

Primärbericht

Integrale Nachuntersuchung von
CORA-Bündeln

Wolfgang Hering

12 ● 07 ● 01 P 13A

September 1989

PRS-Nr. 1042/89

Hauptabteilung Ingenieurtechnik

Bitte beachten Sie: dieser Primärbericht enthält Informationen von vorläufigem Charakter und ist in erster Linie zur aktuellen Unterrichtung zwischen den Instituten und den externen Zusammenarbeitspartnern des Kernforschungszentrums Karlsruhe bestimmt. Eine Weitergabe des Berichts oder seines Inhalts an Dritte bedarf der Zustimmung der Abt. Patente und Lizenzen des KfK.

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Ziel der Analyse	2
Integrale Analyse des Bündelzustandes nach Versuchsende	4
Volumenprofil	4
Messmethode	4
Analytische Auswertung	5
Fehlerbetrachtung	8
Resumée	13
Massenprofil	14
Messung	14
Analyse	14
Verfeinertes Massenprofil	16
Dichteprofil	17
Fehlerbetrachtung	18
Resumée	19
Materialprofil	20
Messmethode	20
Ergebnisse	21
Zusammenfassung	23
Anhang A.	24
Literatur	24
Referenzdaten	25
Messvorschrift	27
Vorbereitung	27
Messvorgang	27
Probenwägung	28
Auswertung	28
Anhang B. Programm AXPRO2	29
Main AXPRO2	29
Programm LESEIN	34
Programm GGLEIT	37
Daten der CORA-Bündel	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Messverfahren	4
Abbildung 2. Ergebnis der Volumenmessung von Test CORA-16	6
Abbildung 3. Ergebnis der Volumenmessung von Test CORA-15	7
Abbildung 4. Mögliche Fehlerquellen	10
Abbildung 5. Einfluss der Filterbreite auf die "Gleitung" der Messwerte	12
Abbildung 6. Ergebnisse der Probenwägung von Test CORA-16	15
Abbildung 7. Ergebnisse der Probenwägung von Test CORA-15	17
Abbildung 8. Axiales Dichteprofil CORA-16	18
Abbildung 9. Axiales Dichteprofil CORA-15	19
Abbildung 10. Vergleich Volumen-/Oberflächenanalyse von CORA-16	20
Abbildung 11. Vergleich Volumen-/Oberflächenanalyse von CORA-15	21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Materials und Geometries	26
---	----

Zusammenfassung

Hering, Wolfgang

INTEGRALE NACHUNTERSUCHUNG VON CORA-BÜNDELN

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe werden in der Versuchsanlage CORA Out-of-pile-Experimente zur Untersuchung des Verhaltens von Leichtwasser Reaktor (LWR) Brennelementen (BE) unter schweren Störfallbedingungen (SFD) durchgeführt. Neben den on-line zur Verfügung stehenden Daten (Leistungseinspeisung, Fluidzusammensetzung, Temperaturen, Wasserverbrauch, optischer Beobachtung des Bündelzustandes während des Tests...) ist die Analyse des Bündelzustandes nach Versuchsende wichtig, um die Schadensausbreitung während des Testes verstehen zu können.

Ein Teil der Nachuntersuchung konzentriert sich auf die Analyse der verschiedenen Materialverbindungen die sich während des Versuches gebildet haben, sowie die Bedingungen die zu deren Entstehung nötig sind.

Weitere Anstrengungen führen zu einer integralen Beschreibung des Bündelzustandes nach dem Abschmelzvorgang. Damit stehen Daten zur Validierung von SFD-Codes zur Verfügung. Die folgende Analyse führt zu einem axialen Kühlkanal-Blockageprofil, einem Massenprofil und in Kombination mit den Ergebnissen der Oberflächenanalyse zu einem axialen Materialprofil. Die entwickelte Methode nutzt den Vergussvorgang des geschädigten Bündels aus. Die Höhe des langsam ansteigenden Flüssigkeitsspiegels in der Acrylglasbox und die dem Vorratsgefäß entnommene Harzmasse werden gespeichert und zusammen mit den Massen der geschnittenen Proben ausgewertet (quantitatives Vergiessen). Diese Daten lassen sich weiterhin zu einem mittleren Dichteprofil kombinieren. Zusammen mit den Daten aus der Oberflächenanalyse kann auf die Porosität der verlagerten Schmelze geschlossen werden.

Beide Methoden (Oberflächenanalyse und Volumenmessung) wurden inzwischen so verbessert, daß die Fehlertoleranzen in etwa dieselben sind. Damit können beide Verfahren miteinander verglichen werden.

Abstract

Hering, Wolfgang

INTEGRAL POST TEST ANALYSIS OF CORA TEST BUNDLES

At the Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK), out-of-pile experiments on Severe Fuel Damage (SFD) of Light Water Reactor (LWR) fuel elements are performed in the CORA facility. Beside the on-line informations (power input, fluid inlet, fluid composition, temperatures, water consumption, optical inspection with videoscope,...) the analysis of the post test bundle state is important to understand the damage progression during test.

One part of the post-test investigations is focussed on the analysis of the different materials formed during transient and the conditions necessary to create them.

Other efforts yield to an integral post test bundle description including data necessary for the comparison with the results of post test calculation with SFD-codes. The investigations described in this report will result in an axial coolant channel profile, an axial mass profile and at least, in combination with data from the surface analysis, to an axial material profile. The methode developed uses the embedding procedure of the post test bundle. The liquid resin is inserted from the bottom of the box made of acryl glas. The resin level inside the box and the weight loss in the resin storage tank is sampled. Together with the mass of the samples cutted from the solid bundle block the axial cross section and mass profile can be calculated. Combining the two informations an average density profile can be computed too. In comparing these data with those gained by the surface analysis some informations about the porosity of the relocated material can be given.

Both methodes (surface and volume measurements) have been improved and show the same results (CORA-15) and the error bars are comparable now.

Einleitung

Im Rahmen der sicherheitsorientierten Forschung der Projektgruppe LWR-Sicherheit (PRS) und der internationalen Zusammenarbeit zur Untersuchung des Verhaltens von LWR-Brennelementen unter schweren Störfallbedingungen werden in der CORA-Anlage Versuche durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist ein besseres Verständnis der Vorgänge nach einem Kühlmittelverluststörfall mit s.g. kleinem Leck oder nach einem Totalausfall der Energieversorgung ("station blackout"). Ferner soll das Verhalten der Brennelementkomponenten beim Wiederfluten eines LWR von unten, d.h. durch den kalten Strang, untersucht werden. Die Anlage ist so konzipiert, daß on-line Beobachtungen an verschiedenen Stellen des Testraumes Aussagen über den zeitlichen und räumliche Ablauf des Brennelementeversagens und der Materialverlagerung erlauben. Die daraus gewonnenen Daten sind wichtig, einerseits zur Bewertung der Phänomene hinsichtlich des Unfallablaufes und andererseits zur Validierung, respektive Weiterentwicklung bestehender SFD Codes /1,2/.

Aus den Videoaufnahmen lassen sich jedoch keinerlei quantitative Daten über den Versagens- und Verlagerungsprozess extrahieren. Diese müssen im Rahmen der Nachuntersuchung ermittelt werden.

Das Ziel einer Gesamt-Analyse zur Nachuntersuchung läßt sich unterteilen in:

1. Detailanalyse:

- Mikroskopische Analysen:
Metallurgische Untersuchungen von speziellen Teilen der Proben bzw. Teiloberflächen mittels energie-dispersiver (EDX) und wellenlängendispersiver (WDX) Sekundärelektronenspektroskopie (SEM) sowie Auger-Elektronenspektroskopie und Mikrosonde.
- Chemische Analyse:
Integrale Zusammensetzung von ausgewählten Proben

2. Integralanalyse:

Makroskopische Beschreibung des Bündels durch :
axiale Querschnitts-, Massen-, Dichte- und Materialprofile

Ein wichtiges makroskopisches Ergebnis dieser Untersuchungen ist die Bestimmung des Einflusses der Aufheizung und der Materialwechselwirkung auf die Materialverlagerung und die dadurch hervorgerufene Blockage des Kühlkanales.

Zu diesem Zweck wurde ein effizientes Verfahren entwickelt, das mit minimalem Aufwand ein axiales Querschnitts- und Massenprofil liefert. Aus diesen Informationen läßt sich dann ein axiales Kühlkanalprofil sowie eine mittlere Dichte der verlagerten Schmelzen ableiten.

Die Vergussprozedur wurde von H. Benz (HVT-BA) entwickelt und optimiert /11/. Das Spezialharz erlaubt innerhalb der Tropfzeit von 6 h einen kontinuierlichen Eingießprozess ohne Störung der Harzeigenschaften. Nach Aushärtung bleibt das Harz durchsichtig, sodaß nachträglich die Bündeloberfläche noch inspiziert werden kann.

In einem weiteren Schritt kann man an den Oberflächen der Schnitte die Materialverteilung bestimmen. Diese Arbeiten wurden von Herrn F. Nagase durchgeführt /6/. Herr Nagase ist als Gastwissenschaftler am KfK-HIT-CP tätig (delegiert von JAERI, Japan).

Ziel der Analyse

Neben den on-line aufgezeichneten Daten /7,10/ ist die Auswertung des Bündelzustandes nach dem Abschmelzprozess wichtig im Hinblick auf die Bereitstellung von Daten zur Code-Verifizierung bzw. Weiterentwicklung. Ziel dieser Aktivitäten ist die Bestimmung eines axialen Materialprofils wie es für den Vergleich mit den Ergebnissen der Rechnungen mit einem Störfallcode (z.B. SCDAP/RELAP, ATHLET,...) benötigt wird. Folgende Informationen sind wichtig:

1. axiales Profil der Bündelquerschnittsfläche
2. axiale Massenverteilung im Restbündel
3. mittlere Materialdichte der verlagerten Schmelzen

Dabei ist sorgfältig zwischen einer Massenverteilung und einer Materialverteilung zu unterscheiden. Ein axiales Massenprofil ist verhältnismäßig einfach durch ein mechanisches Verfahren zu ermitteln, da hier die Zusammensetzung des Materials uninteressant ist, und die mittlere Dichte den Anforderungen bereits genügt.

Für ein axiales Materialprofil muß diese mittlere Dichte nach den Materialanteilen aufgeschlüsselt werden. Dazu werden die Flächenanteile der einzelnen Phasen sowie deren Dichte benötigt. Weiterhin muss zwischen den einzelnen Phasen ein ausreichender Unterschied bestehen. So ist es z.B. interessant keramische und metallische Schmelzen zu unterscheiden.

Weiterhin muss das Material der Originalstruktur (z.B. Pellets) sicher erkannt werden.

Als Messverfahren stehen zwei einfache und schnelle sowie eine etwas kompliziertere und langwierigere Messmethode zur Verfügung:

1. Volumenmessung:

Quantitatives Vergiessen : Beim Vergiessen des Bündels mit Giessharz wird die verbrauchte Vergussmasse als Funktion der Höhe analysiert.

2. Massenbestimmung:

Nach dem Zerschneiden des Bündels werden die Proben einzeln gewogen. Zusammen mit der gesamten Bündelmasse kann eine Massenbilanz erstellt werden.

3. Oberflächen-Vermessung:

Flächenbestimmung an der Oberfläche der Schnitte mittels interaktiver computergestützter Bildanalyse. (Detaillierte Analyse an diskreten Stellen liefern Daten über Auflösungsgrad der UO_2 -Pellets und der Absorberstäbe, sowie Hinweise auf die Zusammensetzung der verlagerten Schmelzmassen) /6/.

In den folgenden Abschnitten werden die o.g. Verfahrensschritte anhand der Auswertung der Versuche CORA-16 (SWR) und CORA-15 (DWR) erläutert. Eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, sie wird jedoch im Rahmen einer weiteren Veröffentlichung geführt.

Das Giessharz wird bei dem Vergussverfahren langsam von unten in das Bündel eingeleitet (Abbildung 1). Dies gewährleistet ein weitgehendes Verfüllen aller offenen Porenvolumina. Die Vergussmasse wird im Vorratsgefäß ständig gewogen. In bestimmten Abständen, etwa alle 10-20 mm, wird dann der Höhenstand der Flüssigkeit im Acrylglaskasten zusammen mit der dem Vorratsgefäß entnommenen Masse notiert. Das Vergiessen erfolgt dabei kontinuierlich jedoch ausreichend langsam, damit keine Unterbrechung des Harzflusses für die Messung notwendig ist.

Bedingt durch die benötigte Menge an Einbettmasse und deren Tropfzeit muss das Vergussverfahren unterteilt werden. Es werden mehrere Chargen hergestellt und nacheinander verarbeitet. Die dabei entstehenden Übergangsstellen werden in der numerischen Auswertung berücksichtigt (siehe Anhang B).

Analytische Auswertung

Nach der Messung werden aus Höhenstand und Vergussmasse die Differenzen Δh_i und Δm_i abgeleitet.

$$\Delta h_i = (h_i - h_{i-1}) \quad \text{und} \quad \Delta m_i = (m_i - m_{i-1})$$

Falls zwischen dem Vergussmaßstab und der festen Bündelkote eine Höhendifferenz besteht, wird diese durch den additiven Term h_c berücksichtigt. Damit erhält man eine Zuordnung der gemessenen Vergussmasse zur Bündelkote z_i :

$$z_i = h_i + \frac{\Delta h_i}{2} + h_c$$

Damit lassen sich folgende über die Harzschicht Δh gemittelte Querschnittsflächen berechnen:

1. Querschnittsfläche des Epoxydharzes

$$A_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta h_i \cdot \rho_{\text{Resin}}}$$

2. Querschnittsfläche des Restbündels

$$A_{1i} = A_a - A_i$$

3. Strukturquerschnittsfläche

$$E_i = A_{1i} - A_W$$

4. Veränderung der Querschnittsfläche durch den Abschmelzvorgang

$$\Delta A_i = A_0 - A_{1i}$$

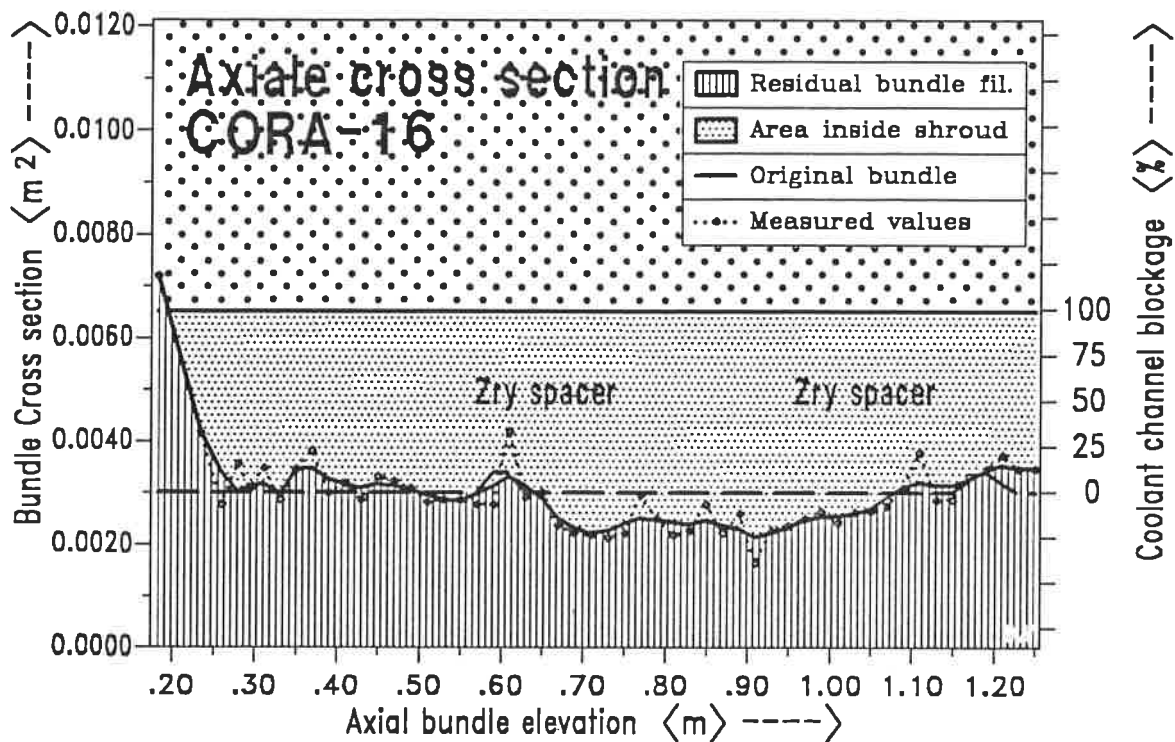


Abbildung 2. Ergebnis der Volumenmessung von Test CORA-16: Axiale Bündelquerschnitte von 0.12 bis 1.20 m Bündelhöhe

mit:

A_a = Querschnittsfläche des Acrylglastkastens

A_o = Querschnittsfläche des Originalbündels

(Unter der Annahme eines durch die Oxidation bedingten Wachstum von ca. 250 μm aller Zirkaloy-Hüloberflächen)

A_w = Querschnittsfläche der Wolframheizstäbe

Am Beispiel zweier CORA-Versuche sollen hier die Möglichkeiten dieses Verfahrens aufgezeigt werden. Untersucht wird repräsentativ für SWR-Bündelgeometrien das Experiment CORA-16 und für DWR-Geometrien der Test CORA-15.

In der Abbildung 2 ist die über eine Schichthöhe von 20 mm gemittelte Querschnittsfläche des Restbündels angegeben. Die Ordinate auf der linken Seite gibt die absoluten Querschnittswerte wieder, während auf der rechten Seite die relative Kühlkanalblockage angegeben ist.

Schraffiert dargestellt ist dabei die Restbündelfläche. Die Differenz zwischen Restbündel- und Gesamtbündelfläche (ca. 6500 mm^2 , Fläche innerhalb des Shrouds) ist die Kühlkanalfläche (gepunktet unterlegt). Die gesamte Ausgiessfläche (Acrylglastkasten) beträgt ca. 16800 mm^2 .

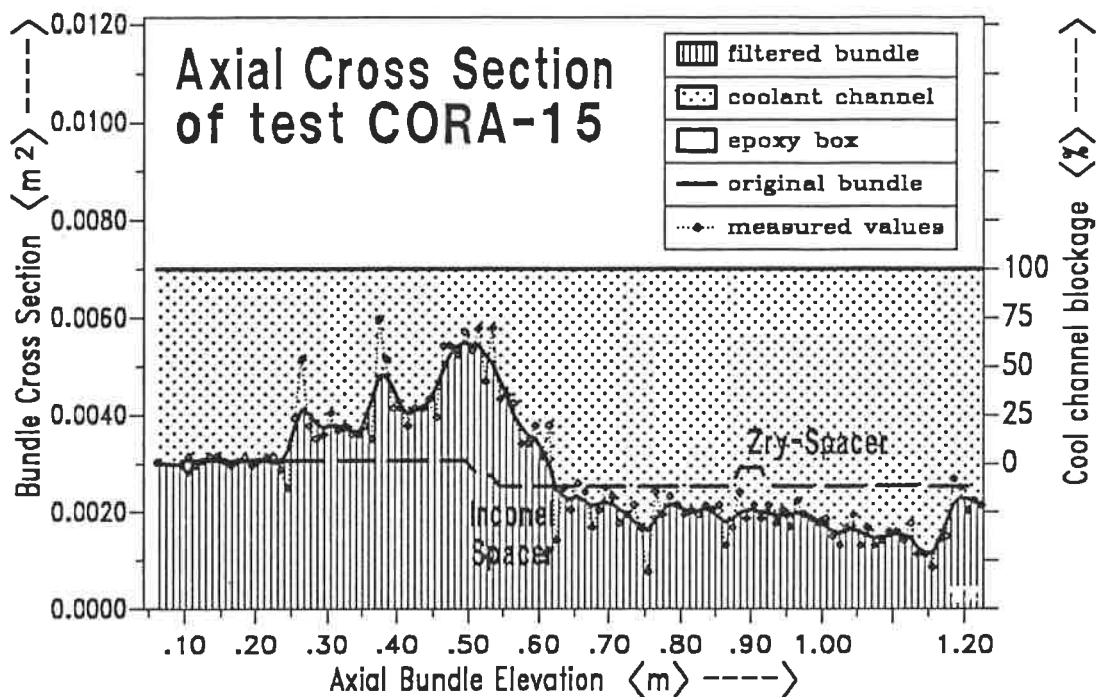


Abbildung 3. Ergebnis der Volumenmessung von Test CORA-15: Axiale Bündelquerschnitte von 0.05 bis 1.22 m Bündelhöhe

Die waagrechte Referenzlinie bei ca. 3000 mm² deutet die Querschnittsfläche des jungfräulichen Bündels an. Sie definiert 0 % Blockage, die horizontale Linie bei 6500 mm² 100 % Blockage des Kühlkanals.

Unterhalb von 0.2 m scheint die Blockage größer als 100 % zu sein. Dies ist durch den Beginn des Messverfahrens erklärbar. Die erste Ablesung erfolgte erst bei 0.185 m, sodaß hier das Höhenintervall zu gross ist. Oberhalb von 0.185 m begannen die systematischen Messungen mit der Schichthöhe von 20 mm, sodaß sich dann durch die Integration ein relativ glattes Profil ergibt.

Die durchgezogene Kurve ist das Ergebnis der Filteroperation (hier $n = 3$, Filterbreite = 5). Da jedoch die Messwerte schon über 20 mm integriert wurden (beim Vergiessen), rundet die Filteroperation nur die Extrema ab, liefert aber keine entscheidende Verbesserung.

Als signifikante Verbesserung gegenüber CORA-16 wurde das Restbündels von Test CORA-15 in 10 mm Schritten vergossen. Die Abbildung 3 zeigt im Vergleich zu Abbildung 2 deutlich die sich daraus ergebenden Konsequenzen. Die axiale Struktur erscheint hier feiner aufgelöst, jedoch werden größere Sprünge (Messfehler) gefunden. Dieselbe Filteroperation ergibt ein viel realistischeres Profil. Die geringere Schichthöhe zusammen mit der Filterung ergibt ein bedeutend besseres Profil (vergl. /6/) Trotzdem kann nur die Analyse der Fehlerquellen eine endgültige Aussage über die Genauigkeit des Verfahrens geben.

Fehlerbetrachtung

Bei der Analyse der Messdaten müssen folgende Fehlerquellen betrachtet werden :

1. Messfehler bei Bestimmung der Höhe und der Masse
2. Geometrie des Restbündels, Störung durch Probenentnahme
3. Hohlräume im verlagerten Material (Voids)
4. Leckagen und Oberflächen-Porositäten

Messfehler

Das Messverfahren beruht auf der simultanen Messung des Füllstandes im Acrylgaskasten und des vergossenen Harzmasse. Damit lassen sich die beiden Messfehler angeben zu:

1. Auflösung der Waage : $\delta p = \pm 1.0 \text{ g}$
2. Genauigkeit der Ablesung der Füllstandes: $\delta z = \pm 0.5 \text{ mm}$
die Umrechnung auf Vergussmasse δm :

$$\delta m = \rho^{\text{Resin}} \cdot \delta z \cdot (A_a - A_l)$$

Somit ergibt sich ein Gesamtfehler von:

$$\delta M = \sqrt{\delta p^2 + (\rho^{\text{Resin}} \cdot \delta z \cdot (A_a - A_l))^2}$$

Bei CORA-16 (und allgemein bei SWR-Tests mit rhomboidem Bündelquerschnitt) ist aus geometrischen Gründen ein großer Acrylgaskasten mit einer Querschnittsfläche von 16800 mm^2 notwendig. DWR-Bündel wie beim Test CORA-15 können mit einem Acrylgaskasten mit kleinerem Querschnitt umhüllt werden (12100 mm^2).

Aufgrund o.g. Messfehler ergeben sich bei einer mittleren Dichte des flüssigen Epoxyharzes von $\rho^{\text{Resin}} = 1.095 \text{ g/cm}^3$ folgende Werte:

- CORA-16:
 $\Delta h_1 = 20 \text{ mm}$, $A_a = 16800 \text{ mm}^2$, $A_0 = 3000 \text{ mm}^2$
 $\delta M = 7.6 \text{ g}$
 $\delta V = 8.3 \text{ cm}^3$ (8300 mm^3) entspricht : $\sim 3 \%$ des Harzvolumens
und damit einer Auflösung von $\sim 14 \%$ des Bündelquerschnittes A_0

- CORA-15:
 $\Delta h_1 = 10 \text{ mm}$, $A_a = 12100 \text{ mm}^2$, $A_0 = 2800 \text{ mm}^3$
 $\delta M = 5.2 \text{ g}$
 $\delta V = 5.7 \text{ cm}^3$ (5700 mm^3) entspricht : $\sim 6 \%$ des Harzvolumens
 und damit einer Auflösung von $\sim 20 \%$ des
 Bündelquerschnittes A_0

Will man diesen Fehler verkleinern, so hat man prinzipiell drei Möglichkeiten:

1. *Messgenauigkeit erhöhen*

- Durch Steigerung der Gewichtsauflösung ($\pm 0.1 \text{ g}$ anstelle von $\pm 1 \text{ g}$) kann man eine Verbesserung auf 8% bei CORA-16 und auf 2% bei CORA-15 erreichen.
- Eine deutliche Verbesserung erhielte man, wenn die Füllhöhe exakter messbar ist. Durch eine Ultraschall Höhenmessung sollte eine Auflösung auf $< 0.2 \text{ mm}$ möglich sein, sodaß damit der Fehler halbiert werden kann. Eine Verringerung der Schichtdicke ist nicht sehr, sinnvoll wie der Berechnung von δM zu entnehmen ist.

2. *Acrylglaskasten verkleinern*

Hier ist leider keine Verbesserung möglich, wenn man die rechteckige Vergussform beibehalten will. Eine zylindrische Form des Acrylglaskastens hat zwar eine geringere Querschnittsfläche, wirft jedoch bei der Bearbeitung der Proben große Probleme auf (Fixierung des Bündels beim Schneiden).

3. *Filterung der Daten*

Einfacher und für das Ziel der Messung ausreichend ist die mathematische Aufbereitung der Messdaten. Durch Filterung (gleitendes gewogenes Mittel) kann der Fehleranteil (hochfrequent) herausgemittelt werden. Dabei nutzt man die Tatsache aus, daß der mittlere Ablesefehler pro Ableseprozess konstant bleibt.

Als Filterfunktion wurde ein Gauss-Filter ausgewählt, da deren Fouriertransformierte ebenfalls eine Gausskurve ist. Damit kann man relativ einfach eine effektive Unterdrückung höherfrequenter Störungen erreichen, wie in Abbildung 5 deutlich erkennbar ist.

Die Gausskurve muss hierbei, bedingt durch die diskreten Abtastwerte durch die Binominalkoeffizienten, approximiert werden. Da der gefilterte Wert wieder derselben Z-Koordinate zugeordnet werden soll, kommen nur die geraden Binominalfunktionen in Frage.

Die axiale Auflösung bleibt dabei immer noch unter dem angestrebten Wert von 50 mm (halbe Zonenhöhe für Rechenprogramme), insbesondere wenn die Schichtdicken von $\sim 20 \text{ mm}$ (CORA-16) auf $\sim 10 \text{ mm}$ (CORA-15) reduziert werden.

Die Filteroperation läßt sich folgendermaßen definieren:

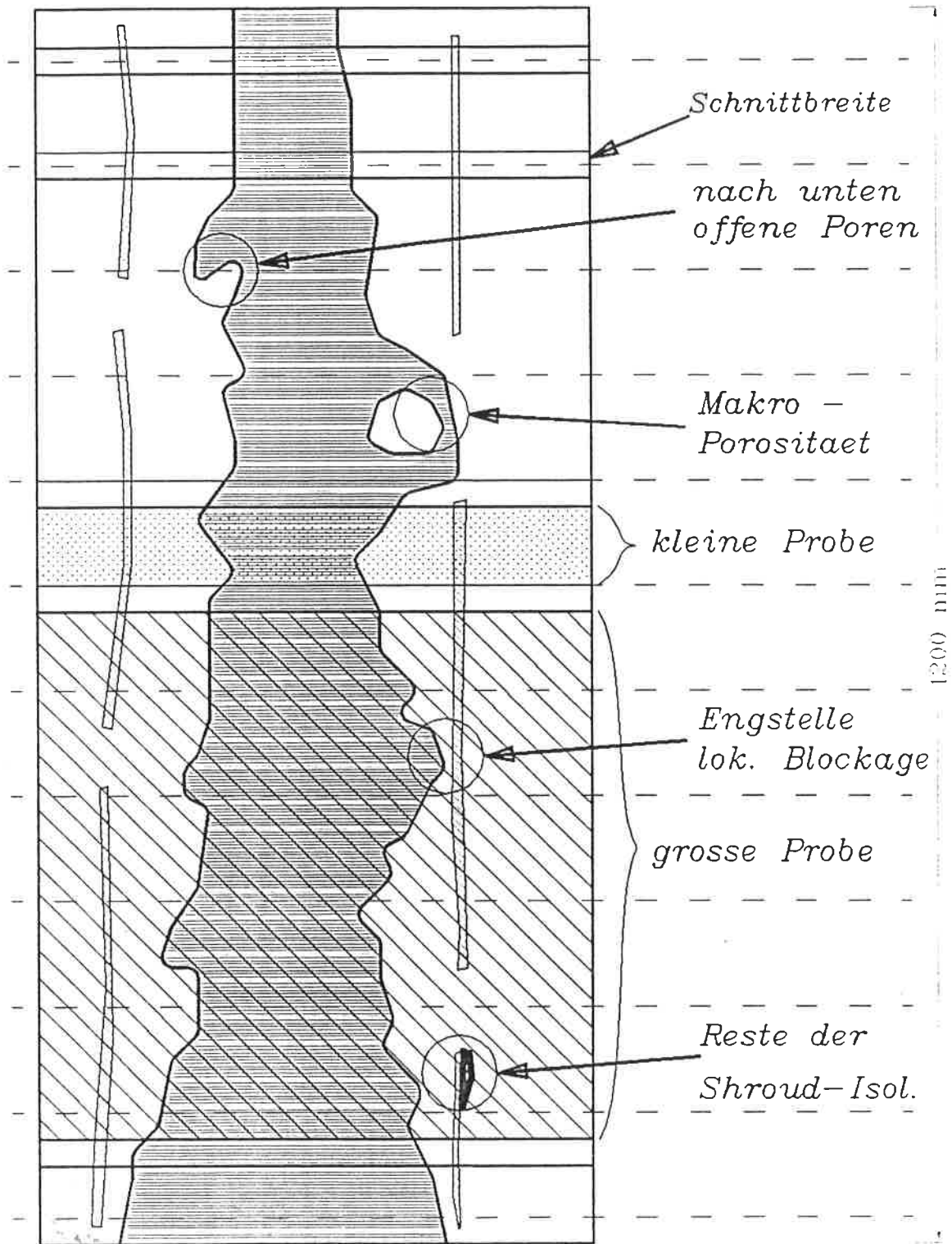


Abbildung 4. Mögliche Fehlerquellen: bedingt durch die unregelmäßige Struktur des getesteten Bündels

$$A2_i^n = \frac{\Delta h_i}{2^n} \cdot \sum_{k=i-n}^{i+n} \frac{a_{k-i} \cdot A1_k}{\Delta h_k}$$

mit: a_k = Gewichtungsfaktoren des Filters

$$a_{k=1} = 1$$

und

$$a_{(k+1)} = \binom{n}{k}$$

mit $n = 1, 2, 3$ ergibt sich die Filterbreite (FB) zu : FB = 3, 5, 7 Abtastpunkte.

Der relative Fehler der gefilterten Daten ergibt sich zu:

$$\frac{\delta A2_i}{A2_i} = \frac{\delta \Delta h_i}{\Delta h_i} \sum_{k=i-n}^{i+n} \frac{\Delta h_k \cdot \delta A1_k}{\delta \Delta h_k \cdot A1_k}$$

Diese Gleichung läßt sich unter den Annahmen $A1_i \sim A1_k$ und $\delta \Delta h_i \sim \delta \Delta h_k$ (für alle i, k) vereinfachen zu:

$$\frac{\delta A2_i}{A2_i} \approx \frac{\delta A1_i}{A1_i} \cdot \frac{1}{(2 \cdot k + 1)}$$

Schon mit dem einfachsten Filter ($n = 1$) können die Fehlergrenzen auf Werte $< 10\%$ eingengt werden.

In Abbildung 5 ist die Wirkung unterschiedlicher Filterbreiten ($n = 1, 2, 3$), d.h. für 3, 5, und 7 Messpunkte anhand der Messwerte von CORA-15 dargestellt. Für die gezeigten Grafiken wurde ein Filter mit der Breite 5 ($n = 2$) verwendet (dicke Linie). Eine ausreichende Filterung ist jedoch schon für $n = 1$ erreichbar.

Geometrie des Restbündels

Bei Abbau der voluminösen Shroud-Isolierung können auch Teile des Zirkaloy-Shrouds und der Hüllrohre mit entfernt werden. Diese Teile verfälschen natürlich das post-hume Profil. Durch genaue Dokumentation kann das Profil des Originalbündels an den Stellen entsprechend abgeändert werden.: Um diese Fehlerquellen gänzlich zu vermeiden, sollte der Shroud komplett abgebaut werden.

Hohlräume

Nicht messbar sind jedoch Hohlräume innerhalb des geschmolzenen Materials oder nicht vollständig gefüllte, nach unten offene Hohlräume wie in Abbildung 4 dargestellt.: Dabei müssen zwei Arten von Hohlräumen unterschieden werden:

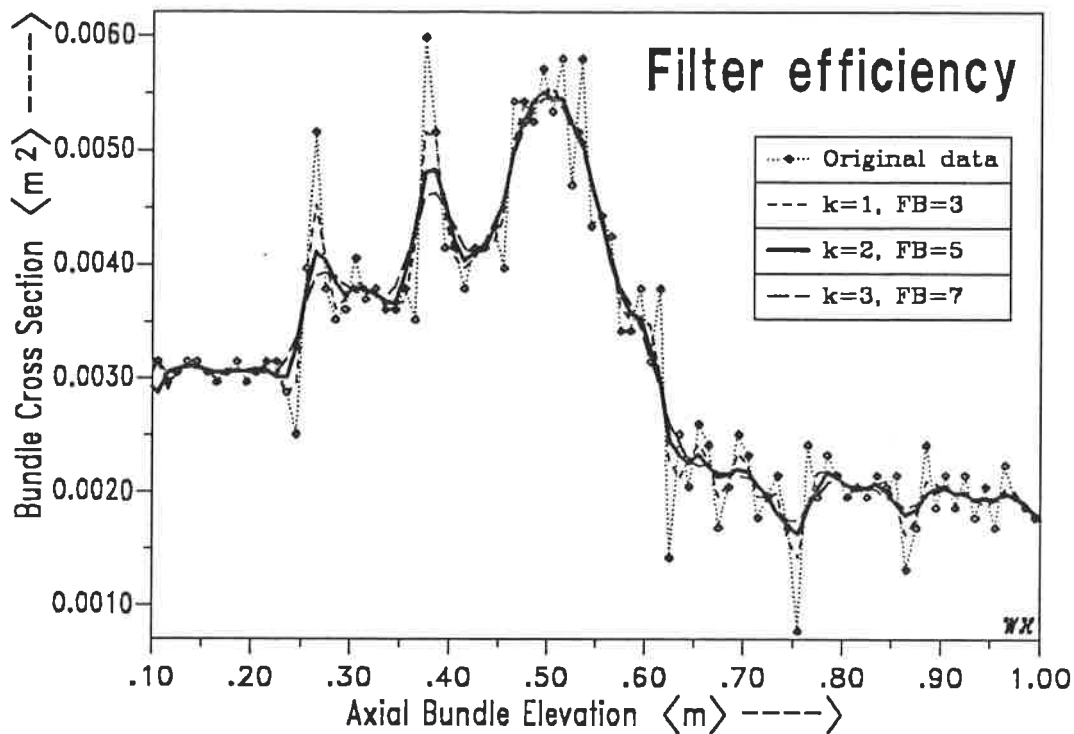


Abbildung 5. Einfluss der Filterbreite auf die "Gleitung" der Messwerte: Vergleich der Messwerte (Symbole) mit den "gefilterten" Kurven

1. Porositäten aufgrund der Materialeigenschaften (Micro-pores)
2. Oberflächenporen, hervorgerufen durch Umschließung größerer Volumina durch mehrere Schmelzflüsse

Allgemein gesehen stellt ein großer beobachteter Hohlraumanteil die Modellierung der Materialverlagerung nur mit einer reinen Massenbilanz in Frage. Die komplexen Verhältnisse in einem geschmolzenen Brennelementbündel erfordern zunehmend die Berücksichtigung der mittleren Materialdichte und der physikalischen Materialwechselwirkungen (z.B. unterschiedliche Schmelztemperaturen erzeugen ein Wiederaufschmelzen des niedrigschmelzenden Materials)

Wenn sich Hohlräume bilden, dann hat dies große Auswirkungen auf das thermodynamische Verhalten von Restbündel und Kühlkanal. So ist aufgrund einer niedrigeren mittleren Dichte weniger Wärme gespeichert, es kann weniger Nachzerfallswärme entbunden werden und die dadurch hervorgerufene Kühlkanalblockage ist umfangreicher.

Leckagen und Porositäten

Das verwendete Epoxidharz ist relativ niederviskos (ca. 1.5 Pa s, /11/) sodaß geringe Undichtigkeiten am unteren Ende des Bündels bzw. am Acrylglastasten genügen, um messbare Mengen austreten zu lassen. Diese ausgelaufene Menge täuscht ein "schlankeres" Bündel vor.

Deshalb muß hier die Messung korrigiert werden unter der Annahme, daß:

$$A1_i = A1_{i-1} + \Delta A1_i$$

mit

ΔA_i = Änderung der Querschnittsfläche

Diese Änderung ist i.A. klein wenn Δh klein ist.

Beim Vergießen des Restbündels CORA-15 wurde beim Wechseln der Chargen ein langsames Absinken des Flüssigkeitspiegels festgestellt. Innerhalb von einer Stunde sackte der Spiegel um ca. 5 mm ab. Offensichtlich ist durch den hydrostatischen Druck das Epoxydharz in kleine Porositäten oder in Labyrinth gedrückt worden. Auf die Messgenauigkeit hat dies nur einen vernachlässigbaren Einfluss, da die Vergussgeschwindigkeit (0.2 - 0.5 mm/s) groß ist gegenüber der Absinkgeschwindigkeit (0.002 mm/s).

Resumée

Das vorgestellte Verfahren hat sich für die Analyse der beiden unterschiedlichen Bündelkonfigurationen, sowohl für DWR- als auch für SWR-Bündelgeometrien bewährt. Die Messungen sind einfach und effektiv durchzuführen, da das übliche Vergussverfahren /11/ nur unwesentlich beeinträchtigt wird.

Eine Automatisierung der Messung, d.h. gleichzeitiges Messen von Gewicht und Flüssigkeitstand ist möglich, bringt aber nur dann Vorteile, wenn die axiale Messgenauigkeit um einen Faktor 2-5 gesteigert werden kann. Nach wie vor muß die Messung ständig überwacht werden, um den korrekten Ablauf zu gewährleisten (z. B. Leckagen beheben, Blasen detektieren,...).

Die bisher erreichte Genauigkeit der Daten ist ausreichend, wenn man das Ziel der Auswertung berücksichtigt:

Bereitstellung von Vergleichsdaten für SFD-Codes.

Da diese Code-Systeme selten mit kleineren Knotenhöhen als 0.05 m arbeiten, genügt ein Profil mit 0.05 m Auflösung und einer Genauigkeit von 10%.

Massenprofil

Messung

Weitere Informationen zur Gesamtanalyse liefert die Massenbilanz der CORA Proben. Damit läßt sich sehr leicht ein axiales Massenprofil erstellen, dessen axiale Auflösung nur von der Probenhöhe abhängt. Die Probenmasse setzt sich aus der eigentlichen Masse des Bündels ("Strukturmasse") und aus der Vergussmasse zusammen.

$$M_j = M_{Struktur} + M_{Harz}$$

mit $j = 1, 2, 3, \dots, N$

Mit dieser Massenverteilung kann man schon ein Profil 0.-Ordnung ableiten unter der Annahme, daß $M_{Struktur} > M_{Harz}$. In Abbildung 6 ist dieses Profil als oberster Linienzug dargestellt.

Sinnvoll ist jedoch eine genauere Auswertung unter Verwendung der Querschnittsinformationen. Dabei müssen jedoch die Schnittverluste mitberücksichtigt werden.

Beim Zerschneiden des eingegossenen CORA-Bündels in verschieden große Einzelproben entstehen jedoch unvermeidlich Verluste durch die finite Dicke des Sägeblattes (Schnittbreite ca. 2.5 mm). Diese fehlende Masse Δm_j läßt sich berechnen, wenn die Gesamtmasse M_B und die Probenmassen m_j bekannt sind.

$$M_B = \sum_{j=1}^N m_j + \sum_{j=1}^{N-1} \Delta m_j$$

Im Allgemeinen ist dieses Massendefizit gegenüber der Gesamtprobe zu vernachlässigen (Fehler < 10%). Für ein verfeinertes Massenprofil jedoch muss die Schnittbreite als Leerstelle mit berücksichtigt werden.

Analyse

Da ein Massenprofil 0.Ordnung eine unbefriedigende axiale Auflösung bietet, wird in Kombination mit den Volumenwerten, siehe Kap. 1, ein verfeinertes Massenprofil erstellt. Dazu wird das Volumen des Restbündels schichtweise über die Probenhöhe integriert und der Probe eine mittlere Strukturmaterialdichte zugeordnet. Die ermittelte Restbündelfläche und die Giessharzmasse aus der Volumenmessung werden in Relation zu dem Gewicht der Proben gebracht.

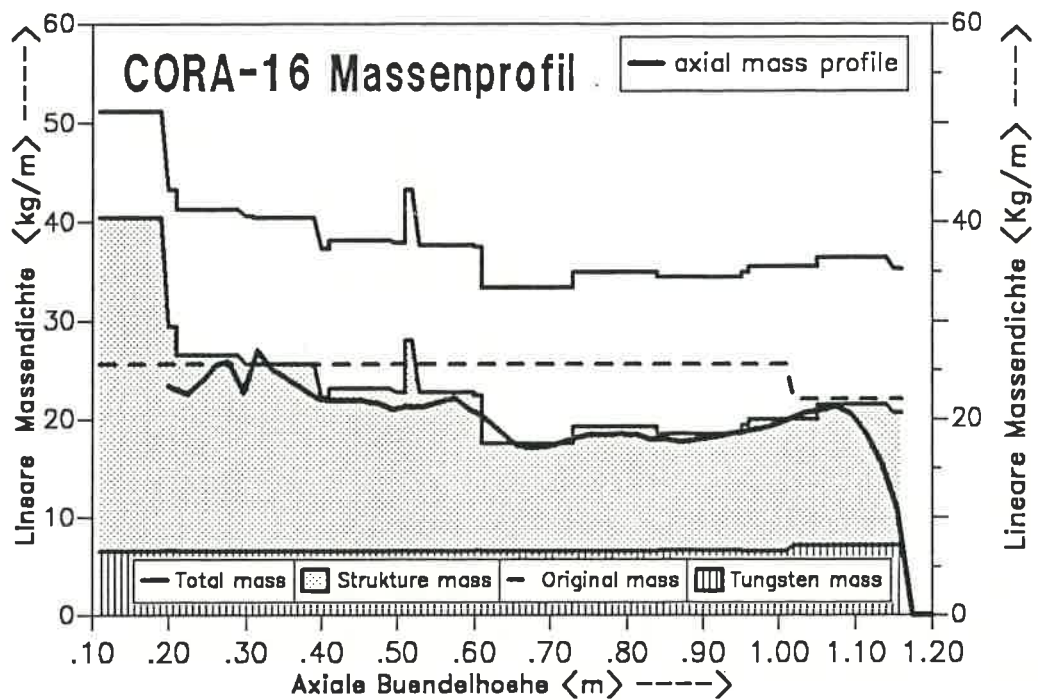


Abbildung 6. Ergebnisse der Probenwägung von Test CORA-16: Axiales Massenprofil von 0.10 bis 1.15 m Bündelhöhe

$$V_{\text{Struktur}} = V_{\text{Probe}} - \sum_{i=i(j)}^{i(j)+k} \delta H_i \cdot A l_i$$

mit: $i(j) = 1$. Schicht der Probe j , $k =$ Anzahl der Schichten der Probe j

$$V_j^{\text{Probe}} = A_a \cdot h_j^{\text{Probe}}$$

$$M_j^{\text{Struktur}} = M_j^{\text{Probe}} - \sum_{i=i(j)}^{i(j)+k} \rho^{\text{Resin}} \cdot \delta h_i \cdot A l_i$$

Damit ergibt sich folgende mittlere Strukturichte für die Probe j :

$$\bar{\rho}_j = \frac{M_j^{\text{Struktur}}}{V_j^{\text{Struktur}}}$$

$$\bar{\rho}_j = \frac{M_j^{Probe} - \sum_{i=i(j)}^{i(j)+k} \rho^{Resin} \cdot \delta h_i \cdot A l_i}{V^{Probe} - \sum_{i=i(j)}^{i(j)+k} \delta h_i \cdot A l_i}$$

Diese Strukturmasse M_s ist in Abbildung 6 durch die gepunkteten Flächen wiedergegeben. Diese Werte können nun mit den Originalmassen des Bündels verglichen werden. Dazu ist die lineare Masse des unoxidierten Bündels ausgezogen, die des vollständig oxidierten Bündels gestrichelt dargestellt. Die Masse des Originalbündels kann an unterschiedlichen axialen Höhen zwischen beiden Extrema schwanken.

Verfeinertes Massenprofil

Eine detailliertere Analyse ergibt sich, wenn man die Informationen über das Proben- bzw. Strukturvolumen aus Verfahren 1 mit berücksichtigt. Hierbei wird die aus Strukturmasse und Strukturvolumen jeder Probe gewonnene mittlere Dichte verwendet.

Somit kann für jede Schicht i der Probe j eine "verfeinerte" Strukturmasse m_i^S definiert werden:

$$m_i^S = A l_i \cdot h_i \cdot \bar{\rho}_j$$

Diese Masse enthält noch den bekannten Anteil der Heizstäbe, die den Abschmelzprozess (für die erforderliche Genauigkeit) unverändert überstehen. Diese Strukturmasse wird nun um die Masse der Heizstäbe m_i^W br

$$m_i^W = N^{Sim} \cdot A^{Sim} \cdot h_i \cdot \rho^W$$

verringert. Damit findet man die Restbündelmasse zu :

$$m_i^R = m_i^S - m_i^W$$

bestehend aus :

- Restpellets, weitgehende Anfangsstruktur.
- Absorbiermaterial sowie Abstandshaltermaterial (vorw. metallisch)
- Uranoxid mit Zirkon, Edelstahl sowie anderen Anteilen (vorw. keramisch)

Diese Masse kann mit den hier beschriebenen Hilfsmitteln nicht weiter untergliedert werden. Hier kann nur mittels Oberflächenanalyse (interaktive Bildverarbeitung) eine weitere Verfeinerung erreicht werden.

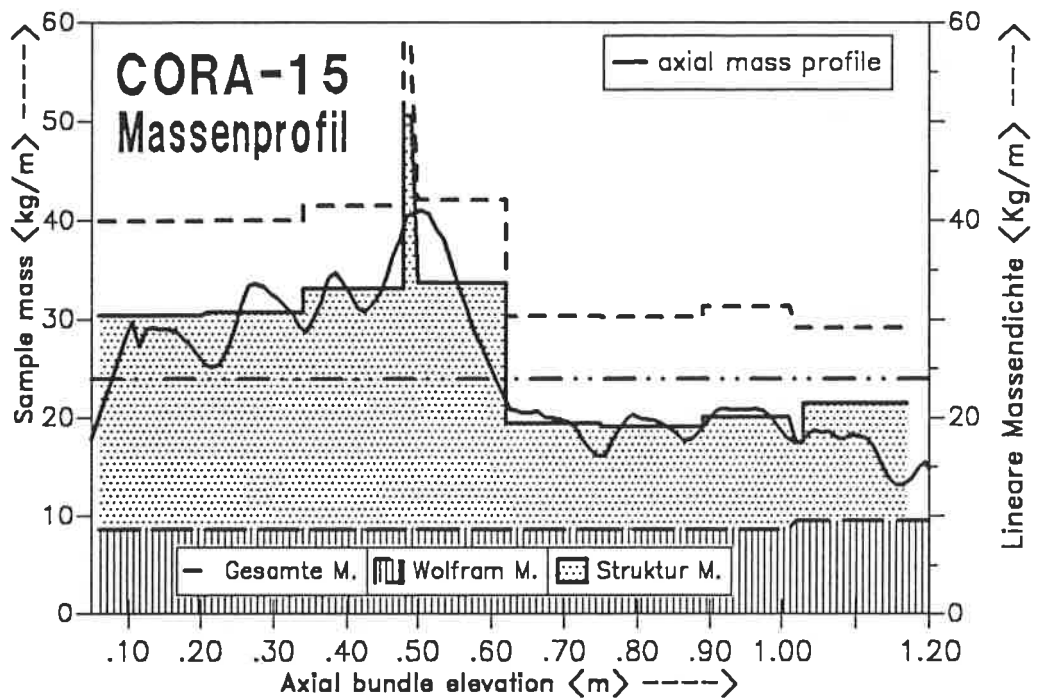


Abbildung 7. Ergebnisse der Probenwägung von Test CORA-15: Axiales Massenprofil von 0.10 bis 1.25 m Bündelhöhe

Die Ergebnisse dieser Analyse sind für CORA-16 in Abbildung 6 und für CORA-15 in Abbildung 7 wiedergegeben. Die beiden Ordinaten sind dabei identisch skaliert um den Vergleich zu erleichtern.

Dichteprofil

Was im vorherigen Abschnitt für das verfeinerte Massenprofil dargelegt wurde, trifft auch auf das daraus abgeleitete Dichteprofil zu. Im wesentlichen gibt das Dichteprofil nur Aufschluss über den Porositätsgrad der angelagerten Massen innerhalb der Probe. Diese Information ist im Zusammenhang mit dem Materialprofil interessant, weil eine erhöhte Porosität nur bei direktem Kontakt von verschiedenen Materialien beobachtet wird (z.B. UO_2 und SS).

In der mittleren Dichte unterscheiden sich die beiden untersuchten Bündel, bedingt durch den großen Dichteunterschied der Absorbermaterialien, stark. (siehe dazu Tabelle 1).

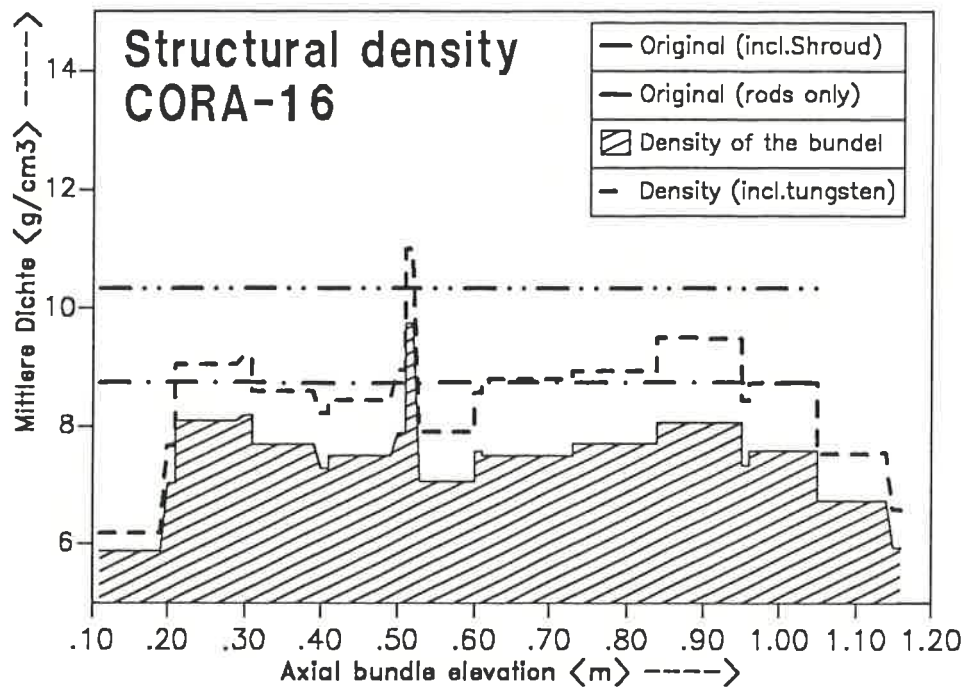


Abbildung 8. Axiales Dichteprofil CORA-16: Analyse von Massen und Volumensdaten

Dennoch läßt sich die lockere Packung im unteren Teil des Bündels gut erkennen. In dem Maße wie Material porös angelagert wurde, sinkt auch die mittlere Dichte der Struktur. Die gravierenden Dichteunterschiede bei CORA-15 sind noch nicht ganz verstanden.

Fehlerbetrachtung

In Vergleich zur groben Auswertung wird hierbei das ermittelte feine Querschnittsprofil verwendet um die Strukturmasse innerhalb der Probenhöhe zu verteilen. Die Einschränkung, nur eine mittlere Dichte für die ganze Probe zu besitzen, läßt den Fehler jedoch mit der Probenhöhe drastisch ansteigen, d.h die mögliche Variation der Dichte spricht voll auf das Massenprofil durch. Aus diesem Grunde sind Probenhöhen über 0.07 m nicht mehr sinnvoll analysierbar.

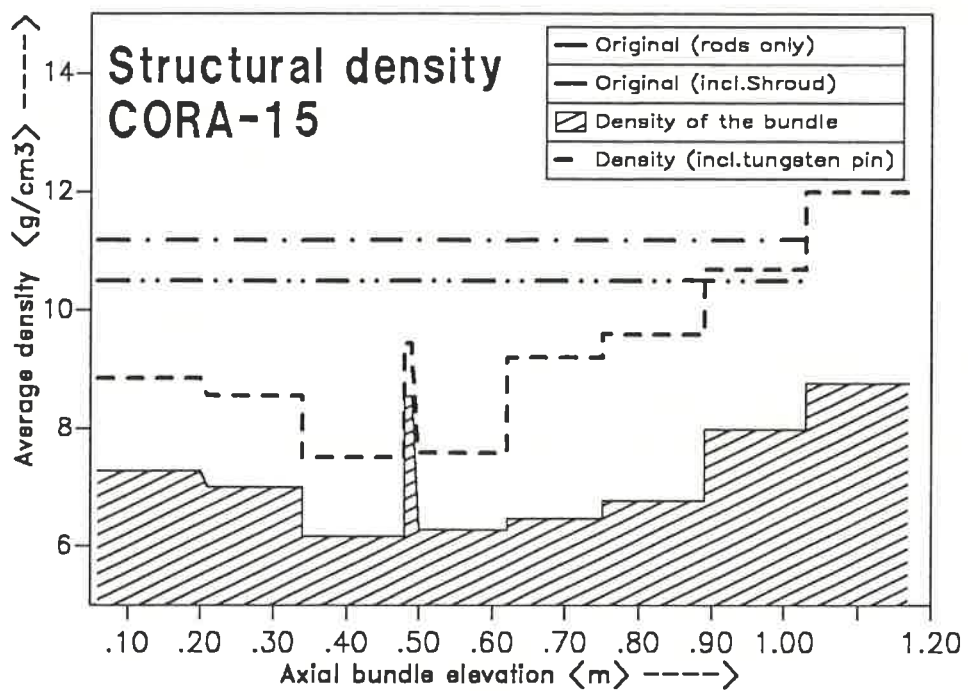


Abbildung 9. Axiales Dichteprofil CORA-15: Analyse von Massen und Volumensdaten

Resumée

Für sich alleine betrachtet ergibt die Massenbestimmung recht wenig neue Information. Im Zusammenhang mit der Querschnittsmessung und der Oberflächenanalyse sowie mit der Unterstützung der Messwerte aus der Mikrostrukturanalyse läßt sich ein detailliertes Bild zeichnen.

Die Bestimmung einer mittleren Strukturdichte wird dann sinnvoll, wenn die Integrationshöhen (Probenhöhe) klein gewählt werden können. Dann lassen sich zusammen mit der punktuellen Analyse mittels Bildverarbeitung relativ genaue Porositätsangaben des Bulkmaterials geben.

Materialprofil

Messmethode

Parallel zu der direkten Auswertung der Volumen- und Masseninformationen wurden die Schnittflächen der CORA-Proben planimetrisch analysiert /4,6/. Im Moment können folgende Materialien unterschieden werden:

1. Wolfram Heizstäbe (Kalibrierungsfläche für Bildvermessung)
2. Unverändertes Pelletmaterial (UO_2)
3. Metallische Schmelze (vorzugsweise metallisches Absorbermaterial)
4. Oxidische Schmelze (U, ZrO_2 , ... hoher O_2 Gehalt)

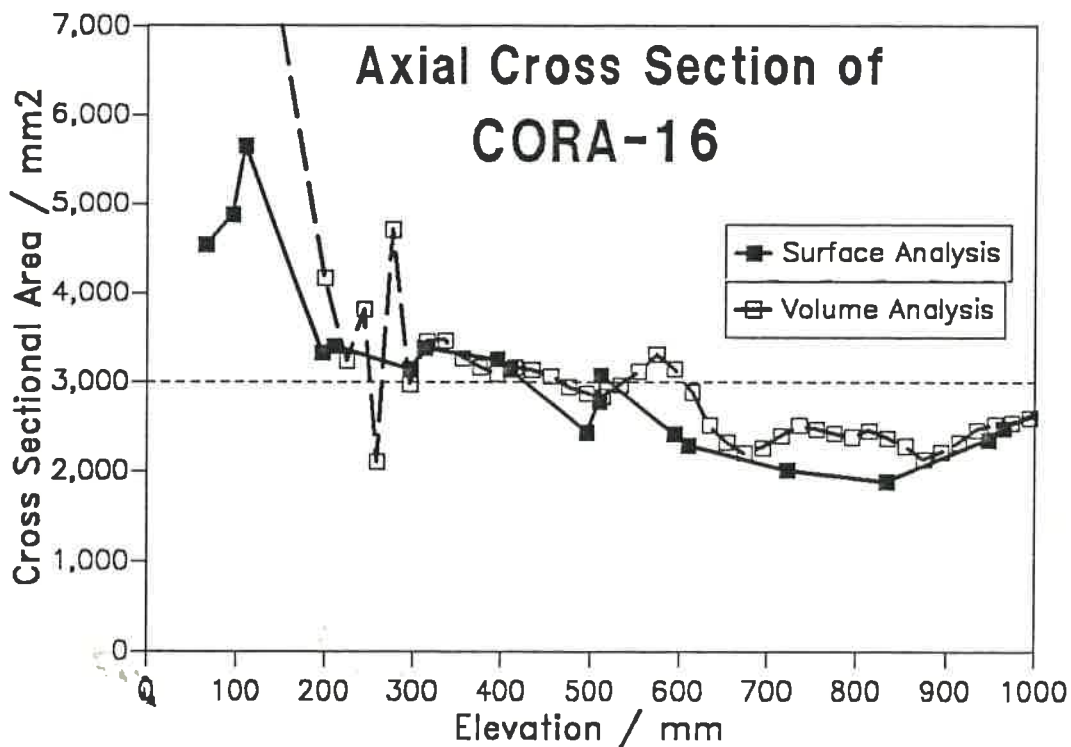


Abbildung 10. Vergleich Volumen-/Oberflächenanalyse von CORA-16

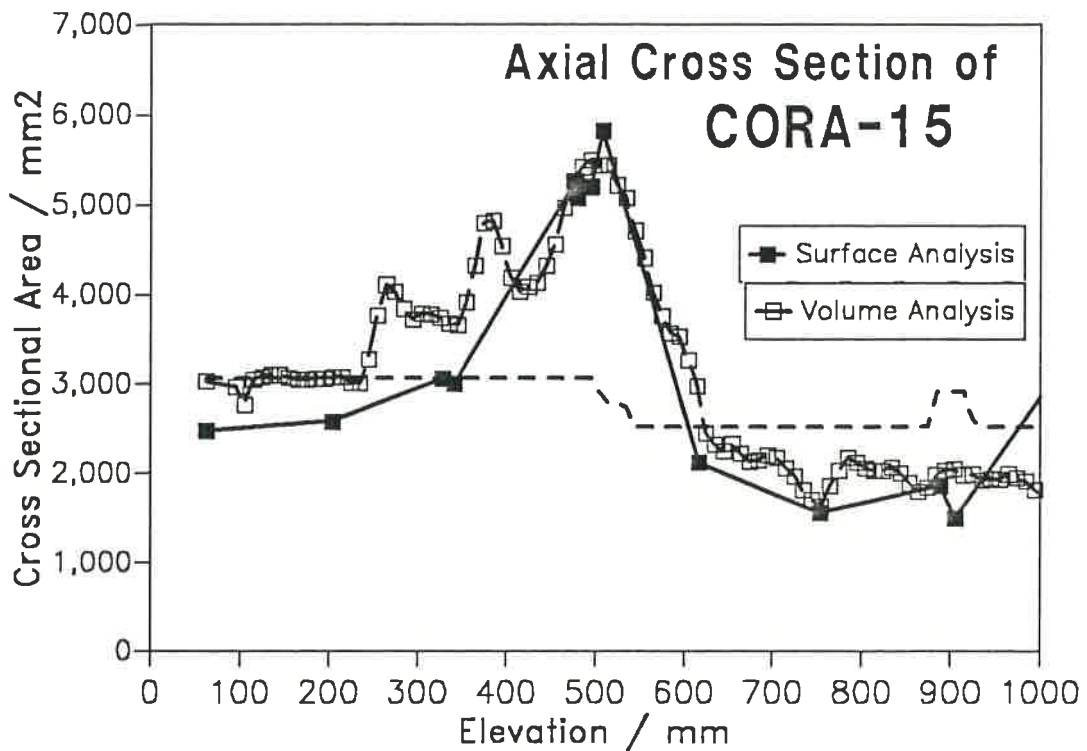


Abbildung 11. Vergleich Volumen-/Oberflächenanalyse von CORA-15

An den Oberflächen der Proben können die einzelnen Materialien optisch detektiert und vermessen werden. Eine Interpolation zwischen den einzelnen relativ weit voneinander entfernten Probenoberflächen ist möglich, birgt aber große Fehlerquellen in sich. Hier ist die Wahl der axialen Position des zu analysierenden Horizontalschnittes sehr sensitiv im Hinblick auf die Interpolierbarkeit. Quasi-kontinuierliche (feine Diskretisierung) Messmethoden wie die in Kapitel 1 und 2 vorgestellten Prozeduren liefern hier bessere Resultate.

Ergebnisse

Die Details dieser Methode sowie Ergebnisse der Analysen der Schnittoberflächen CORA-2 bis CORA-16 sind im Primäbericht von Herrn F. Nagase [6] ausführlich dargestellt.

An dieser Stelle soll nur ein Vergleich der beiden Methoden dargelegt werden.

Das quantitative Auswerteverfahren wurde zuerst am Restbündel des Testes Siedewasser-Versuches CORA-16 durchgeführt (Abbildung 10). Daher waren die in Kapitel 1 diskutierten Verbesserungen noch nicht realisiert. Nach Optimierung des Vergussverfahrens ergibt sich für CORA-15

(Abbildung 11) eine bedeutend bessere Übereinstimmung. Die Differenzen zwischen beiden Verfahren liegen innerhalb ihrer Messgenauigkeit, die mit jeweils 10% (gefilterte Volumendaten) angegeben werden kann. Die Diskrepanz unterhalb 0.4 m in Abbildung 11 ist auf den Anteil des Zirkaloy-Shroudes zurückzuführen, der in der Oberflächenanalyse nicht mit berücksichtigt wurde.

Zusammenfassung

Die durchgeführten Analysen lassen sich zu folgenden Aussagen zusammenfassen:

- Das quantitative Ausgussverfahren liefert verlässliche Informationen über den Restquerschnitt des post-humen Bündels.
- Das Massenprofil kann durch zusätzliche Schnitte (z.B. alle 0.05 - 0.07m einen horizontalen Schnitt) weiter verfeinert werden, sodaß die Fehler bei der numerischen Integration über die Schichtdicke kleiner werden.
- Der Vergleich der aus Massen- und Querschnittsprofil ermittelten Dichtewerte gibt Aufschluss über die mittlere Dichte und damit die mittlere Porosität des verlagerten Materials, unter der Annahme, daß der Porositätsfaktor des ursprünglichen Strukturmaterials als null angenommen werden kann. Diese Daten sind insbesondere wichtig zur Verifikation von Verlagerungsmodellen.
- Die arbeitsintensive Analyse der Schnitt-Oberflächen läßt sich rechtfertigen durch die zusätzlichen Informationen über den Zustand des nichtverlagerten Restbündelmaterials. Hier sollten die Messungen in Zukunft auf folgende Materialien ausgedehnt werden:
 - Absorbermaterial, axiale Verteilung, Porosität
 - Zirkon, bzw. Zirkondioxid, axiale Verteilung, Wandstärke, Oxidationsgrad
Hierbei muss jedoch die Aufnahmekamera verbessert werden, sodaß Teilausschnitte (z.B. ein Brennstab, 12 x 12 mm) ausreichend aufgelöst werden kann. Die Struktur kann dann mit dem vorhandenen Bildverarbeitungssystem interaktiv ausgemessen werden.
- Da bei Versuchen dieser Größenordnung die Stochastik eine große Rolle spielt, muß man sich von der microskaligen Auswertung lösen und versuchen, die integrale Aussage eines Versuches zu finden.

Anhang A.

Literatur

- /1/ Fiege, A.; Severe Damage Investigations of KfK/PNS;
KfK 3431B, 1983

- /2/ Hagen,S., Hain,K.; Out-of-pile Bundle Experiments on
Severe Fuel Damage; CORA-Program, KfK 3677, 1986

- /3/ Hagen,S., Hofmann,P.; Physical and Chemical Behavior of
LWR Fuel Elements up to very High Temperatures,
KfK 4104, 1987

- /4/ Hering,W., Nagase,F., Examination of Axial Material
Relocation; Primary report: 12.07.01P08D; 1988

- /5/ Hering,W.,Meyder,R.; Evaluation of CORA Experiments Using
the SCDAP computer code; Kerntechnik 53 (1988), S.21

- /6/ Nagase,F., Measurement of Axial Material Relocation of
Test CORA-2 to CORA-16; Primary report: 12.07.01P09B; 1989

- /7/ Hagen,S., Hering,W., Sepold,L., Hofmann,P., Schanz,G.,
CORA-Bündelexperimente zu Schweren Kernschäden.
Primary Report: 12.07.01P08E, 1988

- /8/ Zurmühl, R.; Praktische Mathematik für Ingenieure
und Physiker; Springer Verlag 1965

- /9/ Andel, J.; Statistische Analyse von Zeitreihen;
Akademie Verlag Berlin 1984

/10/ Sepold,L., Hagen,S., Hering,W., Hofmann,P., Schanz,G.,
CORA-Bündelexperimente zu Schweren Kernschäden.
Atomwirtschaft 34 (1989), S.43

/11/ Benz, H.; Koelzer,W.; Betriebshandbuch CORA-Versuchsanlage
Eingiessen der Brennstabbündel in Giesharz
zur Nachuntersuchung Anhang C, 1986

Referenzdaten

Zur Quantifizierung der Daten werden für jedes Bündel Referenzwerte des jungfräulichen Zustandes benötigt. Die -- Tabelle id 'tabcom' unbekannt -- gibt für alle bisherigen Versuche einen Überblick über die Massen und Geometrien der CORA Bündel (Output von PREBUN (STOFDAT, MATPRO)).

CORA-Materialien	CORA-2 CORA-3	CORA-5	CORA-12 CORA-15	CORA-16 CORA-17	CORA-18	Einheit
Fuel rod	9	8	7	6	20	1
Simulator	16	16	16	12	32	1
Control	---	1	2	11	5	1
Mass of tungsten	8.7	8.7	8.7	6.5	17.5	kg/m
Mass of uranium oxide	12.6	11.93	11.24	8.95	26.6	kg/m
Mass of Zry (rods)	3.75	3.60	3.45	12.1	7.8	kg/m
Mass of Zry (abs)	---	0.22	0.43	---	1.07	kg/m
Mass of SS (abs)	---	0.16	0.32	1.33	0.69	kg/m
Mass of AG-In-Cd	---	0.63	1.25	---	4.11	kg/m
Mass of boron carbide	---	---	---	0.45	---	kg/m
Mass of Inconel	0.11	0.11	0.11	---	0.25	kg/m
Mass of Zry spacer	0.19	0.19	0.19	0.22	0.4	kg/m
Thickness shroud wall	1.2	1.2	1.2	2.6	1.2	mm
Mass of ZrY (Shroud)	2.6	2.6	2.6	9.3	3.7	kg/m
Total mass of ZrY	6.5	6.6	6.7	12.0	12.6	kg/m
Total mass of SS	0.11	0.268	0.426	2.09	0.79	kg/m
Linear mass density	11.3	11.3	11.2	10.8	10.9	kg/m
Density (incl.Shroud)	10.6	10.6	10.5	8.98	10.5	g/cm ³
Area inside shroud	7060	7060	7060	6500	14189	mm ²
Average cross section	2233	2257	2283	1896	5300	mm ²

Tabelle 1. Materials und Geometries: like bundle composition (simulator, fuel rod, absorber rod and shroud), axial material distribution, axial, and radial dimensions, and original bundle cross sections.

Messvorschrift

Aufgrund des bisher dargelegten lässt sich folgende Messvorschrift generalisieren (Maximalforderung) :

Vorbereitung

1. Acrylglastasten so klein wie möglich halten
2. Bündel und Kasten vollständig abdichten
3. Charge auf 5 kg begrenzen, um genauere Waage verwenden zu können
4. Zuführungsschlauch ca. 0.5m von der Waage entfernt befestigen
5. Dichte des Harzes messen (grob)
(Gewicht und Volumen des Harzes bestimmen (Eichung???))
6. Während eine Charge vergossen wird, kann die nächste schon gemischt und evakuiert werden (Die gesamte Eingiesszeit verkürzt sich dadurch, sodaß sie kleiner als die Tropfzeit der ersten Charge bleibt.)

Messvorgang

1. Durchfluss je nach Bündelstruktur einstellen:
 - Shroud noch vorhanden (unterer Bündelteil): $dz/dr < 1 \text{ cm/min}$
 - Shroud entfernt $1 \text{ cm/min} < dz/dr < 2 \text{ cm/min}$
2. Arbeitsteilung : Höhenablesung (sehr genau, $\pm 1/4 \text{ mm}$)
Gewichtsablesung (genau bis auf letztes Digit)
3. Beim Beenden einer Charge Schlauch am unteren Bündelende verschliessen.
4. Blasenbildung im Schlauch so weit wie möglich vermeiden
5. Beim Wiederbeginn mit der neuen Charge den Höhenstand des Harzes neu notieren (Referenz-Nullpunkt für neue Charge)
6. Bei auftretenden Leckagen ist das Eingiesen zu stoppen (Schlauch schliessen) und Höhenstände notieren (vor und nach Abdichtung des Lecks).

Probenwägung

1. Wägung des gesamten Bündels nach Abtrennen der unteren und der oberen Elektrodenzone (ungenauere Waage, $M < 60$ kg)
2. Schneiden des Bündels gemäß Schnittplan
(Wenn Probenhöhen über 100 mm notiert sind, sollten diese zwecks besserer axialer Massenauf-
lösung noch einmal halbiert werden.)
3. Wägung der Proben (genaue Waage)
4. Vermessung der Proben:
 - a. Probenunterkante (Vergossener Maßstab)
 - b. Probenhöhe

Auswertung

Zur Auswertung und Korrelation der unterschiedlichen Meswerte wurde das Analyseprogramm AXPRO2 entwickelt.

Das Analyseprogramm AXPRO2 erlaubt folgende Operationen :

1. Einlesen der Volumen, Höhen und Massedaten aus einem File
2. Korrelation von Volumen- und Massendaten
3. Berücksichtigung einer nichtuniformen Bündelstruktur
(z.B. Shroud teilw. entfernt, Spacer, Thermoelemente,...)
4. Berücksichtigung der Schnittverluste (generell mit 2.5 mm angenommen)
5. Berechnung der Fehlergrenzen
6. Relative Massenbilanz
7. Aufbereitung der Daten auf Code-spezifische axiale Nodalisierung

Die korrigierten Daten liegen als sequentielles File vor und können mittels der IMPORT-Funktion von CHART graphisch dargestellt werden. Alle in diesem Bericht dargestellten Grafiken sind in dieser Art hergestellt.

Anhang B. Programm AXPPO2

Main AXPPO2

```

PROGRAMM  AXPPO2
*****
*          PROGRAMM  AXPPO2          *
*****
*
* PROGRAMM ZUR KORRELATION VON MASSES- HOEHENDATEN AUS DEM
* AUSGIESS-MESSVERFAHREN BEI CORA-VERSUCHEN MIT ERWEITERUNG
* DER BERUECKSICHTIGUNG VON MASSESPROFILIEN AUS DEM
* WIEGEGANG DER GESCHNITTENEN BUENDELPROBEN
*
*****
* PARAMETER : BESCHREIBUNG
* -----
* MAX          MAXIMALE ANZAHL DER WERTE
* MPRO         MAXIMALE ANZAHL DER PROBEN
* =====
* VARIABLEN :      TYP   DIM   BESCHREIBUNG
* -----
* ALAY         CHAR           LAYEREINSTUFUNG
* DATEI1, DATEI2 CHAR           EINGABEDATEI,   AUSGABEDATEI
* FACRYL, FBU00 REAL           FLAECHE KASTENS,  ORGINALBUENDELS
* HC           REAL           HOEHENKORREKTUR
* RHOHA, RHO0  REAL           DICHTE DES HARZES,  WOLFRAM HEIZSTAB
* RHEIZ, AHEIZ REAL           RADIUS DES HEIZSTABES,  FLAECHE
* NHEIZS, NUM  INT            ANZAHL DER HEIZSTAEBE,  TESTNUMMER
* -----
* GPRO         REAL   MPRO    GEWICHT DER ABGSCHNITTENEN PROBEN
* ZPRO, ZEFF   REAL   MPRO    UNTERES ENDE DER PROBE,  PROBENMITTE
* PROTOP       REAL           OBERES ENDE DER AKTUELLEN PROBE
* DZPRO        REAL   MPRO    HOEHE DER PROBE
* -----
* DELTH        REAL   MAX     HOEHENAENDERUNG
* VHAZ, GHARZ  REAL   MAX     HAZ      : VOLUMEN,  MASSE
* FHARZ        REAL   MAX     "          : FLAECHE
* VBUND, GBUND REAL   MAX     RESTBUNDEL: VOLUMEN,  MASSE
* FREBUN, F3   REAL   MAX     "          : FLAECHE,  FL.GEGLEITET
* DELTF        REAL   MAX     AENDERUNG DER FLAECHE
* ZBOT,        REAL   MAX     UNTERES ENDE DES LAYERS
* MZPRO        REAL           HARZMASSE DER AKTUELLEN PROBE
* -----
* DELT         REAL           INTEGRATIONSVAR.
* BMX          REAL   MAX     RESTBUENDELMASSE PRO LAYER
* BMF          REAL   MAX     RESTBUENDELMASSE PRO LAYER,GEFILTERT
* RHOPRO, RHORE REAL   MPRO    DICHTE: RESTBUNDEL, REST OHNE W.
* -----
* PMAS1        REAL   MPRO    DICHTE: LIN MASSE PROBE
* PMAS2        REAL   MPRO    DICHTE: LIN MASSE PROBE OHNE HAZ
* PMAS3        REAL   MPRO    DICHTE: LIN MASSE PROBE OHNE WOLFRAM

```

```

* -----
* IL,      IP          ZAEHLERVARIABLE:   LAYER, PROBE
* MIL,    MIP         MAXIMALVARIABLE:   LAYER, PROBE
* =====
* SPRACHE :          FORTRAN 77 MIT OPTIMIERENDEM COMPILER
* AUTHOR  :          WOLFGANG HERING, JUERGEN SCHAEFER
* DATUM   :          20.12.1988
* LETZTE AENDERUNG : 4.04.1989 JETZT UNABHAENGIG VON STARTPUNKT
*****
PARAMETER (MAX=150,MPRO=20,MSPA=3)
C  INTEGER NUM,MSP,MIL,MIP,IL,IP,NHEIZS,IO,IOUT,IN

CHARACTER*24 DATE11/'AIT772.AXIAL.FORT(C15IN)'/
CHARACTER*24 DATE12/'AIT772.AXIAL.FORT(AUS15)'/
CHARACTER ALAY*6
LOGICAL PROST

COMMON /DTRANS/
&  RHOHA,UMRECH,MSP, MIL, MIP, PI, RHEIZ, AHEIZ, RHOWO, RHORE,
&  ZBOT(MAX),ZEFF(MAX),DELTH(MAX), GMAS,
&  DELTF(MAX),FREBUN(MAX),F3(MAX),FBU(MAX),FACRYL,
&  FHARZ(MAX),VHARZ(MPRO), GHARZ(MPRO),GHAPRO,
&  ZPRO(MPRO), RHOPRO(MAX),GPRO(MPRO),DZPRO(MPRO),
&  VBUND(MPRO),GBUND(MPRO),BMX(MAX),BMF(MAX),
&  ZBSPA(MSPA),ZTSPA(MSPA),DHSPA(MSPA),DASPA(MSPA)

DATA IOU/6/, IO/11/, IN/9/

UMRECH=1.0
PI= 3.1415926
RHEIZ=3.0E-3
RHOWO=19.2E3
C- - - - - DATENFILES OEFFNEN
OPEN(UNIT=9,
+ FILE=DATE11,
+ FORM='FORMATTED',
+ STATUS='OLD',
+ ACCESS='SEQUENTIAL',
+ ACTION='READ')

OPEN(UNIT=11,
+ FILE=DATE12,
+ FORM='FORMATTED',
+ STATUS='UNKNOWN',
+ ACCESS='SEQUENTIAL',
+ ACTION='WRITE')
C- - - - - EINLESEN DER DATEN
CALL LESEIN (IN, IOU, IO)
C- - - - - GLEITEN DER RHO-WERTE
CALL GGLEIT (MIL,FREBUN,F3,DELTH,1)
C- - - - -
DO 490 IL =1,MIL
  BMX(IL) = 0.0
  BMF(IL) = 0.0

```

```

        RHOPRO(IL) = 0.0
490  CONTINUE
C- - - - - START MASSEN-VOLUMENKORRELATION
      WRITE(10,903)
      DO 500 II = 1,2
      TOTMAS = 0.0
      IL=1
      DO 500 IP= 1,MIP
      PROTOP= ZPRO(IP) + DZPRO(IP)
      IF (II.EQ.2) THEN
        WRITE(10OUT,901) ' PROBE:',IP, ZPRO(IP),
&      ' M',PROTOP,' M ',DZPRO(IP),
&      ' M MASSE',GPRO(IP),' KG '
        WRITE(10OUT,906)
      ENDIF

333  IF (IL .GT. MIL) GOTO 499
      IF (ZBOT(IL).LE.ZPRO(IP) .AND. ZBOT(IL+1).GT.ZPRO(IP)) THEN
        IF (PROTOP .GT. ZBOT(IL+1)) THEN

          ALAY = ' BOT: '
          DELTU   = ZBOT(IL+1) - ZPRO(IP)
          VHARZ(IP) = FHARZ (IL) * DELTU
          VBUND(IP) = FREBUN(IL) * DELTU
          DELT    = DELTU
          BMX(IL) = BMX(IL)
&          + FREBUN(IL)*DELTU*RHOPRO(IP)/DELTH(IL)

          IF (II.EQ.2) WRITE(10OUT,905) ALAY,IL,
&          DELTU,VHARZ(IP),VBUND(IP),BMX(IL),DELT
          PROST = .TRUE.
          IL = IL + 1
          GOTO 333
        ELSE

          ALAY = ' SMALL '
          VHARZ(IP) = FHARZ(IL) * DZPRO(IP)
          VBUND(IP) = FREBUN(IL) * DZPRO(IP)
          DELTO    = DZPRO(IP)
          DELT     = DZPRO(IP)
          BMX(IL)  = BMX(IL)
&          + FREBUN(IL)*DZPRO(IP)*RHOPRO(IP)/DELTH(IL)

        ENDIF
      ELSE
        IF (PROST) THEN
          IF (PROTOP .GT. ZBOT(IL+1)) THEN

            ALAY = ' MID: '
            VHARZ(IP) = VHARZ(IP) + FHARZ (IL) * DELTH(IL)
            VBUND(IP) = VBUND(IP) + FREBUN(IL) * DELTH(IL)
            BMX(IL) = BMX(IL) + FREBUN(IL)*RHOPRO(IP)
            DELT    = DELT + DELTH(IL)
&            IF (II.EQ.2) WRITE(10OUT,905) ALAY,IL,
            DELTH(IL),VHARZ(IP),VBUND(IP),BMX(IL),DELT
            IL = IL + 1
            GOTO 333
          
```

ELSE

```
ALAY = ' TOP: '  
PROST = .FALSE.  
DELTO = PROTOP - ZBOT(IL)  
DELT = DELT + DELTO  
  
VHARZ(IP) = VHARZ(IP) + FHARZ (IL) * DELTO  
VBUND(IP) = VBUND(IP) + FREBUN(IL) * DELTO  
BMX(IL) = BMX(IL) + FREBUN(IL)*DELTO*RHOPRO(IP)/DELTH(IL)
```

ENDIF

ELSE

IF (ZBOT(IL) .GE. ZPRO(IP)) GOTO 500

IL = IL + 1

GOTO 333

ENDIF

ENDIF

C

C *****

C

499

```
VPRO = FACRYL * DELT  
GHAPRO = VHARZ(IP) * RHOHA  
GBUND(IP) = GPRO(IP) - GHAPRO  
RHOPRO(IP) = GBUND(IP) / VBUND(IP)
```

VHEIZ = AHEIZ * DZPRO(IP)

GHEIZ = RHOWO * VHEIZ

PMAS1 = GPRO(IP) / DZPRO(IP)

PMAS2 = GBUND(IP) / DZPRO(IP)

PMAS3 = PMAS2 - AHEIZ * RHOWO

RHOPR = GPRO(IP) / VPRO

RHORE = (GBUND(IP) - GHEIZ) / (VBUND(IP) - VHEIZ)

TOTMAS = TOTMAS + GBUND(IP)

IF (11.EQ.2) THEN

WRITE(IOUT,905) ALAY,IL,DELTO,VHARZ(IP),VBUND(IP),BMX(IL),DELT

WRITE(IOUT,912) IP

```
$ , VPRO, VHARZ(IP), VBUND(IP), VHEIZ  
$ , GPRO(IP), GHAPRO, GBUND(IP), GHEIZ  
$ , PMAS1, PMAS2, PMAS3, MHEIZ  
$ , RHOPR, RHOHA, RHOPRO(IP),RHOWO
```

ZMITT = (ZPRO(IP) + PROTOP) * 0.5

C WRITE(10,902) IP,ZMITT ,PMAS1,PMAS2,PMAS3,RHOPRO(IP),RHORE

C WRITE(IOUT,902) IP,ZMITT ,PMAS1,PMAS2,PMAS3,RHOPRO(IP),RHORE

WRITE(10,902) IP,ZPRO(IP),PMAS1,PMAS2,PMAS3,RHOPRO(IP),RHORE

WRITE(10,902) IP,PROTOP ,PMAS1,PMAS2,PMAS3,RHOPRO(IP),RHORE

ENDIF

500 CONTINUE

C

CWH - - - - - OUTPUT AUF PLOT=11 UND DATA=6 FILE ION

C

```

WRITE(10,911) GMAS, TOTMAS
WRITE(10OUT,911) GMAS, TOTMAS

WRITE(10,910)
WRITE(10OUT,910)

C- - - - - GLEITEN DER MESSWERTE
CALL GGLEIT (MIL,BMX,BMF,DELTH,2)
CWH CALL GGLEIT (MIL,FREBUN,BMF,DELTH,2)
C- - - - - RESET FUER SUMMATION

DO 700 I = 1, MIL
  BMX(I) = BMX(I)
  WRITE(10OUT,900) I,ZBOT(I),ZEFF(I),FBU(I)
  & ,FHARZ(I),FREBUN(I),F3(I),BMX(I),BMF(I)
  WRITE(10,900) I,ZBOT(I),ZEFF(I),FBU(I)
  & ,FHARZ(I),FREBUN(I),F3(I),BMX(I),BMF(I)
C   WRITE(10,900) I,ZBOT(I+1)-0.1,ZEFF(I),FBU(I)
C   & ,FHARZ(I),FREBUN(I),F3(I),BMX(I),BMF(I)
700 CONTINUE

CLOSE(1N)
CLOSE(10)

900 FORMAT(' ',13,2F7.3,6E10.3)
901 FORMAT(' ',80('-'),/,A,14,5(F8.4,A),/)
902 FORMAT(' ',13,F8.2,6E11.3)
903 FORMAT(' NR. D_HOEHE M_PROBE M_BUND M_STRUKTUR ',
&' RHO_PRO_LIN RHO_STRU_LIN',/)
905 FORMAT(25X,A,13,F6.3,2E10.3,2F8.3)
906 FORMAT(25X,' TYP DELTH V_HARZ V_BUND M_BUND PHOEHE')
910 FORMAT(' NR ZBOT Z_MITT F_ORIG F_HARZ F_BUND F_GLEIT
& RHOB RHOBF',/)
911 FORMAT(' PROBENMASSE : ',F9.3,
&' KG STRUKTURMASSE : ',F9.3,' KG ')
912 FORMAT(' OPROBE NR.:',13,
1 ' PROBE HARZ STRUKTUR WOLFRAM',
2 /' VOLUMINA : ',4E12.3,' M3'
3 /' MASSEN : ',4F12.3,' KG '
4 /' LIN.D. : ',4F12.3,' KG/M'
5 /' DICHTEN : ',4F12.3,' KG/M3',/)

E N D

```

Programm LESEIN

```
      SUBROUTINE LESEIN (IN, IOUT, IO)
*****
*          PROGRAMM  LESEIN          *
*****
*
* PROGRAMM ZUM AUSWERTEN VON MASSEN- HOEHENDATEN AUS DEM
*
* AUSGIESS-MESSVERFAHREN BEI CORA-VERSUCHEN MIT ERWEITERUNG
*
* DER BERUECKSICHTIGUNG VON MASSENPROFILEN AUS DEM
*
* WIEGEVORGANG DER GESCHNITTENEN BUENDELPROBEN
*
*****
* PARAMETER : BESCHREIBUNG
* -----
* MAX          MAXIMALE ANZAHL DER WERTE
* MPRO         MAXIMALE ANZAHL DER PROBEN
* MSPA        MAXIMALE ANZAHL DER SPACER
* =====
* VARIABLEN :      SIEHE HAUPTPROGRAMM
* =====
* SPRACHE :      FORTRAN 77 MIT OPTIMIERENDEM COMPILER
* AUTHOR  :      WOLFGANG HERING
* DATUM   :      04.04.1989
* LETZTE AENDERUNG :
*****

      PARAMETER (MAX=150,MPRO=20,MSPA=3)

      REAL FACRYL,FBU00,HC,HOEHE1,HOEHE2,MASSE1,MASSE2
      INTEGER MSP, MIL, MIP
      LOGICAL IFLAG /.FALSE./

      COMMON /DTRANS/
&      RHOHA,UMRECH,MSP, MIL, MIP, PI, RHEIZ, AHEIZ, RHOWO, RHORE,
&      ZBOT(MAX),ZEFF(MAX),DELTH(MAX), GMAS,
&      DELTF(MAX),FREBUN(MAX),F3(MAX),FBU(MAX),
&      FHARZ(MAX),VHARZ(MPRO), GHARZ(MPRO),GHAPRO,
&      ZPRO(MPRO), RHOPRO(MAX),GPRO(MPRO),DZPRO(MPRO),
&      VBUND(MPRO),GBUND(MPRO),BMX(MAX),
&      ZBSPA(MSPA),ZTSPA(MSPA),DHSPA(MSPA),DASPA(MSPA)

C----- EINLESEN INITIALISIERUNGSDATEN
      READ(IN,*) NUM
      READ(IN,*) RHOHA,FACRYL,FBU00,HC,NHEIZS
      READ(IN,*) MSP,(ZBSPA(1),DHSPA(1),DASPA(1)),11=1,MSP)
      WRITE(IOUT,901) NUM,RHOHA,FACRYL,FBU00,HC
      WRITE(IO,901) NUM,RHOHA,FACRYL,FBU00,HC

      DO 88 I = 1, MSP
          ZTSPA(I) = ZBSPA(I) + DHSPA(I)
      88
```

```

      WRITE(IOUT,'(A,13,3(A,E11.3),A)') ' SPACER-NR.',I,
&      ' LEVEL: ',ZBSPA(I),'<M> HIGH: ',DHSPA(I),
&      '<M> ADD-AREA: ',DASPA(I),'<M2>'
88 CONTINUE
      AHEIZ = NHEIZS * PI * RHEIZ*RHEIZ

C----- EINLESEN DES ERSTEN WERTES FUER
C      HOEHE(CM) UND VERGUSSMASSE(KG)
      IL = 0
      READ(IN,*) HOEHE1,MASSE1
      WRITE(IOUT,'(14,2F9.3)') IL,HOEHE1,MASSE1
C----- EINLESEN DER MESSWERTE : VOLUMEN
C
      DO 99 IL = 1, MAX
      READ(IN,*) HOEHE2,MASSE2
      IF (HOEHE2 .LT. 0.0 ) GOTO 100
C----- BERECHNEN DES VOLUMENPROFILES
C      (ERGEBNISSE 1)
      DELTH(IL)=(HOEHE2-HOEHE1)
      ZBOT(IL) = HOEHE1 + HC
      ZEFF(IL) =(HOEHE2+HOEHE1)*0.5 + HC

      IF ( MASSE2 .LE. 0.0 .OR. MASSE2 .LE. MASSE1) THEN
      MASSE2= MASSE1 + GHARZ(IL-1)
      GHARZ(IL)= (MASSE2-MASSE1)
      WRITE(IOUT,*) IL, ' KORREKTUR CHARGENWECHSEL ',MASSE1, MASSE2
      MASSE1=0
      ELSE
      GHARZ(IL)= (MASSE2-MASSE1)
      MASSE1= MASSE2
      ENDIF
      FHARZ(IL)= GHARZ(IL)/(RHOHA*DELTH(IL))
      FREBUN(IL)= FACRYL-FHARZ(IL)
      WRITE(IOUT,'(14,5F9.4)') IL,HOEHE1,MASSE1
&      ,ZEFF(IL),DELTH(IL),GHARZ(IL)
      HOEHE1=HOEHE2
99 CONTINUE
100 MIL = IL - 1
C
C----- KORREKTUR FUER SPACERS
C
      ISP = 1
      DO 110 IL = 1, MIL
      FBU(IL) = FBU00
      IF (ISP .LE. MSP) THEN
      IF (ZBOT(IL+1).GE.ZBSPA(ISP) .AND. ZBOT(IL+1).LT.ZTSPA(ISP)) THEN
      FBU(IL) = FBU00 + DASPA(ISP) * (ZBOT(IL+1)-ZBSPA(ISP))/DELTH(IL)
C      WRITE(6,*) ' SPACER BOT ',ISP,IL,FBU(IL)
      ZBSPA(ISP) = ZBOT(IL+1)
      IFLAG = .TRUE.
      ELSE
      IF (ZTSPA(ISP) .GT. ZBOT(IL) .AND. IFLAG) THEN
      FBU(IL) = FBU00 + DASPA(ISP) * (ZTSPA(ISP)-ZBOT(IL))/DELTH(IL)
C      WRITE(6,*) ' SPACER TOP ',ISP,IL,FBU(IL)
      IFLAG = .FALSE.
      ISP = ISP + 1
      ENDIF

```

```

ENDIF
ENDIF
DELTF(IL)= FREBUN(IL)-FBU(IL)

C WRITE (IOUT,'(14,4E12.3)') IL,ZBOT(IL),ZEFF(IL),FBU(IL),FBU00
110 CONTINUE
C
C----- EINLESEN DER MASSENDATEN AUS DEM WIEGEN
C
GMAS = 0.0
DO 310 IP = 1 , MPRO
  READ(IN,*,END=320) I1,ZPRO(IP),GPRO(IP), DZPRO(IP)
  WRITE(IOUT,'(14,3F9.3)') I1,ZPRO(IP),GPRO(IP), DZPRO(IP)
  GMAS = GMAS + GPRO(IP)
310 CONTINUE
320 MIP = IP - 1
RETURN

C----- ENDE -----

901 FORMAT(' AXIALES MASEN UND VOLUMENPROFIL VON TEST CORA -',I3,/,
& ' DICHTe HARZ :',E11.3,' KG/M3 FL. KASTEN :',E11.3,' M2',/,
& ' OXID. QUERFL.:',E11.3,' M2 HOEHENDIFF :',E11.3,' M',/)
END

```

Programm GGLEIT

```

SUBROUTINE GGLEIT ( IANZ,AIN,AOUT,DELT,GFAKT)
*****
*           UNTERPROG  GGLEIT           *
*****
*
* PROGRAMM ZUM KORRIGIEREN VON EINDIMENSIONALEN DATENVEKTOREN *
*
* KANN ALS : GLEITFUKTION GESCHRIEBEN WERDEN : DANN IMOD=0
*           IANZ(OUT) = IANZ(IN)
*           GAUSSFUNKTION, MIT BINOMINALKOEFFIZIENTEN
*
*****
* PARAMETER : BESCHREIBUNG
* =====
* VARIABLEN :
* -----
* AIN          REAL          INPUTVEKTOR
* AOUT         REAL          OUTPUTVEKTOR
* DELT         REAL          INTERVALLBREITE
* IANZ         INT    10     ANZAHL DER INPUT DATEN
* GFAKT        REAL          GLAETTUNGSBREITE
* =====
* SPRACHE :      FORTRAN 77 MIT OPTIMIERENDEM COMPILER
* AUTHOR  :      WOLFGANG HERING
* DATUM   :      04.04.1989
* LETZTE AENDERUNG :
*****
REAL AIN(*), AOUT(*), DELT(*)
INTEGER GFAKT, KOEFF(5)
C
IF (GFAKT .GE. 1 .AND. GFAKT .LT. 4 ) THEN
C----- FILTERKOEFFIZIENTEN
AFAC= 0.0
KOEFF(1)= 1.0
IBINO = INT(GFAKT * 2)
DO 500 II = 1,IBINO + 1.0
KOEFF(II+1)= NOVERK( IBINO, II)
AFAC = AFAC + KOEFF(II)
500 CONTINUE
WRITE(*,*) ' FILTER : ',GFAKT,IBINO,' : ',AFAC
WRITE(*,*) ' KOEFF : ',(KOEFF(II),II=1,IBINO+1)
C----- RANDWERTE
DO 100 II = 1,IBINO
AOUT(II)= AIN(II)
AOUT(IANZ-II+1)= AIN(IANZ-II+1)
C WRITE(*,*) 'OUTPUT ',I,DELT(II),AIN(II),AOUT(II)
100 CONTINUE
C----- FILTERUNG
DO 200 I= GFAKT+1, IANZ-GFAKT
AOUT(I)= 0
DO 300 II= I-GFAKT, I+GFAKT

```

```

        IK= 11-1+GFAKT+1
CWH      WRITE (6,*) 1,11,IK,KOEFF(IK)
        AOUT(1)= AOUT(1) + KOEFF(IK) * AIN(11)/DELT(11)
    300   CONTINUE
        AOUT(1)= AOUT(1) * DELT(1) / AFAC
CWH      WRITE(*,*) 'OUTPUT ' ,1, DELT(1), AIN(1), AOUT(1)
    200   CONTINUE
        ELSE
        DO 400 I=1,IANZ
            AOUT(I) = AIN(I)
    400   CONTINUE
        WRITE(*,*) ' KURVE NICHT GLEITBAR ||||| '
        ENDIF
C
        RETURN
        E N D

```

```

C
C
C -----
C
C

```

FUNCTION NOVERK (N,K)

```

C+-----+
C SPRACHE : FORTRAN 77 MIT OPT. COMPILER
C AUTHOR  : WOLFGANG HERING
C+-----+
C ZWECK   : BERECHNUNG DER BINOMINALKOEFFIZIENTEN FUER
C          GAUSSFILTER
C+-----+
C LETZTE AENDERUNG : 03.08.89
C+-----+

```

IMPLICIT INTEGER (I-M), REAL (A-H , O-Z)

IF (N.GE.1 .OR. K .GE. 1) THEN

```

    ZK = 1.0
    DO 100 IN = 1, K
        ZK = ZK * FLOAT(IN)
100   CONTINUE

```

```

    ZN = 1.0
    DO 200 IK = N, (N-K+1), -1
        ZN = ZN * IK
200   CONTINUE

```

NOVERK = ZN / ZK

```

ELSE
    NOVERK = 0.0

```

ENDIF

```

RETURN
E N D

```

Daten der CORA-Bündel

Die folgenden Listen sind von Programm PREBUN erzeugt. Dieses liefert aufbauend auf den Materialdatenbanken STOFDAT und MATPRO die Referenzdaten für das ungestörte Bündel.

2358 AIT7723 11. 8.1989 =228.TAG 1989 9 UHR58 MIN 58.67 SEC

BUENDELTYP: DRUCKWASSER CORA- 2, CORA- 3

SIMULATOR : 16 SHROUDUMFANG : 0.32400
UNB. BRENNSTAB: 9 SHROUDDICKE : 0.00120
ABSORBERSTAB : 0 ISOLATIONS D. : 0.02000
GESAMTANZAHL : 25

QUERSCHNITTSFLAECHE UND MASSE: <M2> <KG/M>
WOLFRAM : 4.5239E-04 8.7311E+00
UO2-PELLETS : 1.2095E-03 1.2632E+01
ZIRKONHUELLE : 5.7084E-04 3.7504E+00
AG-IN-CD : 0.0000E+00 0.0000E+00
HUELLROHR (SS) : 0.0000E+00 0.0000E+00
GUIDE-TUBE (ZRY) : 0.0000E+00 0.0000E+00
GESAMTE ZRY4- MASSE : 9.5964E-04 6.3048E+00
BUENDEL STABFLAECHE/MASSE: 2.2327E-03 2.5114E+01
SHROUDFLAECHE/MASSE : 3.8880E-04 2.5544E+00
ISOLATIONS-FLAECHE /MASSE: 8.0800E-03 3.8784E+00

<KG/M3> <KG/M3>
DICHTE: STAEBE/STA+SHROUD: 1.1248E+04 1.0554E+04

BUENDELTYP: DRUCKWASSER CORA- 5

SIMULATOR : 16 SHROUDUMFANG : 0.32400
UNB. BRENNSTAB: 8 SHROUDDICKE : 0.00120
ABSORBERSTAB : 1 ISOLATIONS D. : 0.02000
GESAMTANZAHL : 25

QUERSCHNITTSFLAECHE UND MASSE: <M2> <KG/M>
WOLFRAM : 4.5239E-04 8.7311E+00
UO2-PELLETS : 1.1430E-03 1.1938E+01
ZIRKONHUELLE : 5.4800E-04 3.6004E+00
AG-IN-CD : 6.1514E-05 6.2560E-01
HUELLROHR (SS) : 2.0198E-05 1.5755E-01
GUIDE-TUBE (ZRY) : 3.2673E-05 2.1466E-01
GESAMTE ZRY4- MASSE : 9.6947E-04 6.3694E+00
BUENDEL STABFLAECHE/MASSE: 2.2578E-03 2.5267E+01
SHROUDFLAECHE/MASSE : 3.8880E-04 2.5544E+00
ISOLATIONS-FLAECHE /MASSE: 8.0800E-03 3.8784E+00

<KG/M3> <KG/M3>
DICHTE: STAEBE/STA+SHROUD: 1.1191E+04 1.0512E+04

BUENDEL TYP: DRUCKWASSER CORA-12, CORA-15

SIMULATOR : 16 SHROUDUMFANG : 0.32400
UNB. BRENNSTAB: 7 SHROUDDICKE : 0.00120
ABSORBERSTAB : 2 ISOLATIONS D. : 0.02000
GESAMTANZAHL : 25

QUERSCHNITTSFLAECHE UND MASSE:	<M2>	<KG/M>
WOLFRAM	: 4.5239E-04	8.7311E+00
UO2-PELLETS	: 1.0766E-03	1.1244E+01
ZIRKONHUELLE	: 5.2517E-04	3.4504E+00
AG-IN-CD	: 1.2303E-04	1.2512E+00
HUELLROHR (SS)	: 4.0397E-05	3.1510E-01
GUIDE-TUBE (ZRY)	: 6.5345E-05	4.2932E-01
GESAMTE ZRY4- MASSE	: 9.7931E-04	6.4341E+00
BUENDEL STABFLAECHE/MASSE:	2.2829E-03	2.5421E+01
SHROUDFLAECHE/MASSE	: 3.8880E-04	2.5544E+00
ISOLATIONS-FLAECHE /MASSE:	8.0800E-03	3.8784E+00

	<KG/M3>	<KG/M3>
DICHTE: STAEBE/STA+SHROUD:	1.1135E+04	1.0471E+04

BUENDEL TYP: SIEDEWASSER CORA-16, CORA-17

SIMULATOR : 12 SHROUDUMFANG : 0.54400
UNB. BRENNSTAB: 6 SHROUDDICKE : 0.00260
ABSORBERSTAB : 11 ISOLATIONS D. : 0.02000
GESAMTANZAHL : 29

QUERSCHNITTSFLAECHE UND MASSE:	<M2>	<KG/M>
WOLFRAM	: 3.3929E-04	6.5483E+00
UO2-PELLETS	: 8.5727E-04	8.9534E+00
ZIRKONHUELLE	: 4.1100E-04	2.7003E+00
BORONCARBIDE	: 1.8043E-04	4.5108E-01
HUELLROHR (SS)	: 1.0763E-04	1.6757E+00
GUIDE-TUBE (ZRY)	: 0.0000E+00	0.0000E+00
GESAMTE ZRY4- MASSE	: 1.8254E-03	1.1993E+01
BUENDEL STABFLAECHE/MASSE:	1.8956E-03	2.0329E+01
SHROUDFLAECHE/MASSE	: 1.4144E-03	9.2926E+00
ISOLATIONS-FLAECHE /MASSE:	1.2480E-02	5.9904E+00

	<KG/M3>	<KG/M3>
DICHTE: STAEBE/STA+SHROUD:	1.0724E+04	8.9490E+03

BUENDELTYP: DRUCKWASSER CORA-18

SIMULATOR : 32 SHROUDUMFANG : 0.47400
UNB. BRENNSTAB: 20 SHROUDDICKE : 0.00120
ABSORBERSTAB : 5 ISOLATIONS D. : 0.02000
GESAMTANZAHL : 57

QUERSCHNITTSFLAECHE UND MASSE:	<M2>	<KG/M>
WOLFRAM	: 9.0477E-04	1.7462E+01
UO2-PELLETS	: 2.5520E-03	2.6653E+01
ZIRKONHUELLE	: 1.1873E-03	7.8008E+00
AG-IN-CD	: 4.0377E-04	4.1063E+00
HUELLROHR (SS)	: 8.8830E-05	6.9287E-01
GUIDE-TUBE (ZRY)	: 1.6336E-04	1.0733E+00
GESAMTE ZRY4- MASSE	: 1.9195E-03	1.2611E+01
BUENDEL STABFLAECHE/MASSE:	5.3000E-03	5.7788E+01
SHROUDFLAECHE/MASSE	: 5.6880E-04	3.7370E+00
ISOLATIONS-FLAECHE /MASSE:	1.1080E-02	5.3184E+00

	<KG/M3>	<KG/M3>
DICHTE: STAEBE/STA+SHROUD:	1.0903E+04	1.0483E+04

Danksagung

Für die sorgfältige und konstruktive Durchsicht danke ich Herrn Dr. H. Kapulla, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Hauptabteilung Ingenieurtechnik (HIT). Für die Überlassung der CORA-Meßdaten danke ich Herrn Dr. S. Hagen, HIT. Für die Vorbereitung und Durchführung der Messungen danke ich den Herren der Abteilung HVT-BA, insbesondere Herrn Benz, dessen Erfahrung bei der der Weiterentwicklung des Vergussprozesses eine wertvolle Hilfe darstellte.