

Sonderdruck aus:  
Jahrbuch 1985  
der Technischen Universität München

# Die isochore Wärmekapazität am kritischen Punkt unter reduzierter Schwere – ein Experiment zur Ersten Deutschen Spacelab-Mission D1 1985 –

von Klaus Nitsche und Johannes Straub,  
Lehrstuhl A für Thermodynamik

## 0. Übersicht

Als am 30. Oktober 1985 die mittlerweile tragisch verunglückte Raumfähre Challenger zur ersten deutschen Spacelab-Mission D1 erfolgreich startete, befand sich auch ein Hochpräzisionsthermostat (HPT) an Bord, mit dessen Hilfe Messungen am kritischen Punkt durchgeführt wurden. Die Apparatur, entwickelt am Lehrstuhl A für Thermodynamik, raumfahrttauglich gefertigt und elektronisch ausgerüstet von der Firma Kayser Threde in München, erlaubte die Messung der isochoren Wärme Kapazität  $c_v$  von Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) in einem Intervall von  $\pm 0.1$  Grad um die kritische Temperatur. Die Versuche erstreckten sich über die gesamte Missionsdauer von sechs Tagen. Das Experiment wurde von Lehrstuhlangehörigen in der Bodenkrollstation in Oberpfaffenhofen überwacht. Gleichzeitig arbeiteten Mitarbeiter und Studenten an der Entschlüsselung und Auswertung der einlaufenden Funkdaten und dokumentierten quasi in Echtzeit den laufenden Zustand des Experiments. Der dafür eigens vom Lehrstuhl nach Oberpfaffenhofen transportierte Laborrechner mitsamt seiner Peripherie lieferte somit die Entscheidungsgrundlagen, anhand derer das gesamte ursprünglich geplante Experimentierprofil während der Mission abgeändert werden konnte. Ein erster Blick auf die Daten verspricht unerwartete Ergebnisse.

## 1. Einführung

Der kritische Punkt von Flüssigkeit hat an Aktualität seit seiner Entdeckung vor über 100 Jahren nichts eingebüßt. Er entzieht sich nach wie vor einer genauen experimentellen Analyse, da er divergierende Eigenschaften aufweist; so gehen z.B. die Kompressibilität, die Wärmekapazität und andere thermodynamische Größen nach unendlich, während Schallgeschwindigkeit und Temperaturleitfähigkeit gegen Null streben. Diese Singularitäten lassen sich in Messungen nachweisen, fanden jedoch bisher nur unzureichend Eingang in technische Zustandsgleichungen. Dies ist in besonderem Maße unbefriedigend, da die kritischen Zustandsgrößen für viele empirischen Gleichungen als Fixpunkt dienen. Daher wurden gerade in den letzten Jahren große Anstrengungen unternommen, durch Regressionsanalysen die zahlreichen mittlerweile auf Computerebene verfügbaren Meßdaten im kritischen Gebiet in eine auch für die Anwendung geeigneten Form zu komprimieren /z.B. 1/.

Die vorrangige Motivation zu Untersuchungen am kritischen Punkt erwächst jedoch aus dem ausgezeichneten Verhalten des Übergangs zwischen gasförmiger und flüssiger Phase. Das Studium von Phasenübergängen 2. Ordnung verspricht nämlich ein besseres Verständnis des Übergangsverhaltens der Materie ganz allgemein, weist dieses doch universelle Gemeinsamkeiten auf. Demnach läßt sich die spinodale Entmischung binärer Gemische

mit den gleichen Gesetzen beschreiben, die auch für die kritische Magnetisierung in Festkörpern gelten sowie für die Separation in flüssige und gasförmige Phase am kritischen Punkt eines reinen Fluids. Die Bedeutung der kritischen Erscheinungen liegt also in der Allgemeingültigkeit des Verhaltens verschiedener Systeme von unterschiedlicher Mikrostruktur, woraus sich schließlich die Universalitätshypothese entwickelte. Bei Phasenübergängen an kritischen Punkten ändert sich der Ordnungszustand der verschiedenen Systeme in analoger Weise, so daß sich der Begriff der „Ordnung“ zu einer zentralen Größe zur Beschreibung der Eigenschaften der Materie im kritischen Gebiet entwickelt hat. Physikalisch beruht das universelle Verhalten auf Fluktuationen deren Korrelationslänge nahe der kritischen Temperatur stark anwächst und die charakteristischen Längen der Mikrostrukturen übersteigt. Dieser Effekt wird deutlich sichtbar bei der kritischen Phasenseparation eines reinen, transparenten Fluids, wenn die ansteigende Korrelationslänge die Größenordnung der Lichtwellenlänge erreicht und somit zur Eintrübung der ansonsten transparenten Flüssigkeit führt. Diese optische Erscheinung ist als kritische Opaleszenz seit langem bekannt.

Theoretische Studien wie zum Beispiel die Renormierungs Gruppentheorie /2/ verlassen daher auch die Basis der molekularen Einzelwechselwirkungen und ermöglichen unter Annahme der Skaleninvarianz, das heißt unter Annahme von kohärenten Fluktuationen jeder Reichweite, die Berechnung makroskopischen Stoffverhaltens an kritischen Punkten in guter Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen. Die Bedeutung dieser Methode wurde im Herbst 1982 mit der Verleihung des Nobel-Preises durch die Schwedische Akademie der Wissenschaften an K.G. Wilson besonders gewürdigt /3/, /4/. Damit schien das Kapitel der kritischen Phasenübergänge seinen offiziellen Abschluß gefunden zu haben, noch während der 8jährigen Vorbereitungsphase zum D1 Experiment „Wärmekapazität am kritischen Punkt unter reduzierter Schwere“. Verfeinerte Messungen an Fluiden dagegen zeigten in den letzten Jahren immer wieder Abweichungen experimenteller Ergebnisse von den theoretisch ermittelten Werten für die sogenannte kritischen Exponenten, die das singuläre Stoffverhalten charakterisieren. Zudem „leiden“ Experimente am kritischen Punkt reiner Fluide unter dem Einfluß der irdischen Schwerkraft, so daß in der einschlägigen Literatur mehrfach Untersuchungen in reduzierter Schwere, unter sogenannten Mikro-g-Bedingungen ( $\mu$ -g) vorgeschlagen wurden.

Die D1-Mission eröffnete nun zum ersten Mal die Möglichkeit, in einem Langzeitexperiment ohne den massenordnenden Einfluß der Schwerkraft die spezifische Wärmekapazität im kritischen Gebiet zu messen. Von den Daten wird Aufschluß erwartet, inwieweit Extrapolationen von irdischen Messungen auf  $\mu$ -g Bedingungen und theoretische Resultate ihre experimentelle Bestätigung finden.

Die folgenden Abschnitte erläutern kurz die mathematische Fassung der kritischen Phänomene in Fluiden, gehen auf den Einfluß der Schwerkraft ein, der Versuche im Raumlabor rechtfertigt. Weiters wird der operationelle Ablauf der Experimentüberwachung und der Online-Auswertung kurz vorgestellt. Die ersten Ergebnisse aus dieser Vorauswertung erlauben jedoch noch keine endgültige Interpretation, da bis zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Beitrages die für die Endauswertung erforderliche Flugapparatur noch nicht verfügbar war. Es schließt sich ein Ausblick auf die kommende D2-Mission an.

## *2. Kritische Exponenten und $\mu$ -g-Relevanz*

Eine Quantifizierung kritischer Phänomene ermöglichen die sogenannten Potenzgesetze, die das makroskopische Zustandsverlaufhalten im kritischen Gebiet längs definierter

thermodynamischer Pfade beschreiben. Entsprechend Abb. 1 wird bei Temperaturen unterhalb der kritischen die Dichtedifferenz längs der Koexistenzkurve zwischen flüssiger und gasförmiger Phase durch den Exponenten  $\beta$  gekennzeichnet

$$\rho_f - \rho_g \sim (T - T_c)^\beta \quad (1)$$

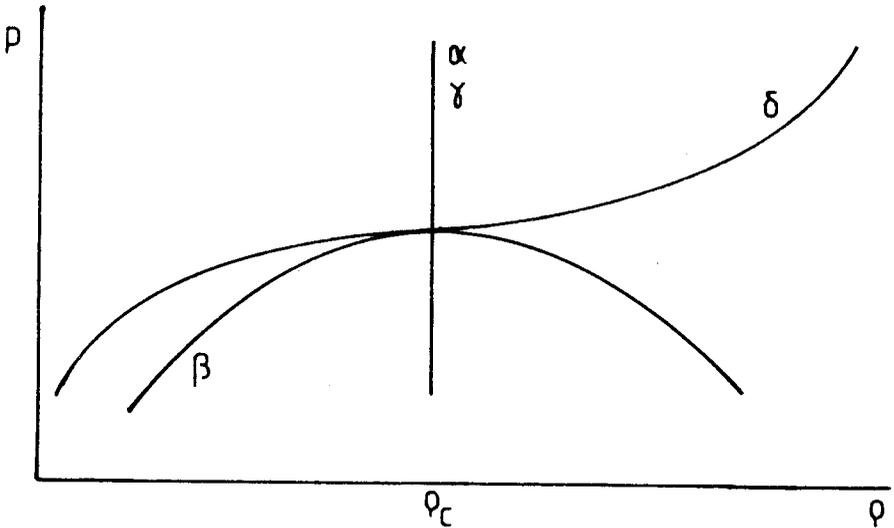


Abb. 1: Definition der kritischen Exponenten für ein reines Fluid.

Da die Dichtedifferenz  $\rho - \rho_c$  als Maß für den Ordnungszustand des Systems angesehen werden kann, beschreibt dieser Ansatz allgemein den Verlauf des Ordnungsparameters

$$\phi \sim (T_c - T)^\beta \quad (2)$$

Mit dem Exponenten  $\gamma$  wird die Kompressibilität beschrieben

$$\chi_T \sim |T_c - T|^{-\gamma} \quad (3)$$

Der Exponent  $\delta$  gibt den Verlauf der kritischen Isotherme wieder

$$p_c - p \sim |\rho - \rho_c|^\delta \quad (4)$$

Die Universalität kritischer Phänomene wird auf die Fluktuationen des Ordnungsparameters zurückgeführt, die bei den verschiedenen Systemen von gleicher Größenordnung sind und deren Größe die Korrelationslänge

$$\xi \sim |T_c - T|^{-\nu} \quad (5)$$

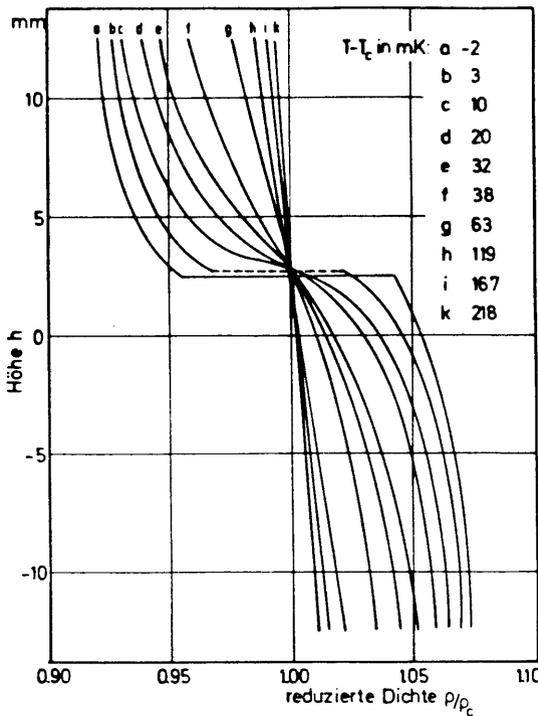
beschreibt. Für theoretische Studien ist der Verlauf der isochoren Wärmekapazität  $c_v$  von besonderem Interesse. Er ergibt sich zu

$$c_v = A \left| \frac{T-T_c}{T_c} \right|^{-\alpha} + B \quad (6)$$

Die numerischen Werte der Exponenten und Parameter in den Potenzansätzen lassen sich sowohl theoretisch z. B. nach der Renormierungsgruppe berechnen als auch experimentell bestimmen. Leider kann man in fluiden Systemen – wegen ihrer Transparenz auch durch optische Methoden vielfach untersucht – Messungen auf der Erde nicht beliebig nahe an den kritischen Punkt heranzuführen. Denn aufgrund der divergierenden Kompressibilität

$$\chi_T = -1/\rho \cdot (\partial \rho / \partial p)_T = \Gamma \cdot (T_c - T)^{-\gamma} \longrightarrow \infty \quad (7)$$

treten sogenannte Dichteschichtungen auf, bis schließlich unterhalb der kritischen Temperatur flüssige und gasförmige Phase separieren. Abb. 2 zeigt die gemessenen Dichteschichtungen in  $N_2O$  für verschiedene Temperaturen.



Dichteschichtungen an  $N_2O$

Abb. 2: Gemessene Dichteschichtung in  $N_2O$  für verschiedene Temperaturen nahe am kritischen Punkt /7/ (Straub, J.), a:  $T-T_c = -2$  mK, k:  $T-T_c = 218$  mK.

Da thermodynamische Größen nur für homogene Systeme definiert sind, können makroskopische Messungen beim Auftreten von Dichteschichtungen nicht zugeordnet werden. Dies tritt besonders bei Messungen der Wärmekapazität in Erscheinung, vergl. z.B. /5/. Unter Schwerkraftbedingungen (1-g) kann nur ein „irgendwie„ geartetes Mittel über eine räumliche Sequenz von Zuständen gemessen werden, d.h. je nach Höhe der Meßzelle erhält man unterschiedliche Ergebnisse.

Daher reduziert man bei irdischen Messungen die hydrostatische Zellenhöhe, um den von der divergierenden Kompressibilität verursachten Fehler zu minimieren. Die üblichen konstruktiven Lösungen führen auf eine münzenförmige Laborzelle mit geringer hydrostatischer Höhe und großem Innenquerschnitt, die somit ein günstiges Verhältnis zwischen Schichtdicke im kritischen Zustand und Gesamtvolumen aufweist. Es ist jedoch in der einschlägigen Literatur allgemein anerkannt, daß sich die Zellenhöhe nicht beliebig reduzieren läßt und deshalb  $\mu$ -g-Messungen anzustreben sind. Auch wird dadurch eine Verstärkung des singulären Verhaltens von Zustandsgrößen und Stoffwerten am kritischen Punkt erwartet.

Abb. 3 zeigt den Einfluß der Schwerkraft durch Variation der Winkellage der Kalorimetermeßzelle während einer Voruntersuchung zur D1-Mission. Die Heizleistung  $P_0$  ist proportional der spezifischen Wärmekapazität  $c_v$ . In  $\mu$ -g-Umgebung wird eine weitere Erhöhung der Peaks erwartet, was auf der Erde einer weiteren Reduzierung der hydrostatischen Höhe entspräche. Der Schwerkrafteinfluß auf irdische Messungen wird in der Literatur ausführlich diskutiert, z.B. in /6/.

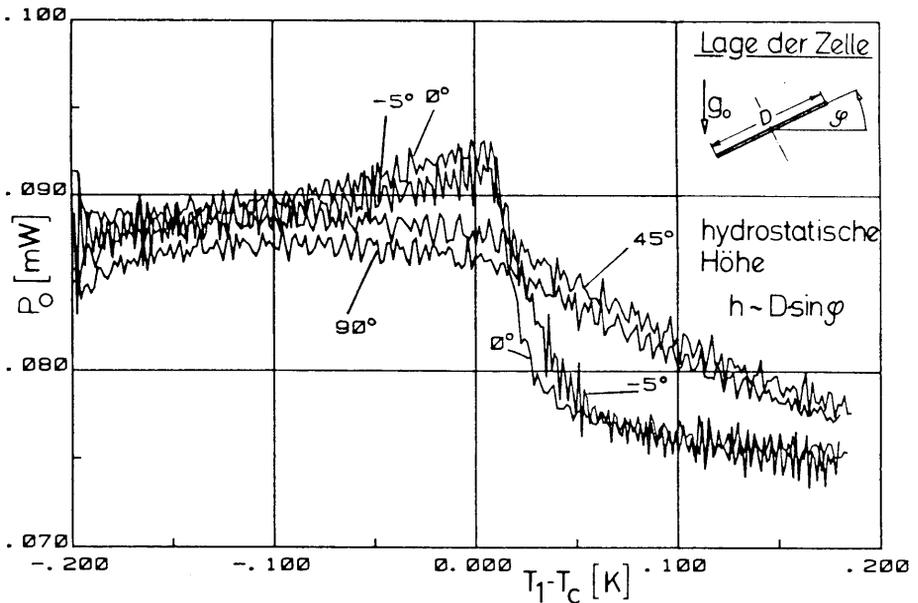


Abb. 3: Als elektrische Heizleistung  $P_0$  skalierte Wärmekapazität  $c_v$  für verschiedene Winkellagen  $\varphi$  und somit für verschiedene hydrostatische Höhen im irdischen Schwerfeld.

### 3. Meßprinzip und Apparatur

Für die Wahl des Meßprinzips waren in Hinblick auf den späteren Weltraumeinsatz folgende Anforderungen besonders ausschlaggebend:

- das Experiment soll leicht automatisierbar sein,
- in 6 Tagen Experimentierzeit (beschränkt durch die Missionsdauer) soll ein Maximum an Meßinformation gewonnen werden.

Die Anforderungen führen zwangsläufig zum Einsatz eines kontinuierlichen Verfahrens, das in der englisch-sprachigen Literatur als „Scanning-Ratio-Calorimetry“ bezeichnet wird. Dieser Name erklärt sich aus dem Meßprinzip, das in kontinuierlicher Weise die für das Aufheizen einer Meßprobe benötigte Leistung erfaßt („scanning“) und in Relation zu einer Referenz „ratio“ setzt.

Fertig ausgeführt besteht das Kalorimeter aus drei konzentrisch ineinander aufgehängten Zylindern die, auf gleicher Temperatur gehalten, die Zelle im Zentrum von der Umgebung nahezu adiabatisch abkoppeln. Der mechanische Aufbau des Vierstufenkalorimeters ist in Abb. 4 ein Querschnitt der Meßzelle in Abb. 5 dargestellt.

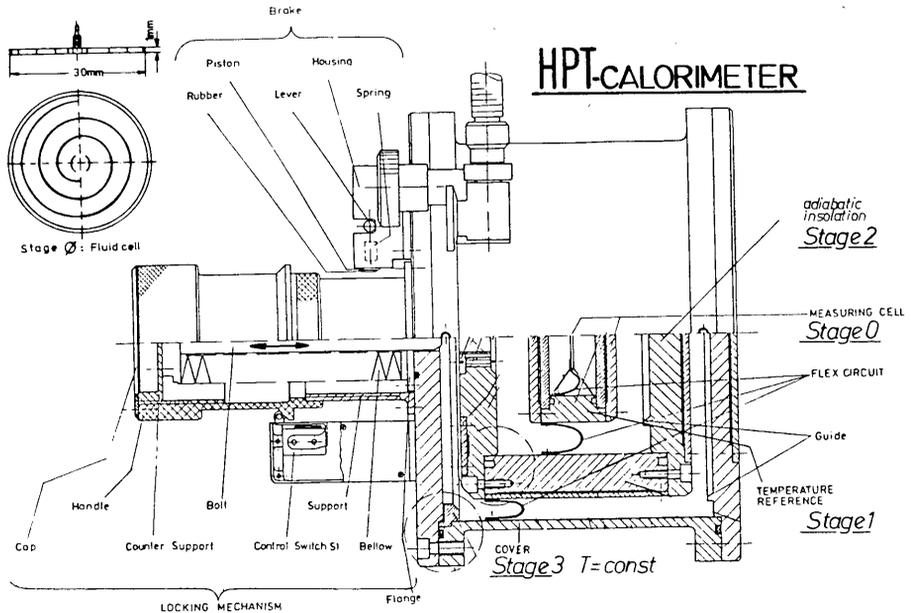


Abb. 4: Aufbau des vierstufigen Flugkalorimeters.

Abb. 5: Schnitt durch Meßzelle (links oben).

Eine Energiebilanz für die Meßstelle (Kalorimeterstufe 0) und die umschließende Stufe 1 liefert, Temperaturlgleichgewicht vorausgesetzt, die etwas vereinfachte Beziehung

$$C_0 = C_{\text{Metall}} + m_{\text{Fluid}} \cdot c_{v,\text{Fluid}}(T) = C_1 \cdot P_0(T) / P_1$$

für die Gesamtkapazität  $C_0$  der Stufe 0, bestehend aus Metallgehäuse und Füllmasse.  $C_0$  ist proportional der Kapazität von Stufe 1 und dem Verhältnis der elektrisch gemessenen Heizleistungen  $P_0$  und  $P_1$ . Die zugeführten Heizleistungen liegen im Mikrowattbereich

und sind so minimal, daß Heizraten von 3.6 mK/h realisiert werden können, was einer Temperaturerhöhung von 1K in 11,6 Tagen entspricht. Die elektronische Regelung thermostatiert die Kalorimeterstufe auf  $10^{-5}$ K und führt die etwa 5-Markstück-große Meßstelle zyklisch innerhalb eines Temperaturintervalls von 200 mK durch den kritischen Punkt ( $T_c = 45,58^\circ\text{C}$ ). Das Kalorimeter zusammen mit der empfindlichen Meß- und Regelelektronik fand Platz im sogenannten Hochpräzisions-Thermostaten (HPT), der im Spacelab das obere Drittel eines 19-Zoll-Racks einnahm, während der Laborprototyp, der bereits vor 6 Jahren entwickelt worden war, zusammen mit der Meßeinrichtung noch den Raum eines halben Labors beanspruchte. Im Flugmodell wurden die Meßdaten, auf die sich die wissenschaftliche Auswertung stützt, wie Temperatur, Strom und Spannungen als 12 Bit-Information kodiert, während die sogenannten Haushaltswerte mit 8 Bit in einem Gesamtrahmen Platz fanden. Mit einer Frequenz von 128 Byte/0.6 sec. bzw. von 54 Meßwerten/0.6 sec trafen sechs Tage lang kontinuierlich die Daten aus dem Raumlabor via USA und Satellitenkommunikation in Oberpfaffenhofen ein.

#### *4. Bodenüberwachung und Vorauswertung in nahezu Echtzeit*

Wenn an dieser Stelle der operationelle Ablauf geschildert wird, dann mit der Berechtigung, daß der von den Experimentatoren für die Betreuung erbrachte Zeitaufwand in der Endphase nach dem Bau der Flugkalorimeters den ursprünglich gesteckten Rahmen überstieg. Anfangs ging man nämlich von einem Konzept aus, das den Experimentatoren nach dem Einbringen ihrer Idee und Ausführung der Ig-Referenzuntersuchungen ohne große organisatorische Eigenbeteiligung die  $\mu\text{g}$ -Daten für die Auswertung nach der Mission liefern sollte. Denn das technische Detailwissen über die hochkomplizierte, raumtaugliche Elektronik der Apparaturen liegt bei ganzen Entwicklungs-Teams in der Industrie und kann von einem Hochschulinstitut mit ganz anderer Zielrichtung nicht erbracht werden. Ebenso im organisatorischen Bereich beschäftigten z.B. kurzfristige Änderungen des bereits Jahre im voraus geplanten Experimentierablaufs eigene Zeitplaningenieure und Groß-Computer. Daher stand in Oberpfaffenhofen eine perfekte Organisation bereit, die den Missionsablauf sowie die Datenverwaltung leitete. In dem dort gebräuchlichen Sprachjargon („Tschörmisch“), einer Mischung aus Flugenglisch und Deutsch, arbeiteten sämtliche D1-Experimentatoren mit den zuständigen Stellen der Missionsleitung zusammen. Crew Interface Coordinator, Crew Operations Support Engineer, Payload Activity Programmer, Payload Data Coordinator, um nur einige zu nennen.

Die Absicht der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR), die Leitung des Nutzlastprogrammes einer überwiegend deutschen Mission innerhalb Deutschlands zu etablieren, erforderte die Gewöhnung an amerikanische, in der Raumfahrt bereits bewährte Organisationsstrukturen. Damit Führungspersonal und Experimentatoren die Zusammenarbeit trainieren konnten, führte die DFVLR in Oberpfaffenhofen zahlreiche Simulationen durch, in denen Zeitfenster der D1-Mission von bis zu 48 Stunden durchgespielt wurden. Die Astronauten bedienten dazu die äußerlich nahezu identischen Apparaturattrappen, die in einem 1 : 1 Spacelabmodell im Flugsimulator in Köln aufgebaut waren. Die „Physik“ der Experimente simulierten Computerprogramme, die ferner die Daten wie z.B. Temperaturen, Fernsehbilder etc. in die Bodenstation nach Oberpfaffenhofen sandten. Dort übten Flugleitung und Experimentatoren den Missionsablauf. Ausfüllen von Formularen, Sprechfunkkontakt zu den Astronauten, Flugplanänderungen, Bedienen der Überwachungsterminals und Einordnung in die Gesamtorganisation

erforderten viel Geduld und Zeit. Ein weiterer Unterschied zur Vorbereitungszeit im Labor besteht im umfangreichen Dokumentationswesen. Geringe Änderungen an einer Appatur oder im Zeitplan mußten sofort schriftlich niedergelegt und aus Kompatibilitätsgründen an alle möglicherweise Betroffene verschickt werden. Die für das HPT-Experiment relevanten Dokumente zusammen mit den allgemeinen Missionsumdruck wuchsen denn auch zu einer stattlichen Ordnerlänge von nahezu drei Metern heran.

Eine Sonderstellung unter den fluid- und materialwissenschaftlichen Versuchen nahm das HPT-Experiment zur Messung der Wärmekapazität ein. Während für die meisten Experimentatoren Erfolg oder Fehlschlag erst nach Aushändigung der prozessierten Metallproben feststand, konnte der Fortgang der HPT-Langzeitversuche bereits während der Mission nicht nur überwacht sondern bereits wissenschaftlich vorausgewertet werden. Aus den nach Oberpfaffenhofen übertragenen Meßdaten, ließ sich der Verlauf der isochoren Wärmekapazität qualitativ berechnen und somit der Erfolg des Versuchs beurteilen.

Diese im ursprünglichen Konzept nicht vorgesehene Online-Vorauswertung wurde kurzfristig ins Bodenbegleitprogramm mitaufgenommen. Die Experimentatoren schafften dazu ihren HP-1000 Labor-Computer mitsamt Peripherie nach Oberpfaffenhofen, erstellten die Datenkodier-Software sowie die Programme zur Online-Auswertung nach thermodynamischen Gesichtspunkten. Der Rechner verarbeitete Inputdaten mit einer Rate von 86 kBit/sec, ordnete die zeitlich nicht immer sequentiell eintreffenden Meßrahmenblöcke in eine Datenbank ein. Insgesamt wurde der komplette Missionsablauf des HPT-Experiments auf 144288 Rahmen mit je 70 Werten abgespeichert, was einer zeitlichen Diskretisierung von 6 Sekunden entspricht.

Zwölf Mitarbeiter bzw. Studenten betreuten ständig das HPT-Experiment während der Mission in 13-Stunden-Schichten. Die mit der Auswertung betraute Gruppe ordnete die während des Funkschattens aufgezeichneten und erst später übertragenen Playback-Daten zeitrichtig in den Echtzeitdatenstrom ein und erstellte die anfangs noch lückenhaften, später immer vollständiger werdenden Diagramme der Wärmekapazität über der Zeit bzw. der Prozeßtemperatur. Anhand dieser Vorauswertung war es möglich, den durch Anfangsspannen in Verzug geratenen HPT-Zeitplan nach fundierten Ergebnissen innerhalb kürzester Zeit völlig neu zu gestalten. Aus einer Notlage heraus entwickelten sich nahezu ideale Experimentierbedingungen: die Ergebnisse des letzten Versuchslaufes bestimmen die Parameter des nächsten. Trotz einiger Pannen und 48 Stunden Zeitverzugs konnte schließlich das geplante Programm zu 95 Prozent verwirklicht werden.

Die Frage, wie weit man sich als Experimentator in operationelle und administrative Aufgaben einbinden lassen soll unter gleichzeitiger Zurückstellung wissenschaftlicher Labortätigkeit, verliert an Bedeutung, betrachtet man die achtjährige Vorbereitungszeit, den bisherigen finanziellen Aufwand und nicht zuletzt die „wissenschaftliche Neugier“, das bisherige Laborexperiment erstmals unter  $\mu$ -g-Bedingungen durchführen zu können. Die Endauswertung wird schließlich zeigen, inwieweit bisherige Prognosen, Schwerkraftkorrekturen, theoretische Extrapolationen für den Verlauf der Wärmekapazität am kritischen Punkt mit experimentellen Resultaten übereinstimmen.

### *5. Vorläufige Ergebnisse*

Das D1-Experiment „Wärmekapazität“ wurde mit einer Datenaufzeichnungseinheit ausgestattet, die hohe Datenraten erlaubt. Rund 130000 Meßpunkte im langsamsten Heizlauf garantieren eine ausreichende Datendichte für statistische Analysen und quantitative

Berechnungen. Dazu sind jedoch die in Gleichung (7) vernachlässigten Fehlereinflüsse zu berücksichtigen. Die dissipierte Leistung in den Temperatursensoren und vor allem Restwärmeströme, die sich aus endlichen Temperaturdifferenzen zwischen den Kalorimeterstufen ergeben, sind der gemessenen Heizleistung überlagert und müssen durch Eichmessungen nachträglich bestimmt werden. Für diese Messungen, die einen Teil der Post-Mission-Datenauswertung darstellen, wird die Flugapparatur benötigt. Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Februar 1986) weder der Flug-HPT zur Verfügung steht, noch die endgültigen Missionsdaten aus Oberpfaffenhofen vorliegen, beschränkt sich das hier präsentierte Ergebnis lediglich auf die Vorauswertung während der Mission. Abb. 6 zeigt ein während des Flugs aufgezeichnetes Profil von  $c_v$  im kritischen Gebiet unter reduzierter Schwere. Der zugehörige Heizgradient beträgt 100mK/h.

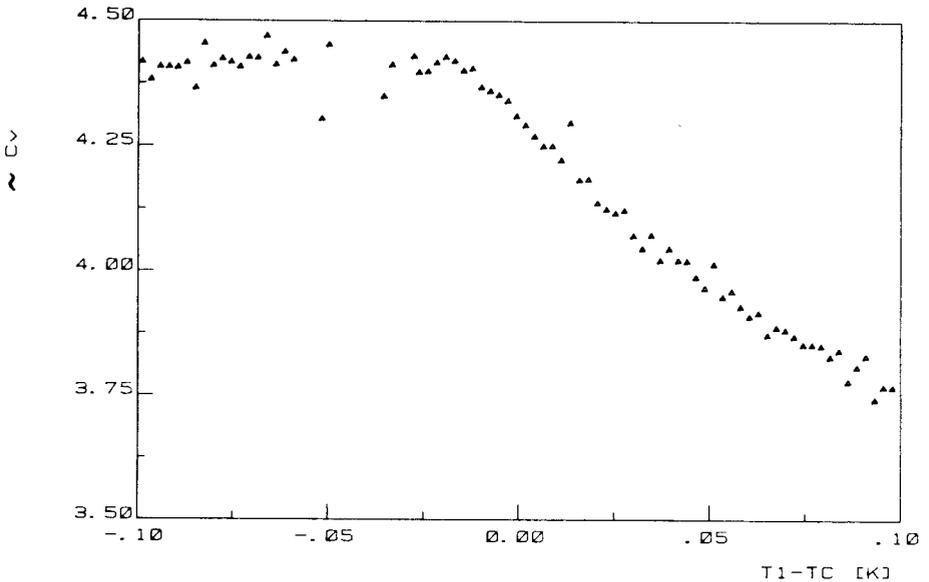


Abb. 6: Charakteristik von  $c_v$  im kritischen Gebiet unter  $\mu$ -g-Bedingungen,  $dT/dt = 100 \text{ mK/h}$ .

Wider Erwarten erschien anstatt der vielfach vorhergesagten „scharfen“ Erhöhung der kritischen Singularität von  $c_v$  ein überraschend abgerundeter Anstieg und Abfall, der sich in weiteren Heizläufen bestätigte. Eine Interpretation dieses unerwarteten Resultats unterbleibt hier, da diese durch eine quantitative Datenanalyse noch nicht abgesichert werden kann. Zumindest der Einwand, es handle sich um einen Phasenübergang erster Ordnung, den ein Massenverlust der Zellenfüllung verursacht haben könnte, kann ausgeräumt werden, da selbst in diesem Fall ein Sprung im  $c_v$ -Verlauf auftreten müsste.

#### 6. Vorbereitung zukünftiger Spacelab-Experimente für kritische Phänomene

Der tragische Unfall der Raumfähre Challenger überschattet die Vorbereitungen weiterer Experimente aus dem Bereich kritische Phänomene und Phasenseparation reiner Fluide. In

Vorbereitung stehen optische Untersuchungen zur Phänomenologie des Trennungsvorganges von flüssiger und gasförmiger Phase während des Abkühlens durch den kritischen Punkt. Weiters sind Wärmekapazitätsmessungen im modifizierten D1-HPT-Thermostaten vorgesehen, um Hysteresereischeinungen, Homogenisierungseffekte bei unterschiedlichen Heiz- und Kühlraten der Fluidprobe von dem ordnenden Einfluß der Schwerkraft zu isolieren.

Gerade jetzt in der Vorbereitungszeit drängt sich die Frage auf nach dem Sinn der Verwirklichung eines Experiments in einem bemannten Raumlabor mit den bekannten Problemen wie: lange Vorbereitungszeit, hoher Finanzmitteleinsatz und offensichtlich ein nicht auszuschließendes Restrisiko eines Unglücks. Für die beiden erwähnten D2-Projekte scheidet jedoch die Alternative, nämlich die Realsierung auf einer vollautomatisierten und ins All ausgesetzten Experimentierplattform aus. Denn die optischen Experimente erfordern zum einen die unmittelbare Reaktion des Experimentators, in diesem Fall eines besonders ausgebildeten Astronauten, auf die sich ändernde Erscheinung des Phasenseparation unter verschiedenen Heiz- und Kühlraten. Mit anderen Worten, der Erfolg bzw. die Zielrichtung des Experiments wird teilweise der unmittelbaren Entscheidung des Wissenschaftlers im All überlassen bleiben. Eine Aufgabe für die Roboter nicht geeignet sind. Weiters zeigen die Erfahrungen aus der D1-Mission gerade für das HPT-Experiment, daß trotz intensiver Vorbereitung auf alle hypothetischen Fehler, diese oft in ganz anderer Form auftreten. So glichen beispielsweise die Astronauten die Lock-in-Verstärker am D1-HPT neu ab. Eine *manuelle* Prozedur von fünf Minuten, ohne die acht Jahre Vorbereitung ergebnislos investiert worden wären!

#### Literatur:

- 1) Sengers, J.V.: „Transport properties of fluids near critical points“, Intn. Journ. of Thermophysics, Vol. 6, No.3, May 1985.
- 2) Lipowski, R.: „Die Renormierung in der statistischen Physik“, Phys. Bl. 39, S.387, 1983.
- 3) Anderson, P.W.: „The 1982 Nobel Prize in Physics, Science 218, 763– 764, 1982.
- 4) Nordling, C.: „Nobelpreis 1982. Kritische Phänomene“, Phys. Bl.38, 352– 354, 1982.
- 5) Lange, R.: „Die Anomalie der isochoren Wärmekapazität im kritischen Gebiet von Schwefelhexafluorid“, Diss. TU-München, 1983.
- 6) Hohenberg, P.C., Barmatz, M.: „Gravity effects near the gas-liquid critical point“, Phys. Rev. A, Vol.6, No.1, P 289, 1982.
- 7) Straub, J.: „Kritische Phänomene in Fluiden“, Habilitationsschrift, TU-München, 1977.