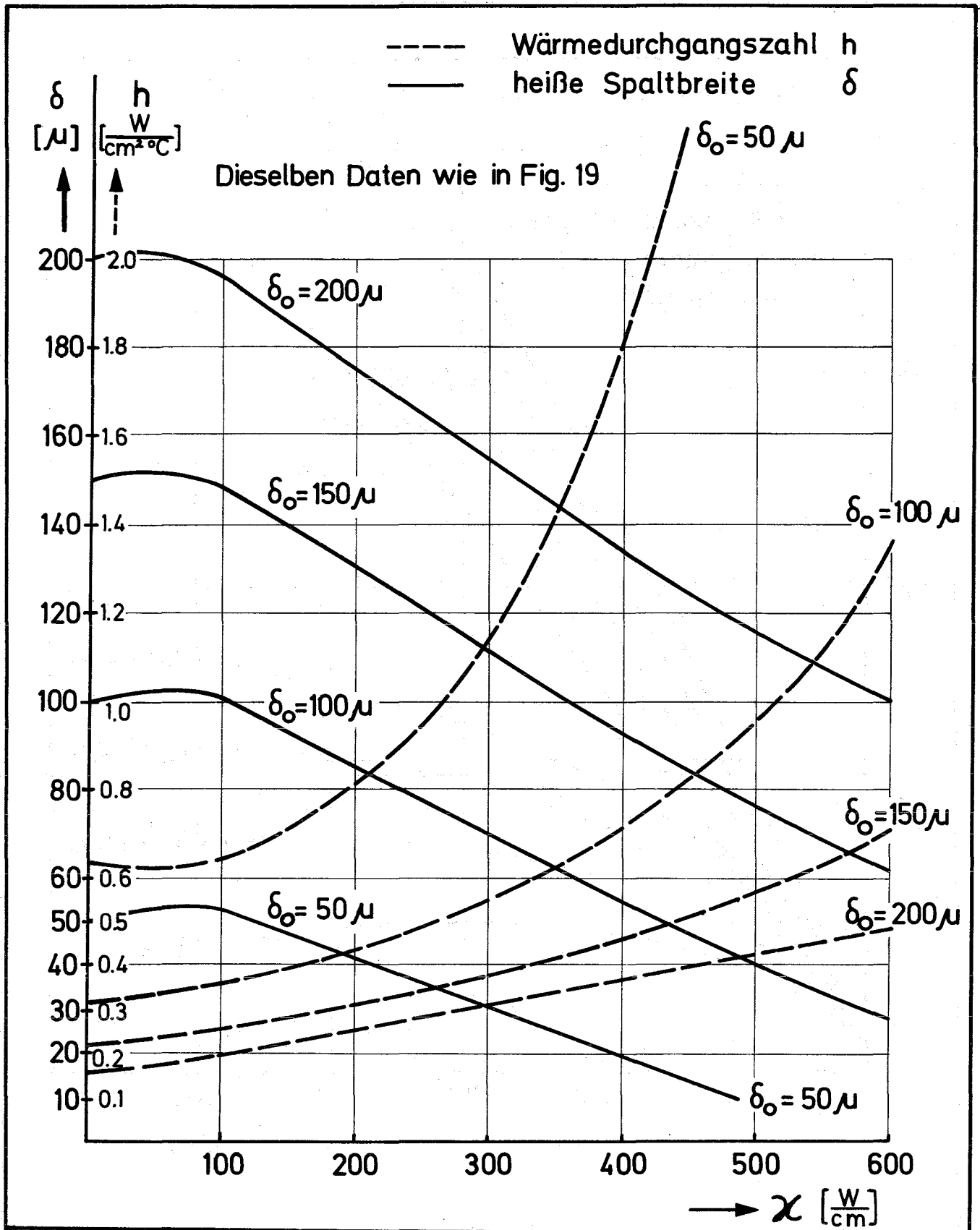


Fig. 20

Wärmedurchgangszahl  $h$  u. heiße Spaltbreite  $\delta$  in Abhängigk. d. Stableistg.  $\chi$  mit kalter Ausgangsspaltbreite  $\delta_0$  als Parameter für Schnellbrüterbedingungen.

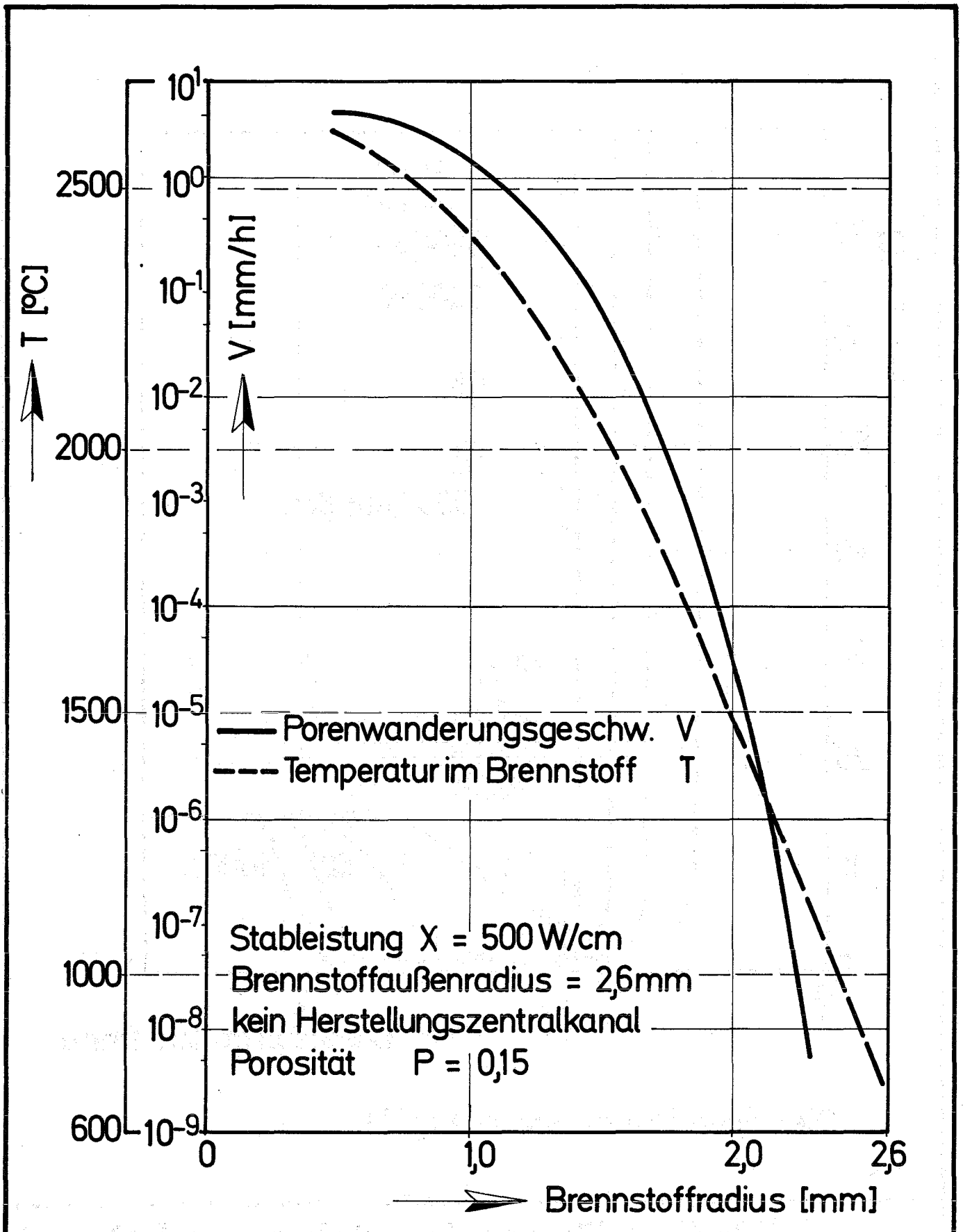
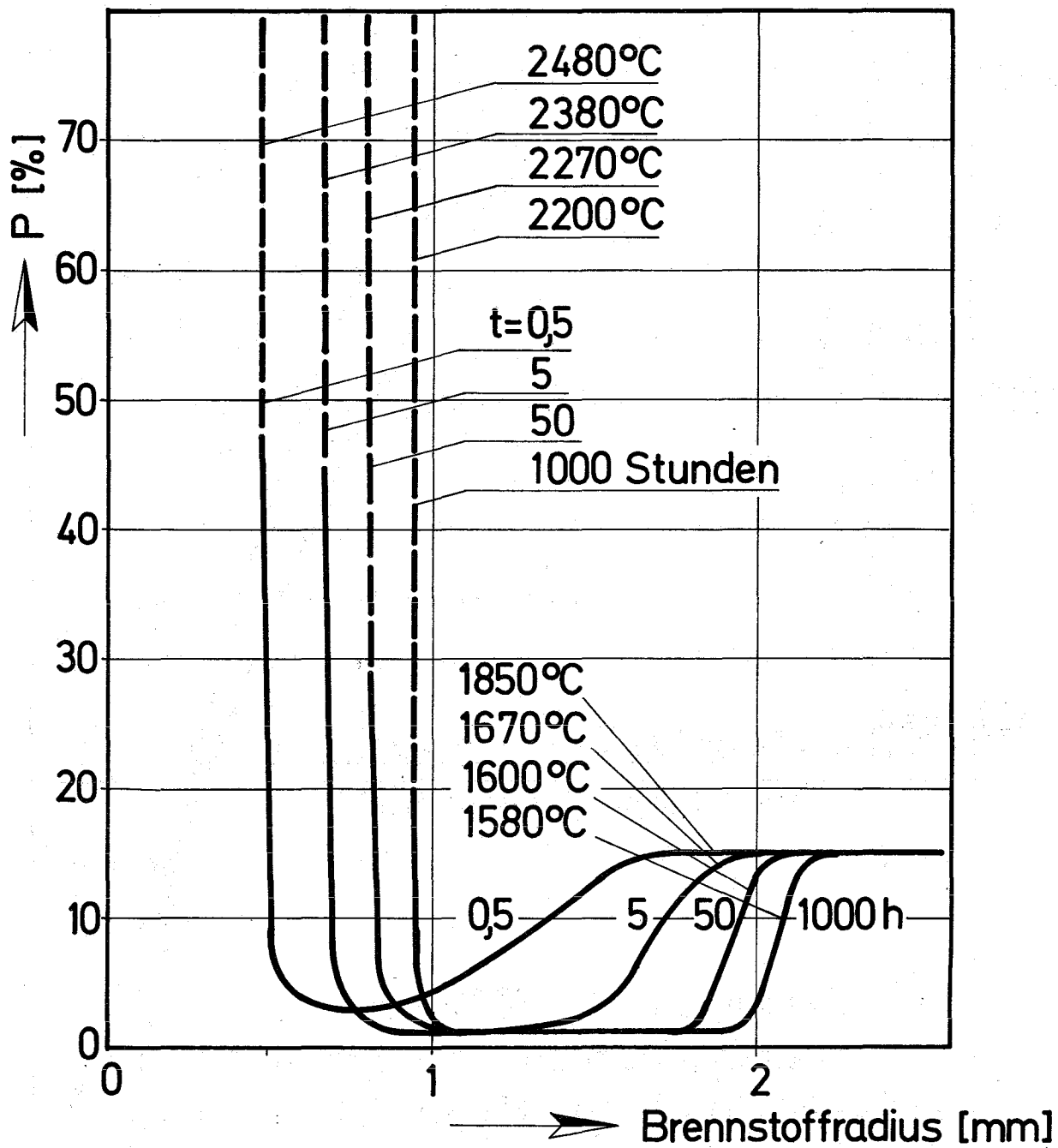


Fig. 21

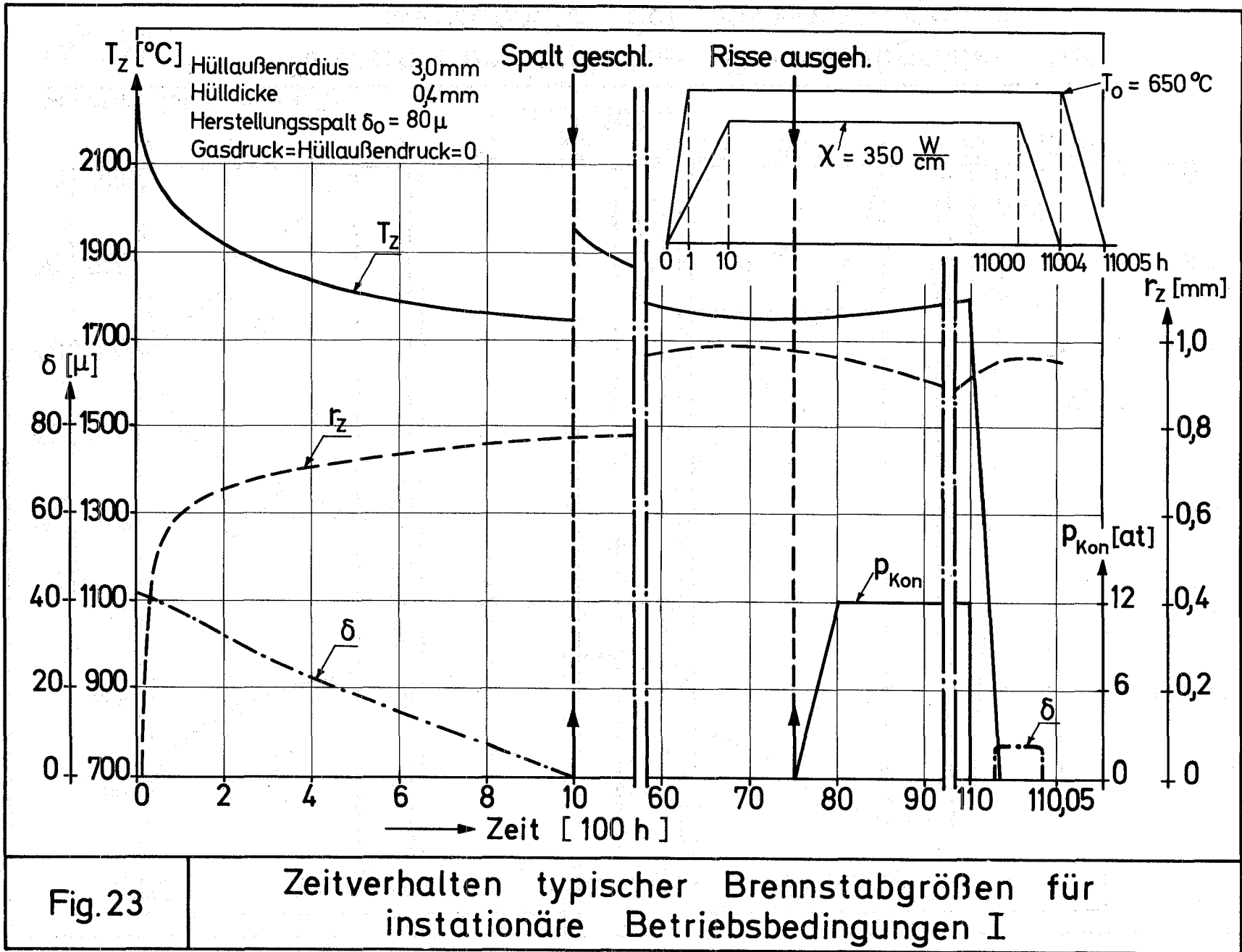
Radiale Verteilung der Porenwanderungsgeschwindigkeit und der Temperatur



Dieselben Daten wie in Fig. 21

Fig. 22

Radiale Porositätsverteilung auf Grund der Porenwanderung mit der Betriebszeit als Parameter



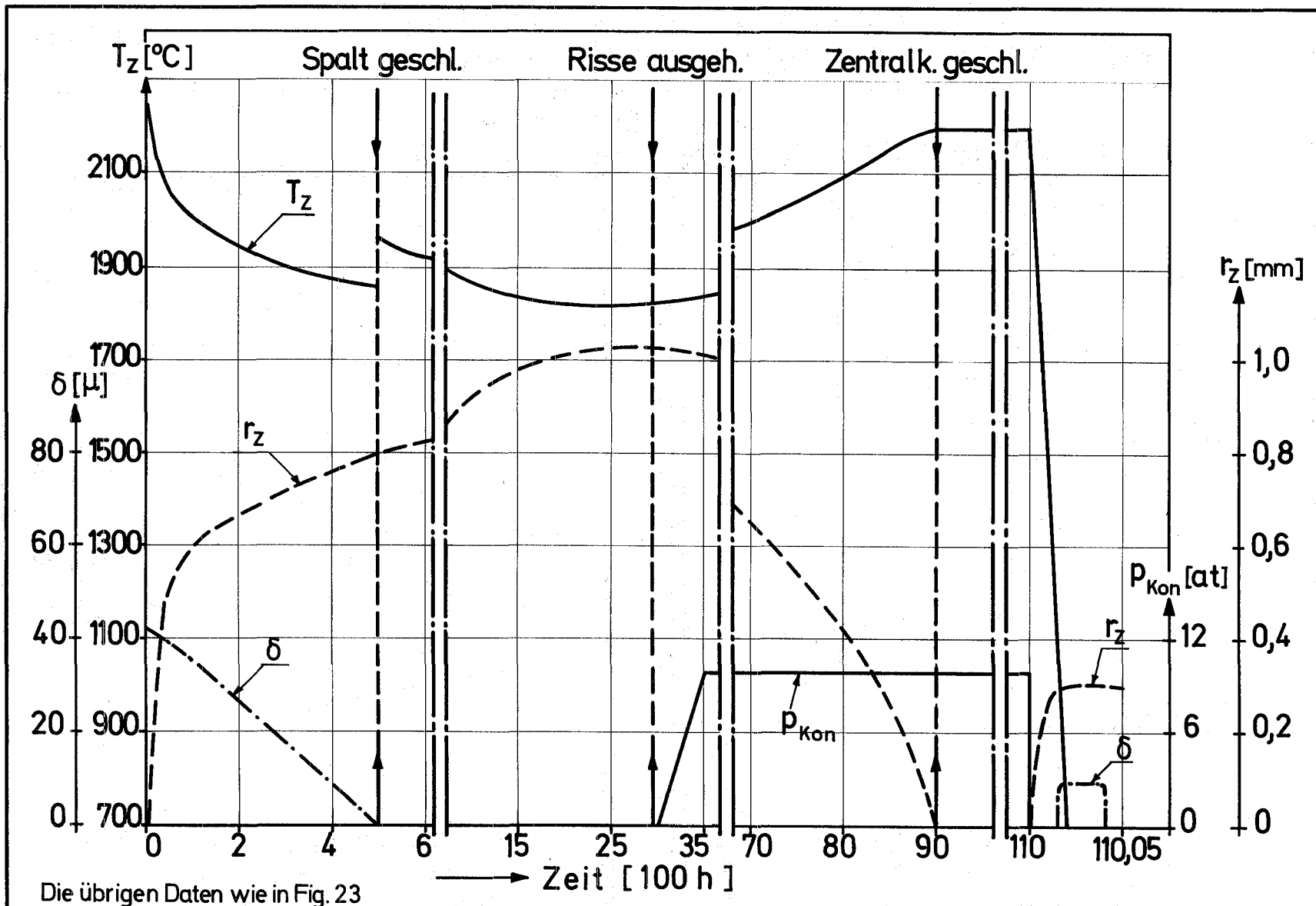


Fig. 24

Zeitverhalten typischer Brennstabgrößen für instationäre Betriebsbedingungen II



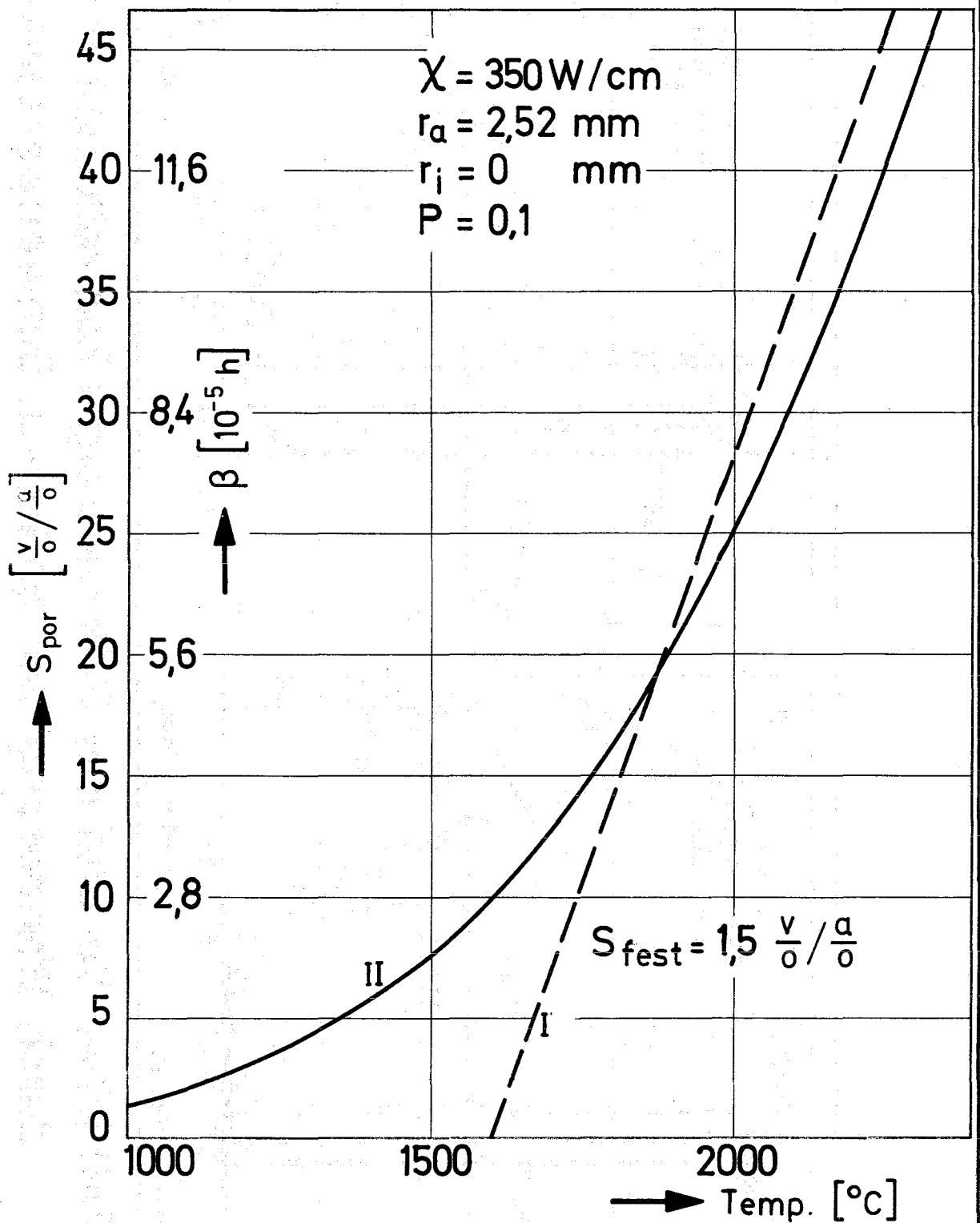
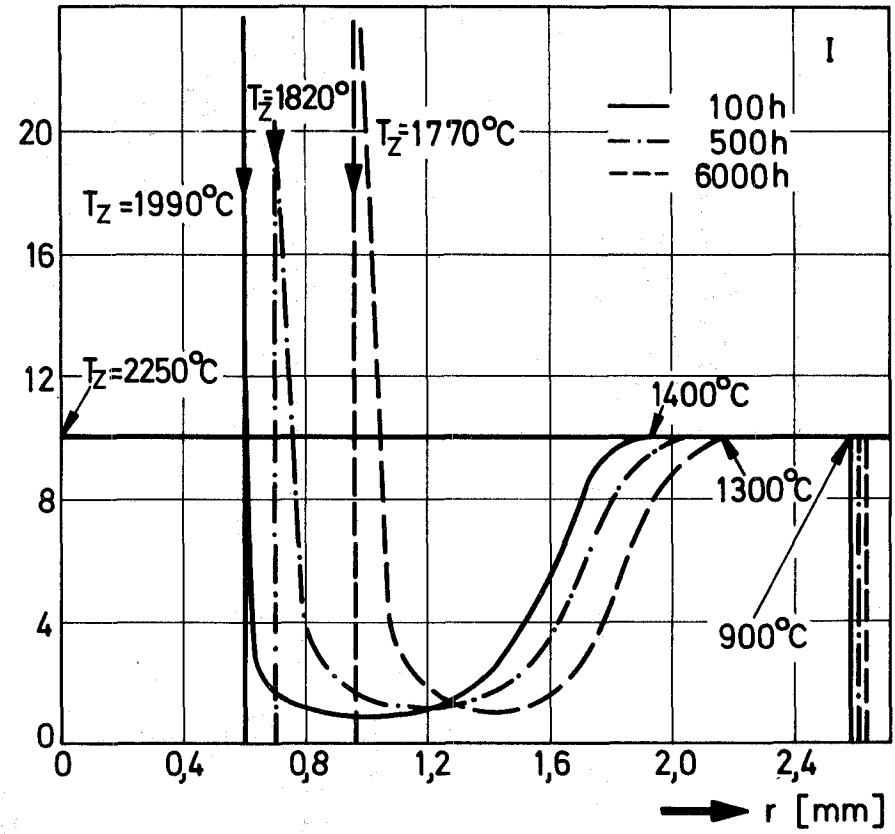
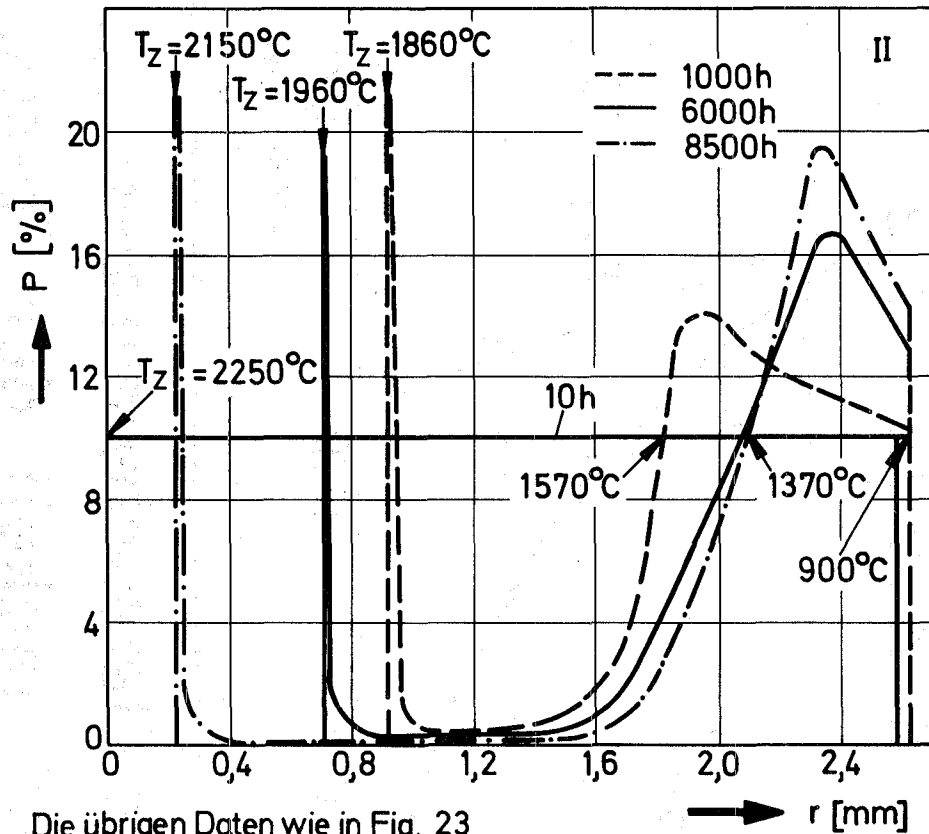


Fig. 25

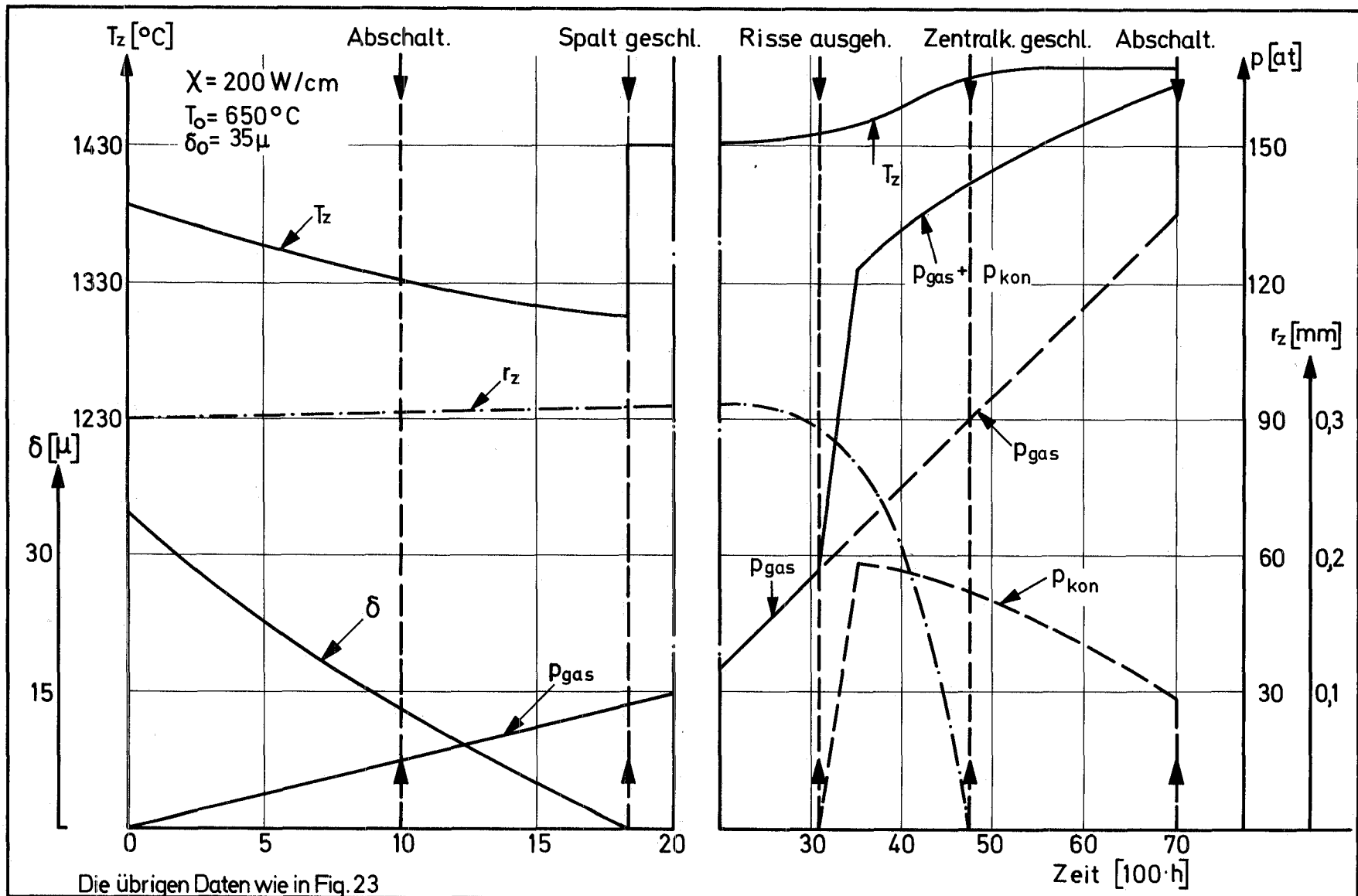
Porositätsschwellraten  $S_{\text{por}}$  in Abhängigkeit der Temperatur



Die übrigen Daten wie in Fig. 23

Fig. 26

Zeitlicher Verlauf der P-Verteilung u. Zentralkanalbildung durch Wanderung der Sinter- u. Schwellporosität



Die übrigen Daten wie in Fig. 23

Fig. 27

Zeitverhalten typischer Brennstabgrößen  
für instationäre Betriebsbedingungen III

