

# Experimentelle Untersuchung des Wärmeübergangs und seiner Transportmechanismen bei Siedevorgängen unter reduzierter Schwerkraft

von Martin Zell und Johannes Straub, Lehrstuhl A für Thermodynamik

Die experimentelle Untersuchung von Siedevorgängen unter Schwerelosigkeit stellt neben der Erforschung kritischer Phänomene von Fluiden im Rahmen der ersten deutschen Spacelab-Mission D1 ein weiteres „schwereloses“ Forschungsgebiet dar, das durch gezielte Experimente unter Ausschaltung der Gravitation Einblicke in die unter Erdbedingungen überaus komplexe Struktur des zweiphasigen Wärmeübergangs beim Sieden verschafft. Im Rahmen des Parabellflugprogrammes der NASA sowie bei ballistischen Raketenflügen (TEXUS) wurden die Auswirkungen fehlender bzw. erhöhter Schwerkraft auf den Wärmeübergang und das Verhalten der dampfförmigen Phase bei Siedevorgängen untersucht. Durch physikalische Entkoppelung der gravitationsabhängigen Wärmetransportmechanismen (Konvektion, Blasenauftrieb) unter Schwerelosigkeit kann die experimentelle Untersuchung des Siedevorgangs auf den Wärmeübergang durch Phasenänderung flüssig-dampfförmig konzentriert werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse führen zu einem verbesserten Verständnis des komplexen Siedevorgangs auch für Erdbedingungen, gleichfalls können sie direkt zur Auslegung von Wärmetauschern in Raumstationen herangezogen werden.

## *Siedevorgänge im Wandel der Zeit*

Die alltägliche Erscheinung des Siedens, die jedermann aus der häuslichen Umgebung wohlbekannt ist, spielt heute auf dem Gebiet der Wärmeübertragung in der Energietechnik eine überragende Rolle. Aber so vertraut und einfach uns dieser Vorgang auch erscheinen mag, so ist er doch bis heute nicht vollkommen verstanden.

Mit der Erfindung der Dampfmaschine durch James Watt im Jahre 1765 gelangte der von jeher altvertraute Siedeprozess, bei dem Flüssigkeit durch Energiezufuhr in Dampf übergeht, zu herausragender technischer Bedeutung:

In Kraftwerken wird der in öl-/kohle-befeuerten Kesseln erzeugte überhitzte Dampf mit möglichst hoher Temperatur und Druck den Turbinen oder anderen Arbeitsmaschinen zugeführt. In den auch im Hausgebrauch weitverbreiteten Kompressor-Kälteaggregaten nutzt man den Verdampfungsvorgang, um der Umgebung Wärme zu entziehen. Ferner sind eine ganze Reihe technischer Verfahren wie z. B. Destillation oder Meerwasserentsalzung ohne den Siedeprozess undenkbar. In jüngster Zeit tritt vor allem die sichere Übertragung maximaler Wärmestromdichten sowohl für Heiz- als auch für Kühlzwecke stark in den Vordergrund.

Eine nähere Betrachtung des Siedevorgangs vermag seine auf den ersten Blick fragwürdige Eignung für Kühlzwecke eindeutig zu erklären:

Die Definition einer siedenden Flüssigkeit beinhaltet die Bildung von Dampfblasen. Hierzu ist notwendig, daß an Heizflächen die Siedetemperatur für den jeweiligen Systemzustand der Flüssigkeit überschritten wird und somit an den Keimstellen Verdampfung

mittels Blasenbildung auftritt. Der zur Verdampfung notwendige Entzug von Energie aus der überhitzten, d.h. über Siedetemperatur erwärmten, Flüssigkeitsschicht an der Heizfläche charakterisiert diesen Vorgang als energieintensiven Verbraucher. Die herausragende technische Bedeutung gewinnt der Siedeprozess durch weitgehende Stabilität der Wandtemperatur bei Änderungen des zu übertragenden Wärmestroms in Form einer Intensitätsanpassung des Verdampfungsvorgangs.

*Stand der Wissenschaft*

Obwohl die technische Nutzung des Siedeprozesses in vollem Gange ist, konnten die komplexen fluid- und thermodynamischen Zusammenhänge bis heute noch nicht vollständig geklärt werden. Die bestehenden Siedemodellgleichungen geben ein sehr widersprüchliches Bild über den Einfluß der verschiedenen Systemparameter auf den Wärmeübergang beim Blasensieden. Die Ursache hierfür liegt in der großen Anzahl der Systemparameter, die das Sieden zu einem äußerst komplexen Vorgang machen:

Während sich Wärmeaustausch ohne Phasenänderung (wie Wärmeleitung, Konvektion) durch Stoffeigenschaften wie Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, thermischer Ausdehnungskoeffizient und durch die Systemgeometrie beschreiben läßt, gehen beim Sieden durch die gleichzeitige Phasenänderung (Verdampfungs-/Kondensationsvorgang) sowie die durch die Blasendynamik gekoppelten hydrodynamischen Vorgänge noch weitere Variable wie Verdampfungswärme, Sättigungstemperatur der Flüssigkeit, Dichte und Dichtedifferenz der Phasen, Oberflächenspannung der Flüssigkeit sowie Keimdichte, Entstehungsfrequenz, Anzahl und Größe der Dampfblasen ein.

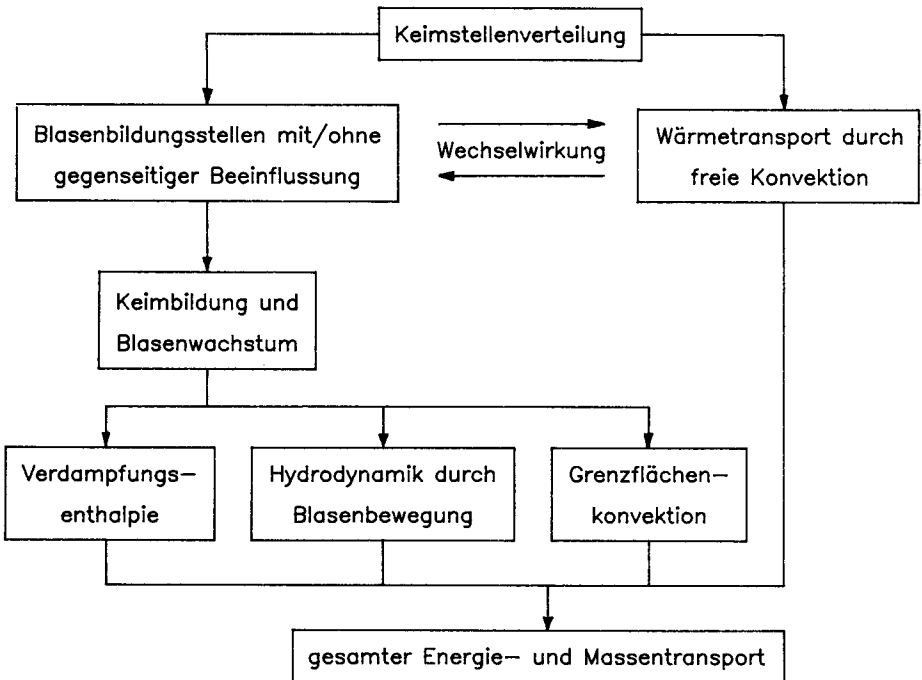


Abb. 1: Aufteilung der Wärmeübergangsgebiete und -mechanismen im Bereich des Blasensiedens.

Im Blasensiedebereich an der Heizfläche sind zwei Gebiete mit völlig verschiedenen Wärmeübertragungsmechanismen zu unterscheiden:

- Die für die Dampfblasenentstehung verantwortlichen Keimstellen (Rauigkeiten bzw. Poren der Heizoberfläche) einschließlich ihrer vom Blasenwachstumsprozeß beeinflussten Umgebung
- Die dazwischen liegenden Heizflächenanteile mit freier Konvektion

Diese Aufteilung beinhaltet jedoch keineswegs eine scharfe Abgrenzung gegeneinander, vielmehr ist in Abhängigkeit von der dichtevertelung aktivierter Keimstellen eine mehr oder weniger ausgeprägte Wechselwirkung zwischen beiden Gebieten vorhanden (Abb. 1).

Damit wird deutlich, daß in den Bereichen mit Blasenbildung eine komplexe Vielzahl von schwer trennbaren thermo- und fluiddynamischen Vorgängen abläuft. Abb. 2 gibt eine Analyse in Form einer Kräftebilanz der relevanten Mechanismen an einer wachsenden Dampfblase.

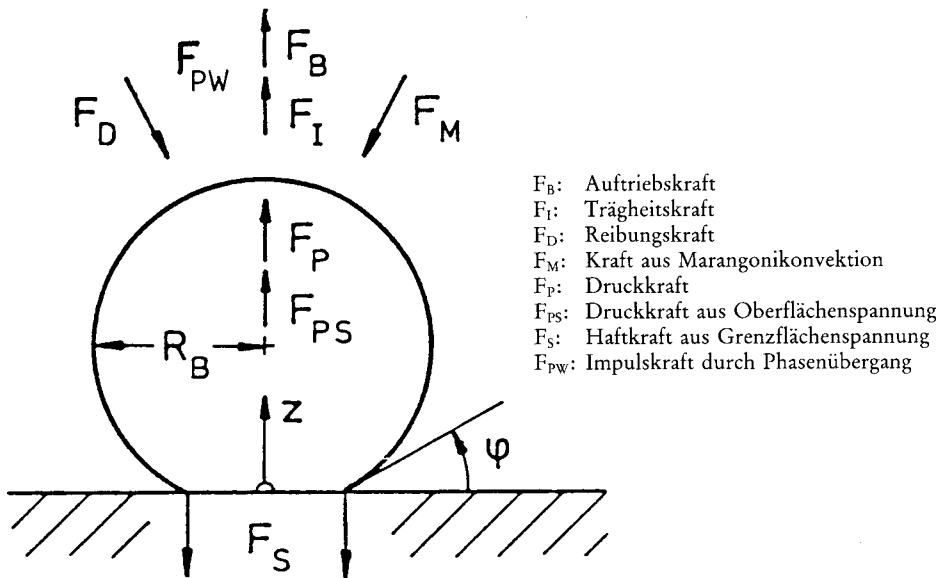


Abb. 2: Kräftebilanz an einer Dampfblase.

Die Summe aller Kräfte  $\Sigma F_i$  während der Blasenwachstumsphase bestimmt damit den Abreißzeitpunkt der Blasen. Der Abreißvorgang der Blasen von der Heizfläche ist von besonderer Wichtigkeit, da er einen Blasenzyklus zeitlich in zwei Bereiche mit physikalisch völlig andersartigen Prozessen unterteilt. Interferometrische Beobachtungen an wachsenden Dampfblasen zeigen, daß die überhitzte Flüssigkeit aus der Umgebung der Keimzelle von der abreisenden Dampfblase als Driftströmung mitgerissen wird und damit einen signifikanten Beitrag zum Gesamtwärmeübergang zu leisten vermag (Abb. 3).

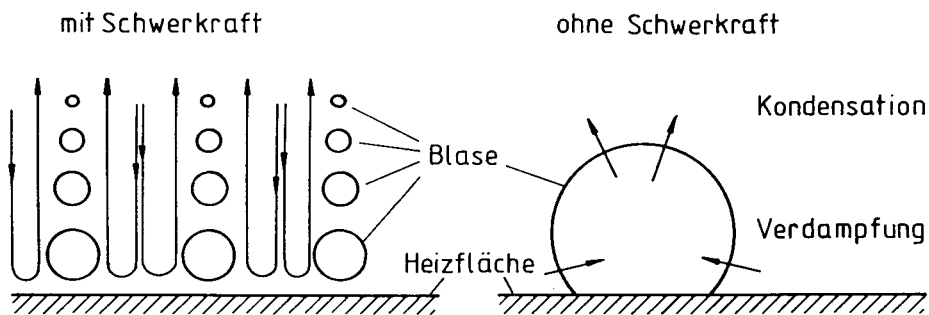


Abb. 3: Blasenverhalten in Abhängigkeit der Systembeschleunigung.

Der Gesamtwärmeübergang beim Behältersieden kann somit als die Summe folgender Terme definiert werden:

$$\dot{q}_{\text{total}} = \dot{q}_{\text{Dampf}} + \dot{q}_{\text{Driftströmung}} + \dot{q}_{\text{Konvektion}}$$

Dabei stellt sich nun die entscheidende Frage:

- Ist die überragende thermische Stabilität im Bereich des Blasensiedens und die damit verbundene Übertragbarkeit maximaler Wärmestromdichten an Konvektion und Latentwärmetransport durch auftriebsbedingt abreißende Dampfblasen gebunden?

In diesem Fall würde dem Parameter „Systembeschleunigung“ die entscheidende Rolle beim zweiphasigen Wärmeübergang ohne erzwungene Konvektion zukommen (Behältersieden, Pool Boiling). Die in der Literatur existierenden Siedemodellgesetze geben bezüglich der Abhängigkeit des Wärmeübergangs von der Systembeschleunigung bei Siedeprozessen ein sehr widersprüchliches Bild.

Die weiterführende Klärung dieser Fragestellung kann daher nur durch experimentelle Untersuchung des Siedevorgangs und seiner Transportmechanismen unter gegenüber Erdbedingungen stark reduzierter Schwerkraft ( $a/g \approx 0$ ) gelöst werden, da die bisher vorliegenden Messungen größtenteils bei Zentrifugenexperimenten durchgeführt wurden und die Modellgleichungen für Beschleunigungen  $a/g < 1$  extrapoliert werden müssen.

Die wissenschaftliche Zielsetzung der vom Autor unter reduzierter Schwerkraft durchgeführten Messungen bei Siedevorgängen konzentriert sich daher im wesentlichen auf weitere Erkenntnisse im Rahmen der folgenden Fragestellung:

- Welche Wärmetransportphänomene dominieren in Abhängigkeit von der Systembeschleunigung?
- Untersuchung der Blasendynamik (Blasenzustand, -größe, -population, -generationsrate, Abreißen von der Heizfläche?)
- Anwendbarkeit des Siedeprozesses zur Übertragung maximaler Energiedichten (Heizung, Kühlung) in Weltraumstationen und -plattformen?

#### *Technische Realisierung des schwerelosen Zustandes*

Abhängig von den experimentenspezifisch zulässigen bzw. tolerierbaren Restbeschleunigungen und der zusammenhängenden Dauer der schwerelosen Phase der experimentellen Untersuchungen kann der schwerelose Zustand prinzipiell auf vier Arten realisiert werden:

a) Fallturm	$t_{\max} = 4$ Sekunden	$a/g \min = 10^{-3}$
b) ballistische Flugbahn mit Flugzeug	$t_{\max} = 30$ Sekunden	$a/g \min = 10^{-2}$
c) ballistische Flugbahn mit (Feststoff-)Raketen	$t_{\max} = 360$ Sekunden	$a/g \min = 10^{-5}$
d) Erdumlaufbahn (Orbiter, Raumstation)	$t_{\text{typisch}} = 7$ Tage	$a/g \min = 10^{-3}$

Die kurzen Versuchszeiten bei Fallturmversuchen bergen die Gefahr der Fehlinterpretation der Versuchsergebnisse durch instationäre Messungen, während die für Langzeitversuche optimale Flugmöglichkeit in einer Erdumlaufbahn hohen Kostenaufwand und sehr lange Experimententwicklungszeiten erfordert.

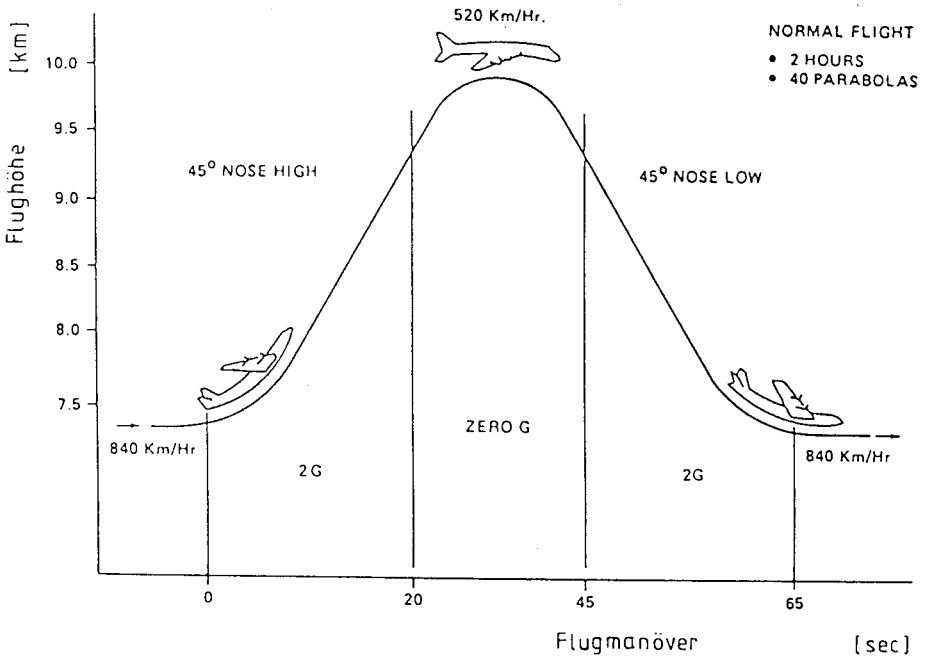


Abb. 4: KC 135 Flugmanöver bei Parabelflügen.

Erste Studien an Flüssigkeitsexperimenten mit kurzen Einschwingzeiten können qualitativ sehr gut auf sogenannten Parabelflügen an Bord speziell angepasster Flugzeuge (z.B. KC 135 der NASA) durchgeführt werden. Neben den variablen Systembeschleunigungen ( $0 \leq a/g < 2$ ) im Verlauf der Flugbahn erweist sich die direkte Eingriffsmöglichkeit des mitfliegenden Experimentators in die Versuchssteuerung während des Fluges als nicht zu unterschätzender Vorteil gegenüber vollständig automatisch arbeitenden Experimenten.

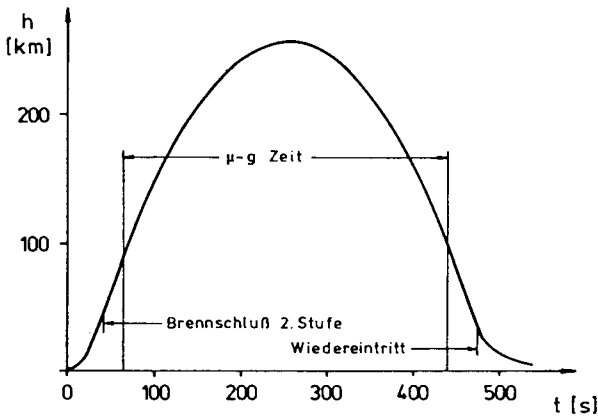


Abb. 5: Ballistische Raketenflugbahn (TEXUS) für Experimente unter Mikrogravitation.

Das ballistische Raketenflugprogramm TEXUS (*Technologische Experimente unter Schwerelosigkeit*), das vom Bundesminister für Forschung und Technologie finanziert wird, gewährleistet durch die kurzen Experimententwicklungszeiten, der überragenden technischen Flexibilität sowie durch minimale Störbeschleunigungen während des Fluges sehr gute Meßergebnisse, die eine solide Grundlage für eine optimale Auslegung von Langzeitexperimenten an Bord einer Raumfähre garantieren.

#### *Experimentelle Durchführung der Parabelflug-Experimente*

Im Sommer '85 konnte am Johnson Space Center (JSC) der NASA in Houston/Texas bei Parabelflügen an Bord einer KC 135 (US. Air Force Version der Boeing 707) ein Experimentprogramm zur Untersuchung des Gravitationseinflusses auf Siedevorgänge realisiert werden. Der entscheidende Vorteil dieser Experimentdurchführung liegt in der direkten Eingriffsmöglichkeit des Experimentators während des Fluges, ferner kann im Anschluß an jede „schwerelose“ Experimentperiode von jeweils ca. 30 Sekunden ein direkter Vergleich mit Zuständen bei doppelter und normaler Erdschwerkraft durchgeführt werden (s. Abb. 4).

Mit eigens für die Sicherheitsbestimmungen der NASA modifizierter Laborhardware wurde ein Experimentensystem an Bord der KC 135 („Weightless Wonder IV“) integriert (Abb. 6: Experimenthardware), das im wesentlichen aus der Experimentplattform sowie dem Meßgeräte rack bestand, deren einzelne Einheiten im folgenden kurz charakterisiert werden:

- Einstellung beliebiger Fluidzustände im Bereich  $T = 30\text{--}110^\circ\text{C}$ ;  $P = 1\text{--}45\text{ bar}$
- Druckkonstanz durch Volumenausgleichsystem (Metallfaltenbalg)
- Verwendung diverser Heizergeometrien (Heizdrähte, Flächenheizer)
- optische Aufzeichnung des Siedevorgangs mit Stroboskop und 16 mm Kamera
- Steuerelektrik zur Versorgung der Heizflächen
- Meßdatenerfassungssystem mit Voltmeter, Scanner, Hewlett-Packard PC mit Floppy Disc Drive und Printer, 6 Kanal Analogschreiber
- Beschleunigungsmesssystem

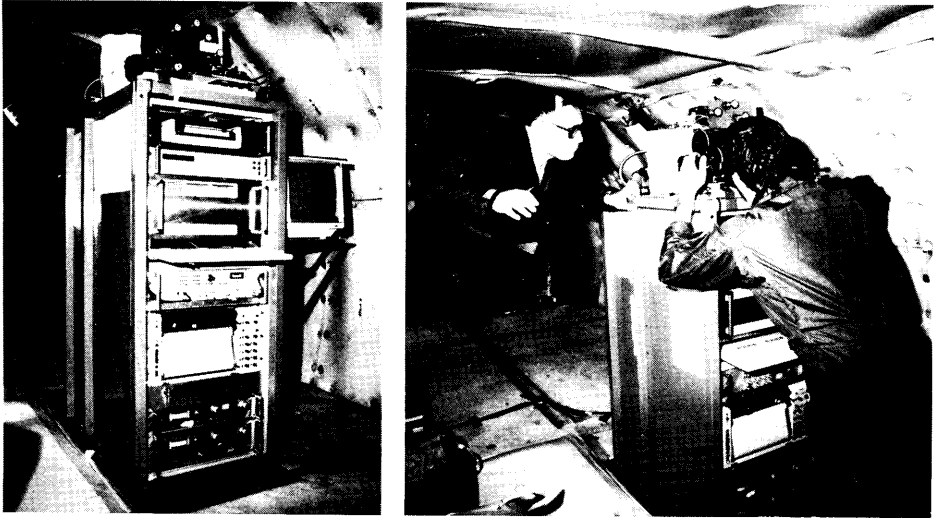


Abb. 6: Flughardware und ‚In-Flight-handling‘ durch den Experimentator.

### *Wissenschaftliche Ergebnisse der Parabelflug-Experimente*

Die experimentellen Untersuchungen des Siedeprozesses in variablen Schwerfeldern vom schwerelosen Zustand bis zu doppelter Erdschwerkraft demonstrieren deutlich den starken Einfluß der Systembeschleunigung auf die Blasenbildung und das Verhalten der dampfförmigen Phase; sie zeigen darüber hinaus ebenso drastisch die weitgehende Stabilität und damit Unempfindlichkeit des Wärmeübergangs mit Phasenänderung bei fehlender Konvektion sowie Blasenauftrieb.

Der Versuch wurde jeweils erst zu Beginn der schwerelosen Phase (Abb. 4,  $T = 20$  sec) aktiviert, um jede ansonsten während der Aufstiegsphase induzierte Konvektionsbewegung in der Flüssigkeit auszuschalten. Die Abb. 7 demonstriert das Verhalten des Systems beim Sieden in gesättigter Flüssigkeit.

Unter dem Einfluß der Schwerkraft und damit des Auftriebs wird der Wärmeübergang feste Wand/Flüssigkeit beim Sieden in gesättigter Flüssigkeit vor allem durch den Transport latenter Energie durch auftriebsbedingt ablösende Dampfblasen, deren Driftströmung sowie natürliche Konvektion der Flüssigkeit gewährleistet. Dieser periodische Vorgang der Blasenentstehung, des Wachstums und abschließenden Ablösens von der Heizfläche verschwindet unter Schwerelosigkeit. Dies ist in verstärktem Maße an ebenen Heizflächen zu beobachten, wo entlang der gegenüber Heizdrähten wesentlich längeren Kontaktlinien Blase/Heizfläche statische Oberflächenspannungskräfte (Haftkräfte) ein Blasenablösen durch dynamische Kräfte verhindern. Die für Erdbedingungen postulierte Steigerung des Wärmeübergangs durch aufsteigende Blasen (-säulen) und deren Driftströmung wird durch die vorliegenden Messungen in Frage gestellt, da ohne Schwerkraft keine Veränderung des Wärmeübergangskoeffizienten feststellbar ist. Für technische Anwendungen im Bereich der Raumfahrt ist beim Sättigungssieden zur Erreichung maximaler Wärmestromdichten erzwungene Konvektion zum Abtransport der Dampfvolamina vorzusehen.

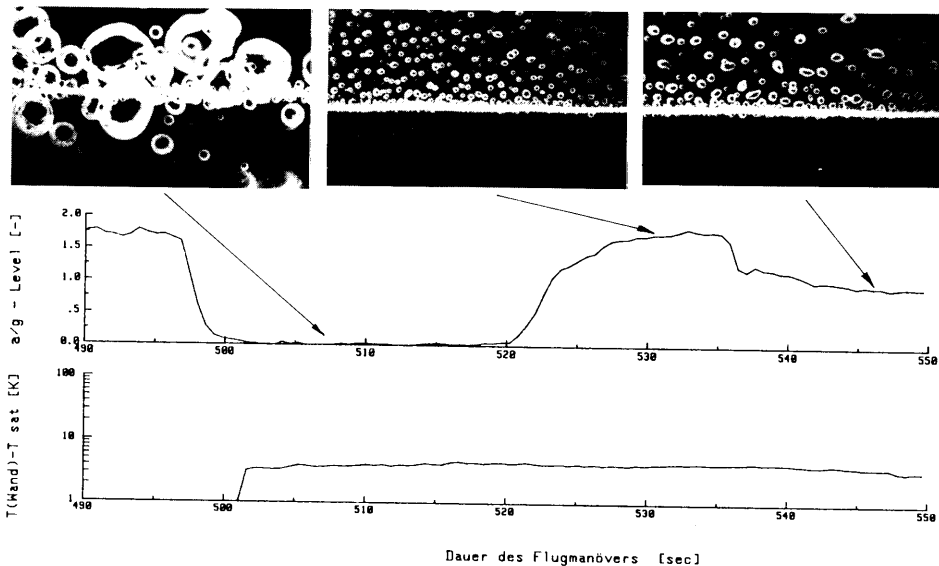


Abb. 7: Blasensieden (Platin-Draht  $\varnothing$  0.2 mm) in gesättigter Flüssigkeit ( $q = 22 \text{ W/cm}^2$ ).

Dagegen behält der Siedevorgang in unterkühlter Flüssigkeit (Abb. 8) seine terrestrische Stabilität auch ohne Einwirkung beschleunigungsabhängiger Wärmetransportmechanismen. Beschleunigungsunabhängige Phänomene wie gesteigerte Verdampfung/Kondensation und pulsierende Blasen (Mikrokonvektion) in Verbindung mit Grenzflächenkonvektion verringern den thermischen Widerstand der Flüssigkeitsgrenzschicht an der wärmeabgebenden Fläche und garantieren ohne erzwungene Konvektion stabile thermische Verhältnisse.

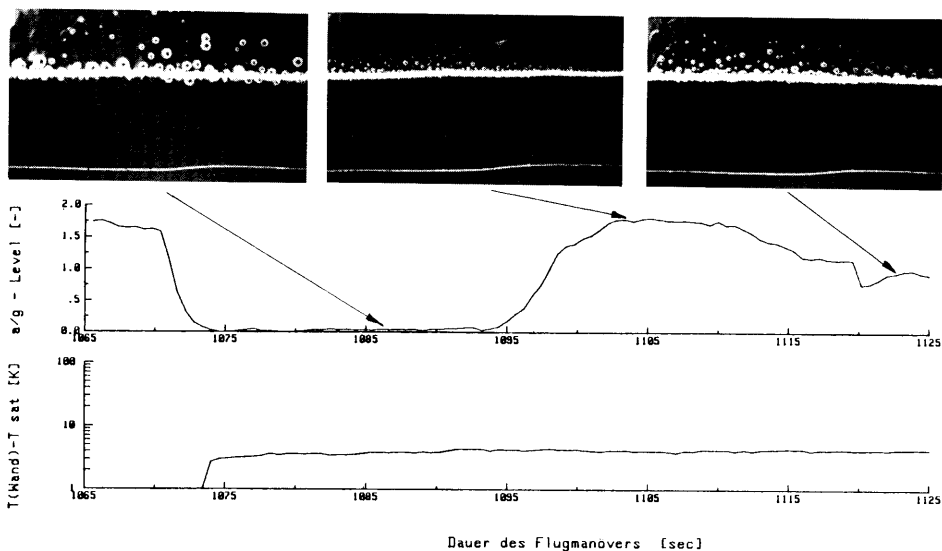


Abb. 8: Blasensieden (Pt-Draht  $\varnothing$  0.2 mm) in unterkühlter Flüssigkeit ( $q = 30 \text{ W/cm}^2$ ).



Der starke Rückgang der Oberflächenspannung bei Fluidzuständen nahe dem kritischen Punkt bewirkt die zunehmende Instabilität des Blasensiedens und es kommt zum Eintritt in das Filmsiedegebiet (Abb. 9,  $t = 1576$  sec). Die damit verbundene drastische Vergrößerung der Blasen volumina unter reduzierter Schwerkraft wird von einem periodischen ‚Pumpvorgang‘ der kleinen Blasen in die größeren begleitet. Die weitgehende Isolation des Heizdrahtes gegenüber der umgebenden Flüssigkeit durch die symmetrisch am Draht wachsenden Blasen bewirkt eine starke Erhöhung der Heizflächentemperatur (ca. 200 K) gegenüber Systemzuständen bei erhöhter sowie terrestrischer Systembeschleunigung.

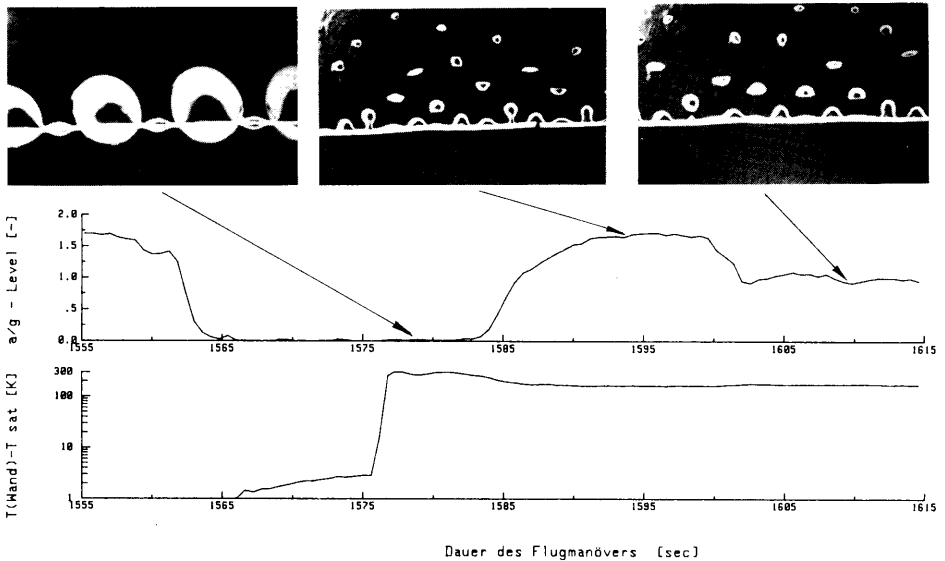


Abb. 9: Filmsieden im kritischen Gebiet in unterkühlter Flüssigkeit ( $q = 28 \text{ W/cm}^2$ ).

Die bei den Parabelflügen gewonnenen Ergebnisse fließen direkt in die laufende Konstruktionsphase eines gleichartigen Siedeexperimentes zur Durchführung auf einer einwöchigen Space-Shuttle Mission ein. Mit diesem Experiment sollen die bei den Parabelflügen erzielten ersten Ergebnisse mit wesentlich verlängerten Experimentlaufzeiten und verminderten Störbeschleunigungen eindeutig verifiziert werden.

#### Experimentelle Durchführung der TEXUS-Experimente

Die gegenüber Parabelflügen wesentlich veränderten Experimentrandbedingungen der TEXUS-Flugmöglichkeit (Gewichtslimit 40 kg, automatischer Experimentablauf, maximale Experimentlaufzeit unter Mikrogravitation 360 Sekunden) erfordern spezielle Flughardware sowie die zeitliche Optimierung des Experimentablaufs. In Abb. 10 ist der prinzipielle Aufbau des Experiments dargestellt. Im unteren Teil der Meßzelle ist die

Heizfläche (goldbedampfte Glasplatte  $40 \times 20$  mm) waagrecht integriert. Durch Kalibrierung der verwendeten Heizfläche vor und nach dem Flug konnte sie gleichzeitig als Widerstandsheizung und Oberflächenthermometer eingesetzt werden. Vier Thermoelemente im Glsträger der Heizfläche gewährleisten eine exakte Bestimmung des Verlustwärmestroms und damit die Berechnung der tatsächlich an die Flüssigkeit übertragenen Nettoleistung. Weitere Thermoelemente im Fluid über der Heizfläche geben Information über Blaseninnentemperatur (Dampf) sowie Blasenumgebungstemperaturen. Die Druckkonstanz in der Versuchsflüssigkeit (FREON 113) wurde durch Volumenkompensation der Dampfblasen mittels eines Metallfaltenbalgs sichergestellt. Das Verhalten der dampfförmigen Phase an der Heizfläche wurde mit einer 16 mm Filmkamera mit verschiedenen Filmgeschwindigkeiten (18 und 100 Bilder/sec) über eine Schattenoptik registriert.

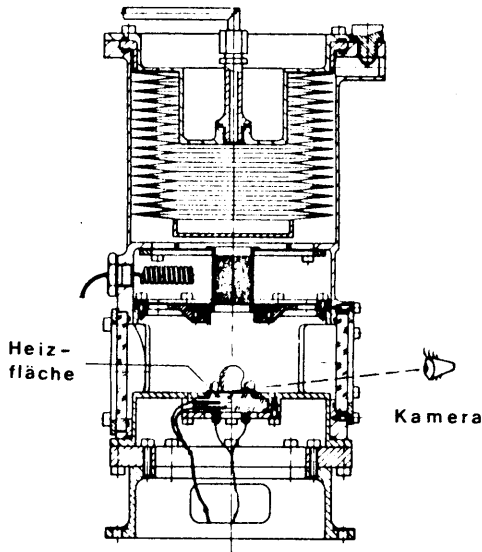


Abb. 10: TEXUS Experimentzelle.

Das folgende Meßprogramm definiert den wesentlichen Experimentablauf:

- a) Sättigungszustand der Flüssigkeit ( $t = 75-230$  sec)  
 stufenweise Erhöhung und nachfolgend Verringerung der Heizleistung  
 ( $q = 2-7$  W/cm<sup>2</sup>)
- b) Übergang Sättigungssieden – unterkühltes Sieden (ab  $t = 230$  sec)  
 bei konstanter Heizleistung ( $q = 3$  W/cm<sup>2</sup>)
- c) Unterkühltes Sieden ( $t = 300-500$  sec)  
 stufenweise Steigerung und nachfolgende Verringerung der Heizleistung  
 ( $q = 2-7$  W/cm<sup>2</sup>)

Die Experimentregelung umfaßt die Heizerspannung (proportional zur Heizleistung : 6 diskrete Niveaus S2–S7 mit  $q = 2 \dots 7$  W/cm<sup>2</sup>) mit Heizer ‚Notaus‘-Schaltung bei Überschreiten einer Oberflächentemperatur an der Heizfläche (Burnout!). Die Steuerung

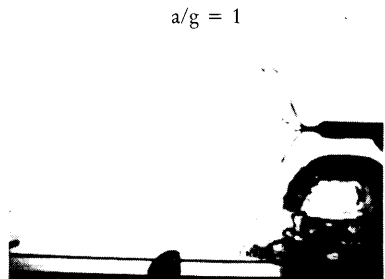
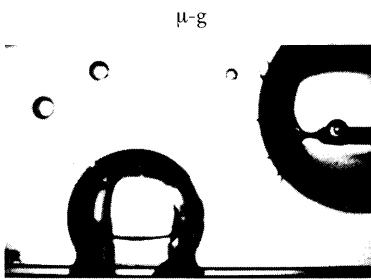
der Filmgeschwindigkeit (hohe zeitliche Auflösung bei Siedebeginn) sowie die Druckabsenkung erfolgte ebenfalls über Timerbefehle.

Die für Erdbedingungen gültigen Referenzexperimente wurden direkt vor dem Flug mit Flugheizer und -flüssigkeit ausgeführt, um die direkte Vergleichbarkeit (Keimstellen, Gasgehalt der Flüssigkeit) der  $\mu$ -g und der terrestrischen Experimente zu gewährleisten.

### Ergebnisse der TEXUS-Experimente

#### a) Sättigungssieden

Während unter Erdbedingungen der Wärmeübergang beim Sättigungssieden an den Transport latenter Energie durch auftriebsbedingt abreißende Dampfblasen, deren Driftströ-



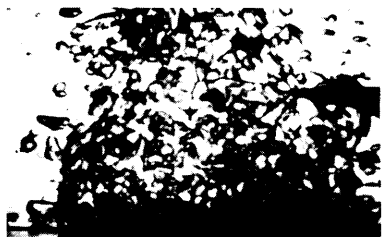
Siedebeginn:  $\Delta t_{\text{BBS}} = 0.35 \text{ sec}$



Siedebeginn:  $\Delta t_{\text{BBS}} = 1.0 \text{ sec}$



Filmsieden



Blasensieden

Abb. 11 a–f: Sieden im Sättigungszustand der Flüssigkeit ( $q = 3 \text{ W/cm}^2$ ).

mung überhitzter Flüssigkeitsschichten sowie freier Konvektion getragen wird, entscheidet bei fehlender Schwerkraft die durch fehlenden Auftrieb veränderte Kräftebilanz über das Verhalten der dampfförmigen Phase. Die in der Literatur dargestellte Dominanz der dynamischen Kräfte beim Blasenwachstum über die statischen Haftkräfte würde auch unter Mikrogravitation zum Ablösen der Dampfblasen führen. Die Abbildung 11 a–f zeigt für eine Heizleistung von  $3 \text{ W/cm}^2$  den Siedebeginn mit Blasenbildung und das nachfolgende Einschwingen in die jeweiligen Systemzustände sowohl für das schwerelose System ( $\mu\text{-g}$ ) als auch für das terrestrische Referenzexperiment  $a/g = 1$ .

Die optische Aufzeichnung des Siedevorgangs steht in direktem Einklang mit den gemessenen Temperaturdaten der Heizfläche, so daß für das Sättigungssieden folgende Aussagen abgeleitet werden können:

- Statische Haftkräfte an der Blasenkontaktfläche mit dem Heizer dominieren über die beim Blasenwachstum wirkenden dynamischen Kräfte. Damit wird auch für die Erdbedingungen das postulierte Abreißen der Blasen durch Impulskräfte in Frage gestellt.
- Ohne Schwerkraft verschlechtert sich der Energieaustausch Heizfläche–Fluid bereits kurz nach Siedebeginn drastisch, da keinerlei Enthalpietransport durch ablösende Dampfblasen und deren Driftströmung mehr stattfindet. Damit überzieht sich nahezu die gesamte Heizfläche mit einem durchgehenden Dampffilm (Filmsieden).

#### b) Übergang Sättigungssieden – unterkühltes Sieden

Beim Flugexperiment bewirkt die Druckerhöhung von der Sättigungslinie auf eine Flüssigkeitsunterkühlung von  $T_{\text{sat}} - T_{\text{fluid}} = 25 \text{ K}$  eine schlagartige Kondensation der beim Sättigungssieden bestehenden Dampffront und nach einer Einschwingzeit von ca. zwei Sekunden stationären Wärmeübergang mit gegenüber Erdbedingungen unveränderten Wärmeübergangskoeffizienten.

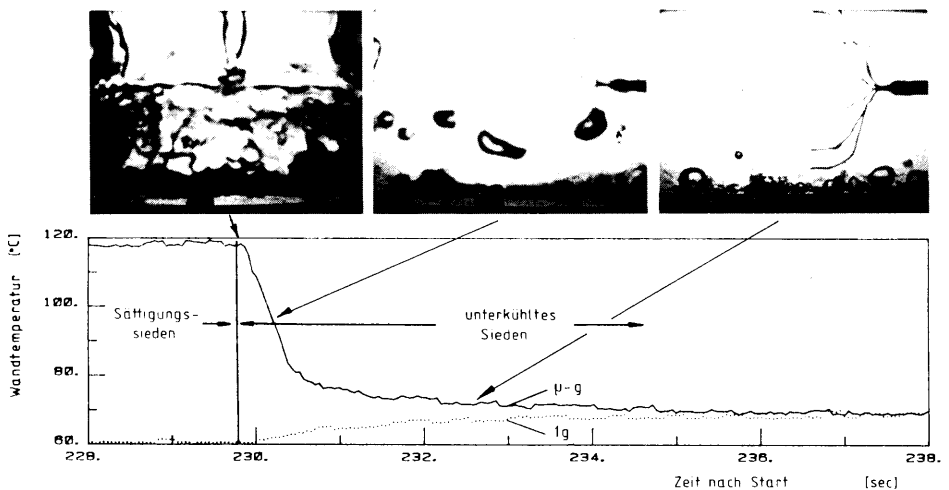


Abb. 12 a–c: Übergang Sättigungssieden – unterkühltes Sieden unter Mikrogravitation.

c) Unterkühltes Sieden

Die Aktivierung der ersten Keimstelle bewirkt durch die große thermische Grenzschichtenergie an der Heizfläche unter Mikrogravitation (Wärmeleitprofil) die explosionsartige Ausbreitung der Siedefront über die ganze Heizfläche, während auf der Erde durchaus Zonen mit freier Konvektion und solche mit Blasenbildung nebeneinander existieren (vgl. Abb. 13).



Abb. 13: Siedebeginn (a, b) und stationäres Blasensieden (c) bei Erdbedingungen.

Der starke Abfall der Wandtemperatur der Heizfläche bei Siedebeginn wird bei dem schwerelosen Experiment nur zu einem sehr geringen Teil von der sogenannten ‚Erstblase‘ verursacht, die sich in Sekundenbruchteilen explosionsartig über die gesamte Heizfläche ausbreitet (Abb. 14). Vergleicht man den Verlauf der Heizflächenüberhitzung bei Siedebeginn mit der einsetzenden Phasenbildung an der Heizfläche, so erstreckt sich die Erstblase nach einer Zehntelsekunde über die gesamte Heizfläche; dies ist nur möglich durch Entzug der benötigten Verdampfungsenthalpie aus der überhitzten Flüssigkeitsgrenzschicht an der Heizfläche (vgl. Blasenwachstum im Fluid ohne direkten Heizflächenkontakt, Abb. 5 b, c).

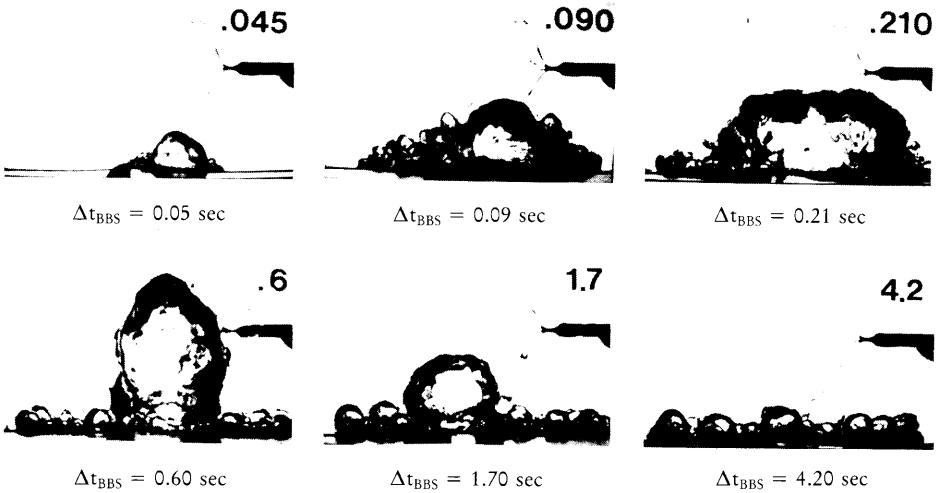


Abb. 14a-h: Siedebeginn unter Mikrogravitation ( $q = 4 \text{ W/cm}^2$ ).

Der zeitliche Gradient der Heizflächentemperatur wird durch die Energieabfuhr des sich etablierenden Siedens verursacht, das schon während der Rückkondensation der Erstblase an den wiederbenetzten Heizflächenteilen einsetzt, jedoch eine Einschwingdauer von einigen Sekunden benötigt, während das Referenzexperiment nahezu verzögerungsfrei reagiert.

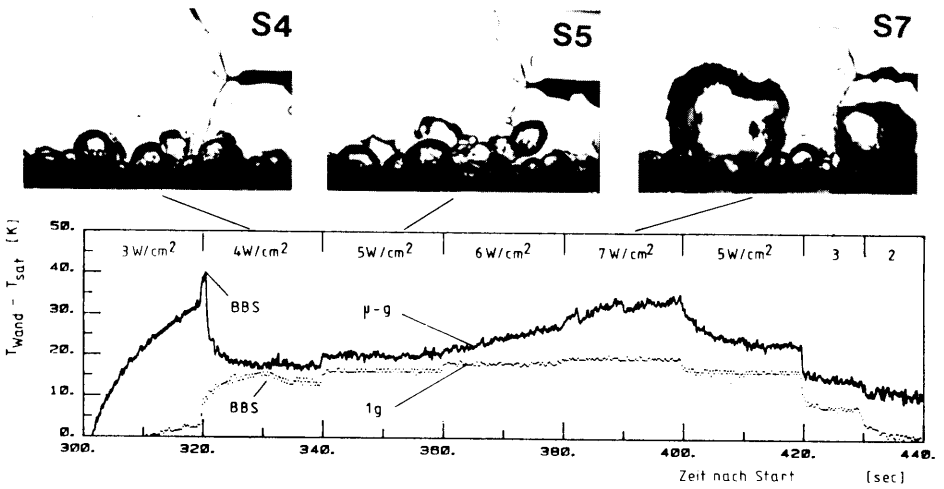


Abb. 15: Siedeverhalten unter Mikrogravitation für verschiedene Wärmeströme.

Die Auswertung des TEXUS Filmmaterials ergibt beim Vergleich der Experimente bei  $a/g = 1$  und  $a/g = 10^{-4}$  für jeweils gleiche Heizleistungen durch grundlegende Veränderung der thermischen Grenzschichtbedingungen an der Heizfläche signifikante Unterschiede bei der Betrachtung der dampfförmigen Phase:

- Blasenpopulation (Flug/Referenz) 1 : 50
- durchschnittliche Blasenradien (Flug/Referenz) 8 : 1
- Phasengrenzflächen Dampf-Flüssigkeit (Flug/Referenz) 1.9 : 1

Unter terrestrischen Bedingungen wird der Siedeprozess von Dampfblasen mit nahezu uniformer Maximalgröße getragen, wobei jede Blase für sich mittels natürlicher Konvektion und Grenzflächenkonvektion in die Lage versetzt wird, ohne Blasenabreißen (nur in entgasten Flüssigkeiten gewährleistet) einen stationären Verdampfungs-/Kondensationsvorgang aufrecht zu erhalten. Unter  $\mu$ -g Bedingungen dagegen bewirken die auf Grund fehlender Konvektion wesentlich veränderten Grenzschichtbedingungen, daß der Wärmeübergang feste Wand/Flüssigkeit nur durch wesentlich vergrößerte Blasenoberflächen und damit ausreichender Kondensation gewährleistet wird. Nach kurzem Wachstum ( $< 1$  sec) in der überhitzten Fluidgrenzschicht an der Heizfläche koalieren die ‚kleinen‘ Blasen mit größeren Blasen (3–4facher Radius) in ihrer Umgebung, deren Scheitel in unterkühlte Fluidzonen hineinragen und somit die Kondensationsfunktion des Gesamtprozesses übernehmen.

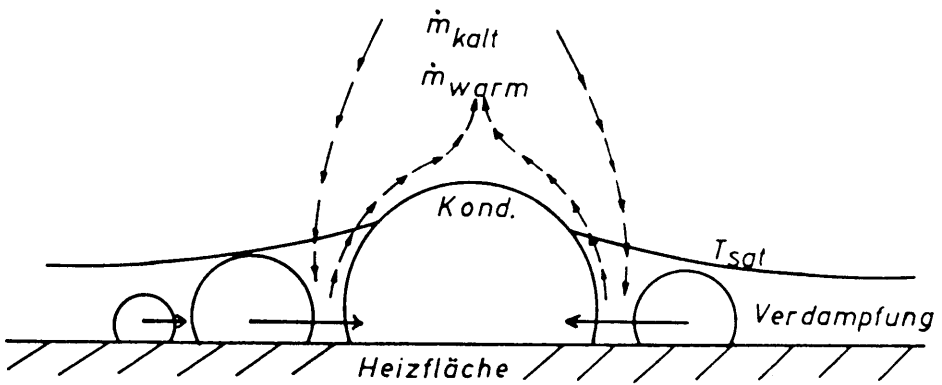


Abb. 16: Modellvorstellung des unterkühlten Siedens an einer ebenen Heizfläche unter Mikrogravitation.

Die Blasenbildungsfrequenz für das  $\mu$ -g Experiment beträgt 0.5–2 Hz, während die Blasen des Referenzexperiments scheinbar stationär an den aktivierten Keimstellen sitzen und sich nicht ablösen. Die gemessenen Temperaturverläufe unter  $\mu$ -g definieren die Blasen volumina als offen durchströmte Systeme mit Phasenänderung an den Grenzflächen, wobei Verdampfungs zonen am Blasenfuß und entsprechende Kondensation längs der gekrümmten Oberflächen in unterkühlten Flüssigkeitsgebieten den gegenüber terrestrischen Bedingungen weitgehend unveränderten Wärmeübergang garantieren. Der Wärmeübergang durch Enthalpietransport mittels abreisender Blasen und deren Driftströmung, bei normaler Systembeschleunigung ein (scheinbar) dominierender Faktor des Wärmeübergangs, scheidet für die unter Mikrogravitation durchgeführten Experimente vollständig aus. Damit ist stationäres Blasensieden auch unter vollständiger Ausschaltung aller gravitationsabhängigen Wärmetransportmechanismen möglich.

#### Ausblick

Weitere Untersuchungen der Siedemechanismen unter Schwerelosigkeit, verbunden mit terrestrischen Referenzexperimenten sowie erhöhten Systembeschleunigungen (Zentrifugenexperimente), sollen in der Kombination mit weiteren wesentlichen Systemparametern zur Charakterisierung des Wärmeübergangsverhaltens beim Sieden:

- Systemflüssigkeit
- thermodynamischer Zustand der Flüssigkeit
- verschiedenen Heizergeometrien und -oberflächen

allgemeingültige Aussagen zur vollständigen Erfassung der komplexen zweiphasigen Wärmeübergangs beim Sieden erlauben. Detailuntersuchungen an einzelnen Dampfblasen unter Schwerelosigkeit mittels interferometrischer Aufzeichnung des Temperaturfeldes der Blasen umgebung sowie Hochgeschwindigkeitskinematographie bringen einen tieferen Einblick in die grundlegenden Strukturen des Siedens. Die gewonnenen Erkenntnisse können auch direkt für die Auslegung von Wärmeübertragern im schwerelosen Raum (z. B. Raumstation) angewendet werden.

## Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesminister für Forschung und Technologie für die Finanzierung der Projekte, der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt DFVLR-PT-SN in Köln für das Projektmanagement, den TEXUS-Teams der Weltraumfirmen MBB/ERNO in Bremen sowie Kayser-Therde, München, durch deren Unterstützung die erfolgreiche Durchführung der TEXUS-Experimente gewährleistet wurde.

Für die Koordination der Parabelflugmöglichkeit danken die Autoren ferner der Europäischen Weltraumbehörde ESA/ESTEC in Noordwijk sowie der amerikanischen Weltraumbehörde NASA, vertreten durch R. Williams und R. Shurney für die ausgezeichnete Zusammenarbeit bei der Experimentdurchführung während der Parabelflüge.

## Literatur

Han, C.H., und Griffith, P., „The Mechanism of Heat Transfer in Nucleate pool Boiling – Part II“, **Int. J. Heat Transfer**, 8, pp. 905–914, 1965

Mikic, B.B., und Rohsenow, W.M., „A New Correlation of Pool Boiling Data Including the Effect of Heating Surface Characteristics“, **J. Heat Transfer**, C 91, pp. 245–250, 1969.

Cooper, M.G., und Lloyd, A.J.P., „The Microlayer in Nucleate Pool Boiling“, **Int. J. Heat Mass Transfer**, 12, pp. 895–913, 1969.

Judd, R.L., und Hwang, K.S., „A comprehensive Model for Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Including Microlayer Evaporation“, **J. Heat Transfer**, C 98, pp. 623–629, 1976.

Forster, H.K., und Zuber, N., „Dynamics of Vapour Bubbles and Boiling Heat Transfer“, **AICHE J.**, 1, pp. 531–535, 1955.

Robin, T.T., und Snyder, N.W., „Theoretical Analysis of Bubble Dynamics for an Artificially Produced Vapour Bubble in a Turbulent Stream“, **Int. J. Heat Mass Transfer**, 13, pp. 523–536, 1970

Stralen, S. van, und Cole, R., „Boiling Phenomena I, II“, **Hemisphere Publishing Corporation**, Washington, New York, London, 1979.

Merte jr., H., und Clark, H.B., „Boiling Heat Transfer with Cryogenic Fluids at Standard, Fractional and Near-zero Gravity“, **Transactions ASME**, pp. 351, 1964.

Littles, and Walls, „Nucleate Pool Boiling of Freon 113 at Reduced Gravity Levels“, **ASME**, 70-HT-12.

Weinzierl, A., „Untersuchung des Wärmeübergangs und seiner Transportmechanismen bei Siedevorgängen unter Mikro-Gravitation“, **Dissertation Technische Universität München**, 1984.

Zell, M., Weinzierl, A. und Straub, J., „Nucleate Pool Boiling in Subcooled Liquid under Microgravity – Results of TEXUS Experimental Investigations“, **Proceedings of the 5th European Symposium on Material Sciences under Microgravity – Schloß Elmau**, 1984. (ESA SP-222)