Beschreibung der Kühlwasserkalorimetrie – und der Wandthermometriediagnostik am Tokamak ASDEX Upgrade

Th. Richter, H. Vernickel

IPP 5/46

August 1992



## MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

8046 GARCHING BEI MÜNCHEN

# MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK GARCHING BEI MÜNCHEN

# Beschreibung der Kühlwasserkalorimetrie – und der Wandthermometriediagnostik am Tokamak ASDEX-Upgrade

Th. Richter, H. Vernickel

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik Garching bei München

August 1992

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	1
2. Energiedeposition auf Tokamakwände	2
3. Kühlwasserkalorimetrie an ASDEX-Upgrade	3
3.1. Grundlagen der Kalorimetrie	3
3.2. Die für die Kühlwasserkalorimetrie relevante Einbautengeometrie von ASDEX-Upgrade	4
3.3. Sensorik	4
3.3.1. Lokalisation der Meßstellen	4
3.3.2. Die Meßfühler	5
3.4. Theoretische Vorbetrachtungen zur Durchführung und Interpretation der Messungen	5
4. Wandthermometrie	7
5. Elektronische Signalverarbeitung	8
5.1. Signalerfassung	8
5.2. Datenspeicherung und Datenauswertung	10
5.3. Wartung der Meßstrecken	12
6. Erste Meßergebnisse	12
7. Zusammenfassung	13
Literaturverzeichnis	14
Tabellen und Abbildungen	16

### Abstract

This report describes in detail the hardware and software of the cooling water calorimetry and the wall thermometry diagnostics at the tokamak ASDEX-Upgrade. These diagnostics are used to analyze the energy deposition on the first wall elements in ASDEX-Upgrade.

The cooling water calorimetry system consists of 130 Platinum resistor thermometers Pt-100 and 27 Annubar flow meters located in the cooling water system of the tokamak downstream and upstream near the individual cooling units. These units are mainly the divertor plates (upper outer, upper inner, lower outer, lower inner) and the heat shield in each section of the torus (16 sections altogether). Therefore within this scale toroidally and poloidally resolved measurement of the cooling water temperature rise is possible. Resistor thermometers and flow meters are installed in the cooling water circuits of the passive stabilization loop and the ICRH antennas Faraday screens and will be installed in the cooling water system of the neutral injection boxes too.

In addition to the cooling water calorimetry system in some sections of the torus a wall thermometry diagnostic was installed to reach a higher poloidal resolution of the energy deposition measurements. The wall thermometry measuring system consists of 62 NiCr-Ni thermocouples, located in graphite tiles of the divertor plates, the heat shield and the passive stabilization loop.

The electrical measuring signals from the sensors are amplified, converted into digital signals, multiplexed with a frequency of 500 Hz, and sent over a fibre optics system into the control room. There a transputer system consisting of five T800 transputers receives the signals and stores a complete set of data about every three seconds during the 10 min pause between the shots. These raw data are sent into the data analysis system of the experiment and the deposited energy for each cooling unit is calculated.

First experimental results of the cooling water calorimetry show toroidal and poloidal asymmetries in the energy deposition on the ASDEX-Upgrade walls. These asymmetries are currently investigated using the described diagnostic systems.

## 1. Einleitung

Auf dem Wege zur Beherrschung der Technologie für die kontrollierte Kernfusion ist das Funktionsprinzip des Tokamakreaktors das bisher am weitesten entwickelte und am besten experimentell und theoretisch untersuchte Konzept. Obwohl der Tokamak in seiner Grundstruktur toroidal symmetrisch ist, gibt es doch in der Praxis der Tokamakentladungen Abweichungen von dieser idealen Symmetrie. Ursache für solche Asymmetrien sind z.B. die an vereinzelten toroidalen Positionen montierten Zusatzheizsysteme und Gasventile, technologisch bedingte Toleranzgrenzen bei der Fertigung von Tokamakkomponenten sowie das Plasma beeinflussende Diagnostikeinrichtungen. Da die Beherrschung der Plasma-Wand-Wechselwirkung einen besonders kritischen Punkt für die Konstruktion von Kernfusionsreaktoren wie ITER oder DEMO darstellt, ist die experimentelle und theoretische Untersuchung der Energiedeposition auf innere Tokamakwände in diesem Zusammenhang nicht nur für die Uberprüfung und Verbesserung von Modellen der Plasmarandschicht bedeutungsvoll. Gerade auch die Kenntnis über Phänomenologie und Ursachen toroidaler und poloidaler Asymmetrien in der Energiebeladung der Wände bei verschiedenen Entladungsregimen ist wesentlich für die Auslegung der Materialkennwerte zukünftiger Tokamakreaktorwände, für die Bestimmung der Fertigungstoleranzen von Tokamakkomponenten sowie für Empfehlungen zum allgemeinen Aufbau des Gesamtsystems und zu dessen Betriebsführung.

Zum experimentellen Studium der Energiedeposition auf Tokamakwände wurden am Tokamak ASDEX-Upgrade ein umfangreiches Kühlwasserkalorimetriesystem und eine Wandthermometriediagnostik installiert. Bei dem Kühlwasserkalorimetriesystem handelt es sich um das toroidal und poloidal engmaschigste Detektornetz seiner Art, das bisher an einem Tokamak aufgebaut worden ist. Das axialsymmetrische Divertorexperiment ASDEX-Upgrade ([1] – [6]) eignet sich als Tokamak mit reaktorrelevanter Randschicht besonders gut für die Untersuchung der Energiedeposition auf die inneren Wände einer solchen Maschine. Die technischen Hauptmerkmale von ASDEX-Upgrade sind: Großer Plasmaradius – 1,65 m; Plasmabreite – 1,00 m; Plasmahöhe – 1,60 m; 16 Toroidalfeldspulen; poloidaler offener Divertor; maximales Magnetfeld – 3,90 T; maximaler Plasmastrom – 2 MA.

lie Energie der aus dem Kernplasma abdiffundierten Wasserstoff- und Heliumionen auf pöglichst ziele Teilcheufin dem Plasmandschicht und im Divertor verteilt sordaß die Plasmatemperatur vor den Divertorprallplatten möglichst gering bleibt. Als Nebenoffelst des doch Recycling-Regimes ergibt sich ferner die Abstrahlung von Energie ans dem Plasma ler Abschälschicht und dest Divertors durch Wasserstoff und Verungsmitzungen, was einerseits zwar eine Verungerung der Leistungsflußdichte auf die Divertorplatten bestehten undererseits jedoch bei starker Abstrahlung entsprechende strahlungsgetriebene Plasmainstabilitäten (Marfes) zur Folge hat. Die Arbeiten am Tokanak ASDEX-Upgrade sind u.a. ber Erreichung eines Entladungsgetines mit kaltem Divertor sowie der Untersuchung von

Das an ASDEX-Upgrade installierte Kühlwasserkalorimetriesystem basiert auf den n der Vorgängermaschine ASDEX gesammelten Erfahrungen mit einer loroidal und po-

## 2. Energiedeposition auf Tokamakwände

Die inneren Wände von Tokamaks sind auf Grund der in diesen Maschinen erzeugten Materiezustände extremen Beanspruchungen ausgesetzt. Die drei Hauptmechanismen der Energiedeposition auf derartige Wände sind:

- 1. Strahlung, die aus dem Plasma zur Wand gelangt
- 2. Beschuß der Wand mit Ladungsaustauschneutralen
- 3. direkter Plasma-Wand-Kontakt und daraus resultierend der Beschuß der Wand mit Ionen und Elektronen.

Den ersten beiden der aufgeführten Mechanismen sind alle inneren Wände des Tokamaks ausgesetzt. An Limitern und Divertorprallplatten wirkt zusätzlich und unter bestimmten Betriebsbedingungen sogar dominierend die Energiedeposition über den direkten Plasma-Wand-Kontakt.

Strahlung gelangt in einem großen Wellenlängenbereich aus dem Plasma zu den Wänden. Die Strahlungsdichte ist im allgemeinen räumlich inhomogen verteilt und die Absorption der Strahlung von der Wellenlänge abhängig. Näheres hierzu findet man in der Literatur über Bolometer-Tomographie von Tokamakplasmen ([7] – [13]).

Neben der Übertragung rein kinetischer Energie auf die Wand beim Auftreffen von Ladungsaustauschneutralen, Ionen und Elektronen liefern auch Neutralisation und Rekombination dieser Teilchen am Festkörper einen Beitrag zur Energiedeposition auf die Tokamakwände. Diese physikalischen Effekte sind in der Literatur über Plasma-Wand-Wechselwirkung (z.B. [14] – [18]) ausführlich diskutiert.

Der vorliegende Report behandelt meßtechnische Aspekte im Zusammenhang mit der experimentellen Untersuchung thermischer Belastungen von Festkörperstrukturen des Tokamaks ASDEX-Upgrade mittels eines Kühlwasserkalorimetrie- und eines Wandthermometriesystems.

Für ASDEX-Upgrade werden bei vollem Ausbau aller Zusatzheizungen Leistungsflußdichten zur Wand im Bereich von etwa 0,15 bis 7,0 MW/m<sup>2</sup> erwartet, wobei die lokale Leistungsflußdichte stark von der poloidalen Position und dem gewählten Entladungsregime abhängig ist. Eine Reduktion der Leistungsflußdichte auf die inneren Tokamakwände hofft man mit dem Konzept des kalten Divertors zu erreichen [19]. Dieses Konzept basiert auf einem hohen Teilchenrecycling im Gebiet vor den Divertorprallplatten. Dabei wird die Energie der aus dem Kernplasma abdiffundierten Wasserstoff- und Heliumionen auf möglichst viele Teilchen in der Plasmarandschicht und im Divertor verteilt, so daß die Plasmatemperatur vor den Divertorprallplatten möglichst gering bleibt. Als Nebeneffekt des Hoch-Recycling-Regimes ergibt sich ferner die Abstrahlung von Energie aus dem Plasma der Abschälschicht und des Divertors durch Wasserstoff und Verunreinigungen, was einerseits zwar eine Verringerung der Leistungsflußdichte auf die Divertorplatten bedeutet, andererseits jedoch bei starker Abstrahlung entsprechende strahlungsgetriebene Plasmainstabilitäten (Marfes) zur Folge hat. Die Arbeiten am Tokamak ASDEX-Upgrade sind u.a. der Erreichung eines Entladungsregimes mit kaltem Divertor sowie der Untersuchung von in diesem Betriebszustand auftretenden Effekten gewidmet.

Das an ASDEX-Upgrade installierte Kühlwasserkalorimetriesystem basiert auf den an der Vorgängermaschine ASDEX gesammelten Erfahrungen mit einer toroidal und poloidal den Torus umfassenden Kühlwasserkalorimetriediagnostik. An ASDEX wurden mit

diesem System umfangreiche Messungen der Energiedeposition auf den Divertorplatten durchgeführt, deren Ergebnisse in [20] und [21] dargestellt sind. Man fand starke toroidale Asymmetrien der Energiedeposition auf die Divertorplatten bei zusatzgeheizten Entladungen. Gemessen wurde ferner eine typische poloidale Innen-Außen-Asymmetrie der Energiebeladung in Form einer stets größeren Belastung der Divertorplatten auf der Niedrigfeldseite im Vergleich zu den geringer belasteten Targets auf der Hochfeldseite des Tokamaks. Die Charakteristiken der toroidal und poloidal aufgelösten Energiedepositionsprofile zeigten Abhängigkeiten vom Typ der benutzten Plasmaheizung, von der vertikalen Plasmaposition und vom Sicherheitsfaktor. Das Auftreten dieser Asymmetrien wird in einem theoretischen Modell [21] als Folge einer natürlichen, zufälligen und nicht vollständig vermeidbaren Bildung magnetischer Inseln im Tokamak erklärt. Ursache solcher magnetischer Inselbildung sind kleine, nicht vorherbestimmbare räumliche Versetzungen von Magnetfeldspulen während der Montage und dem Betrieb eines Tokamaks.

ASDEX ist bislang der einzige Tokamak, an dem eine poloidal und toroidal auflösende Kühlwasserkalorimetrie zur Messung der Energiedeposition betrieben wurde. An anderen Tokamaks gibt es nur für einzelne lokale Positionen Wandenergiebeladungsmessungen mittels Thermoelementen oder Infrarot-Thermographie ([22] – [32]).

## 3. Kühlwasserkalorimetrie an ASDEX-Upgrade

## 3.1. Grundlagen der Kalorimetrie

Zur Ermittlung der über das Kühlwasser von den einzelnen Kühleinheiten des Tokamaks abgeführten Energie ist es notwendig, während der Kühlphase die zeitliche Abhängigkeit der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  des Kühlwassers vor und nach dem Durchfließen der jeweiligen Kühleinheit zu messen. Ferner benötigt man die Kenntnis der Kühlwasserdurchflußmenge pro Zeiteinheit  $\frac{\mathrm{d} m}{\mathrm{d} t}$ . Sei c die spezifische Wärmekapazität des Wassers, so bestimmt sich die über das Kühlwasser abgeführte Energie Q dann zu

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} c \frac{dm}{dt} \Delta T dt$$
 (1)

wobei man das Zeitintervall  $[t_1; t_2]$  derart wählen muß, daß die Temperaturexkursion im Kühlwasserrücklauf meßtechnisch vollständig erfaßt wird.

Formel (1) macht deutlich, daß es sich bei der Kühlwasserkalorimetrie um eine zeitlich integrale Messung handelt. Wie im folgenden noch ausführlich dargestellt wird, besitzt die Kühlwasserkalorimetrie jedoch eine toroidale und poloidale Ortsauflösung entsprechend den einzelnen Kühleinheiten.

## 3.2. Die für die Kühlwasserkalorimetrie relevante Einbautengeometrie von ASDEX-Upgrade

Der Tokamak ASDEX-Upgrade besteht toroidal aus 16 Segmenten, deren Grundstruktur Abbildung 1 im poloidalen Schnitt zeigt. Abbildung 2 vermittelt einen räumlichen Eindruck vom Aufbau des Vakuumgefäßes.

Auf die jeweils dem Torusinneren zugewandte Fläche der Metallstrukturen von Hitzeschild, Divertorplatten und Passiven Stabilisierungsleitern sind Graphitkacheln aufgeklemmt, während die Auflagenfläche jeweils mit einer wasserdurchflossenen metallischen Kühlschlange versehen ist (Abb. 3-5).

Jedes einzelne Divertorplattensegment und jedes Hitzeschildsegment bildet eine Kühleinheit. Der Passive Stabilisierungsleiter ist in zwei Kühleinheiten unterteilt. Separate Kühleinheiten sind ferner die Faradayschirme der vier ICRH-Antennen und die beiden noch nicht installierten bzw. noch nicht in Betrieb genommenen Neutralteilcheninjektoren.

Bei einer totalen Heizleistung von 12 MW während einer 10 s dauernden ASDEX-Upgrade-Entladung wird im Oberflächenzentrum einer Graphitkachel auf der unteren äußeren Divertorplatte in der Nähe der Separatrixdurchstoßlinie eine maximale Oberflächentemperaturerhöhung von 1100 K und eine über die gesamte entsprechende Kachel gemittelte Temperaturerhöhung von 360 K erwartet. Die experimentell gefundene exponentielle Abkühlzeitkonstante beträgt für die Divertorplatten 250 s und für das Hitzeschild 500 s.

## 3.3. Sensorik

#### 3.3.1.Lokalisation der Meßstellen

Abbildung 6 zeigt das Prinzipschaltbild der Kühlwasserführung für zwei Segmente einschließlich der Wassertemperatur- und Durchflußmeßstellen.

Neben den aus Abbildung 6 ersichtlichen, in jedem Segment vorhandenen Temperaturund Durchflußmeßstellen befinden sich in den Segmenten 2, 4, 10 und 12 zusätzliche Meßpunkte zur Detektion der Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasservor- und -rücklauf sowie zur Messung des Kühlwasserdurchsatzes der dort befindlichen Faradayschirme von ICRH-Antennen.

Ein weiteres zu kühlendes Bauelement des Tokamaks ist der Passive Stabilisierungsleiter. Auf dessen Außenseite ist sowohl für die obere als auch für die untere Torushälfte jeweils eine Kühlschlange montiert. Vor- und Rücklauftemperatur sowie der Durchfluß des Wassers werden auch für diese Kühlsysteme gemessen.

Ferner stehen im Vor- und Rücklauf des Kühlwassers für das Vakuumgefäß selbst jeweils acht toroidal symmetrisch verteilte Temperaturmeßstellen zur Verfügung. Diese dienen jedoch genau wie die ebenfalls ins Kühlwassersystem des Vakuumgefäßes integrierten acht Durchflußmesser hauptsächlich der betriebstechnischen Gefäßüberwachungsdiagnostik.

Sobald in den Segmenten 7 und 15 die Anlagen für die Neutralteilcheninjektion aufgebaut und betriebsbereit sind, werden auch in den Kühlwassersystemen dieser Neutralinjektionsboxen thermometrische und Durchflußmeßstellen zur Verfügung stehen.

## 3.3.2. Die Meßfühler

Zur Messung der Kühlwassertemperatur finden Widerstandsthermometer auf der Basis des Platin–Meßwiderstandes Pt–100 Anwendung. Diese Widerstandsthermometer besitzen eine relativ kurze Ansprechzeit. So haben sie in Wasser eine Halbwertszeit von 0,35 s und eine 9/10–Zeit von 1,30 s. In Verbindung mit dem benutzten Meßumformer RTM 60 C\* beträgt die absolute Meßgenauigkeit des Systems im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 100 °C  $\pm$ 0,3 K.

Zur Messung des Kühlwasserdurchflusses werden Annubar–Staudrucksonden in Kombination mit Meßumformern vom Typ STD 624\*\* eingesetzt. Die relative Meßgenauigkeit dieses Systems beträgt bei 25°C Wassertemperatur  $\pm\,0,2\,\%$  und verschlechtert sich um jeweils weitere  $\pm\,0,1\,\%$  pro 7 K Abweichung von diesem Temperaturwert.

Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, besitzt keine Kühleinheit (Divertorplatte, Hitzeschildsegment) eine separate in situ Kühlwasserdurchflußdetektion. In diese Kühlstränge sind Blenden eingebaut, deren strömungstechnische Daten in einem gesonderten Wasserkreislauf einzeln vermessen wurden [33]. Entsprechend [33] ergeben sich daraus mit einer relativen Genauigkeit von  $\pm 5\,\%$  die in Tabelle 1 für jede Kühleinheit aufgeführten Kühlwasserdurchsätze. Die Durchflußmessungen entsprechend Abbildung 6 dienen während der Experimentdurchführung der aktuellen summarischen Kontrolle dieser Solldurchsätze.

# 3.4. Theoretische Vorbetrachtungen zur Durchführung und Interpretation der Messungen

Die Energiedepositionsmessungen mittels der Kühlwasserkalorimetrie sind entsprechend Gleichung (1) nur als zeitintegrale Messungen am Tokamak ausführbar, da die maximale Plasmaentladungsdauer von 10 s klein gegenüber den bei der Messung zu berücksichtigenden thermischen Zeitkonstanten ist.

Um eine erste Orientierung über erwarteten Zeitverlauf und Größe der Temperatursignale aus den Kühlwasserkreisläufen zu erhalten, sollen im folgenden die entsprechenden Verhältnisse an einer Divertorplatte mit geklemmten Graphitkacheln diskutiert werden.

Der Temperaturanstieg an der Temperaturmeßstelle im Kühlwassersystem ist bestimmt durch den Zeitverzug der Wasserströmung von rund 2 s und die Wärmeleitung in der Graphitkachel von der beaufschlagten Vorderseite bis zur gekühlten Rückseite. Bis die Rückseite ihre Maximaltemperatur erreicht vergehen rund 20 s. Der Temperaturabfall wird hauptsächlich durch den Übergangswiderstand zwischen der Graphitkachel und dem Strukturmetall bestimmt. Die exponentielle Abkühlzeitkonstante wurde gemessen und beträgt 250 s. Der Zeitverzug durch die Wärmeleitung ist so groß, daß der Temperaturanstieg im Kühlwasser erst nach dem Schußende erfolgt und daher kein Fehler dadurch entsteht, daß unmittelbar während des Schusses die Temperaturen nicht gemessen werden. So haben die in der eigentlichen Schußphase auftretenden großen elektromagnetischen Streufelder keinen störenden Einfluß auf diese Messungen. Es ergibt sich der in Abbildung 7 skizzierte zeitliche Verlauf der Kühlwassertemperatur.

<sup>\*</sup> Fa. Soclair Electronic

<sup>\*\*</sup> Fa. Honeywell

Am Ende einer Standard-Schußpause von 10 Minuten werden 9 % der auf die Divertorplatte deponierten Energie noch nicht über das Kühlwasser abgeführt sein.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die erwartete Energiedeposition auf die verschiedenen Systemkomponenten und die entsprechenden maximalen Temperaturerhöhungen in den einzelnen Kühleinheiten. Der Abschätzung zugrunde gelegt ist eine 7 s dauernde Plasmaentladung im Single-Null-Unten-Regime mit 12 MW Heizung wobei 50 % der Energie auf die unteren Divertorplatten gelangen und 50 % der Energie abgestrahlt werden sollen.

Neben der Messung der insgesamt über das Kühlwasser abgeführten Energie als Beitrag zur integralen Energiebilanzierung besteht die wichtigste Aufgabe der Kühlwasserkalorimetrie darin, die toroidale und poloidale Verteilung der Energiedeposition zu messen. Auf Grund der in 3.3.2. angegebenen Meßgenauigkeiten wird erwartet, daß in der Energiedeposition auf nominell gleiche Kühlkreise Abweichungen untereinander von mindestens 10 % mit Sicherheit zu registrieren sind.

Da sich aus technischen Gründen zwischen den Kühleinheiten und den Pt–100–Meßfühlern der Kühlwasserkalorimetrie rund 4 m Rohrleitung mit 1 cm Innendurchmesser befinden, muß der relative Verlust  $L_{\rm rel}$  bezogen auf die transportierte Energie zwischen Wärmequelle und Sensor abgeschätzt werden.  $L_{\rm rel}$  ergibt sich aus

$$L_{\rm rel} = \frac{d\pi l k \Delta T}{\dot{m} c \Delta T} \tag{2}$$

mit d = 1 cm, l = 4 m, m =  $518 \, \text{kg/h} - 822 \, \text{kg/h}$ , k =  $12 \cdot 10^{-4} \, \text{W/cm}^2 \, \text{K}$  (Wärmedurchgangskoeffizient für die Rohrwand einschließlich der Isolation) und c =  $4,18 \, \text{kJ/kgK}$  zu  $L_{\rm rel} = 0,25 \, \% - 0,16 \, \%$  und ist damit vernachlässigbar klein. Die während der Aufheizphase eintretende Erwärmung des Kühlleitungsrohres selber ist keine Wärmesenke für den kalorimetrischen Meßprozeß, da während der Abkühlphase auch der Wasserrohrmantel seine Wärmeenergie wieder an das Kühlwasser abgibt.

Die Restwärmemenge einer Kühleinheit am Ende der Schußpause liegt wie oben gezeigt bei rund 9 % der auf diese Kühleinheit deponierten Energie. Sofern am Ende der Schußpause noch eine meßbare Temperaturerhöhung des Kühlwassers gegenüber den Verhältnissen vor Schußbeginn vorhanden ist, muß dies bei der Festlegung der Temperaturgrundlinie für die Auswertung des nächsten Schusses berücksichtigt werden. Außerdem ist in so einem Falle für die Berechnung der gesamten auf die entsprechende Kühleinheit im aktuellen Schuß deponierten Energie die gemessene Abkühlkurve der Wassertemperatur zeitlich über die 600 s Schußpause hinaus zu extrapolieren.

Die kalorimetrische Energiedepositionsbestimmung kann durch gefäßinterne Umverteilung von Energie durch Wärmestrahlung beeinflußt werden. Das betrifft speziell die überwiegend strahlungsgekühlten Graphitkacheln des Passiven Stabilisierungsleiters. Deren Temperatur wird zunächst von Schuß zu Schuß steigen, bis sie im Gleichgewicht von Vorder- und Rückseite etwa gleichviel abstrahlen. Nur die Strahlung von der Rückseite gelangt zum Passiven Stabilisierungsleiter. Die Strahlung von der Vorderseite der entsprechenden Graphitkacheln trifft überwiegend auf das Hitzeschild. Da an einigen Kacheln sowohl des Passiven Stabilisierungsleiters als auch des Hitzeschildes die Temperatur mit Thermoelementen gemessen wird, besteht jedoch die Möglichkeit, diese Thermoelementmeßdaten gegebenenfalls zur Interpretation oder Korrektur der aus den Rohdaten der Kühlwasserkalorimetrie gewonnenen Energiedepositionsverteilungen heranzuziehen.

#### 4. Wandthermometrie

Als Ergänzung zur Kühlwasserkalorimetriediagnostik wurde an ASDEX-Upgrade eine Wandthermometriediagnostik installiert, um an einigen Segmenten eine größere poloidale Auflösung der Energiedepositionsbestimmung erreichen zu können. Die hierzu benutzten Meßfühler sind Thermoelementköpfe, welche mit Hilfe einer elektrisch isolierenden Aluminiumoxidkeramik in Graphitkacheln auf Divertorplatten, dem Hitzeschild und dem Passiven Stabilisierungsleiter eingeklebt wurden (Abb. 8). Dies konnte jedoch nur auf wenige toroidale Stellen begrenzt bleiben, da die Möglichkeiten der Verlegung von Kabeln innerhalb des Torusgefäßes und die Bereitstellung elektrischer Durchführungen nach außen eingeschränkt sind.

Als Thermoelement fand die Kombination NiCr-Ni Verwendung. Die Nickel- und Chromnickeldrähte verlaufen innerhalb des Torusgefäßes bis an einen Flansch und sind dort an nach außen führende Kupferdrähte geklemmt. Diese auf Gefäßtemperatur liegende Klemmverbindung stellt die Vergleichsmeßstelle dar.

Insgesamt sind mit Thermoelementköpfen bestückt:

- jeweils eine poloidale Kachelreihe zu vier Kacheln auf den Divertorplatten unten außen und innen in den Segmenten 4, 13 und 16 sowie auf den oberen inneren Divertorplatten in den Segmenten 4 und 13
- jeweils eine poloidale Kachelreihe zu je drei Kacheln auf den oberen äußeren Divertorplatten in den Segmenten 4 und 13
- jeweils vier Kacheln einer vertikalen Hitzeschildkachelreihe in den Segmenten 4, 8, 13 und 16
- jeweils zwei Graphitkacheln der Abdeckung des Passiven Stabilisierungsleiters in den Segmenten 8 und 16
- zwei große Sondermeßkacheln der Thermographiediagnostik auf den unteren äußeren Divertorplatten im Segment 16 (jeweils zwei Thermoelemente pro Kachel).

Für die Thermoelemente liegt der standardmäßig garantierte maximale Meßfehler bis zu einer Temperatur von 400°C gemessen gegen eine Vergleichstemperatur von 0°C bei +3 K, für höhere Temperaturdifferenzen bei + 0,75 % des Meßwertes [34].

Um den Einfluß der als Klebstoff für die Thermoelementköpfe in den Graphitkacheln benutzten Aluminiumoxidkeramik auf die Temperaturmessung zu testen, wurden an einer Kachel entsprechende Laboruntersuchungen durchgeführt. Es erfolgte eine definierte Erwärmung der Kachelvorderseite, während dabei der zeitliche Temperaturverlauf auf der Kachelvorder- und -rückseite mit zusätzlich aufgebrachten Thermoelementen sowie der zeitliche Temperaturverlauf im Festkörper mit Hilfe des standardmäßig eingeklebten Thermoelementes gemessen wurden. Nach Beendigung der Wärmezufuhr dauert der Wärmeausgleich innerhalb der Kachel 20 s. Dieses experimentelle Resultat stimmt mit dem Ergebnis entsprechender Wärmeleitungsrechnungen überein. Eine etwaige Beinträchtigung der Festkörpertemperaturmessung durch die um das innere Thermoelement herum befindliche, elektrisch isolierende Aluminiumoxidkeramik konnte nicht festgestellt werden.

## 5. Elektronische Signalverarbeitung

## 5.1. Signalerfassung

Wie unter 3.3.2. bereits beschrieben wurde, finden zur Messung der Kühlwassertemperatur Widerstandsthermometer auf der Basis des Platin-Meßwiderstandes Pt-100 in Verbindung mit Meßumformern vom Typ RTM 60 C Anwendung. Eine Temperaturänderung am Meßfühler um 1 K entspricht einer Spannungsänderung von 10 mV am Ausgang des RTM 60 C - Moduls. Die analogen elektrischen Signale werden in Isolierverstärkereinheiten fünffach verstärkt und danach auf 8-Kanal-Multiplexer-ADCs geführt. Diese Analog-Digital-Wandler haben ein Spannungsauflösungsvermögen von 2,5 mV, was in der beschriebenen Meßstrecke einer Temperaturauflösung von 0,05 K entspricht. Die gesamten Kanäle der Widerstandsthermometermeßstrecken werden in drei Blocks zu 52, 55 und 23 Kanälen mit je 500 Hz Multiplexfrequenz im seriellen Multiplexverfahren über Optokoppler und Lichtwellenleiter an drei T800 - Transputer [35] gekoppelt, welche die Meßsignale empfangen, zeitlich selektieren und die Meßwerte speichern. Die optoelektronische Ubertragungsstrecke dient der galvanischen Entkopplung des Meßplatzes vom Tokamakgefäß und ist außerdem vorteilhaft wegen ihrer Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störfeldern. Die Verwendung der schnellen, parallel arbeitenden Transputersysteme ist für die zeitunkritische Signalerfassung der Kühlwasserkalorimetrie und der Wandthermometrie aus physikalischen Gründen nicht notwendig. Wegen der Vielzahl der zu betrachtenden Meßkanäle wurde jedoch dem Einsatz der Transputer gegenüber dem ASDEX-Upgrade CAMAC-Standard aus Platz- und Kostengründen der Vorzug gegeben.

Zur Messung des Kühlwasserdurchflusses kommen Annubar-Staudrucksonden in Kombination mit Meßumformern des Typs STD 624 zum Einsatz. Die an den Ausgängen der STD 624 – Meßumformer anliegenden Stromsignale werden über Radizier- und Isolierverstärkereinheiten in 0 – 10 V Spannungspegel transformiert und auf 8-Kanal-Multiplexer-ADCs geführt. In einem Block von 27 Kanälen zusammengefaßt erfolgt die weitere Übertragung der Durchflußmeßsignale genauso wie oben für die Wassertemperatursignale beschrieben im seriellen Multiplexverfahren mit Hilfe einer optoelektronischen Datenleitung auf einen T800 – Transputer.

Für die Durchflußmessungen an den Kühlwasserkreisläufen der ICRH-Antennen, des Passiven Stabilisierungsleiters und der Neutralinjektionsboxen werden Annubarsonden mit einem Meßbereich von  $0-2\,\mathrm{m}^3/\mathrm{h}$  und für alle übrigen Gefäßeinbauten Annubarsonden mit einem Meßbereich von  $0-8\,\mathrm{m}^3/\mathrm{h}$  eingesetzt. Bei einer Digitalisierung von 2,5 mV pro Bit in den ADCs entspricht dies einem digitalen Auflösungsvermögen der gesamten Meßstrecke von  $5\,\mathrm{dm}^3/\mathrm{h}$  bzw.  $20\,\mathrm{dm}^3/\mathrm{h}$ .

Die Signalerfassungsstrecke für die 62 Thermoelemente der Wandthermometriediagnostik ist prinzipiell entsprechend den Wassertemperatur- bzw. Durchflußmeßstrecken aufgebaut. Die Thermospannungssignale werden über Operationsverstärker, Multiplex-ADCs und eine optoelektronische Übertragungsstrecke mit 500 Hz Multiplexfrequenz in einen T800 – Transputer eingekoppelt. Das digitale Auflösungsvermögen der gesamten Wandthermometriemeßstrecke beträgt 0,25 K. Die absolute Meßunsicherheit des Wandthermometriesystems wird bestimmt durch die Normung der Thermoelemente, durch das digitale Auflösungsvermögen der Meßstrecke und durch die Genauigkeit der Gefäßkühl-

wassertemperaturmessung. Unter Berücksichtigung aller dieser Faktoren ergibt sich eine Meßunsicherheit in der absoluten Kacheltemperaturbestimmung von  $-0.6\,\mathrm{K}\,/+3.0\,\mathrm{K}$  bei Kacheltemperaturen T bis hinauf zu 673 K und eine Meßunsicherheit von $-0.6\,\mathrm{K}\,/+\frac{75}{100}(\mathrm{T}-273\,\mathrm{K})$  für höhere Kacheltemperaturen. Die relative Meßunsicherheit in Bezug auf die Differenz zweier zu verschiedenen Zeitpunkten in einem Diagnostiklauf mit ein und demselben Thermoelement gemessenen Temperaturen wird ausschließlich durch das digitale Auflösungsvermögen der Meßstrecke bestimmt und ergibt sich daher zu  $\pm 0.5\,\mathrm{K}$ .

Die Transputer am Ende jeder einzelnen der oben beschriebenen Signalerfassungsstrecken sind mit einer gemeinsamen Master-CPU verbunden. Diese enthält einen T800 – Transputer und einen 4 MByte Speicher. Die Master-CPU koppelt das gesamte Transputersystem an den Lokalen Timer der Diagnostik und an die Host-CPU. Die Host-CPU, in diesem Falle eine ISI-Workstation, ist Bestandteil des ASDEX-Upgrade-Rechnernetzes. In diesem Netzwerk verknüpfen mehrere Knotenrechner kommunikationsfähig alle zur Steuerung und Prozeßführung von ASDEX-Upgrade notwendigen Computer, alle Diagnostik-Workstations sowie die IBM-Maschine, auf der das zentrale ASDEX-Upgrade-Datenspeicherprogramm AMOS/D läuft. Die für die Kühlwasserkalorimetrie- und Wandthermometrie zuständige Diagnostikworkstation hat im ASDEX-Upgrade-Netz die Adresse "kwk". Mittels eines MSCC-Kommunikationsboards ist sie in das Netz integriert.

Der Lokale Timer der Diagnostik ist mit dem Zentralen Timer von ASDEX-Upgrade verbunden. Aus der Vielzahl der vom Zentralen Timer angebotenen Ereignismarken sind die für das Starten und Stoppen der speziellen Diagnostik-Datenaufnahme erforderlichen Marken auszuwählen und im EPROM des Lokalen Timers zu programmieren. Als Starttrigger für die Kühlwasserkalorimetrie- und die Wandthermometriediagnostik gilt die Timermarke "PLASMASTROM AUS"; Endetrigger sind "BEGINN SCHUSSPRO-GRAMM", "BEGINN PAUSE" und "EXPERIMENTENDE". Die Aufnahme der thermometrischen und der Durchflußmeßdaten erfolgt also stets in der Pause zwischen den einzelnen ASDEX-Upgrade-Schüssen. Unabhängig vom automatisch arbeitenden ASDEX-Upgrade-Timersystem ist auch eine manuelle Triggerung der Kühlwasserkalorimetrie- und der Wandthermometriediagnostik zu beliebigen Zeitpunkten möglich. Weitere Einzelheiten über Hard- und Software der Transputer-Datenerfassung sowie zum Timersystem findet man in [36] und [37].

leiten awischen (1,5 s. und 6,0 s. in der Regel jedoch 5,5 s. programmers-do M. e.b. meter Bei der Auswertung von Wandthermometrienignalen ist folgendes zu beachtent m KWK: Schuffilerabgelegten Temperaturwerte To der Themoelementar Satrocken si p sufbergitet, daß der gemessenen Different zwischen Grophitkuchalten gentur Trott fokamakgefälltemperatur To bazd gapenfillig elektronisch eins Hemperatur von 2010 h

 $\Gamma_0 = (\Gamma_{\rm E} - \Gamma_{\rm G}) + 20^{\circ} {\rm C}$ 

## 5.2. Datenspeicherung und Datenauswertung (1 10111) panasemulategatotionant

Jeder Transputer liest nach dem Einschalten der Diagnostik alle 2 ms einen Meßwert und legt die Daten zyklisch in seinem Speicher ab. An der ISI-Workstation kann über den Shotfileheader programmiert werden, wieviele Meßwerte pro Signal und pro Zeiteinheit tatsächlich im Transputerspeicher aufzuheben sind. Nach dem Empfang des Starttriggers werden zu den vorher zyklisch im Transputerspeicher abgelegten Daten noch n weitere hinzugefügt, wobei auch die Zahl n im Shotfileheader zu programmieren ist. Nach Empfang des Endetriggers liest die Master-CPU die Daten von den CPU-0-Transputern aus, setzt sie zu Signalen zusammen und sendet sie an das Hostsystem, von wo aus der Weitertransport des so generierten Schußfiles nach AMOS/D erfolgt. Es soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, daß das Transputersystem erst dann auf einen Endetrigger reagiert, sobald für jedes Signal die vorher programmierte Anzahl n der zu speichernden Meßwerte erreicht ist. Will man die Datenaufnahme vorher stoppen, so erfolgt dies interaktiv über die Workstation durch Eingabe des Kommandos CTRL C, wobei jedoch alle für den aktuellen Schuß auf den CPU-0-Transputern bereits eingesammelten Meßdaten verlorengehen.

Eingeschaltet werden die Kühlwasserkalorimetrie- und die Wandthermometriediagno-

stik mittels des Kommandos

#### **KWK**

auf der KWK-ISI-Workstaion unter dem KWK-Directory. Nach Aufruf dieses Kommandos werden die im Shotfileheader programmierten Anweisungen abgearbeitet. Es erfolgen ein Autoboot und ein Autoreset der Transputer. Soll eine während des Arbeitens der Diagnostik erstellte geänderte Shotfileheaderversion geladen werden, ohne die Diagnostik ausschalten zu müssen, so erfolgt dies mit dem Kommando

## CTRL \

Einen Überblick über die in AMOS/D abgelegten Schußfiles gibt das Schußfile-Informationssystem ISIS [38]. Die graphische Darstellung des Zeitverlaufes der Rohdaten auf dem Bildschirm der Workstation kann man mit

onl augd KWK Schußnummer

oder mit Hilfe des Datenverarbeitungssystems OSIRIS [39] generieren. Die Systeme ISIS und OSIRIS sowie das onl-Programm liefern nach ihrem Start jeweils selbstbeschreibende weiterführende Menüs.

Den ebenfalls selbstbeschreibenden Shotfileheader öffnet man zum Programmieren mit dem Kommandoaufruf

#### sfed

unter dem KWK-Directory. Als Standardwerte werden derzeit für die Kühlwasserkalorimetrie und die Wandthermometrie von jeder Meßstelle 121 Meßwerte pro Schuß abgespeichert. Als Zeitdifferenz zwischen der Speicherung der einzelnen Meßwerte wurden bislang Zeiten zwischen 0,5 s und 6,0 s, in der Regel jedoch 3,5 s programmiert.

Bei der Auswertung von Wandthermometriesignalen ist folgendes zu beachten: Die im KWK-Schußfile abgelegten Temperaturwerte  $T_0$  der Thermoelementmeßstrecken sind so aufbereitet, daß der gemessenen Differenz zwischen Graphitkacheltemperatur  $T_K$  und Tokamakgefäßtemperatur  $T_G$  hardwaremäßig elektronisch eine Temperatur von 20 °C hinzuaddiert worden ist (Gl. 3).

$$T_0 = (T_K - T_G) + 20 \,^{\circ}C$$
 (3).

Viele der zur Verfügung stehenden Thermoelementmeßstrecken dienen neben der Benutzung für die Wandthermometriediagnostik auch der technischen Vakuumgefäßüberwachung. Für die Zwecke dieser technischen Diagnostik ist es vollkommen ausreichend, die Tokamakgefäßtemperatur konstant mit 20 °C anzusetzen, weshalb die Darstellungsweise entsprechend Gl. 3 hardwaremäßig realisiert wurde. Auf die Auswertung relativer Temperaturdifferenzen ein und derselben Thermoelementmeßstelle zu verschiedenen Zeiten in einem Diagnostiklauf ist diese Darstellungsweise ohne Einfluß. Möchte man jedoch absolute Kacheltemperaturen angeben, so hat man softwaremäßig von  $T_0$  20 °C zu subtrahieren und die Gefäßtemperatur entsprechend der von der Kühlwasserkalorimetriediagnostik gemessenen Kühlwasserrücklauftemperatur zu addieren. Es ergibt sich dann die tatsächliche absolute Kacheltemperatur  $T_K$  zu

$$T_{\rm K} = T_0 - 20\,^{\circ}{\rm C} + T_{\rm G}$$
 (4).

Eine solche softwaremäßige Bearbeitung des Rohsignals kann man im OSIRIS ohne Probleme rasch realisieren.

Nachdem die Entwicklung der Level-0-Software für die Meßwerterfassung der KWK-Diagnostik abgeschlossen ist, besteht der weitere Softwareausbau in der Schaffung von Level-1-Auswertediagnostiken. So wird derzeit die routinemäßige Berechnung der absoluten Kacheltemperaturen entsprechend Gleichung 4 als Level-1-Diagnostik KWN installiert. Bereits jetzt gehört zur Level-0-Diagnostik KWK die Level-1-Auswertediagnostik KWL. Gestartet wird diese aus einem FORTRAN-Programm bestehende Diagnostik durch den Aufruf

#### **KWL**

auf der KWK-ISI-Workstation unter dem KWL-Directory. Nach Aufruf der KWL-Diagnostik erscheint ein Menü, in dem die Nummer des zu bearbeitenden Schusses und der dazugehörige zeitliche Abstand der Meßpunkte abgefragt wird. Nach Eingabe dieser Werte berechnet KWL aus den gemessenen Kühlwassertemperaturen und den nominell gegebenen Wasserdurchflußmengen für jede Kühleinheit die bei dem entsprechenden Schuß über das Wasser abgeführte Wärmemenge entsprechend Gleichung (1). Außerdem werden Summen dieser Wärmemengen gebildet: poloidal für jedes einzelne Segment, toroidal für jeweils alle unteren äußeren, unteren inneren, oberen äußeren und oberen inneren Divertorplatten, toroidal für das Hitzeschild, toroidal für jeweils alle unteren und alle oberen Divertorplatten und die Gesamtsumme von allen Meßstellen an den Divertorplatten- und Hitzeschildkühleinheiten.

Da bislang die Temperaturspitzen im Kühlwasser so gering waren, daß sich das Wasser innerhalb der Schußpausen wieder auf die Ausgangstemperatur von der Zeit vor dem jeweils letzten Schuß abkühlen konnte, benutzt KWL als Grundlinientemperatur derzeit nicht die im Kühlwasservorlauf gemessene Wassertemperatur, sondern die Grundlinientemperatur der Meßstelle im Kühlwasserrücklauf selbst, da auf diese Weise die Fehlergrenzen der Temperaturmessung geringer gehalten werden.

Das Aufrufen der mit KWL erzeugten Level-1-Daten ist ausschließlich mit dem System ISIS möglich, nicht jedoch über das OSIRIS-System oder über das onl-Programm, da OSIRIS und onl nur zeitabhängige Funktionen graphisch darstellen können. Beim Aufruf der KWL-Daten über ISIS erhält man eine selbstbeschreibende Tabelle der entsprechenden berechneten Energiewerte.

## 5.3. Wartung der Meßstrecken

Da die Kühlwasserkalorimetrie- und Wandthermometriediagnostik an ASDEX-Upgrade ein umfangreiches Detektorsystem mit insgesamt 219 Meßstellen beinhaltet, ist eine ständige manuelle Überwachung der Funktionstüchtigkeit aller Meßstrecken notwendig. Hierbei handelt es sich insbesondere um die Behebung elektronischer Ausfälle und die Überprüfung von zeitlich driftenden Verstärkeroffsets. Zur Erkennung von eventuellen Beschaltungsund Kontaktierungsfehlern müssen alle Thermoelementmeßstrecken nach jedem Umbau innerhalb des Torusgefäßes entsprechend getestet werden. Der Test der Kühlwassertemperaturmeßstrecken erfolgt stets während der Ausheizphasen des Torusgefäßes, da hierbei eine wohldefinierte Wassertemperatur im Heiz-Kühl-System herrscht.

## 6. Erste Meßergebnisse

Die Abbildungen 9 bis 11 zeigen an Hand des ASDEX-Upgrade-Schusses Nr. 1616 Beispiele von gemessenen Zeitverläufen der Kühlwasser- und der Wandtemperatur sowie des Kühlwasserdurchflusses. Schuß Nr. 1616 war eine Helium-Entladung mit ICRH im Single-Null-Unten-Regime. Die Flat-Top-Phase dauerte bei dieser Entladung 1,5 s, wobei der Plasmastrom 600 kA betrug. Die ICRH arbeitete für 0,8 s mit 2,0 MW Generatorleistung. Tabelle 3 beinhaltet die mittels KWL berechnete Matrix der pro Kühleinheit über das Kühlwasser abgeführten Wärmemenge für den Schuß Nr. 1616. Abbildung 12 stellt für denselben Schuß die von der Kühlwasserkalorimetriediagnostik gemessene Wärmeabfuhr über das Kühlwasser pro Segment toroidal aufgelöst graphisch dar. Die relative Unsicherheit bei der Angabe der über das Kühlwasser pro Kühleinheit und Schuß abgeführten Wärmemenge ergibt sich wesentlich aus der Unsicherheit der Kühlwasserdurchflußbestimmung (siehe Abschnitt 3.3.2.) und beträgt  $\pm 5\%$ . Deutlich erkennt man, daß die Energiedeposition wie erwartet toroidal unsymmetrisch ist. Die Asymmetrie wird offenbar unter anderem durch die Lage der aktiven ICRH-Antennen beeinflußt. Aus Tabelle 3 ersieht man deutlich den schon von ASDEX bekannten poloidalen Innen-Außen-Asymmetrie-Effekt, daß auf der Niedrigfeldseite des Torus' wesentlich mehr Energie deponiert wird als auf der Hochfeldseite.

## 7. Zusammenfassung

Um die Plasma-Wand-Wechselwirkung in Kernfusionsanlagen verstehen und beherrschen zu können ist es notwendig, experimentell Kenntnis über die Energiedeposition auf die inneren Wände derartiger Maschinen während einer Plasmaentladung zu erlangen. Diesem Zweck dient das am Tokamak ASDEX-Upgrade installierte Kühlwasserkalorimetrie- und Wandthermometriesystem.

Im vorliegenden Report wurden die Meßfühler, die Signalverarbeitungs- und Signalübertragungselektronik sowie die Hard- und Software der entsprechenden Diagnostikmeßstrecken vorgestellt. Es erfolgte eine Diskussion des Einflusses der Einzelkomponenten auf die Meßgenauigkeit des Gesamtsystems.

Die relative Ungenauigkeit bei der Angabe der über das Kühlwasser pro Kühleinheit und Schuß abgeführten Wärmemenge beträgt  $\pm 5\,\%$ . Dieser Wert ist durch die Unsicherheit der Kühlwasserdurchflußmessung bestimmt. Für eine Verbesserung der kalorimetrischen Meßgenauigkeit ist es unbedingt erforderlich, jeder Kühleinheit eine eigene, möglichst präzise Durchflußmeßsonde zuzuordnen.

Die Meßunsicherheit des Wandthermometriesystems wird bestimmt durch die Normung der Thermoelemente, durch das digitale Auflösungsvermögen der Meßstrecke und durch die Genauigkeit der Gefäßkühlwassertemperaturmessung. Unter Berücksichtigung aller dieser Faktoren ergibt sich eine Meßunsicherheit in der absoluten Kacheltemperaturbestimmung von  $-0.6\,\mathrm{K}/+3.0\,\mathrm{K}$  bei Kacheltemperaturen bis hinauf zu 673 K und eine Meßunsicherheit von  $-0.6\,\mathrm{K}/+\frac{75}{100}(\mathrm{T}-273\,\mathrm{K})$  für höhere Kacheltemperaturen. Die relative Meßunsicherheit in Bezug auf die Differenz zweier zu verschiedenen Zeitpunkten in einem Diagnostiklauf mit ein und demselben Thermoelement gemessenen Temperaturen beträgt  $\pm 0.5\,\mathrm{K}$ .

An Hand erster Meßergebnisse konnte das Funktionieren der Kühlwasserkalorimetrieund Wandthermometriediagnostik an ASDEX-Upgrade demonstriert werden. Wie erwartet stellte sich heraus, daß die Energiedeposition auf die inneren Tokamakwände toroidal unsymmetrisch ist. Bei Entladungen mit ICRH beeinflußt offenbar die Lage der aktiven ICRH-Antennen diese Asymmetrie. Deutlich ausgeprägt ist auch die poloidale Innen-Außen-Asymmetrie der Energiebeladung in Form einer größeren Belastung der Divertorplatten auf der Niedrigfeldseite im Vergleich zu den geringer belasteten Targets auf der Hochfeldseite des Tokamaks.

Die Kühlwasserkalorimetrie- und Wandthermometriediagnostik arbeitet an ASDEX-Upgrade als Standarddiagnostik. Untersuchungen zu den Abhängigkeiten der toroidalen und poloidalen Energiedepositionsasymmetrien von verschiedenen Entladungsparametern sowie Beiträge zur Energiebilanzierung des Tokamaks sind Gegenstand der laufenden Arbeit im Rahmen dieser Diagnostik.

#### LITERATURVERZEICHNIS

- 1. Becker, G. et al.: ASDEX-Upgrade. Definition of a tokamak experiment with a reactor compatible poloidal divertor.—IPP-Report 1/197, Garching 1982.
- Köppendörfer, W. et al.: ASDEX Upgrade Project Proposal Phase II.— IPP-Report 1/217, Garching 1984.
- 3. Köppendörfer, W. et al.: Proceedings of the 12th Symposium on Fusion Technology, Vol. 1, Jülich (1982) 187.
- 4. Gruber, O. et al.: J. Nucl. Mat. 121(1984)407.
- 5. Vernickel, H. et al.: J. Nucl. Mat. 128&129(1984)71.
- 6. Köppendörfer, W.: Phys. Bl. 46(1990)324.
- 7. Schivell, J. et al.: Rev. Sci. Instrum. 53(1982)1527.
- 8. Gottardi, N.; Krause, H.; Mast, K. F.: 12th European Conferenc on Controlled Fusion and Plasma Physics, Contributed Papers, Part I, Budapest (1985) 30.
- 9. Mast, K. F. et al.: Bolometric Diagnostics in JET.- JET-Report IR-(85)07, Abingdon 1985.
- 10. Mast, K. F.; Krause, H.: Rev. Sci. Instrum. 56(1985)969.
- 11. Schivell, J.: Rev. Sci. Instrum. 56(1985)972.
- 12. Schivell, J.: Rev. Sci. Instrum. 58(1987)12.
- 13. Hartinger, K. Th.: Bestimmung zweidimensionaler Strahlungsverteilungen in Hochtemperaturplasmen des Tokamaks ASDEX mittels bolometrischer Messungen und Computertomographie.—IPP-Report III/170, Garching 1990.
- 14. Gott, Ju. V.: Vzaimodejstvie častitz s veschschestvom v plazmennych issledovanijach.— Moskva 1978.
- 15. Chapman, B.: Glow Discharge Processes. Sputtering and Plasma Etching. New York 1980.
- 16. Winters, H. F.: Elementary Processes at Solid Surfaces Immersed in Low Pressure Plasmas.—Berlin 1980.
- 17. Post, D. E.; Behrisch, R. (eds.): Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion. New York 1986.
- 18. Danilin, B. S.; Kireev, V. Ju.: Primenenie nizkotemperaturnoj plazmy dlja travlenija i očistki materialov.– Moskva 1987.
- 19. Lackner, K. et al.: Plasma Physics and Controlled Fusion 26(1984)105.
- 20. Evans, T. E. et al.: J. Nucl. Mat. 176&177(1990)202.
- 21. Evans, T. E. et al.: Measurements of Poloidal and Toroidal Energy Deposition Asymmetries in the ASDEX Divertors.—IPP-Report III/154, Garching 1991.
- 22. Orlinskij, D. V.; Magyar, G.: Nuclear Fusion 28(1988)611.
- 23. Hill, D. N.; Howl, W.: Nuclear Fusion 28(1988)902. Alteographic resemble members and the
- 24. Taylor, T.; Brooks, N.; Ioki, K.: J. Nucl. Mat. 111&112(1982)569.
- 25. Mc Cracken, G. M. et al.: J. Nucl. Mat. 128&129(1984)150.
- 26. Bogen, P. et al.: J. Nucl. Mat. 128&129(1984)157.
- 27. Berezovsky, E. L. et al.: Plasma Devices and Operations 1(1992)289.
- 28. Budny, R. et al.: J. Nucl. Mat. 121(1984)294.
- 29. Mioduszewski, P. K. et al.: J. Nucl. Mat. 145-147(1987)210.
- 30. Chankin, A. V. et al.: J. Nucl. Mat. 145–147(1987)789.

- 31. Ritter, R. S.; Budny, R. V.; Cohen, S. A.: J. Nucl. Mat. 145-147(1987)793.
- 32. Evans, T. E. et al.: J. Nucl. Mat. 145-147(1987)812.
- 33. Mattes, K.: IPP/AUG-Notiz HKS-B/11/91, Garching 1991.
- 34. Kohlrausch, F.: Praktische Physik (Band 2).- Stuttgart 1968, S. 314.
- 35. Brookes, G. R. et al.: Inside the Transputer. Oxford 1990.
- 36. Heimann, P.; Merkel, R.; Tisma, R.: Transputer-Datenerfassung.— IPP Garching, Bereich Informatik, 1992.
- 37. ASDEX-Upgrade-Gruppe Schnelle Steuerung und Regelung: Das Timer-System von ASDEX-Upgrade.- IPP Garching 1990.
- 38. Fuchs, Ch.: ISIS Interaktives Schußfile Informations-System für ASDEX-Upgrade Diagnostiken, Version 2.00.– IPP Garching 1992.
- 39. Drube, R.: OSIRIS V.3 Ein interaktives Datenverarbeitungssystem für Level–n–Schußfiles von ASDEX Upgrade.– IPP Garching 1992.

## Tabellen und Abbildungen

- Tab. 1: Kühlwasserdurchfluß pro Kühleinheit in dm³/h. DPua Divertorplatte unten außen; DPui Divertorplatte unten innen; DPoa Divertorplatte oben außen; DPoi Divertorplatte oben innen; HS Hitzeschild.
- Tab. 2: Erwartete Energiedeposition (E) auf ASDEX-Upgrade-Systemkomponenten und entsprechende maximale Kühlwassertemperaturerhöhung (ΔT<sub>max</sub>) bei 7 s Single-Null-Unten-Entladung mit 12 MW Heizung und 50 % Energieabstrahlung. DP – Divertorplatten; PSL – Passiver Stabilisierungsleiter.
- Tab. 3: Matrix der pro Kühleinheit über das Kühlwasser abgeführten Wärmemenge in kJ für den Schuß Nr. 1616. Genauigkeit: ±5%. DPo obere Divertorplatte, DPu untere Divertorplatte, i innen, a außen, HS Hitzeschild.
- Abb. 1: Schematischer poloidaler Schnitt durch ein ASDEX-Upgrade-Segment. A Divertorplatte oben innen; B Divertorplatte oben außen; C Divertorplatte unten innen; D Divertorplatte unten außen; E Hitzeschild.
- Abb. 2: Räumlicher Schnitt durch das ASDEX-Upgrade-Vakuumgefäß.
- Abb. 3: Auf die Metallstruktur einer Divertorplatte geklemmte Graphitkacheln.
- Abb. 4: Divertorplatte mit Graphitkacheln.
- Abb. 5: Hitzeschildsegment mit Graphitkacheln.
- Abb. 6: Kühlwasserführung und Meßstellen der Kühlwasserkalorimetrie für zwei ASDEX-Upgrade-Segmente. Ti|K und T|K - Pt-100-Meßfühler; Fl/K - Annubarsonde. DPa - äußere Divertorplatte; DPi - innere Divertorplatte; o - oben; u - unten; H - Hitzeschild.
- Abb. 7: Prinzipieller zeitlicher Verlauf der Kühlwassertemperatur T. Zeitpunkt 0 = Schußende.
- Abb. 8: Lage eines Thermoelementkopfes (TE) in einer Graphitkachel.
- Abb. 9: Relative Exkursion der Kühlwassertemperatur in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Schuß Nr. 1616 gemessen hinter der Divertorplatte unten außen im Segment 3.
- Abb. 10: Mit einem Thermoelement in einer Graphitkachel auf der unteren äußeren Divertorplatte im Segment 4 nach Schuß Nr. 1616 gemessene relative Temperaturexkursion in Abhängigkeit von der Zeit.
- Abb. 11: Gemessene summarische Wasserdurchflußmenge durch die Kühleinheiten der Segmente 2 und 3 in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Schuß Nr. 1616.
- Abb. 12: Graphische Darstellung der pro Segment über das Kühlwasser abgeführten Wärmemenge für den Schuß Nr. 1616.

Tabelle1

Kühlwasserdurchfluß pro Kühleinheit in dm³/h. DPua – Divertorplatte unten außen; DPui – Divertorplatte unten innen; DPoa – Divertorplatte oben außen; DPoi – Divertorplatte oben innen; HS – Hitzeschild.

Segment	DPua	DPui	HS	DPoi	DPoa
1	771	706	774	554	536
2	540	557	745	558	532
3	552	549	760	555	537
4	540	557	745	558	532
5	552	549	760	555	537
6	543	552	778	555	539
7	545	566	822	557	545
8	540	557	745	558	532
9	799	710	761	557	518
10	540	557	745	558	532
11	552	549	760	555	537
12	540	557	745	558	532
13	552	549	760	555	537
14	543	552	778	555	539
15	545	566	822	557	545
16	540	557	745	558	532

 $\frac{\textbf{Tabelle2}}{\textbf{Tabelle2}}$  with the induction of the property of the prope

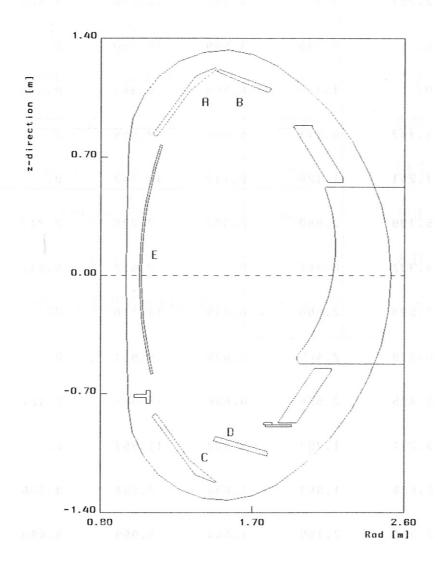
E/MJ	$\Delta { m T}_{ m max}/{ m K}$
3,4	1,5
2,5	1,2
19,3	8,9
28,6	13,7
6,7	2,3
8,4	8,0
15,1	1,8
	3,4 2,5 19,3 28,6 6,7 8,4

The state of the s

Segment	DPoi	DPoa	DPui	DPua	HS	Summe
1	0.	2.691	2.711	12.675	0.	18.076
2	5.877	0.891	1.864	7.974	0.	16.606
3	2.787	3.331	4.162	10.216	8.454	28.949
4	0.	6.285	1.589	10.260	0.	18.134
5	0.	1.110	6.269	8.966	0.673	17.019
6	1.147	0.371	4.564	7.056	0.	13.138
7	1.261	1.126	2.117	10.247	0.	14.751
8	5.109	2.880	2.303	7.070	2.713	20.076
9	4.332	0.765	0.	2.832	5.318	13.247
10	1.593	2.566	0.439	11.110	0.	15.708
11	0.819	2.485	3.675	6.901	0.	13.880
12	0.495	2.566	0.658	10.366	2.127	16.211
13	3.224	1.797	3.027	11.357	0.	19.404
14	5.628	1.963	1.630	7.858	3.906	20.986
15	2.358	2.199	1.448	8.959	3.480	18.445
16	2.252	4.661	6.800	8.240	0.367	22.320
Summe	36.881	37.688	43.257	142.086	27.039	286.951
Summe	74.5	68	18 1 gnn b	5.343		

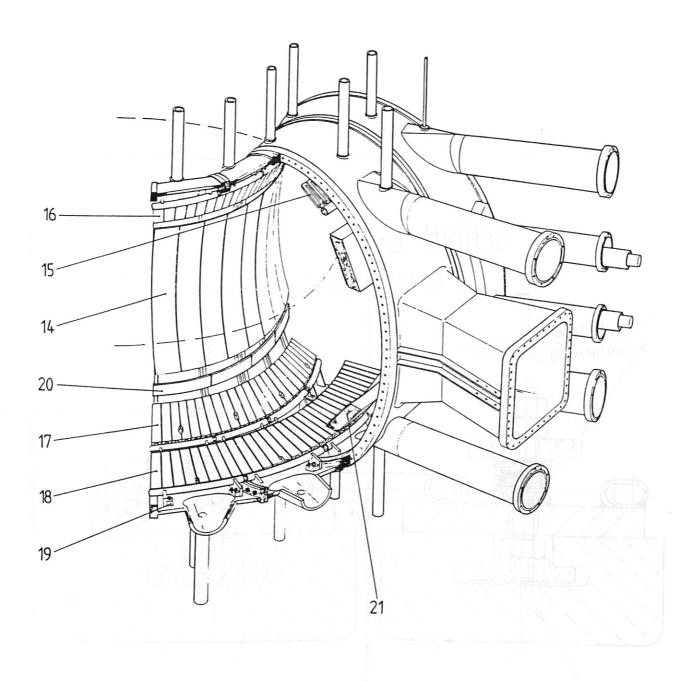
## Tabelle 3

Matrix der pro Kühleinheit über das Kühlwasser abgeführten Wärmemenge in kJ für den Schuß Nr. 1616. Genauigkeit:  $\pm\,5\,\%$ . DPo – obere Divertorplatte, DPu – untere Divertorplatte, i – innen, a – außen, HS – Hitzeschild.



## Abbildung 1

Schematischer poloidaler Schnitt durch ein ASDEX-Upgrade-Segment. A – Divertorplatte oben innen; B – Divertorplatte oben außen; C – Divertorplatte unten innen; D – Divertorplatte unten außen; E – Hitzeschild



## ·<u>ASDEX Upgrade Vakuumgefäß – Einbauten</u>

- 14 Hitzeschild
- 15 obere äußere Divertorplatte
- 16 obere innere Divertorplatte
- 17 untere innere Divertorplatte
- 18 untere äußere Divertorplatte
- 19 Divertorplatten Konsole
- 20 Montageschiene
- 21 Passiver Stabilisierungsleiter

## Abbildung 2

Räumlicher Schnitt durch das ASDEX–Upgrade–Vakuumgefäß

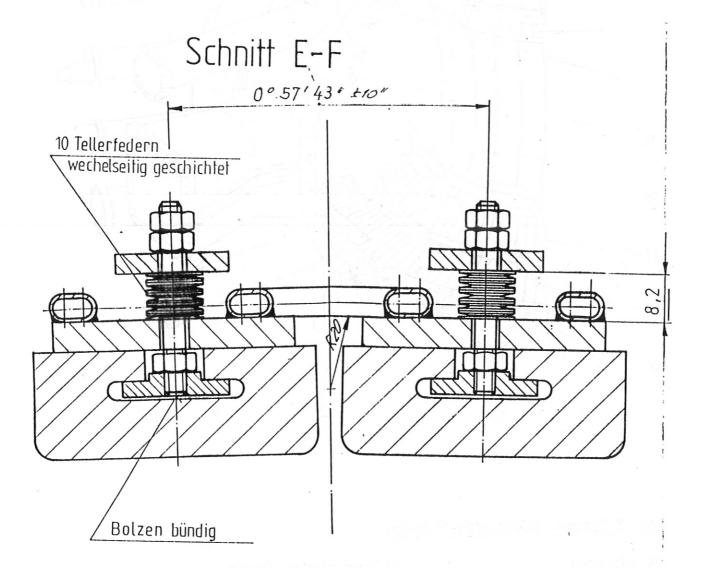


Abbildung 3

 ${\bf Auf\ die\ Metallstruktur\ einer\ Divertorplatte\ geklemmte\ Graphitkacheln}$ 

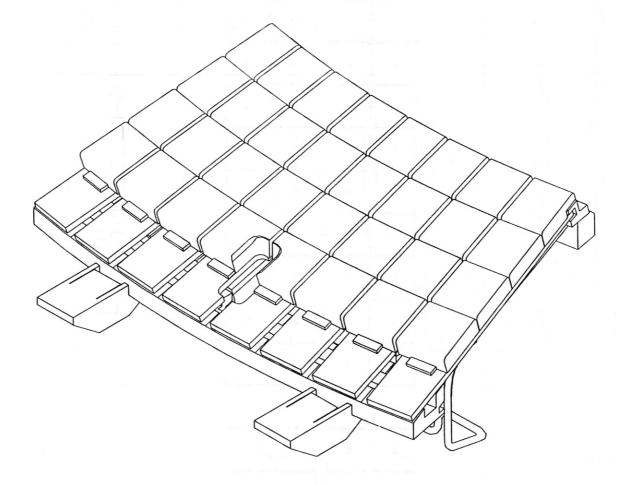
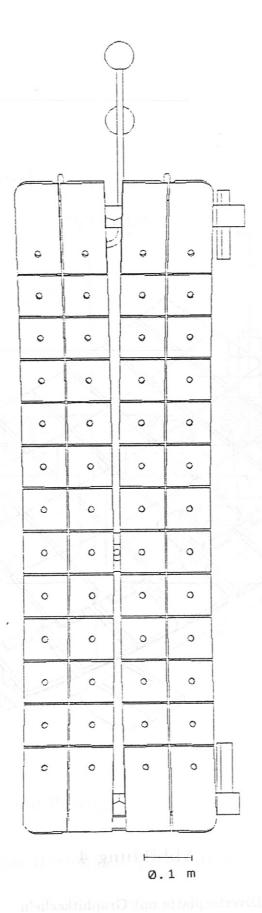


Abbildung 4

 ${\bf Divertorplatte\ mit\ Graphitkacheln}$ 



Hitzeschildsegment mit Graphitkacheln

Abbildung 5

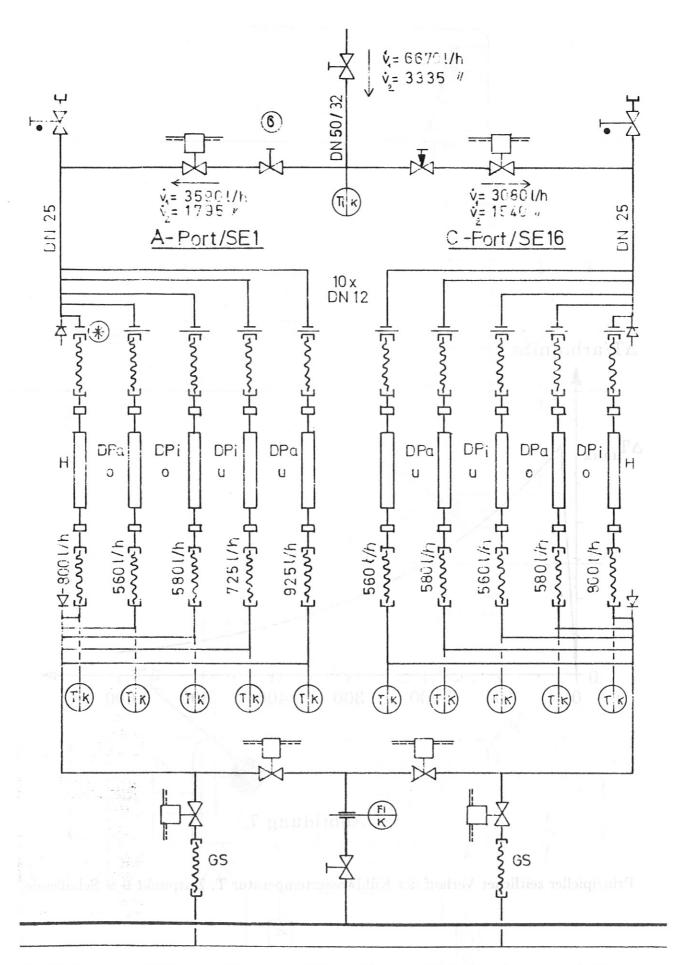


Abbildung 6: Kühlwasserführung und Meßstellen der Kühlwasserkalorimetrie für zwei ASDEX-Upgrade-Segmente. Ti|K und T|K – Pt-100-Meßfühler; Fl/K – Annubarsonde. DPa – äußere Divertorplatte; DPi – innere Divertorplatte; o – oben; u – unten; H – Hitzeschild

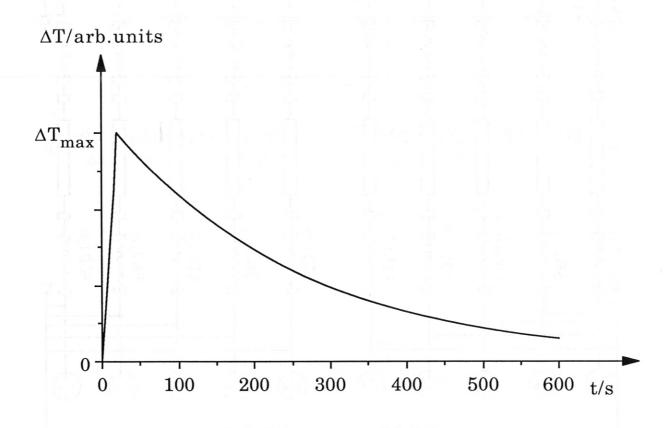
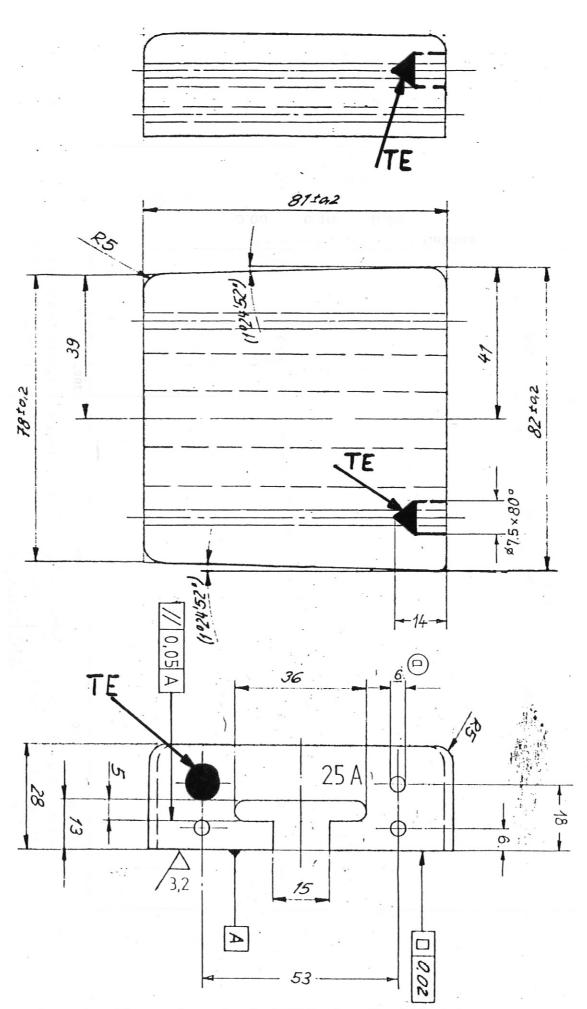


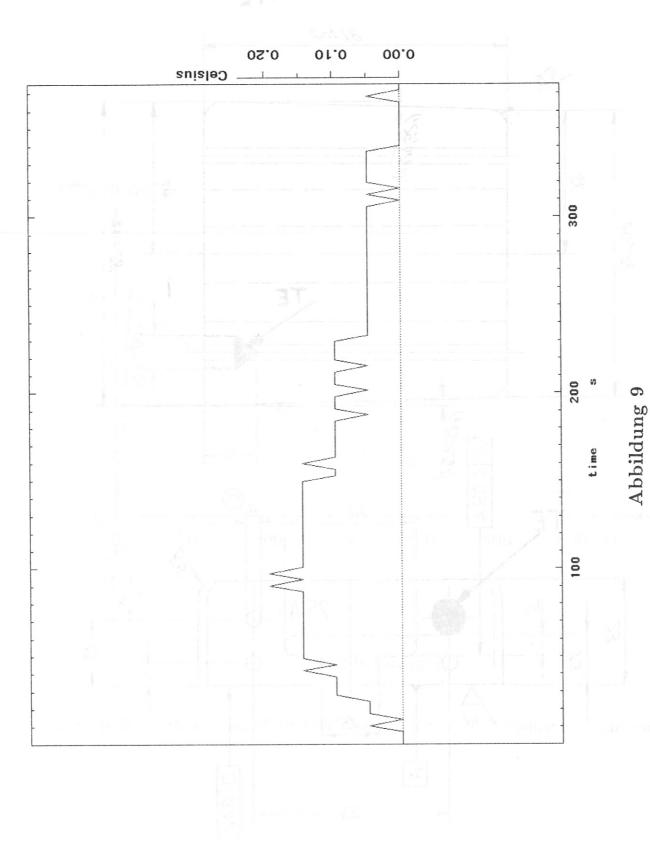
Abbildung 7

Prinzipieller zeitlicher Verlauf der Kühlwassertemperatur T. Zeitpunkt 0= Schußende.



Lage eines Thermoelementkopfes (TE) in einer Graphitkachel

Abbildung 8



Relative Exkursion der Kühlwassertemperatur in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Schuß Nr. 1616 gemessen hinter der Divertorplatte unten außen im Segment 3.

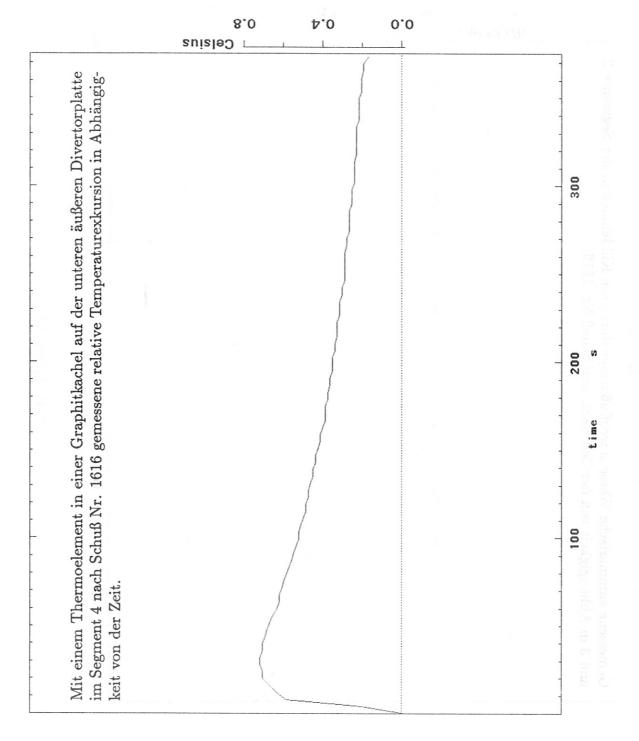


Abbildung 10

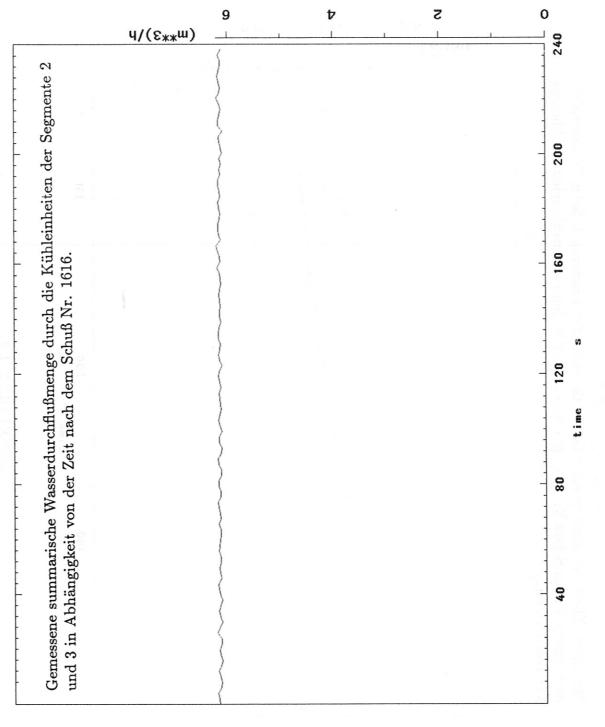


Abbildung 11

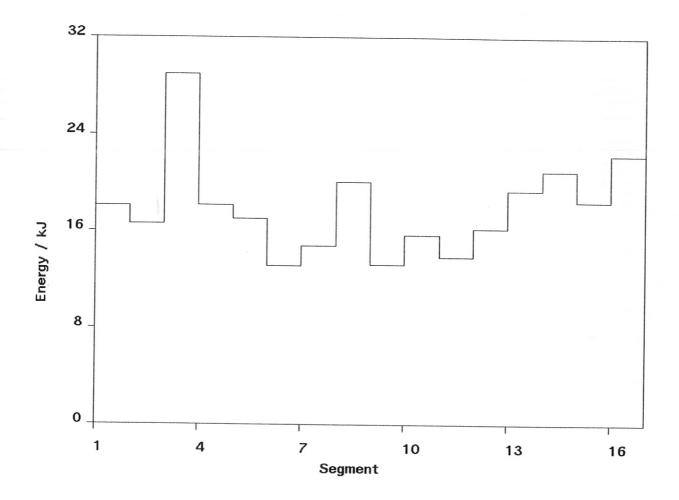


Abbildung 12

Graphische Darstellung der pro Segment über das Kühlwasser abgeführten Wärmemenge für den Schuß Nr. 1616.