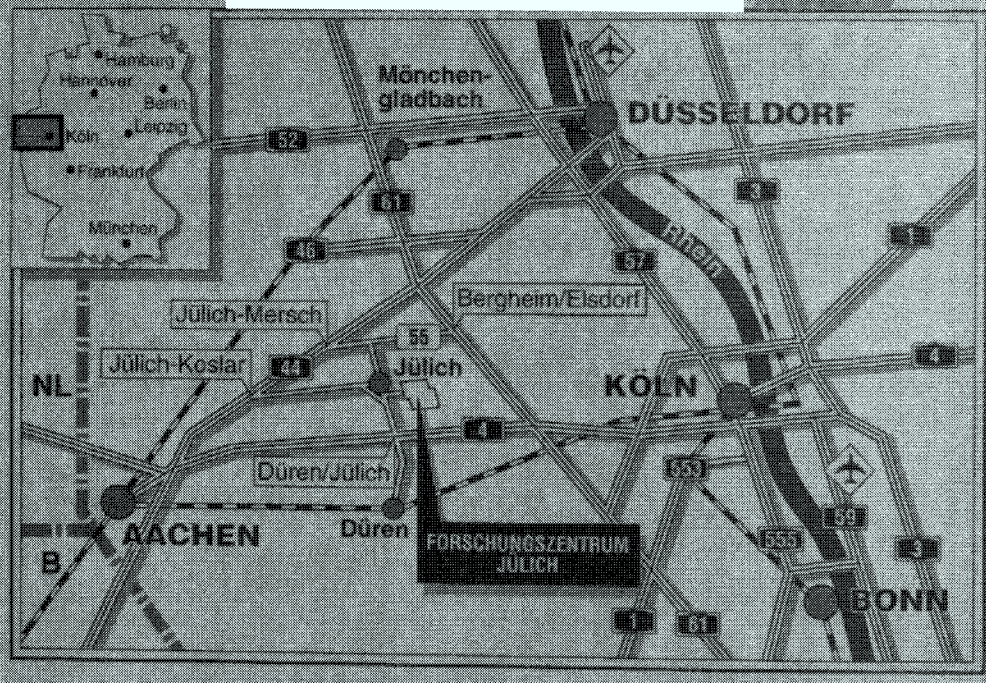
FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GmbH
KFA

Institut für Sicherheitsforschung
und Reaktortechnik

Ausbreitung und Verdampfung von flüssigem Wasserstoff auf Wasser und festem Untergrund

Bernd Dienhart

6133213855



KFA-ZENTRALBIBLIOTHEK

Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 3155
ISSN 0944-2952
Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik Jül-3155
D294 (Diss. Universität Bochum)

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek
D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland
Telefon: 02461/61-6102 · Telefax: 02461/61-6103 · Telex: 833556-70 kfa d

Ausbreitung und Verdampfung von flüssigem Wasserstoff auf Wasser und festem Untergrund

Bernd Dienhart

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (ISR) der Forschungszentrum Jülich GmbH (KFA).

Herrn Professor Dr. E.F. Hicken, Direktor am ISR, bin ich für die Themenstellung, sein Interesse am Verlauf der Arbeit sowie für zahlreiche Anregungen zu besonderem Dank verpflichtet.

Herrn Professor Dr. H. Unger danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Insbesondere gilt mein herzlicher Dank Herrn Dr. J. Wolters für die fachliche Betreuung und kritische Begleitung der Arbeit sowie für die vielen Hilfestellungen, Herrn Dr. K. Verfondern für die zahllosen Diskussionen, Herrn Dr. J. Mertens für die Durchsicht des Manuskripts mit wertvollen Hinweisen, Herrn Dr. W. Katscher und Herrn B. Stauch (beide früher ISR) für die Hilfen beim Einstieg ins Thema und den Vorarbeiten zu den Experimenten, den Herren K.-H. Escherich, H.-K. Hinssen, W. Müskes, A. Brämer, S. Pitsch für die Unterstützung bei der Durchführung der Experimente sowie Frau S. Begemann für die Anfertigung der zahlreichen Abbildungen.

Ferner möchte ich mich bei allen KollegInnen und MitarbeiterInnen des Instituts für das außerordentlich kollegiale und freundschaftliche Verhalten bedanken, das stets positiven Einfluß auf meine Arbeit ausgeübt hat.

Jülich, im November 1995 Bernd Dienhart

Ausbreitung und Verdampfung von flüssigem Wasserstoff auf Wasser und festem Untergrund

von Bernd Dienhart

Kurzfassung

Flüssiger Wasserstoff hat in Szenarien der künftigen Energieversorgung als umweltfreundlicher Energieträger Vorteile gegenüber anderen Alternativen (z.B. schadstoffarme Verbrennung zu Wasser). Allerdings sollte wegen der Explosionsgefahr bei Durchmischung von Wasserstoff mit Luft eine Abschätzung möglicher Risiken und Gefährdungen bei unbeabsichtigter Freisetzung durchgeführt werden. Instrumentarien in dazu verwendeten Risikoanalysen sind Rechencodes, die denkbare Unfälle mit Freisetzung von kryogenen Flüssigkeiten möglichst realitätsnah simulieren. Als Teil eines solchen Instrumentariums wurde in dieser Arbeit die Ausbreitung und Verdampfung kryogener Flüssigkeiten untersucht.

Hierzu wurden Experimente zur Verdampfung von flüssigem Stickstoff (LN_2) auf isolierten Proben aus Bitumen und Beton (trocken/feucht) durchgeführt. Bei feuchtem Beton war die Zeit bis zur vollständigen Verdampfung des LN_2 deutlich geringer als bei trockenem Beton. Desweiteren wurden zur Untersuchung der radialen Lachenausbreitung und -verdampfung Experimente mit flüssigem Stickstoff auf Wasser und mit flüssigem Wasserstoff auf Wasser und Aluminium durchgeführt. Bei Ausbreitung auf einer Wasseroberfläche zeigte sich nach Ende der Verdampfung der kryogenen Flüssigkeit Eisbildung an der Wasseroberfläche.

Zur Simulation der Verdampfung über den isolierten Proben sowie der Lachenausbreitung auf festen Untergründen und Wasser wurde der Rechencode LAuV (**L**achen**A**usbreitung **u**nd **V**erdampfung) entwickelt. Die Simulation der radialen Lachenausbreitung basiert auf den sogenannten "Shallow-Layer" Gleichungen, einem Partial-Differential-Gleichungssystem auf Basis der Massen- und Impulserhaltung. Die Berechnung des Wärmeeintrages aus dem festen Untergrund in die Lache kann im LAuV-Code mit zwei unterschiedlichen numerischen Lösungen der Fourier-Gleichung erfolgen. Bei Ausbreitung auf Wasser wird das Wachstum der Eisschicht simuliert.

Die durchgeführten Nachrechnungen erfolgten für flüssiges Erdgas, flüssigen Stickstoff und flüssigen Wasserstoff. Die Ergebnisse der Nachrechnungen zeigten gute Übereinstimmung zu den oben genannten und aus der Literatur verfügbaren Experimenten.

Mit dem verifizierten LAuV-Code wurden Vorausrechnungen zur Lachenausbreitung von flüssigem Wasserstoff auf verschiedenen Untergründen mit Mengen bis zu 3000 m^3 durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß selbst diese Menge innerhalb etwa einer Minute verdampft ist und daher im Vergleich zu anderen Brennstoffen nur mit einer vergleichsweise kurzen Gefährdungszeit, in der entzündbare Wasserstoff/Luft-Gemische in der Nähe der Freisetzungsstelle vorliegen, zu rechnen ist.

Spreading and Vaporization of Liquid Hydrogen onto Water and Solid Ground

by Bernd Dienhart

Abstract

In scenarios of a future energy provision, liquid hydrogen has, as an environmentally benign energy carrier, advantages compared to other alternatives (for instance the pollution-free oxidation to water). However, in consideration of hazards associated with hydrogen when mixed with air, the assessment of conceivable risks and its jeopardizing potential after an inadvertant release has to be performed. The tools for such a risk analysis are calculation models to simulate conceivable accidents with the release of cryogenic liquids as realistic as possible. The spreading and vaporization of cryogenic liquids, as a part of it, has been investigated in this work.

Experiments have been conducted to study the vaporization of liquid nitrogen (LN_2) over insulated bodies of macadam and concrete (dry/moist). For moist concrete, the time until a complete vaporization of the LN_2 is significantly smaller than for dry concrete. Also, the radial pool spreading and vaporization of liquid nitrogen over water and of liquid hydrogen over water and aluminium has been experimentally examined. After spreading of the cryogenic liquid over a water surface, ice formation has been observed.

To simulate vaporization over insulated bodies as well as pool spreading over water and solid grounds, the computer model LAuV (**L**achen**A**usbreitung **u**nd **V**erdampfung) has been developed. The simulation of the radial pool spreading is based on the so-called Shallow Layer equations, a partial differential equation system considering mass and momentum conservation. The calculation of heat transport from the solid ground into the pool is given in the LAuV code by two different numerical solutions of the Fourier equation of heat conduction. For a spreading over water, the growth of the ice layer is simulated.

The results of postcalculations are in good agreement with the measurement data of the above mentioned own experiments as well as of literature data. Postcalculations have been made for liquid natural gas, liquid nitrogen, and liquid hydrogen.

The validated code LAuV has been taken to predict the pool spreading of liquid hydrogen over various grounds with amounts up to 3000 m^3. It could be demonstrated that even such a large amount will be vaporized within the time span of approximately one minute and, thus, in comparison with other liquid fuels, the respective time of jeopardy, i.e. the existence of a flammable hydrogen/air mixture close to the release site, will be relatively short.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur ..... **xiii**

1. Einleitung und Aufgabenstellung **1**

2. Grundlagen **5**

2.1. Phänomene 5

2.2. Stand des Wissens 11

2.2.1. Vorhandene Experimente 11

2.2.2. Theoretische Grundlagen 14

2.2.2.1. Verdampfung 14

2.2.2.2. Lachenausbreitung 22

2.2.3. Beschreibung einiger Modelle zur Lachenausbreitung und Verdampfung 24

2.2.3.1. Empirische Modelle 24

2.2.3.2. Quellterm EVAP aus HGSYSTEM 25

2.2.3.3. Quelltermmodell nach Opschoor 25

2.2.3.4. Quelltermmodell GASP 25

2.3. Fazit 28

2.3.1. Experimente 28

2.3.2. Modelle 29

3. Versuche zur Lachenausbreitung und -verdampfung mit flüssigem Stickstoff und flüssigem Wasserstoff **33**

3.1. Untersuchung des Wärmeeintrags aus dem Untergrund in eine Lache aus flüssigem Stickstoff 36

3.1.1. Beschreibung des Versuchaufbaus 36

3.1.2. Versuchablauf und durchgeführte Versuche 40

3.1.3. Ergebnisse 42

3.2. Untersuchung der Lachenausbreitung und -verdampfung von flüssigem Stickstoff über Wasser 47

3.2.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus 47

3.2.2. Versuchsablauf und durchgeführte Versuche 50

3.2.3. Ergebnisse 55

3.3. Untersuchung der Lachenausbreitung und -verdampfung von flüssigem Wasserstoff über Wasser und Aluminium 63

3.3.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus 63

3.3.2. Versuchsablauf und durchgeführte Versuche 69

3.3.3. Ergebnisse 71

3.4. Fazit der Versuche mit flüssigem Stickstoff und flüssigem Wasserstoff 76

4. Modellierung der Lachenausbreitung und Verdampfung 79
4.1. Ausbreitungsverhalten einer Flüssigkeitslache 79
4.1.1. Ableitung der "Shallow Layer" Gleichungen 79
4.1.2. Mathematisches Lösungsverfahren 86
4.2. Verdampfungsverhalten einer Lache aus kryogener Flüssigkeit 88
4.2.1. Verdampfung über einem festen Untergrund 88
4.2.1.1. Analytische Lösung der instationären Wärmeleitgleichung 88
4.2.1.2. Numerische Lösung der instationären Wärmeleitgleichung 89
4.2.1.3. Modellierung eines feuchten Untergrundes 90
4.2.2. Verdampfung über einem flüssigen Untergrund (Wasser) 92
4.3. Verwendete Stoffwerte 93

5. Testen und Verifizieren des LAuV-Codes 97
5.1. Numerische Stabilitätsbetrachtung 98
5.2. Freisetzung von 500 Litern Flüssigwasserstoff über Wasser 100
5.3. Freisetzung von 125 m³ Flüssigwasserstoff über verschiedenen Untergründen 104
5.4. Eisbildung im Wasser 108
5.5. Vergleich von LAuV mit anderen Ausbreitungs-Codes 110
5.6. Nachrechnung der Verdampfungsversuche mit LN2 116
5.7. Nachrechnung der Ausbreitungsversuche mit LN2 120
5.7.1. Versuche mit schlagartiger Freisetzung 120
5.7.2. Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung 124
5.8. Nachrechnung der Ausbreitungsversuche mit LH2 128

6. Vorausrechnung der Lachenausbreitung und -verdampfung im Hinblick auf mögliche Unfälle mit Freisetzung von flüssigem Wasserstoff 133
6.1. Freisetzung von Flüssigwasserstoff in den Größenordnungen des Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project 133
6.2. Freisetzung von Flüssigwasserstoff in der Größenordnung des Tankinhaltes eines wasserstoffgetriebenen Flugzeuges 136
6.3. Freisetzung von Flüssigwasserstoff in der Größenordnung des Tankinhaltes eines Tanklastzuges 140

7. Zusammenfassung und Ausblick 145

8. Literaturverzeichnis 149

Anhang A (Fehlerbetrachtung) **159**
A.1. Beschreibung der mobilen Meßdatenerfassungsanlage HP 3852A 159
A.2. Fehlerbetrachtung für die Verdampfungsexperimente 160
A.2.1. Genauigkeit der Massenmessung 160
A.2.2. Genauigkeit der Temperaturmessung 162
A.3. Fehlerbetrachtung für KIWI-Experimente 162
A.3.1. Genauigkeit des Lachenradius 163
A.3.2. Genauigkeit der Versuchszeit 164
A.3.3. Genauigkeit der Anfangsmassenbestimmung bei den Versuchen mit schlagartiger Freisetzung 165
A.3.4. Genauigkeit des Flüssigkeits-Massenstroms bei Versuchen mit kontinuierlicher Freisetzung 167
A.4. Fehlerbetrachtung für LH2-Experimente in Cottbus 169
A.4.1. Genauigkeit des Lachenradius 170
A.4.2. Genauigkeit der Zeitmessung 171
A.4.3. Genauigkeit der Massenstrombestimmung 172

Nomenklatur

Arabische Buchstaben

Zeichen	Bezeichnung	Dimension
A	Fläche	[m^2]
a	Wärmeleitzahl (bzw. Temperaturleitfähigkeit)	[m^2/s]
a_r	Oberflächenrauhigkeit	[m]
b	Formfaktor	[-]
C	empirische Konstante	[-]
$\tilde{C}$	Chézy-Koeffizient	[-]
c	Geschwindigkeit	[m/s]
c_p	spezifische Wärmekapazität	[kJ/kg K]
d	Durchmesser	[m]
dr	inkrementelles Radienelement	[m]
dt	inkrementelles Zeitelement	[s]
dz	inkrementelles Element in der Tiefe	[m]
e	Verdampfungsrate	[m^3/s]
F	Kraft	[m^2/s]
f	Frequenz	[1/s]
Gr	Grashoffzahl $\frac{g\Delta T\kappa\rho_l z}{\eta}$	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s^2]
H	durchschnittliche Lachenhöhe	[m]
ΔH	Heizwert	[kJ/kg]
h	Lachenhöhe	[m]
Δh	Enthalpie des Phasenübergangs	[kJ/kg]
$\Delta h'$	effektive Enthalpie des Phasenübergangs	[kJ/kg]
K	empirische Konstante	[-]
k	Extinktionskoeffizient	[1/m]
M	Molmasse	[g/mol]
m	Masse	[kg]
$\dot{m}$	Massenstrom	[kg/s]
Nu	Nusseltzahl	[-]
Pr	Prandtlzahl $\frac{\eta}{\rho a}$	[-]
p	Druck	[Pa]
$\bar{p}$	mittlerer statischer Druck	[Pa]
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	[kW/m^2]

R	Lachenradius an der vorderen Lachengrenze	[m]
R_t	Rauhtiefe einer Oberfläche	[m]
R_w	mittlerer Abstand der Rauhigkeitsspitzen	[m]
r	Lachenradius	[m]
Δr	Radiusdifferenz	[m]
S	Quellterm	[kg/s]
Sc	Schmidtzahl $\frac{\nu}{\zeta}$	[-]
s	Entropie	[kJ/kg K]
T	Temperatur	[K]
$\overline{T}$	mittlere Temperatur	[K]
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]
$\Delta \dot{T}$	Temperaturgradient	[K/s]
t	Zeit	[s]
Δt	Zeitdifferenz	[s]
U	Radialgeschwindigkeit an der vorderen Lachengrenze	[m/s]
u	Lachengeschwindigkeit	[m/s]
V	Volumen	[m^3]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[m^3/s]
v	flächenbezogene Verdampfungsrate	[m/s]
W	Arbeit	[J]
w	flächenbezogener Quellterm (Volumenstrom) $\frac{S}{\rho A}$	[m/s]
Δz	Differenz der Koordinate in der Tiefe	[m]
z	Koordinate in der Tiefe	[m]
$\overline{z}$	Eindringtiefe	[m]

Griechische Buchstaben

Zeichen	Bezeichnung	Dimension
α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m^2 K]
β	Stoffübergangskoeffizient	[m/s]
χ	empirische Konstante	[-]
δ	Dichteverhältnis	[-]
ε	Emissionsgrad	[-]
Φ	Wärmequelle im Untergrund	[kW/m^3]
Γ	empirische Konstante	[-]
γ	Massenanteil	[-]

η	dynamische Viskosität	[N s/m²]
φ	Winkel	[Rad]
κ	Volumen-Ausdehnungskoeffizient	[1/K]
Λ	Flächenverhältnis	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/m K]
ν	kinematische Viskosität	[m²/s]
ρ	Dichte	[kg/m³]
τ	Scherspannung	[N/m²]
σ	Oberflächenspannung	[N/m]
ς	Boltzmann Konstante $5,77 \cdot 10^{-11}$	[kW/m² K⁴]
Ψ	Dampfgehalt	[-]
ζ	Diffusionskoeffizient	[m²/s]
$\Re$	Universelle Gaskonstante (8,314)	[kJ/kmol K]

Indizes

A	Auftrieb
abs	absolut
B	Boden
DF	Dampffilm
DNB	Maximum Blasensiedepunkt (Departure from Nucleate Boiling)
el	elektrische
FB	Filmsiedebereich (Film Boiling)
fg	Verdampfung (flüssig - gas)
G	Gasphase
ges	Gesamt
in	Innen
KHB	Kritische Heizflächenbelastung
k	Zeit-Index
konv	konvektiv
L	Luft
l	flüssig (liquid)
ls	Erstarrung (liquid - solid)
MFB	Minimum Filmsiedepunkt (Minimum Film Boiling)
m	mittlere
NB	Keimsieden (Nucleate Boiling)
n	Ort-Index
Ob	Oberfläche
o	oberer
R	Reibung

r	Randeinfluß
S	Siedetemperatur
sol	Solarstrahlung
U	Umgebungsbedingungen (i.a. NTP)
u	unterer
v	Verdampfung
W	Wasser
Zu	Zufuhr

Abkürzungen

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Berlin)
erf	Error Funktion $\mathrm{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$
GASP	Gas Accumulation over Spreading Pools
GH_2	Gasförmiger Wasserstoff (Gaseous Hydrogen)
GN_2	Gasförmiger Stickstoff (Gaseous Nitrogen)
HF	Fluorwasserstoff
KFA	Forschungszentrum Jülich GmbH
LAuV	LachenAusbreitung und Verdampfung
LCH_4	Flüssiges Methan (Liquid CH_4)
LC_2H_6	Flüssiges Äthan (Liquid C_2H_6)
LH_2	Flüssiger Wasserstoff (Liquid Hydrogen)
LHe	Flüssiges Helium
LNG	Flüssiges Erdgas (Liquid Natural Gas)
LN_2	Flüssiger Stickstoff (Liquid Nitrogen)
LO_2	Flüssiger Sauerstoff (Liquid Oxygen)
LPG	Flüssiggas (Liquid Petroleum Gas)
MCH	Methylcyclohexan
NAG	Numerical Algorithms Group
NTP	Normaltemperatur (293,15 K) - Normaldruck (0,1013 MPa)
SRD	Safety and Reliability Directorate
UK	United Kingdom (Großbritannien und Nordirland)
UKAEA	United Kingdom Atomic Energy Authority

1. Einleitung und Aufgabenstellung

In einer künftigen schadstoffarmen Energieversorgung kann Wasserstoff als Energiespeicher, Roh- und Treibstoff eine bedeutende Rolle erlangen. Neben Vorteilen gegenüber fossilen Energieträgern, z.B. durch reduzierte Schadstoffemission bei seiner Verbrennung, existieren jedoch auch Nachteile. Ein wesentlicher Nachteil ist sein Gefährdungspotential bei einem Störfall, in dessen Verlauf sich Wasserstoff mit Umgebungsluft durchmischt und zündfähige Gemische bilden kann: In einer Grenzbetrachtung ist davon auszugehen, daß in der Umgebung Zündquellen vorhanden sind, die zur Zündung mit (deflagrativer) Verbrennung der Gaswolke führen. Hauptsächlich wegen der hohen Verbrennungsgeschwindigkeit neigen Wasserstoff/Luft-Gemische eher zu detonieren als beispielsweise Erdgas/Luft-Gemische [EIC92], was das besondere Gefährdungspotential des Wasserstoffes gegenüber konventionellen Energieträgern ausmacht.

Ein weiterer Nachteil ist die geringe *volumen*bezogene Energiedichte des Wasserstoffs, die zum ökonomischen Transport über weite Strecken eine Verflüssigung sinnvoll werden läßt. Auf der anderen Seite prädestiniert ihn seine hohe *massen*bezogene Energiedichte für eine Reihe von Anwendungen (z.B. Flugzeug, Rakete), in denen das Gewicht des Treibstoffes eine erhebliche Rolle spielt. Die Verflüssigung ist jedoch auch hier, wie für eine Reihe weiterer Anwendungen (z.B. KFZ) unumgänglich, um das Speichervolumen zu reduzieren.

Wasserstoff liegt auf der Erde vornehmlich in gebundener Form, wie z.B. dem Wasser, vor. Dadurch muß zur Wasserstoffgewinnung Primärenergie aufgewendet werden. Um dennoch die Schadstofffreiheit für den Wasserstoff zu gewährleisten, muß auch die zu dessen Erzeugung erforderliche Primärenergie schadstofffrei erzeugt werden, wie dies z.B. durch Ausnutzung von Wasser- oder Windkraft möglich ist. Hier fallen Schadstoffe nur beim Bau und bei der Demontage/Wiederverwertung der Anlage an, nicht jedoch während des Betriebs.

Als Beispiel eines Systems, in dem Wasserstoff aus Wasserkraft erzeugt wird, soll im folgenden das Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHHPP) vorgestellt werden. Im Rahmen dieses Projektes wird der gesamte Weg der Energieerzeugung bis hin zur Verteilung des Wasserstoffes aufgezeigt, wodurch dies Modellcharakter für weitere Energieversorgungssysteme auf Wasserstoffbasis hat.

Das EQHHPP [EQP91] ist ein 100 MW_{el} Energieerzeugungs- und -versorgungssystem, bei dem der in Kanada aus Wasserkraft gewonnene Strom zur elektrolytischen Erzeugung von Wasserstoff genutzt wird. Zum Transport nach Europa wird der Wasserstoff verflüssigt und in speziellen Bargen (Inhalt: 3000m^3 flüssiger Wasserstoff) gespeichert. Fünf solcher Bargen werden in einem speziellen Schiff (Barge-Carrier) auf einmal nach Europa transportiert. Dort

wird der flüssige Wasserstoff (LH_2) den verschiedenen Verwendungen zugeführt, wobei ein wesentlicher Teil des Wasserstoffs in der flüssigen Phase als Roh- und Treibstoff benötigt wird [GIA93, EQH91].

Falls in Zukunft wesentliche Anteile des Energiebedarfs durch Wasserstoff sichergestellt werden sollen, wird auch der Transport des flüssigen Wasserstoffes über Land- und Seeweg an Bedeutung gewinnen, wobei mit Störfällen zu rechnen ist.

Als Beispiel eines möglichen Unfalles soll das Leckschlagen einer Barge (3000 m^3 LH_2) im Hamburger Hafen betrachtet werden, wobei LH_2 austritt und sich als Lache auf der Wasseroberfläche ausbreitet und verdampft. Die Größe der Lache ist von der Anfangsmenge und der nachgeführten Menge an LH_2 abhängig. Strömungen im Wasser, Wellengang und Wind können die Lache auseinander- oder abtreiben. An der Wasseroberfläche wird sich wegen der geringen Siedetemperatur des LH_2 (-253°C) Eis bilden. Die entstehende Gaswolke hat bereits wenige Grad über Siedetemperatur Auftrieb gegenüber der Umgebungsluft und wird demzufolge rasch aufsteigen. Der Wind wird die Wolke abtreiben und es ist denkbar, daß die Wolke in einiger Entfernung von ihrer Quelle gezündet wird. Anschließend kann die Gaswolke wie eine Fackel abbrennen, oder im Zusammenwirken mit weiteren Einflußfaktoren (teilweise Verdämmung, z.B. durch eine Häuserfront) detonieren.

Um diese Vorgänge möglichst realitätsnah in Risikoanalysen simulieren zu können, sind u.a. fundierte Kenntnisse der dabei auftretenden Vorgänge, der Ausbreitung und Verdampfung von Flüssigwasserstoff, Entstehung und Ausbreitung der Gaswolke, sowie einer möglicherweise auftretenden Explosion erforderlich. Um diese notwendigen Kenntnisse zu erlangen und Risiken abschätzen zu können, ist es erforderlich, zum einen geeignete Experimente durchzuführen und zum anderen Modelle zu entwickeln, welche die Simulation bestimmter Störfälle erlauben.

Hierzu wurden bereits einige Vorarbeiten getan. So existiert eine experimentelle Untersuchung zur Ermittlung der Verdampfungsrate von flüssigem Wasserstoff über einem Paraffin-Probeboden [ZAB61] und ein Experiment, in dem versucht wurde, die Ausbreitung der flüssigen Lache zu messen [CHI86]. Darüber hinaus wurden einige Experimente nur zur Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens der Gaswolke durchgeführt, ohne die Quelle genauer zu untersuchen. Weiter existieren einige Experimente mit Flüssigerdgas (LNG), einem Gemisch aus Methan und Äthan, welches wie Flüssigwasserstoff (LH_2) eine kryogene Flüssigkeit ist. Die Ausbreitung der flüssigen Lache wurde hier in einigen Fällen untersucht, jedoch stand auch hier die Ausbreitung der Gaswolke im Vordergrund, so daß meist keine Messung der Lachenausbreitung durchgeführt wurde. Die insgesamt aus diesen Experimenten gewinnbaren Informationen bezüglich der Lachenausbreitung und -verdampfung sind lückenhaft und z.T. fehlen die Angaben wesentlicher Stoffwerte. Daher ist es erforderlich, zur

Gefahrabschätzung des neuen Energieträgers Flüssigwasserstoff, zusätzliche experimentelle Untersuchungen zum Ausbreitungs- und Verdampfungsverhalten zu unternehmen, wobei neben der Gaswolke auch deren Quelle, die Lache, zu untersuchen ist.

Vorhandene Modelle zur Simulation der Lachenausbreitung und -verdampfung gehen meist von stark vereinfachten Annahmen aus, wie z.B. einer zylinderförmigen Lache, deren Höhe sich durch Verdampfung und Vergrößerung des Radius (Ausbreitung) solange verringert, bis der gesamte LH_2 verdampft ist. Genauere Simulationen sind durch Modelle auf Basis der sogenannten "Shallow Layer"-Gleichungen möglich, die neben der Simulation der Lachenhöhe in Abhängigkeit von Zeit und Ort u.a. auch Reibungskräfte zwischen Lache und Untergrund berücksichtigen. Deren Umsetzung in ein Rechenmodell ist jedoch häufig mit erheblichen numerischen Instabilitäten verbunden [BRW81, EIC92].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden aus Sicherheits- und Verfügbarkeitsgründen zunächst Versuche mit flüssigem Stickstoff (LN_2) durchgeführt. Dazu wurden Versuchsanlagen aufgebaut, die es erlauben, die Verdampfung auf isolierten Proben realer Untergründe sowie die Lachenausbreitung und -verdampfung auf Wasser zu untersuchen. Auf den daraus gewonnenen Erfahrungen bauten spätere Experimente zur Lachenausbreitung und -verdampfung von flüssigem Wasserstoff auf verschiedenen Untergründen auf.

Parallel hierzu wurde ein Modell zum Ausbreitungs- und Verdampfungsverhalten entwickelt und in einen Rechencode umgesetzt. Der Code mußte in der Lage sein, transiente Freisetzungsraten zu berücksichtigen, Ausbreitung auf flüssigem und festem Untergrund, Feuchte im Untergrund sowie Eisbildung im Wasser zu simulieren, Reibung zwischen Untergrund und sich ausbreitender kryogener Flüssigkeit zu berücksichtigen sowie die verschiedenen Phasen der Ausbreitung wiederzugeben. Im Rahmen einer Arbeit waren jedoch nicht alle Randbedingungen abdeckbar, weshalb Einschränkungen z.B. auf eine radiale Lachenausbreitung gemacht werden müßten. Das Rechenmodell wurde anhand der gewonnenen experimentellen Ergebnisse validiert und auf ausgewählte Fälle angewendet.

Kapitel 2 beschreibt die grundlegenden Phänomene bei der Freisetzung einer kryogenen Flüssigkeit und gibt einen kurzen Literaturüberblick zu vorhandenen Experimenten und Modellen zur Lachenausbreitung und Verdampfung. In Kapitel 3 werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Versuchseinrichtungen, sowie die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zur Ausbreitung und Verdampfung von flüssigem Stickstoff (LN_2) und flüssigem Wasserstoff (LH_2) vorgestellt. Kapitel 4 beschreibt die dem speziell entwickelten LAuV-Code (**L**achen**A**usbreitung **u**nd **V**erdampfung) zugrundeliegenden Modelle und deren Lösungsverfahren. Die Verifikation des Modells anhand experimenteller Ergebnisse geht aus Kapitel 5 hervor. Im Kapitel 6 werden mit dem LAuV-Code Rechnungen zur Ausbreitung und Verdampfung von LH_2 vorgestellt, wie sie in ausgewählten Projekten zum Einsatz kommen.

Im letzten Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefaßt und die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf die noch laufenden und geplanten Arbeiten ab.

2. Grundlagen

Im folgenden werden zunächst die grundlegenden Phänomene bei einer Freisetzung von kryogenen Flüssigkeiten diskutiert (Kapitel 2.1). Dabei werden alle Vorgänge vom Austritt aus dem Behälter bis zur Verdünnung der entstehenden Gaswolke unter die Zündgrenze aufgezeigt. Der Schwerpunkt liegt im Punkt der Ausbreitung und Verdampfung einer kryogenen Flüssigkeit als Lache, welche das Thema dieser Arbeit ist. Daher werden die Vorgänge bei Freisetzung sowie die Ausbreitung der Gaswolke und evtl. Zündung im folgenden nur am Rande betrachtet. In Kapitel 2.2 wird der Stand des Wissens zu Experimenten, Modellen und Rechencodes der Lachenausbreitung und Verdampfung kryogener Flüssigkeiten dargelegt. Ausgehend davon wird in Kapitel 2.3 der Forschungsbedarf bezüglich Experiment und Rechnung aufgezeigt.

2.1. Phänomene

Bild 2.1 auf Seite 6 zeigt schematisch eine mögliche Freisetzung von flüssigem Wasserstoff. Anhand dieses Bildes sollen im folgenden die grundlegenden Phänomene einer Ausbreitung von flüssigem Wasserstoff bei einer Freisetzung aus einem Lagerungs-/Transportbehälter bzw. einer Übertragungsleitung erläutert werden.

Versagensarten und -mechanismen

Einen wesentlichen Einfluß auf den austretenden Massenstrom und den Störfallverlauf hat die Druckentlastung vom Systemdruck zum Umgebungsdruck. Die Entspannung auf Umgebungsdruck führt zur spontanen Verdampfung (Flash-Verdampfung) eines Teils der Flüssigkeit.

Ein mögliches auslösendes Ereignis ist der Abriß oder Aufriß einer Übertragungsleitung; aus dem Leck strömt dann die in der Leitung vorhandene Flüssigkeit unter Druck aus, im engsten Querschnitt entspannt sie sich und ein Teil wird durch die Druckentlastung spontan verdampft.

Im Rahmen des in der Einleitung erwähnten Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project [EQP91] ist vorgesehen, die großen Transport- und Lagerungsbehälter (Inhalt 3000m³) mit flüssigem Wasserstoff mittels Schlepper über die Elbe vom Liegeplatz zum Flughafen zu transportieren. Havariert ein Schiff mit einem solchen Behälter, kann Wasser in die Vakuumisolierung des Behälters eindringen; es würde dort erstarren und den Wärmetransport von außen nach innen erheblich vergrößern. Kann der entstehende Wasserstoffdampf nicht schnell genug abgeführt werden (z.B. durch begrenzte Abblaserate), steigt der Druck im Behälter an und kann zur Explosion des Tanks führen. In [LOD89] wird von einer solchen Explosion eines 700 kg LH_2-Tanks (~10m³) berichtet.

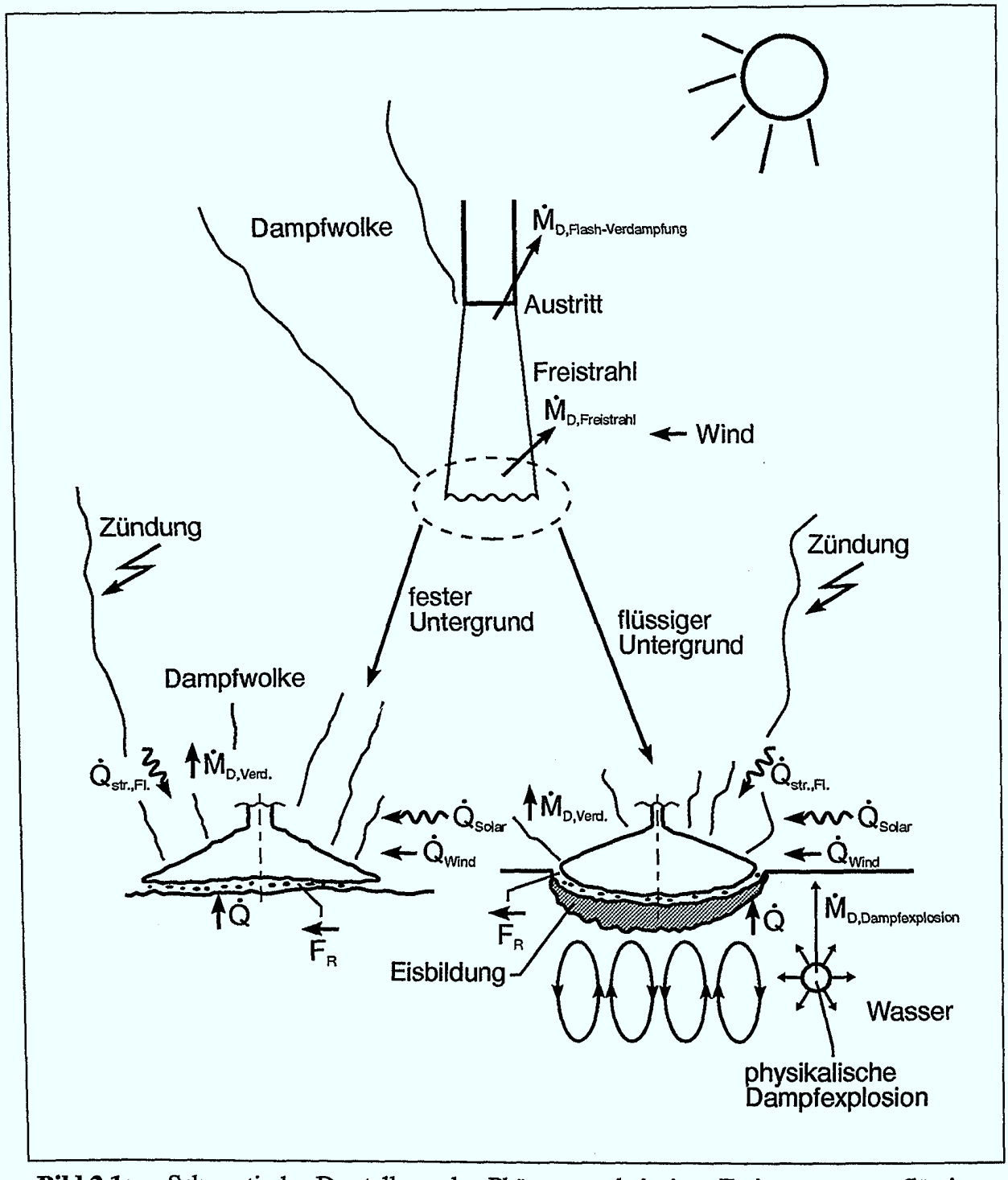


Bild 2.1: Schematische Darstellung der Phänomene bei einer Freisetzung von flüssigem Wasserstoff

Freistrahl

Ein spezieller Fall der Freisetzung unter Druckgefälle ist der **Freistrahl** (z.B. abgerissene Verbindungsleitung). Es handelt sich dabei um einen Zwei-Phasen-Strahl, an dessen

Grenzfläche ein turbulenter Wärme- und Stoffaustausch stattfindet, der zur Aerosolbildung führt. Durch die Entspannung auf Umgebungsdruck kommt es zur spontanen Verdampfung eines Teils der Flüssigkeit. Es handelt sich danach um einen Zwei-Phasen-Hochimpuls-Jet, an dessen Grenzfläche der Eintrag von Umgebungsluft (Entrainment) und Scherkräfte Turbulenzen erzeugen, die den Strahl von außen her verdünnen. Ein Teil des Impulses wird an die entstehende Dampfwolke übertragen. Nahe der Öffnung ist der Strahl vornehmlich impulsorientiert. In weiterer Entfernung von der Öffnung dominiert der Gravitationseinfluß über den Impuls [ZHA93, WEB91].

Lachenbildung, -ausbreitung und -verdampfung

Bei einer Freisetzung von flüssigem Wasserstoff kann sich auf geschlossenen Untergründen die Flüssigkeit ansammeln und eine Lache bilden, die sich entsprechend dem freigesetzten Volumen bzw. dem zugeführten Volumenstrom ausbreitet. Diese Lache ist neben der Spontanverdampfung und der Verdampfung, die unmittelbar aus dem Freistrahl resultiert, die Quelle für die entstehende Wasserstoff-Dampfwolke. Mit wachsender Lachenfläche wird auch die aus ihr pro Zeiteinheit verdampfende Masse größer. Bei Erreichen des stationären Zustandes ist die pro Zeiteinheit zugeführte Masse gleich der verdampften Masse. Nach Unterbindung der weiteren Massenzufuhr wird allmählich die Lachenfläche wieder kleiner, demzufolge nimmt auch die pro Zeiteinheit verdampfte Masse ab.

Weitere Einflußgrößen auf die entstehende und sich ausbreitende Lache gliedern sich in solche, die die Form, und in solche, die die Verdampfungsrate bestimmen.

Vor Beschreibung der Einflußgrößen sollen die Begriffe Verdampfung (Vaporization) und Verdunstung (Evaporation) gegeneinander abgegrenzt werden [SKR87]. Man spricht von Verdampfung, wenn der Dampf-Partialdruck an der Flüssigkeitsoberfläche gleich dem Umgebungsdruck ist. Dies entspricht dem Zustand bei Siedetemperatur. Bei einer Verdunstung ist der Dampf-Partialdruck über der Flüssigkeitsoberfläche geringer als der Umgebungsdruck. Dies ist der Fall, wenn die Flüssigkeitstemperatur unterhalb der Siedetemperatur liegt. Da eine Lache aus kryogener Flüssigkeit aufgrund der großen Temperaturdifferenz zur Umgebung immer auf Siedetemperatur bleibt, wird diese verdampfen und nicht verdunsten. Die aus der Umgebung aufgenommene Wärme dient daher zur Verringerung der Lachenmasse und nicht zur Erhöhung der Lachentemperatur.

Die Verdampfung aus der Lache wird unmittelbar durch die zufließende Wärme bestimmt. Die wesentlichen Wärmequellen sind:

- natürliche und erzwungene Konvektion
  Durch natürliche und erzwungene Konvektion (Wind) wird der Lache Wärme zugeführt. Bedingt durch die Durchmischung der entstandenen kalten Wasserstoffgaswolke mit

Umgebungsluft können sich unter Umständen ausgefrorene Bestandteile der Luft in der Lache niederschlagen [CAS60].

- Wärmestrahlung der Umgebung und evtl. einer brennenden Gaswolke
  Die Strahlungswärme aus der Umgebung besteht aus den Komponenten Sonneneinstrahlung minus Reflexion an der Flüssigkeitsoberfläche und Strahlung der Atmosphäre minus Abstrahlung der Flüssigkeit [SKR87, SHA78B]. Eine brennende Gaswolke kann der Lache über Wärmestrahlung und Konvektion Wärme zuführen.

- Wärme aus dem Untergrund
  Zwischen einer kryogenen Flüssigkeit und dem sich auf Umgebungstemperatur befindenden Untergrund bildet sich wegen der anfangs großen Temperaturdifferenz ein Dampffilm aus, der zunächst den Wärmetransport aus dem Untergrund in die Lache stark behindert (Leidenfrost-Phänomen). Weil die Reibungskräfte im Dampffilm zu groß sind, um den entstehenden Dampf zu den Seiten hin abzuführen, wird die untere Oberfläche der Flüssigkeit permanent durch aus dem Dampffilm aufsteigende Dampfblasen gestört, so daß sich dort eine periodische Bewegung der Grenzschicht Gas/Flüssigkeit zeigt, die der pro Zeiteinheit entstehenden Dampfmenge und damit der Temperatur der Oberfläche des Untergrundes proportional ist. Bei Abkühlung der Oberfläche wird die zeitlich entstehende Dampfmenge kleiner: der Dampffilm wird instabil und bricht partiell zusammen, wodurch sich der Wärmeübergang zur Oberfläche verbessert. Dieser Bereich des Übergangssiedens wird in Sekunden durchlaufen; er ist durch eine rasche Temperaturabnahme der Oberfläche gekennzeichnet. Man erreicht dann den Bereich des Blasensiedens, wo mit abnehmender Temperatur der Oberfläche auch der Wärmestrom zwischen Untergrund und Flüssigkeit wieder kleiner wird.
  Reale Untergründe sind inhomogen, haben eine Oberflächenrauhigkeit, können Wasser enthalten, Poren besitzen (durch die die kryogene Flüssigkeit eindringen kann), oder gar Schüttungen (Sand) sein. Die Verdampfungsrate wird dadurch in entscheidender Weise beeinflußt.

  Auf flüssigen Untergrund wie Wasser können die oben beschriebenen Vorgänge des Film-, Übergangs- und Blasensiedens prinzipiell übertragen werden. Durch lokale Druckunterschiede im Dampffilm können Wechselwirkungen mit dem flüssigen Untergrund auftreten, die den Wärmestrom beeinflussen.
  Bei einem flüssigen Untergrund führt die Abkühlung der Oberfläche zur Ausbildung einer Konvektionsströmung im Untergrund, die kalte Flüssigkeit in tiefere Schichten und warme Flüssigkeit an die Oberfläche bringt. Bei Wasser mit einer Ausgangstemperatur unter 4°C ist das Einsetzen einer Konvektionsströmung jedoch fraglich. Nach Unterschreiten der Gefriertemperatur bildet sich an der Wasseroberfläche unter Abgabe der Erstarrungsenthalpie Eis. An der Unterseite der Eisschicht bleibt aber bei entsprechenden

Ausgangstemperaturen die Konvektionsströmung erhalten, welche das Eiswachstum verzögert.

Unter Umständen kann es durch thermische Wechselwirkungen zwischen der tiefkalten Flüssigkeit und dem sich auf Umgebungstemperatur befindenden Wasser zu einer (u.a. aus Fragestellungen der Reaktortechnik bekannten) Dampfexplosion kommen. Unabhängig von den verschiedenen Stoffwerten einer Metallschmelze und einer kryogenen Flüssigkeit ist der grundlegende Mechanismus der Dampfexplosion in beiden Fällen der gleiche [SAI93]. Es handelt sich dabei aber nicht um eine chemische Reaktionen, sondern um thermische Wechselwirkungen als Folge einer plötzlichen Verbesserung des Wärmeübergangs zwischen zwei Flüssigkeiten auf unterschiedlichem Temperaturniveau und des dadurch bedingten spontanen Phasenwechsels. Dabei ist die Zeit, in der die Wärme übertragen wird, klein gegenüber der Expansionszeit des entstehenden Dampfes und außerdem ist eine sehr intensive Vermischung beider Komponenten Voraussetzung. Unter diesen Bedingungen kann ein wesentlicher Teil der übertragenen thermischen Energie in mechanische Arbeit umgesetzt werden. Außerdem können kurzzeitig große Mengen gasförmigen Wasserstoffs in die Atmosphäre abgegeben werden.

Die Einflußgrößen, die Einfluß auf die Form der Lache haben, lassen sich in geometrische Bedingungen wie Bebauung und Topographie, in fluiddynamische Bedingungen, wozu in erster Linie der Wind zählt, und in Bedingungen, die vom Untergrund abhängen gliedern.

- Durch Bebauung und Topographie wird eine Lache in ihrer Ausbreitung begrenzt. Beispiele sind die Ufer von Flußläufen, Kaimauern und Straßenberandungen bzw. Straßengräben. An Begrenzungen staut sich die Lache auf und wird reflektiert. Bei Straßen und Plätzen, die zur Ableitung des Regens meist mit Gefälle angelegt sind, folgt die Lache dem Gefälle. Darüber gelangt sie dann auch in Schächte und Kanäle des Abwassersystems. In Bodenvertiefungen sammeln sich Lachenreste, die nur durch Verdampfen verschwinden.
- Scherkräfte zwischen Wind und Lachenoberfläche beeinflussen die Lachengeschwindigkeit. Abhängig von der Richtung der beiden Geschwindigkeiten führt dies auf der windzugewandten Seite zu einer Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit und auf der windabgewandten zu einer Zunahme. Bei Flüssen sorgt die Fließgeschwindigkeit dafür, daß sich die Lache vom Freisetzungsort fortbewegt.
- Auf Wasser als Untergrund verdrängt die Lache eine ihrem Eigengewicht entsprechende Menge Wasser. Sie dringt also etwas unter den Wasserspiegel und muß daher bei der Ausbreitung an der Lachenfront Verdrängungsarbeit leisten. Durch Wellenbewegungen der Wasseroberfläche kann eine Lache auseinandergerissen werden. Auf festem, unversiegeltem Untergrund besteht die Möglichkeit, daß ein Teil der Lache versickert; er steht dann für die Ausbreitung nicht zur Verfügung, wodurch die Lachenfläche insgesamt

kleiner ausfällt als bei versiegelter Oberfläche. Oberflächenrauhigkeiten behindern die Ausbreitung und führen gegenüber einer Ausbreitung auf einer glatten Oberfläche zu einer kleineren Lachenfläche.

Ausbreitung der Gaswolke

Die sich bildende Gaswolke setzt sich zusammen aus dem Anteil, der unmittelbar durch die Druckentlastung und den Freistrahl in den gasförmigen Zustand übertritt, und dem Anteil, der mittelbar aus der Verdampfung der Lache resultiert. Die Wolke hat bereits wenige Grad über Siedetemperatur Auftrieb gegenüber der umgebenden Luft. Eine Durchmischung der Gaswolke mit Umgebungsluft findet hauptsächlich in den Randbereichen der Gaswolke statt, was dazu führt, daß sich dieser Bereich im Vergleich zum Zentrum der Wolke über der Lache schneller erwärmt und somit stärkeren Auftrieb erfährt. Durch den Wind kann z.B. die Wasserstoff/Luft-Gaswolke abgetrieben werden; der Wind kann auch einen zusätzlichen Turbulenzeintrag in die Wolke bringen.

Zündung

Bei Erreichen einer Zündquelle kann die (teilweise) zündfähige Wolke explodieren, wobei es sich im Freien aber wohl stets um eine Deflagration handelt. Der Übergang einer Deflagration zur Detonation konnte bislang nur in ganz oder teilweise geschlossenen Räumen beobachtet werden. Hier neigen Wasserstoff/Luft-Gemische, hauptsächlich wegen der hohen Verbrennungsgeschwindigkeit, eher zur Detonation als beispielsweise Erdgas/Luft-Gemische. Im Freien wurden bislang keine Deflagrations-Detonationsübergänge ohne Initialdetonation beobachtet [EIC92].

2.2. Stand des Wissens

2.2.1. Vorhandene Experimente

In der Literatur wird relativ häufig über Untersuchungen zur störfallbedingten Freisetzung von Flüssigerdgas (LNG) berichtet. Das Interesse daran entstand in den 70er und 80er Jahren, als der verstärkte Einsatz und Transport von Erdgas bis hin zur technischen Einführung von LNG propagiert wurde. Vor diesem Hintergrund wurde eine Reihe von Experimenten und Berechnungen zur Ausbreitung von LNG durchgeführt.

In Tabelle 2.1 auf Seite 12 sind alle im Rahmen einer Literaturrecherche gefundenen Ausbreitungs- und Verdampfungsversuche aufgeführt. Die Ausbreitung des LNG auf Wasser als Untergrund wurde häufiger untersucht als die Ausbreitung auf festem Untergrund. Dies rührt u.a. von der Problemstellung her, nämlich dem Transport großer Mengen LNG auf dem Seeweg. Die Versuche mit flüssigem Stickstoff (LN_2) dienten häufig zum Testen der Versuchseinrichtung; es existieren davon keine Meßwertaufzeichnungen.

LNG ist wie flüssiger Stickstoff oder flüssiger Wasserstoff (LH_2) eine kryogene Flüssigkeit. Weil LNG aus Komponenten mit verschiedenen Siedepunkten besteht, ist die Siedetemperatur von der jeweiligen Zusammensetzung abhängig. Bei lagerungsbedingten Abdampfverlusten verdampft zuerst die niedriger siedende Komponente. Dies bezeichnet man auch als "Alterung". Beim Verdampfen von LNG aus offenen Lachen spricht man ebenfalls von einem "Alterungsprozeß", weil auch aus der Lache zunächst nur die niedriger siedenden Bestandteile verdampfen. Dies führt zu speziellen Phänomenen der LNG-Freisetzung, wie z.B. Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten oder Schaumbildung.

Es wurden verschiedene Experimentaufbauten zur Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens einer Lache aus kryogener Flüssigkeit verwendet (Ausbreitungsexperimente). In den ersten Versuchen wurde die Flüssigkeit aus einem Behälter, der über der Oberfläche angebracht war, ausgeschüttet. In späteren Versuchen hat man dann dafür gesorgt, den Anfangsimpuls zu minimieren, um die Ausbreitung aufgrund der Schwerkraft von anderen Effekten, die den Impuls zuzuordnen sind, zu trennen. So wurden z.B. auf einer Wasseroberfläche angeordnete Behälter mit kryogener Flüssigkeit abgetaucht und dadurch ein Aufschwimmen der kryogenen Flüssigkeit durch das einströmende Wasser erreichte.

Eine gute Zusammenfassung über bislang durchgeführte Ausbreitungsexperimente mit kryogenen Flüssigkeiten (u.a. LPG, LNG, LN_2) gibt Prince [PRI85]. Ziel der in seiner Literaturrecherche zusammengestellten experimentellen Ergebnisse war die Validierung des Quellterm programms GASP [WEB86A].

Tabelle 2.1: Historischer Überblick bislang durchgeführter Ausbreitungs- und Verdampfungsexperimente mit kryogenen Flüssigkeiten über Wasser und Boden

Untergrund	durchgeführt von	freigesetzte Flüssigkeit	Jahr	Literatur
Wasser	Bureau of Mines, Bruceton, USA	LNG, LN_2	1968-1969	BUR70A, BUR70B
	Bureau of Mines, Pittsburgh,USA	LNG, LN_2	1971-1972	BUR72A
	Esso Research and Eng. Company, Matagorda Bay, Texas, USA	LNG	1971	FEL72
	Shell Research Ltd., UK	LNG	1973	BOY73
	US Coast Guard, China Lake, Kalifornien, USA	LNG	1973	PAR80
	Shell Research Ltd. at Sea	LNG	1973	KNE74
	LNG Research Centre, MIT, USA	LN_2, LCH_4, LC_2H_6	1975	DRA75A, JEJ74
	Japan Gas Association, Sodegaura, Japan	LNG	1975	PRI85
	LNG Research Centre, MIT, USA	LN_2, LCH_4	1976	DIN77
	LNG Research Centre, MIT, USA	LNG, LPG	1977	REI78A
	Lawrence Livermore Laboratory, China Lake, Kalifornien, USA	LNG	1978	KOO79
	Lawrence Livermore Laboratory, China Lake, Kalifornien, USA	LN_2, LNG	1980	KOO82, ERM82
	Shell Research Ltd., Maplin Sands, UK	LNG, LPG	1980	COL82, COL80
	LNG Research Centre, MIT, USA	LN_2, LPG, LCH_4	1979-1981	CHG82
Boden	Arthur D. Little Inc., USA	LH_2	1960	ADL60
	TRW Systems, USA	LNG	1968	SER68
	American Gas Association, San Clemente, California, USA	LNG	1971-1972	DUF74
	Gaz de France, Nantes, France	LNG	1972	HUM72
	American Gas Association, Ohio, USA	LNG	1974	GID74
	Japan Gas Association, Sodegaura, Japan	LNG	1974-1975	PRI85
	LNG Research Centre, MIT, USA	LN_2, LNG, LCH_4	1975	DRA75B
	LNG Research Centre, MIT, USA	LNG	1976	REI80, REI78B
	NASA, White Sands Test Facility	LH_2	1980	CHI86, WIT83
	British Gas, Midlands Research Station, UK	LNG	1986	MOO86
	Lawrence Livermore Laboratory, Nevada, USA	LNG	1987	CHN92

In einer weiteren Art von Experimenten (Verdampfungsexperimente) wird die Wärmeeinleitung in eine Lache aus kryogener Flüssigkeit auf isolierten Probekörpern gemessen. Aus dem zeitlichen Verlauf des Massenverlustes der Lache infolge Verdampfung wird der übertragene Wärmestrom berechnet. Eine simultane Messung von Verdampfung und Ausbreitung ist nach derzeitigem Kenntnisstand bislang nicht durchgeführt worden. Die Probleme ergeben sich aus dem nötigen Aufwand für die Meßtechnik. In dem Vorhaben der China-Lake-Versuche war z.B. eine direkte Messung der Wärmeeinleitung aus dem Untergrund mit sog. Wärmeleitplatten vorgesehen [KOO80], entsprechende Ergebnisse sind später jedoch nicht erwähnt worden. Experimente zur instationären Wärmeeinleitung in eine Lache aus kryogener Flüssigkeit werden von mehreren Autoren durchgeführt [WEL82, ZAB60, BOY73, DIN77, DRA75A, DRA75B, REI80, REI78A, REI78B].

Die wichtigsten Experimente und Ergebnisse der separaten Ausbreitungs- und Verdampfungsversuche sind nachfolgend zusammengefaßt.

- Drake [DRA75B] untersucht in Laborexperimenten den Einfluß der Feuchte im Sandboden auf die LNG- und LN_2-Verdampfung. Der untersuchte Feuchtigkeitsanteil liegt zwischen 0 und 10%. Eine Abhängigkeit der in den Boden eingedrungenen Menge kryogener Flüssigkeit vom Feuchtegrad des Bodens kann nicht festgestellt werden. Einerseits lassen die großen Poren bei trockenem Sand die kryogene Flüssigkeit durch die Oberfläche treten, andererseits ist mit zunehmender Feuchte zusätzlich ein verstärktes Aufbrechen der Oberfläche zu beobachten, was das Eindringen ermöglicht. Dadurch kommt es unter anderem zu Ansammlungen der kryogenen Flüssigkeit im Wannenboden. Ein Zusammenhang zwischen der dort angesammelten Masse (damit auch der verdampften Masse) und der Feuchte kann nicht festgestellt werden.
- Reid untersucht die Verdampfung von LNG über Boden, Sand, Beton, Stein, Polyuretan und Aluminium [REI80] und gibt die ermittelten thermischen Kenngrößen der untersuchten Untergründe an; er stellt experimentell einen Zusammenhang der Verdampfungsrate mit der Zeit als $\sqrt{t}$-Abhängigkeit fest [REI78A, REI78B].
- Erste Ausbreitungsversuche zur Abschätzung des von LH_2 ausgehenden Gefahrenpotentials werden Ende der 50er Jahre durchgeführt [CAS60, ZAB61]. Es werden jedoch nur visuelle Aufzeichnungen von der Wolke gemacht. Eine Instrumentierung zur Messung der Lachenausbreitung ist nicht vorhanden [ADL60].
- Zabetakis [ZAB60] hat zusätzliche Verdampfungsversuche mit LH_2 unternommen. Den Paraffinprobenkörper hat er in einem doppelwandigen vakuumisolierten Behälter (Dewar) von ca. 6,5 cm Durchmesser eingebracht und nach Aufgabe des LH_2 zur Ermittlung der Verdampfungsrate den zeitabhängigen Massenverlust gemessen. Um die Verdampfungsrate, die durch die bereits erwähnten thermohydraulischen Vorgänge an der

Oberfläche anfangs stark ansteigt, rechnerisch mittels Gleichung 2.6 auf Seite 16 zu approximieren, ersetzt er die Zeit t durch $t=t+t^*=t+20s$. Dadurch erreicht er eine gute Übereinstimmung für größere Zeiten.

Die ersten und einzigen Feldexperimente mit LH_2-Freisetzung wurden von der NASA an der White Sands Test Facility durchgeführt [WIT83] mit dem Ziel, das Dispersionsverhalten einer Wasserstoffwolke detailliert zu untersuchen. In fünf Tests werden 5,7 m³ LH_2 in einem Zeitraum zwischen 35 und 85 s, in einem Test 2,7 m³ LH_2 in 18s und in einem weiteren 3,2 m³ LH_2 in 120 s bodennah auf eine vorher verdichtete Sandoberfläche durch einen speziellen Diffusor mit Heliumdruckluft freigesetzt. Eine Messung des Lachendurchmessers ist nur in einem Versuch (Versuch 6) erfolgt. In radialer Richtung vom Freisetzungszentrum werden auf dem Untergrund Thermoelemente jeweils im Abstand von 1m zueinander installiert. Bei diesem Versuch werden 8,8 kg/s Wasserstoff über 41 s freigesetzt. Während der Freisetzung kommen aber nur die Thermoelemente 1 und 2 (1 m und 2 m vom Freisetzungszentrum entfernt) in Kontakt mit dem LH_2. Thermoelement 3 (3m) zeigt keine Temperaturänderung [CHI86]. Das ist der bislang einzige Anhaltspunkt für eine Untersuchung der Lachenausbreitung von LH_2.
Nach Versuchsende werden Furchen im vor Versuchsbeginn verdichteten Sand beobachtet. Chirivella behauptet, daß die Verdampfung und Lachenausbreitung in seinen Versuchen weniger von den Eigenschaften des Untergrundes beeinflußt wird. Vielmehr trage neben Druckentlastung (Flashverdampfung) die Art der Ausbringung selbst dazu bei, daß sich die Dispersionsrate erhöht und damit das zur Ausbreitung zur Verfügung stehende Flüssigkeitsvolumen reduziert [CHI86].
Auf diesen Fall der Lachenausbreitung wird von [CHI86] das mechanistische Modell von Fay [FAY73] mit einer empirisch ermittelten Verdampfungsrate angewendet. Danach beträgt der maximale Lachenradius $R= 10.85m$.

Danach sind keine weiteren Experimente zur LH_2-Ausbreitung und -Verdampfung bekannt geworden.

2.2.2. Theoretische Grundlagen

2.2.2.1. Verdampfung

Der Gleichgewichtszustand einer Lache aus kryogener Flüssigkeit wird bestimmt durch die in die Lache fließenden Wärmeströme. Signifikante Beiträge sind zu erwarten von der Wärmeleitung aus dem Untergrund ($\dot{q}_{Ob}$) und im Falle einer brennenden Lache durch die Strahlungswärme der Flamme ($\dot{q}_{str,Fl}$). Die Gesamtwärmestromdichte ergibt sich aus der Summe dieser beiden Beiträge, des Beitrages durch erzwungene Konvektion ($\dot{q}_{konv}$) und Wärmestrahlung der Umgebung ($\dot{q}_{str,Atm}$) [SKR87, WEL82]:

$$\dot{q}_{ges} = \dot{q}_{konv} + \dot{q}_{str,Fl} + \dot{q}_{str,Atm} + \dot{q}_{Ob} \cdot \qquad (2.1)$$

Die durch erzwungene Konvektion (Wind) aus der Umgebung an die Lache abgegebene Wärme ist abhängig von der Windgeschwindigkeit. Die dabei auftretende Wärmestromdichte ist nach dem Ansatz von [SHA78B]

$$\dot{q}_{konv} = 10^{-3} K \cdot c_L^{0,78} r^{-0,22} (T_U - T_l) \rho_{m,L} c_{p,L} \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{0,67} . \qquad (2.2)$$

Der Ansatz bezieht sich auf eine kreisförmige Lache mit dem Lachenradius r. K ist eine Konstante und c_L die Windgeschwindigkeit. Die Stoffwerte sind die der Umgebungsluft. Der Ansatz beruht auf Wärme- und Stoffübergangsbetrachtungen und gilt für Lufttemperaturen von 5-30°C und Windgeschwindigkeiten von 0 bis 7m/s. Gleichung 2.2 liefert Wärmestromdichten, die mit wachsendem Radius kleiner werden. Rechenergebnisse für LNG, LN_2 und LH_2 sind in Tabelle 2.2 auf Seite 20 angegeben.

Der Strahlungswärmeaustausch zwischen Lache und Umgebung besteht aus den Komponenten Sonneneinstrahlung, Reflexion an der Flüssigkeitsoberfläche, Strahlung der Atmosphäre und Abstrahlung der Flüssigkeit [SKR87, SHA78B]. Den Betrag des über Wärmestrahlung in die Lache fließenden Wärmestroms kann man mit Hilfe des Stefan-Boltzmann Gesetzes abschätzen, wobei die Emissivität der Flüssigkeitsoberfläche ε =0,95 und die der Atmosphäre ε =0,75 ist [WEL82]. Das Reflexionsvermögen (Albedo) der Flüssigkeit wird mit 0,14 angesetzt. Somit ergibt sich für einen wolkenlosen Sommertag (Solarstrahlung ≈ 1,4 kW/m^2) ein maximaler Wärmeeintrag in die Lache durch Strahlungsaustausch mit der Umgebung (Lufttemperatur T_L) von

$$\dot{q}_{str,Atm.} = 0,86\dot{q}_{sol} - 0.95\varsigma T_l^4 + 0,75\varsigma T_L^4 = 1,6\frac{kW}{m^2} , \qquad (2.3)$$

allgemein für kryogene Flüssigkeiten, weil die Wärmestrahlung der kalten Flüssigkeitslache (Temperatur T_l) vernachlässigbar ist.

Eine brennende Gaswolke kann der Lache über Wärmestrahlung und Konvektion Energie zuführen. Dabei ist der Anteil der Konvektion unbedeutend [ZAB67]. Die Wärmeeinstrahlung einer Wasserstoffflamme in die Lache wird aufgrund experimenteller Untersuchungen, in denen der Einfluß einer stationär brennende Gaswolke auf die Verdampfungsrate der Flüssigkeit in einem Dewar untersucht wird, mit ca. 8,7 kW/m^2 angegeben [ZAB67]. In neueren japanischen Messungen wird der Beitrag der Wärmeeinstrahlung in die Lache durch die über ihr brennende Gaswolke untersucht; es ergibt sich eine Wärmestromdichte von 11,9 kW/m^2 [URA86], die später im Vergleich der Wärmequellen verwendet werden soll.

Zur Betrachtung des Wärmestromes durch die Oberfläche in die Lache aus kryogener Flüssigkeit wird zwischen Wasser und festem Untergrund differenziert. Aus Freisetzungstests

mit LNG und LN_2 auf Wasser, wobei keine nennenswerte Eisbildung beobachtet wird [BOY73, BUR72A], kann man schließen, daß während der Ausbreitung und Verdampfung nur stabiles Filmsieden vorliegt. Sonst wäre die Wasseroberfläche soweit abgekühlt worden, daß sich Eis gebildet hätte. Weil die Leidenfrosttemperatur für diese beiden Flüssigkeiten mindestens 100 K unter der Erstarrungstemperatur des Wassers liegt, hätte sogar eine recht massive Eisschicht gebildet werden müssen. Eine kleine Temperaturabsenkung der Oberfläche hingegen, wie sie ohne Eisbildung zu vermuten ist, hat keinen großen Einfluß auf den Wärmestrom, und man kann in guter Näherung einen konstanten Wärmestrom annehmen. Diese Vereinfachung wird bei Ausbreitungsrechnungen von vielen Autoren getroffen [GEO79, MAY75, OPS80, SHA78A]. Prince [PRI85] vertritt sogar den Standpunkt, daß es keinen Unterschied im Wärmestrom macht, ob es sich beim Untergrund um Eis, Wasser oder Salzwasser handelt. Im Gegensatz zu den Versuchen im technischen Maßstab ist in kleinen Laborversuchen häufig Eisbildung aufgetreten [BOY73, BUR72A, OPS77, BUR72B]. Daher wurde von manchen Autoren die Notwendigkeit gesehen, auch die Eisbildung in den Ansätzen zur Berechnung des Wärmestromes zu berücksichtigen [OPS77, WAI83].

Für die in einem festen Untergrund der Lache transportierte Wärme gilt mit der Annahme, daß das Material homogen und isotrop ist, die bekannte Fourier-Gleichung:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\nabla^2 T + \frac{\Phi}{\rho c_p} . \tag{2.4}$$

a ist die Temperaturleitfähigkeit und Φ beschreibt die volumenbezogene Wärmeerzeugungsrate, wie sie z.B. durch das Freiwerden der Erstarrungsenthalpie beim Phasenübergang von im Untergrund vorhandenem Wasser zu Eis gegeben ist.

Unter Vernachlässigung eines Wärmeübergangskoeffizienten an der Oberfläche existiert eine häufig verwendete und einfache eindimensionale analytische Lösung von Gleichung 2.4 für kleine Zeiten t aus der Richtungsableitung der Temperatur und der Wärmeleitfähigkeit λ [CSL59]:

$$\dot{q}(z,t) = -\lambda\frac{\partial T}{\partial z} = -\sqrt{\frac{\lambda\rho c_p}{\pi t}}\Delta T^* e^{-\frac{z^2}{4at}} . \tag{2.5}$$

ΔT ist die Temperaturdifferenz zwischen Siedetemperatur der kryogenen Flüssigkeit und Ausgangstemperatur des Untergrundes, z bezeichnet die Koordinate in die Tiefe des Untergrundes ausgehend von der Oberfläche. Die Wärmestromdichte an der Oberfläche erhält man, wenn man die Tiefe $z=0$ setzt. Dann reduziert sich Gleichung 2.5 auf:

$$\dot{q}(z=0,t) = -\sqrt{\frac{\lambda\rho c_p}{\pi t}}\Delta T . \tag{2.6}$$

Durch Verdampfung an der Oberfläche wird die Temperatur im Untergrund in Abhängigkeit vom an der Oberfläche entzogenen Wärmestrom und dem Abstand zur Oberfläche absinken. Die Eindringtiefe $\bar{z}$ bezeichnet die Tiefe im Untergrund, bis zu der sich die Temperatur in der Zeit t noch ändert:

$$\bar{z} = \sqrt{12at} \ . \tag{2.7}$$

Die hydrodynamischen Vorgänge zwischen Untergrund und Lache können die dort übertragbare Wärme beeinflussen. Es existiert eine Reihe von Lösungsansätzen für die Wärmestromdichte an der Oberfläche in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen glatten metallischen Oberflächen und einer Flüssigkeit. Die hier verwendeten und nachfolgend genauer beschriebenen Ansätze verschiedener Autoren werden von Brentari [BRN65] u.a. für LN_2, LH_2, flüssigen Sauerstoff (LO_2) und flüssiges Helium (LHe) experimentell bestätigt. Die hierzu durchgeführten Experimente unterscheiden sich im Aufbau durch die unterschiedliche Art der Wärmezufuhr (Heizdrähte, Kondensationsröhrchen und ebene Heizplatten) und führen zu verschiedenen Ergebnissen, die in die Korrelationen durch einen Korrekturterm, der die Krümmung der Oberfläche berücksichtigt, Eingang gefunden haben. Die im folgenden zitierten Korrelationen gelten für Versuchsstände mit ebenen Heizplatten; hier ist der Korrekturterm gleich 1.

Die Wärmestromdichte an der Oberfläche kann im Filmsiedebereich durch die Beziehung von Breen und Westwater bestimmt werden [BRN65]. Auf Basis der Taylor'schen Instabilitäts-Theorie und unter Annahme der Aufrechterhaltung einer minimalen Wellenlänge an der unteren Oberfläche der siedenden Flüssigkeit, welche die Dampfblasen in die kryogene Flüssigkeit aus dem Dampffilm unter ihr verursacht, ist der Wärmestrom durch

$$\dot{q}_{FB} = \left(4{,}94 \frac{(\Delta\rho)^{0{,}375}}{\sigma^{0{,}125}} \right) \left[\frac{\lambda_v^3 \Delta h'_{fg} \rho_v}{\eta_v} \right]^{0{,}25} (\Delta T)^{0{,}75} \tag{2.8}$$

gegeben. $\Delta h'_{fg}$ ist die effektive Verdampfungsenthalpie, die allgemein für kryogene Flüssigkeiten durch

$$\Delta h'_{fg} = \frac{\left[\Delta h_{fg} + 0{,}34 c_{p,l} \Delta T \right]^2}{\Delta h_{fg}} \tag{2.9}$$

gegeben ist. Der Anwendungsbereich der Filmsiedekorrelation wird mit sinkender Temperaturdifferenz durch die minimale Filmsiede-Wärmestromdichte (Minimum Film Boiling Point, MFB) begrenzt. Die Korrelation von Zuber [ZUB59] basiert ebenfalls auf der Taylor'schen Instabilitäts-Theorie unter Annahme einer kritischen Oberflächenwellenlänge, deren Amplitudenvergrößerung mit sinkender Temperatur der Oberfläche den Dampffilm zusammenbrechen läßt. So kann Flüssigkeit in direkten Kontakt mit dem Untergrund kommen, wodurch sich der Wärmeübergang zwischen Oberfläche und Flüssigkeit verbessert.

$$\dot{q}_{MFB} = \frac{\pi^2}{60}\sqrt[4]{\frac{4}{3}}\rho_v \Delta h_{fg} \sqrt[4]{\sigma g \frac{\rho_l - \rho_v}{(\rho_l + \rho_v)^2}} \,. \tag{2.10}$$

Im Bereich des Blasensiedens ist die Wärmestromdichte nach Kutateladze [BRN65] in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz durch

$$\dot{q}_{NB} = 4{,}87 \cdot 10^{-11} \left[\frac{c_{p,l}^{1,5} \lambda_l \rho_l^{1,282} p_U^{1,75}}{(\Delta h_{fg} \rho_v)^{1,5} \sigma^{0,906} \eta_l^{0,626}} \right] (\Delta T)^{2,5} \tag{2.11}$$

gegeben. Nach oben hin ist der Bereich des Blasensiedens begrenzt durch die kritische Heizflächenbelastung (KHB=DNB, Departure from Nucleate Boiling), die nach Kutateladze dann vorliegt, wenn durch den Raum zwischen den sich von der Oberfläche ablösenden Dampfblasen gerade soviel Flüssigkeit zur Oberfläche nachströmen kann, wie zur Bildung neuer Dampfblasen benötigt wird.

$$\dot{q}_{DNB} = 15{,}7 \Delta h_{fg} \rho_v^{0,5} (\sigma \Delta \rho)^{0,25} \,. \tag{2.12}$$

Es sei angemerkt, daß die Stoffwerte temperaturabhängig sind. Für die gasförmige Phase sind sie auf die mittlere Temperatur $\overline{T} = \frac{T_S + T_{Ob}}{2}$ zwischen Untergrund und kryogener Flüssigkeit bezogen.

Im Übergangssiedebereich (ÜS) zwischen Film- und Blasensieden nimmt die Wärmestromdichte mit steigender Oberflächentemperatur ab. I.a. wird dieser Bereich sehr schnell durchlaufen (im Sekundenbereich), wodurch enorme Schwierigkeiten auftreten, die Wärmestromdichte in diesem Bereich zu messen. Der Bereich des Übergangssiedens ist bislang wenig erforscht und die genauen Vorgänge sind bis heute nicht vollständig bekannt. Daher soll ein Verlauf der Wärmestromdichte über der Oberflächentemperatur T_{Ob} und damit der Temperaturdifferenz ΔT im Bereich des Übergangssiedens entsprechend Gleichung 2.13 angenommen werden.

$$\dot{q}_{\ddot{U}S} = \frac{\dot{q}_{DNB}}{1 + \left(\frac{\dot{q}_{DNB}}{\dot{q}_{MFB}} - 1 \right) \frac{T_{Ob} - T_{DNB}}{T_{MFB} - T_{DNB}}} \,. \tag{2.13}$$

In Bild 2.2 ist die aus obenstehenden Gleichungen ermittelte sogenannte Nukijama-Kurve, d.h. die Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz, für Wasserstoff angegeben und mit experimentellen Untersuchungen verschiedener Autoren verglichen. Die angegebenen Bereiche bezeichnen die Grenzlinien, in denen sich die Versuche bewegen. Qualitativ ist der Verlauf für andere Flüssigkeiten identisch. Durch die verschiedenen

Stoffwerte ergeben sich jedoch quantitative Unterschiede. Brentari [BRN65] validierte die beschriebenen Korrelationen speziell für kryogene Flüssigkeiten.

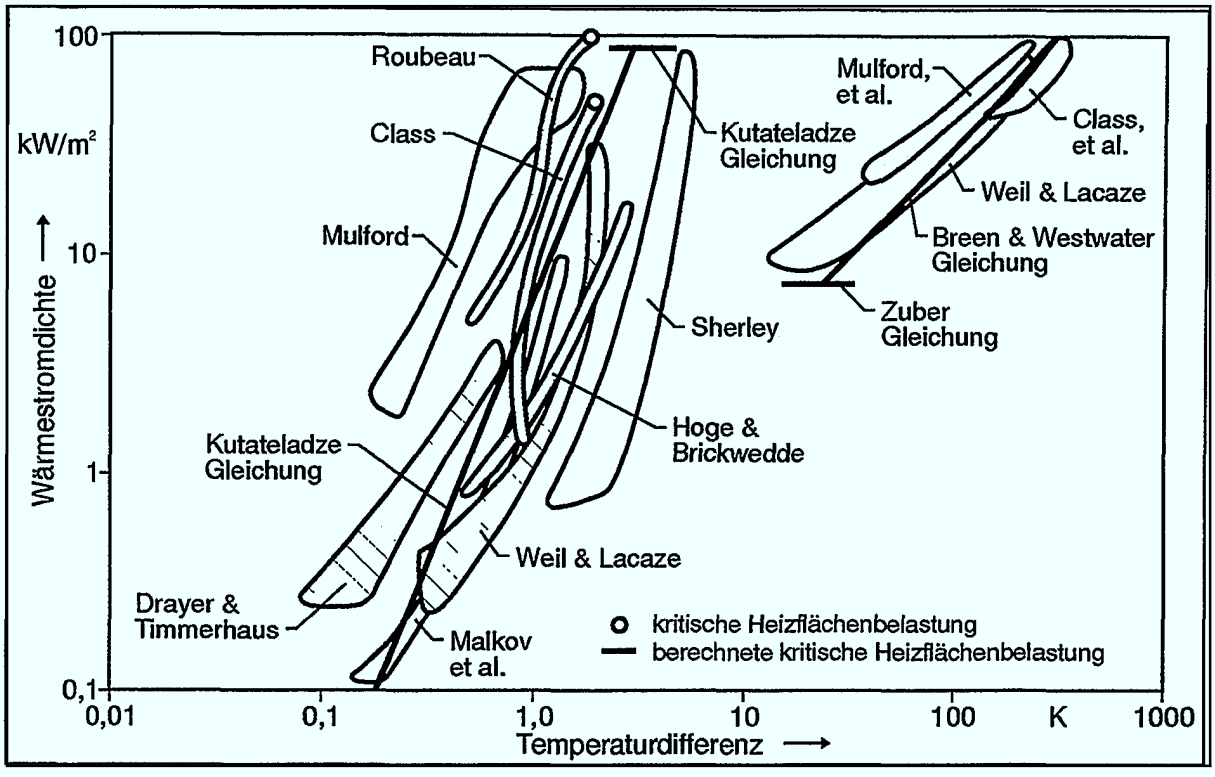


Bild 2.2: Nukijama-Kurve: Experimentell ermittelte und errechnete Wärmestromdichten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Flüssigkeit für Wasserstoff [BRN65]. Die angegebenen Bereiche bezeichnen die Grenzlinien in denen sich die jeweiligen experimentellen Ergebnisse bewegen.

In Tabelle 2.2 sind die Beiträge der verschiedenen Wärmequellen der Verdampfung für die hier betrachteten kryogenen Flüssigkeiten LNG, LN_2 und LH_2 aufgeführt, deren Summe die Wärmeeinleitung in eine Lache einer kryogenen Flüssigkeit wiedergibt (Gleichung 2.1 auf Seite 15). Es wird eine kreisförmige Lache von $1m^2$ Fläche angenommen. Zur Ermittlung der konvektiven Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom Lachenradius wird Gleichung 2.2 auf Seite 15 angewendet. Nach [SHA78B] kann die darin enthaltene empirische Konstante für kryogene Flüssigkeiten mit $K=1\ m^{0,44}/s^{0,22}$ angesetzt werden. Die Strahlungswärme der Wasserstoffflamme und der LNG-Flamme resultiert aus experimentellen Untersuchungen [BLA82, RAJ75]. Die Strahlungswärme der Umgebung ist das Ergebnis der bereits durchgeführten Abschätzung gemäß Gleichung 2.3 auf Seite 15. Der Beitrag der Wärmeeinleitung aus dem Untergrund ergibt sich aus der Nukijama-Kurve entsprechend der Temperaturdifferenz zwischen Untergrund und kryogener Flüssigkeit.

Tabelle 2.2: Beiträge der verschiedenen Wärmequellen, welche die Verdampfung einer Lache aus kryogener Flüssigkeit von 1m² Fläche auf einer Wasseroberfläche beeinflussen (Windgeschwindigkeit 5 m/s).

Wärmequelle (kW/m²)	Flüssig-Wasserstoff (LH_2)	Flüssig-Stickstoff (LN_2)	Flüssig-Erdgas (LNG)
Konvektion ($\dot{q}_{konv}$)	0,8	1,8	1,1
Strahlung der Flamme ($\dot{q}_{str,Fl,max}$)	~12	-	100-200
Strahlung der Umgebung ($\dot{q}_{str,Atm}$)	1,6	1,6	1,6
Wärmeleitung aus dem Untergrund ($\dot{q}_{Ob}$)	100	25	92

Der Vergleich der verschiedenen Wärmestromdichten zeigt, daß für LH_2 und LN_2 die Hauptwärmequelle die Wärmeeinleitung aus dem Untergrund ist. Die Abweichung durch Vernachlässigung der übrigen Wärmequellen liegt im Bereich 10 - 20 %. Einer brennenden LNG-Lache kann über Wärmeabstrahlung der Flamme mehr Wärme zugeführt werden als über die Wärmeleitung aus dem Untergrund. Grund für den größeren Einfluß der Wärmestrahlung bei der Verbrennung von LNG im Vergleich zur Verbrennung von Wasserstoff ist die höhere Emissivität als Folge der Rußbildung.

Tabelle 2.3: Historischer Überblick vorhandener Rechenmodelle zur Simulation der radialen Lachenausbreitung von kryogenen Flüssigkeiten.

Untergrund	Freisetzung	Modell	Autor	Anwendung	Literatur
Wasser	kontinuierlich		Otterman	LNG	OTT75
		LNGVG	Stein	LNG	STE78
		SPILL	Shaw	LNG	SHA78A
		SPILLS	Fleischer	wasserunlösliche Stoffe	FLE80
			Raj	kryogene Flüssigkeiten	RAJ81
		DMODEL	Dodge	wasserunlösliche Stoffe	DOD83
			Brandeis	kryogene Flüssigkeiten	BRA83B
		COBRA	Alp	LNG	ALP85
		GASP	Webber	kryogene und langsam siedende Flüssigkeiten	WEB87B
		EVAP	McFarlane	kryogene Flüssigkeiten	FAR90
	schlagartig		Burgess	LNG	BUR72B
			Fay	LNG	FAY73
			Raj	LNG	RAJ74
			Lind	LNG	LIN74
			Otterman	LNG	OTT75
			Opschoor	LNG	OPS77
		LNGVG	Stein	LNG	STE78
		SPILL	Shaw	LNG	SHA78A
			Georgakis	LNG	GEO79
		SPILLS	Fleischer	wasserunlösliche Stoffe	FLE80
			Raj	kryogene Flüssigkeiten	RAJ81
		DMODEL	Dodge	wasserunlösliche Stoffe	DOD83
			Brandeis	kryogene Flüssigkeiten	BRA83B
			Waite	LNG	WAI83
		GASP	Webber	kryogene und langsam siedende Flüssigkeiten	WEB87B
		EVAP	McFarlane	kryogene Flüssigkeiten	FAR90
Boden	schlagartig	SPILL	Shaw	LNG	SHA78A
			Raj	kryogene Flüssigkeiten	RAJ81
			Jensen	kryogene Flüssigkeiten	JEN83
		GASP	Webber	kryogene und langsam siedende Flüssigkeiten	WEB87B
	kontinuierlich	SPILL	Shaw	LNG	SHA78A
			Raj	kryogene Flüssigkeiten	RAJ81
			Jensen	kryogene Flüssigkeiten	JEN83
		GASP	Webber	kryogene und langsam siedende Flüssigkeiten	WEB87B

2.2.2.2. *Lachenausbreitung*

In Tabelle 2.3 sind die im Rahmen der Literaturrecherche gefundenen Ausbreitungsmodelle aufgelistet. Alle Modelle behandeln ausschließlich die radiale Ausbreitung einer Lache. Eine Aufschlüsselung wird bezüglich des betrachteten Untergrundes und der Freisetzungsart vorgenommen.

Man unterscheidet in Experiment und Modell zwischen einer kontinuierlichen und einer schlagartigen Freisetzung. Bei einer schlagartigen Freisetzung wird das gesamte Volumen zur Zeit $t=0$ ausgebracht, wohingegen bei einer kontinuierlichen Freisetzung das betrachtete Volumen über einen gewissen Zeitraum freigesetzt wird. Der Übergangsbereich wird als quasi-kontinuierlich bezeichnet. Weil die Lache in allen Fällen ein unterschiedliches Verhalten zeigt, ist auch mit unterschiedlichen Eigenschaften der Dampfwolke zu rechnen, deren Quelle die Lache ist.

Eine "schlagartige Freisetzung" ist nur in der Theorie möglich. In der Praxis wird ein gegebenes Volumen immer in einer endlichen Zeit freigesetzt. Das wirft die Frage auf, wann eine Freisetzung als "schlagartig" und wann als "kontinuierlich" bezeichnet werden kann. Das von Raj [RAJ79] entwickelte Zeitkriterium bestimmt den Übergang von schlagartig zu kontinuierlich, dessen Kenntnis für das mechanistische Ausbreitungsmodell a priori nötig ist, um die schlagartige von der kontinuierlichen Ausbreitungsrechnung trennen zu können. Es wird später gezeigt (vgl. Kapitel 5.2), daß der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte LAuV-Code diese Vorgabe nicht benötigt.

Bei einer Freisetzung über flüssigem Untergrund (Wasser) wird die freigesetzte kryogene Flüssigkeit eine ihrem Eigengewicht entsprechende Wassermasse verdrängen. Dadurch verringert sich an der Lachenkante die zur Ausbreitung nutzbare geodätische Höhe der Lache. Die Reduktion der Ausbreitungsgeschwindigkeit durch den flüssigen Untergrund läßt sich durch einen Minderungsfaktor δ berücksichtigen, der sich aus dem Dichteverhältnis beider Flüssigkeiten zusammensetzt:

$$\delta = \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_w}\right). \tag{2.14}$$

Häufig wird das Dichteverhältnis δ in Zusammenhang mit der Erdbeschleunigung genannt ($g'=\delta\ g$), als "reduzierte" Erdbeschleunigung. Im Falle einer Ausbreitung von flüssigem Stickstoff auf Wasser ist $\delta = 0.2$, bei flüssigem Wasserstoff auf Wasser ist $\delta = 0.93$. Das bedeutet, daß 80% des LN_2, aber nur 7% des LH_2 unter dem Wasserspiegel liegen. Bei einer Ausbreitung über festem Untergrund ist $\delta = 1$.

In erster Näherung sind die kinetischen Vorgänge der Ausbreitung einer kryogenen Flüssigkeit auf einer Wasseroberfläche vergleichbar mit denen einer Ausbreitung auf festem Untergrund. Da die Lache aber unter den Wasserspiegel dringt, muß an der vorderen Kante zusätzlich

Verdrängungsarbeit verrichtet werden. Kann nicht genügend Wärme konvektiv aus tieferen Schichten an die Oberfläche transportiert werden, bildet sich außerdem unter Abgabe der Erstarrungsenthalpie Eis.

Ein erster Versuch, die Lachenausbreitung zu simulieren, wird zu Beginn der 70er Jahre mit rein empirischen Beziehungen unternommen. Mitte bis Ende der 70er Jahre werden diese meist sehr einfachen Beziehungen abgelöst, als Fay [FAY78, FAY73] ein Modell vorstellt, das die Lache als zylindrisches Gebilde mit der Höhe h,

$$h = \frac{m}{\rho_l \pi r^2} , \tag{2.15}$$

beschreibt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit U der vorderen Kante ergibt sich aus der stationären Bernoulli-Gleichung und der Annahme der vollkommenen Umwandlung der potentiellen in kinetische Energie:

$$U = C\sqrt{\delta g h} , \tag{2.16}$$

$C=1.41$, was in etwa der Quadratwurzel aus 2 entspricht; später berücksichtigt man Reibungsverluste über eine geringfügig kleiner gewählte Konstante C. Das Dichteverhältnis δ ist zu berücksichtigen, weil durch das Eindringen der Lache unter den Wasserspiegel nur der Teil der potentiellen Energie in kinetische Energie umgewandelt werden kann, der über der Wasseroberfläche liegt. In manchen Lösungen wird die Lachenhöhe h durch h-h_{min} ersetzt. Die "minimale Lachenhöhe" h_{min} ist eine von verschiedenen Autoren für die jeweilige kryogene Flüssigkeit empirisch bestimmte Größe. Sie liegt für LNG bei ca. 1,8 mm und für LN_2 bei ca. 1 mm [BUR72B]. Anschaulich wird damit eine Mindesthöhe definiert, bei deren Unterschreiten sich die Lache nicht weiter ausbreitet, sondern in einzelne Bruchstücke auseinanderbricht.

Neben einer Beschreibung der Lachenfrontgeschwindigkeit und Lachenhöhe wird eine Massenbilanz mit dem Quellterm $S(t)$ und dem Verdampfungsterm $e(r,t)$ aufgestellt:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{S(t)}{\rho_l} - e(r,t) . \tag{2.17}$$

Die vom Radius r abhängige Verdampfungsrate ist:

$$e(r,t) = \pi r^2 v . \tag{2.18}$$

Die zeitabhängige Lachenmasse beträgt somit:

$$m = m_0 - \rho_l \int_0^t \frac{dV}{dt} dt . \tag{2.19}$$

Es ist möglich, die Gleichungen 2.15, 2.16, 2.17 und 2.18 numerisch zu lösen wie z.B. in EVAP [FAR90]. Es gibt aber auch analytische Lösungen dieser Gleichungen, die sich jedoch je nach Wahl des Quellterms $S(t)$ entsprechend schwierig gestalten [OPS80].

Dieses mechanistische Modell wird z.B. von [RAJ81, GEO79, MAY75, OPS80, SHA78A, OPS77, DOD83, ALP85, FAR90, LIN74] benutzt und ist am weitesten verbreitet [EIC92, CHI86].

Neben dem "mechanistischen" Modell gibt es ein weiteres zur Beschreibung der Lachenausbreitung auf Basis der sog. "Shallow Layer" (Flachwasser)-Gleichungen. Dabei handelt es sich um ein nicht-lineares Differentialgleichungssystem, das die Lachenhöhe und -geschwindigkeit als Funktion von Zeit und Ort angibt. Die Shallow-Layer-Gleichungen basieren auf den Erhaltungssätzen von Masse (Gleichung 2.20) und Impuls (Gleichung 2.21). Sie lauten:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(uh) = w - v \text{ und} \tag{2.20}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u\nabla)u = -\delta g \nabla h - \bar{F} , \tag{2.21}$$

mit dem flächenbezogenen Quellterm w, dem ebenfalls flächenbezogenen Verdampfungsterm v, der Reibungskraft F zwischen Lache und Untergrund und dem Dichteverhältnis δ .

2.2.3.Beschreibung einiger Modelle zur Lachenausbreitung und Verdampfung

2.2.3.1. Empirische Modelle

In einem ersten Ansatz zu Beginn der 70er Jahre versuchte man, die Ausbreitung einer Lache aus kryogener Flüssigkeit anhand rein empirischer Modelle zu beschreiben. Ziel dieser einfachen Rechnung war eine Abschätzung bezüglich Ausbreitungsradius und Dauer bis zur vollständigen Verdampfung. Diese empirischen Ansätze sind nur für die jeweils betrachtete Flüssigkeit anwendbar und beinhalten als einzige Einflußgröße das freigesetzte Volumen. So gibt z.B. Burgess [BUR72A, BUR72B] eine empirische Korrelation zur Berechnung des Lachendurchmessers an. Er stützt sich dabei auf Experimente, die er mit LNG und LN_2 durchführte, sein empirisches Modell ist jedoch nur für schlagartige LNG-Freisetzung gültig. Er gibt den einfachen Zusammenhang der Lachenfläche A [m²] von der Zeit t [s] folgendermaßen an:

$$A = 0{,}455t^2 . \tag{2.22}$$

Den maximalen Lachendurchmesser d_{max} [m] berechnet er abhängig von der freigesetzten LNG-Masse M_0 [kg]

$$d_{max} = 4{,}8M_0^{1/3} . \tag{2.23}$$

2.2.3.2. *Quellterm EVAP aus HGSYSTEM*

Bei HGSYSTEM handelt es sich um ein Softwarepaket der Shell AG [FAR90]. Es beinhaltet mehrere Programme zur atmosphärischen Dispersion sowie ein Programm zur Lachenausbreitung und -verdampfung (EVAP). EVAP beruht auf dem mechanistischen Modellansatz nach Colenbrander [COL80] und dessen Weiterentwicklung durch Fleischer [FLE80]. Dazu werden Gleichungen 2.15 bis 2.19 auf Seite 23 unter Berücksichtigung der minimalen Filmhöhe numerisch gelöst. EVAP kann die Ausbreitung einer siedenden Flüssigkeit nur auf Wasser rechnen, hier jedoch die Fälle der schlagartigen und kontinuierlichen Freisetzung. Eine interessante Option besteht darin, für die kontinuierliche Freisetzung zwischen einer konstanten oder einer transienten Freisetzungsrate wählen zu können.

Die Ausbreitung auf Land wird in EVAP nur für nichtsiedende Flüssigkeiten mit Fluorwasserstoff (HF) als Spezialfall berechnet. Im Unterschied zu einer kryogenen Flüssigkeit liegt die Siedetemperatur von HF in der Nähe der Umgebungstemperatur. Bei der Ausbreitungsrechnung ist der Wärmeeintrag aus dem Untergrund wegen der verschwindenden Temperaturdifferenz zwischen Untergrund und sich ausbreitender Flüssigkeit ($\Delta T \approx 0\ K$) zu vernachlässigen. Der für die Verdampfung/Verdunstung notwendige Wärmestrom wird hier der Lache konvektiv aus der umgebenden Luft zugeführt.

2.2.3.3. *Quelltermmodell nach Opschoor*

Der Lösungsansatz von Opschoor [OPS80] auf Basis des mechanistischen Modelles betrachtet ausschließlich den Fall der schlagartigen Freisetzung über Wasser. Im Gegensatz zum EVAP-Modell werden die in Kapitel 2.2.2.2 angegebenen Gleichungen nicht numerisch gelöst, sondern ausgehend von Gleichung 2.16 auf Seite 23 unter Verwendung von $U=dr/dt$ integriert.

Die analytische Lösung für den Lachenradius R lautet:

$$R = \left[0{,}44v\delta g \cdot t^3 + 1{,}3\sqrt{\delta g V(t)} \cdot t\right]^{1/2}, \qquad (2.24)$$

mit dem Verdampfungsterm v, dem Dichteverhältnis δ , der Erdbeschleunigung g, der Zeit t und dem zeitabhängigen Lachenvolumen $V(t)$. Bei Betrachtung der Gleichung wird deutlich, daß sich ein stetig wachsender Lachenradius ergibt, bis das gesamte Lachenvolumen verdampft ist. Deshalb ist dieses Modell nicht auf kontinuierliche Freisetzungen anwendbar, wo der Lachenradius konstant bleibt, sondern bleibt auf die schlagartige Freisetzung beschränkt.

2.2.3.4. *Quelltermmodell GASP*

Das Quelltermmodell GASP (Gas Accumulation over Spreading Pools) vom SRD der UKAEA ist ein weitverbreitetes Quelltermmodell (auf Basis der Shallow-Layer-Gleichungen), das bereits von mehreren Institutionen benutzt wird. Es blickt auf eine über 10-jährige

Entwicklungsgeschichte zurück [WEB86A, WEB86B, WEB86D, WEB87A, WEB87B, WEB91].

Die Entwicklung begann 1978 mit einem (mechanistischen) Modell von Shaw [SHA78A], das sehr differenziert den Wärmestrom in die Lache betrachtet. Das Modell von Brandeis [BRA83A, BRA83B], basierend auf den Shallow-Layer-Gleichungen, bildete dann Mitte der 80er Jahre die Grundlage für ein neues Quellterm programm namens GASP, das im Rahmen von Risikoanalysen der UKAEA benutzt wird und das frühere Modell ersetzt hat. Seitdem wird bei der UKAEA an der Weiterentwicklung und Validierung des GASP-Codes gearbeitet. Er ist bereits für LNG und einige langsam verdunstende Flüssigkeiten validiert, jedoch noch nicht auf Wasserstoff angewendet worden. Das Programm berechnet die Lachenausbreitung auf festem oder flüssigem Untergrund jeweils den Fall der schlagartigen oder kontinuierlichen Freisetzung, begrenzte oder unbegrenzte Freisetzung, und es berücksichtigt laminare und turbulente Reibungskräfte zwischen Lache und Untergrund.

Es wurde darauf geachtet, im Gegensatz zu anderen Modellen schon vom Ansatz her mit möglichst wenig Rechenzeit auszukommen [HAR86]. Die Shallow-Layer Gleichungen werden von Webber zunächst linearisiert und anschließend partiell integriert. Die Bewegungsgleichungen der Massenerhaltung und Impulserhaltung lauten:

$$\frac{dV}{dt} = -R^2 v \text{ und} \tag{2.25}$$

$$\frac{dU}{dt} = Ug\delta\,(1-b)HR - F\,. \tag{2.26}$$

Die Größen U, H und R bezeichnen Geschwindigkeit, Höhe und Radius an der Lachenfront. Der Reibungswiderstand F wird von Webber differenziert für Boden

$$F = \frac{C_B U^2}{H} + (\tfrac{3}{2})^2 \nu \frac{U}{H^2}\,, \tag{2.27}$$

und Wasser

$$F = \frac{C_W U^2}{H} + 1{,}877\nu \frac{U}{H^2}(1-\rho_l)\,, \tag{2.28}$$

betrachtet [SCN86]. C_B und C_W sind die Widerstandbeiwerte für festen und flüssigen Untergrund. Ein Formfaktor b, der die Lachenform charakterisiert, wird ebenso wie der Einfluß der Oberflächenrauhigkeit a_r berücksichtigt:

$$a_r\dot{R} = (U-\dot{R})bH\,, \tag{2.29}$$

$$\tfrac{1}{2}gbH = U(U-\dot{R})\,. \tag{2.30}$$

Durch die Rauhigkeit a_r verringert sich (rechnerisch) die hydrostatische Höhe, die für die Ausbreitung der Lache erforderlich ist. Die Lachenfront kann also nur die reduzierte hydrostatische Energie zur Ausbreitung nutzen, was wiederum die Ausbreitungsgeschwindigkeit verringert.

Das Modell berücksichtigt ebenfalls in Anlehnung an [HOU72] eine "Drei-Phasen-Ausbreitung" der Lache. Die drei Bereiche, die nacheinander durchlaufen werden, sind durch folgende Kräftegleichgewichte bestimmt:

1. Gravitation - Massenträgheit (Gravity-Inertia Regime, G-I),
2. Gravitation - Turbulenz (Gravity-Turbulent Regime, G-T),
3. Gravitation - Viskosität (Gravity-Viscous Regime, G-V).

Weil die Ausbreitung in jedem Bereich durch unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten bestimmt ist, ergibt sich nach [WEB87B] bei der Berechnung auch ein unterschiedliches Verhalten des Radius als Funktion der Zeit. Die Ausbreitung der Lache ist in der ersten Phase am schnellsten und in der dritten Phase am langsamsten. Tabelle 2.4 zeigt den funktionalen Zusammenhang zwischen Lachenradius r und Zeit t.

Tabelle 2.4: Funktionaler Zusammenhang zwischen Lachenradius r und Zeit t für die verschiedenen Phasen der Ausbreitung in Abhängigkeit vom Untergrund nach [WEB87B]

Ausbreitungsphasen	**Lachenradius über**	
	Boden	**Wasser**
1. Phase (G-I)	$r \sim t$	$r \sim t^{1/2}$
2. Phase (G-T)	$r \sim t^{2/7}$	$r \sim t^{2/7}$
3. Phase (G-V)	$r \sim t^{1/8}$	$r \sim t^{1/4}$

GASP beinhaltet als Wärmebetrachtung aus dem festen Untergrund in die Lache die Lösung der instationären Wärmeleitgleichung entsprechend Gleichung 2.6 auf Seite 16. Es berücksichtigt, daß die sich ausbreitende Lache am Rand "warmen" Untergrund erreicht und so der Wärmetransport in die Lache dort höher ist als an bereits abgekühlten Stellen. Nach Webber [WEB91] ist die Verdampfung damit hinreichend genau beschrieben. Optional bietet GASP ein Filmsiedemodell an, dessen Gültigkeit nach Ansicht des Autors jedoch fraglich ist, weil Filmsieden nur auf glatten Metalloberflächen untersucht wurde und z.B. bereits eine dünne

Farbschicht auf dem Untergrund den Wärmestrom in die Flüssigkeit reduziert und so kein Filmsieden erfolgt.

2.3. Fazit

2.3.1. Experimente

Wie bereits beschrieben, unterscheiden sich Verdampfungsexperimente und Ausbreitungsexperimente. Es existieren nur wenige Experimente zur Freisetzung und Verdampfung von flüssigem Wasserstoff. Sie können zudem wegen unzureichender Instrumentierung bzw. wegen der Unkenntnis wesentlicher Randbedingungen zur weiteren Auswertung nicht herangezogen werden. Dies gilt auch für die vorhandenen Experimente zur Lachenausbreitung und -verdampfung von flüssigem Stickstoff, die meist als Vorversuche zu Experimenten mit LNG durchgeführt wurden (zum Test der Experimentieranlage), wobei in der Regel keine Aufzeichnungen gemacht wurden. Aber auch bei den Experimenten mit LNG wurde die Flüssigkeitslache äußerst selten untersucht.

Tabelle 2.5: Gegenüberstellung der wesentlichen Einflußparameter und der Meßgrößen der verschiedenen Experimente

	[DRA75A, DRA75B]	[REI78A, REI78B]	[MOO86]	[CAS60, ZAB61]	[CHI86]
Art des Versuches	V	V	A	A	A
fester Untergrund a) trocken		✓	✓		
b) feucht					
c) Sand	✓	✓	✓	✓	✓
flüssiger Untergrund (Wasser)	✓	✓			
kryogene Flüssigkeit	LNG,LN_2	LNG, LPG	LNG	LH_2	LH_2
Lachenradius als f(t)			✓		bedingt
Verdampfungsrate	✓	✓			
Dispersion der Gaswolke					✓

A Ausbreitungsexperiment
V Verdampfungsexperiment
✓ untersuchter Parameter

Es ist nur ein Experiment bekannt geworden, bei dem speziell die Ausbreitung einer LNG-Lache auf festen Untergründen untersucht wurde [MOO86]. Daher enthält Tabelle 2.5 auch nicht alle in Tabelle 2.1 auf Seite 12 aufgeführten Experimente, sondern nur diejenigen, in denen Aussagen zur Verdampfung oder Ausbreitung gemacht werden.

Für LN_2 und LNG wird das Verdampfungsverhalten auf isolierten Probeböden fester trockener Untergründe, trockenem und feuchtem Sand und Wasser untersucht. Der Einfluß der Feuchte in festen Untergründen ist bislang nicht ermittelt worden. Die bislang einzigen Experimente zur Verdampfung von LH_2 wurden an einem Paraffinprobekörper durchgeführt [ZAB60]. Weil die Angaben über Stoffwerte des Untergrundes fehlen, kann dieses Experiment zur Validierung nicht verwendet werden.

2.3.2. Modelle

In Tabelle 2.6 sind die wesentlichen Eigenschaften für die wichtigsten Modelle aus Tabelle 2.3 auf Seite 21 aufgeführt.

Die Rechencodes auf Basis des mechanistischen Modells zur Simulation der Lachenausbreitung und -verdampfung hat im wesentlichen folgende Nachteile:

1. Bei Erreichen der minimalen Lachenhöhe wird die Berechnung abgebrochen. Dabei ist ein Teil der sich ausbreitenden kryogenen Flüssigkeit noch nicht verdampft.
2. Die kinetische Betrachtung der Lache beschränkt sich auf die Lachenfront. So kann z.B. das Aufbrechen der Lache von innen her nicht erfaßt werden (Vergrößerung des Radius bei gleichzeitiger Verringerung der Oberfläche).
3. Es sind daher nur *positive* Ausbreitungsgeschwindigkeiten möglich (Gleichung 2.16 auf Seite 23). Die Simulation einer sich verkleinernden Lache (z.B. durch Verringerung des zugeführten Massenstroms) ist nicht möglich.
4. Die strömungstechnische Seite der Ausbreitung (Reibung) wird nur über den empirischen Faktor C erfaßt, und es wird nicht zwischen laminarer und turbulenter Strömung differenziert.
5. Wegen der stets positiven Ausbreitungsgeschwindigkeit sind diese Modelle nicht in der Lage, einen stationären Zustand zu simulieren, in dem beispielsweise der Lachenradius konstant bleibt, weil zugeführter und verdampfter Massenstrom im Gleichgewicht sind.

Numerische Lösungsverfahren der Shallow-Layer Gleichungen sind häufig mit massiven numerischen Instabilitäten verbunden [BRW81, EIC92]. So entwickelt Brewer [BRW81] einen Rechencode auf der Basis der Shallow Layer Gleichungen mit dem Ziel, die Lachenausbreitung von LH_2 zu simulieren. Sein Programm konnte allerdings nur zwei erfolgreiche Rechnungen durchführen. Nach seinen Angaben wurden andere Rechnungen wegen numerischer Instabilitäten abgebrochen. Ein Ergebnis seiner stabilen Rechnung wird später vorgestellt.

Brandeis [BRA83A, BRA83B] stellt erstmals Rechnungen vor, in denen ein Shallow-Layer Rechencode auf die Ausbreitung einer kryogenen Flüssigkeit (LNG) angewendet wird. Webber hat auf der Grundlage des Modells von Brandeis sein Programm GASP aufgebaut [WEB87B] und ständig weiterentwickelt [WEB86A, WEB86B, WEB86C, WEB87A, WEB91]. Die GASP zugrunde liegenden Bewegungsgleichungen erlauben die Simulation der vorderen Lachenfront; eine ausführlichere Beschreibung des GASP-Codes erfolgte bereits in Kapitel 2.2.3.4.

Tabelle 2.6: Gegenüberstellung der wesentlichen Eigenschaften der verschiedenen Ausbreitungscodes

	[BUR72A, BUR72B]	[OPS80]	[FAR90] (EVAP)	[BRW81]	[WEB86A] (GASP)
Art des Modells	empirisch	mechan.	mechan.	S.-L.	S.-L.
Simulation Verdampfungsrate	✓	✓	✓	✓	✓
Simulation Lachenradius	✓	✓	✓	✓	✓
kleiner werdender Radius				✓	
Lachenhöhe als f(t,r)				✓	✓
Aufbrechen der Lache				✓	✓
Phasen der Ausbreitung					✓
Wärmetransport (1D)				✓	✓
Wärmetransport (2D)					✓
flüssiger Untergrund		✓	✓		✓
Eisbildung					
transiente Massenzufuhr			✓		
validiert für die kryogene Flüssigk.	LNG				LNG

empirisch	empirisches Modell
mechan.	mechanistisches Modell
S.-L.	Modell auf Basis der "Shallow Layer" Gleichungen
✓	wird vom Rechencode simuliert

Wie bereits erwähnt, ist die Wärmeleitung aus dem Untergrund die Hauptwärmequelle für die Verdampfung einer kryogenen Flüssigkeit (außer bei brennendem LNG). Daneben werden die anderen Wärmequellen häufig vernachlässigt. Hier liefert der eindimensionale Lösungsansatz der instationären Wärmeleitgleichung (Gleichung 2.6 auf Seite 16) für Zeiten größer ca. 20 s zufriedenstellende Übereinstimmung mit Verdampfungsexperimenten. Für kürzere Zeiten t zeigen sich dagegen Abweichungen wegen des anfangs schlechten thermischen Kontaktes [WEB91, ZAB60, RAJ81]. Auch durch Verwendung der oben beschriebenen Korrelationen zur Bestimmung der Wärmestromdichten unter Berücksichtigung der hydrodynamischen Effekte an der Oberfläche kann wegen der großen Abweichungen bereits in der experimentellen Bestimmung der Nukijama-Kurve (meist hat man hier Fehler in der Größenordnung von 50%) keine größere Genauigkeit erzielt werden. Zudem werden bei den Experimenten ausschließlich glatte metallische Oberflächen verwendet. Rauhigkeiten üben einen deutlichen Einfluß auf den Wärmestrom zwischen Untergrund und Flüssigkeit aus und können den Wärmestrom mehr als verdoppeln.

Durch die kurze Verdampfungszeit und schnelle Ausbreitung auf der Oberfläche kann auf die Berücksichtigung horizontaler Wärmeleiteffekte in vielen Fällen verzichtet werden. Z.B. benutzt Webber [WEB87A] eine 2D-Wärmeleitbetrachtung nur, um den Anwendungsbereich der eindimensionalen Lösung einzugrenzen. Ein Zeitkriterium bestimmt, ab wann eine Berücksichtigung von horizontalen Wärmeleiteffekten erfolgen sollte. Übliche Werte liegen im Bereich von mehreren Minuten (siedende kryogene Flüssigkeit auf Beton). Eine größere Lachenfläche und eine kleinere Wärmeleitfähigkeit bewirken jeweils eine Verringerung des Einflusses. Einflüsse durch horizontale Wärmeleitung sind insbesondere dann zu erwarten, wenn die Lache eine konstante Fläche hat.

Bei Wasser als Untergrund kann nach experimentellen Untersuchungen im Labormaßstab in guter Näherung während der ersten Sekunden der Ausbreitung ein konstanter Wärmestrom angenommen werden [DRA75A]. Diese Vereinfachung wurde bei allen bekannten Ausbreitungscodes bei der Simulation der Ausbreitung auf Wasser verwendet. Die Wellenbewegung an der Wasseroberfläche oder Eisbildung werden hierbei vernachlässigt.

3. Versuche zur Lachenausbreitung und -verdampfung mit flüssigem Stickstoff und flüssigem Wasserstoff

Weil in der Literatur nur von wenigen Versuchen zur Lachenausbreitung und -verdampfung von kryogenen Flüssigkeiten berichtet wird und bei den vorhandenen Arbeiten z.T. wesentliche Informationen, wie etwa vollständige Stoffwertangaben (beispielsweise die Dichte des Untergrundes) fehlen, ist es zur Validierung des später beschriebenen Codes erforderlich, eigene Experimente durchzuführen. Aufgrund des großen erforderlichen Aufwandes an Schutzvorkehrungen und dadurch bedingten hohen Kosten für Experimente mit flüssigem Wasserstoff (LH_2) und um Erfahrungen im Umgang mit kryogenen Flüssigkeiten zu gewinnen, werden für Parameterstudien Experimente mit flüssigem Stickstoff (LN_2) durchgeführt. Die hierbei gewonnenen Erfahrungen und Kenntnisse fließen in Vorbereitung und Durchführung von Experimenten mit LH_2 ein, die allerdings nicht wie diejenigen mit LN_2 auf dem KFA-Gelände durchgeführt werden konnten. Im folgenden sollen die verschiedenen Experimentaufbauten vorgestellt werden:

Die Hauptwärmequelle bei der Verdampfung einer Lache aus kryogener Flüssigkeit ist die Wärmeeinleitung aus dem Untergrund. Um diese Wärmeeinleitung zu untersuchen, werden Experimente durchgeführt, in denen LN_2 auf die Oberfläche eines isolierten Probenstückes verschiedener realer Untergründe aufgebracht wird (Kapitel 3.1). Als Untergründe werden Bitumen und Beton (trocken und feucht) verwendet. Aus der Verdampfungsrate kann man den momentanen übertragenen Wärmestrom errechnen.

Zur Untersuchung der Lachenausbreitung von LN_2 und LH_2 wurden jeweils unterschiedliche Experimentaufbauten verwendet. Bei der Konstruktion wird darauf geachtet, den Anfangsimpuls der kryogenen Flüssigkeit zu minimieren, um eine gravitationsbedingte Ausbreitung zu gewährleisten. Dies ist eine wesentliche Randbedingung des Rechencodes. Beiden Versuchsaufbauten ist die Meßtechnik zur Identifizierung der Lache vom Prinzip her gemeinsam.

Wie oben bereits erwähnt, ist es für Parameterstudien der Lachenausbreitung und -verdampfung zweckmäßig, Ausbreitungsversuche mit flüssigem Stickstoff vorzunehmen (Kapitel 3.2). Dadurch können gegenüber Versuchen mit flüssigem Wasserstoff der große Aufwand für den Explosionsschutz der Experimentiereinrichtung, die Probleme der Bereitstellung von flüssigem Wasserstoff und der Suche nach einem geeigneten Versuchsgelände sowie die hohen Kosten des flüssigen Wasserstoffs (z.Zt. ca. 2000 DM/m³LH_2, 1993) umgangen werden. Die eigens konstruierte und in der KFA aufgebaute "**Kipp**vorrichtung zur Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von flüssigem Stickstoff über **W**asser bei **i**nstationären Bedingungen" (KIWI) erlaubt die systematische Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von schlagartig

bzw. kontinuierlich freigesetzter kryogener Flüssigkeiten bis zu 80 l bzw. 2,5 l/s (Gesamtmenge bis 300 l LN_2). Durch den Aufbau als 60°-Kreisausschnitt ist eine zentrale Zuleitung des LN_2 einfach realisierbar. Plexiglasscheiben an einer Seite ermöglichen die Beobachtung der Konturen der Lache.

Tabelle 3.1: Übersichtsmatrix zu durchgeführten Experimenten zur Ausbreitung und Verdampfung von LN_2 und LH_2

Parameter/ Phänomen	LN_2 Verdampfungs Experimente	LN_2 Ausbreitungs Experimente		LH_2 Ausbreitungs Experimente
		KIWI	1:10 Modell	
fester Untergrund	✓			✓
Wasser als Untergrund		✓	✓	✓
Art der Freisetzung	s	s, k	s	k
Verdampfung	✓			
Ausbreitung der Lache		✓	✓	✓
Aufbrechen der Lache		✓	✓	
Lachenkontur		✓		
Konvektion im Wasser			✓	
Eisbildung im Wasser		✓	✓	✓

✓ untersuchter Parameter
s schlagartig
k kontinuierlich

Um die Konvektion im Wasser optisch zu untersuchen und die Ausbreitung von LN_2 auf einer Wasseroberfläche zu beobachten, wird ein 1:10 Plexiglasmodell der KIWI-Versuchsanlage angefertigt (Kapitel 3.2). Zur optischen Beobachtung der Lachenausbreitung wird das 1:10 Modell auf Stützen angeordnet und darunter Videokamera und Fotoapparat positioniert. Es werden mehrere Versuche mit schlagartiger Freisetzung bis ca. 0,5 l LN_2 durchgeführt.

Es werden weiterhin mehrere Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung von Flüssigwasserstoff (Raten von ca. 4,5 bis 6 l/s LH_2) über den Untergründen Wasser und Aluminium durchgeführt

(Kapitel 3.3). Dabei wird das radiale Ausbreitungsverhalten der LH_2-Lache als Funktion der Zeit gemessen und mit Videokameras optisch beobachtet. Die Versuche erfolgten in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und der Battelle Ingenieurtechnik auf einem ehemaligen Militärgelände in der Nähe von Cottbus. Beiden Institutionen und allen an der Durchführung der Experimente beteiligten Personen sei an dieser Stelle herzlich gedankt für vorzügliche Zusammenarbeit und außerordentliche Kollegialität.

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Versuche und die dabei eingestellten Parameter bzw. die Phänomene, die im Einzelfall untersucht oder beobachtet werden.

Bei allen im folgenden näher beschriebenen Experimenten wird die gleiche mobile Meßdatenerfassungsanlage verwendet. Deshalb soll sie hier kurz vorgestellt werden.

Die Erfassung des Temperaturverlaufes über der Oberfläche zur Identifizierung der Lache bzw. der Temperaturen des Untergrundes erfolgt mittels der mobilen Meßdatenerfassungsanlage HP 3852A Data Acquisition/Control Unit [HPC89], je 50 m Ausgleichsleitungen (L2TDT) der Fa. Heraeus Sensor und NiCr-Ni Mantel-Thermoelementen (Typ K, ∅ 1 mm) der Firma Heraeus Sensor. Die Versuche stellen unterschiedliche Anforderungen an die Meßdatenerfassung: Bei den Ausbreitungsversuchen gibt ein charakteristischer Temperatur-Zeit-Verlauf Auskunft, ob und wann das jeweilige Thermoelement Kontakt zur kryogenen Flüssigkeit hatte, wohingegen es bei den Verdampfungsversuchen auf die Kenntnis der Temperaturen im Untergrund ankommt.

Die Genauigkeit der Meßdatenerfassung (siehe Anhang A) beträgt nach Herstellerangaben [HPC89] für die Temperatur:

$$\Delta T_{0°C} = \pm 2K\ , \tag{3.1}$$

$$\Delta T_{-200°C} = \pm 4K \tag{3.2}$$

und für die Zeit

$$\Delta t = t \pm 0{,}004\%\ . \tag{3.3}$$

Weitere Genauigkeitsangaben werden in der Versuchsbeschreibung der jeweiligen Kapitel gemacht. Eine ausführliche Fehlerbetrachtung aller Versuche findet sich in Anhang A.

3.1. Untersuchung des Wärmeeintrags aus dem Untergrund in eine Lache aus flüssigem Stickstoff

3.1.1. Beschreibung des Versuchaufbaus

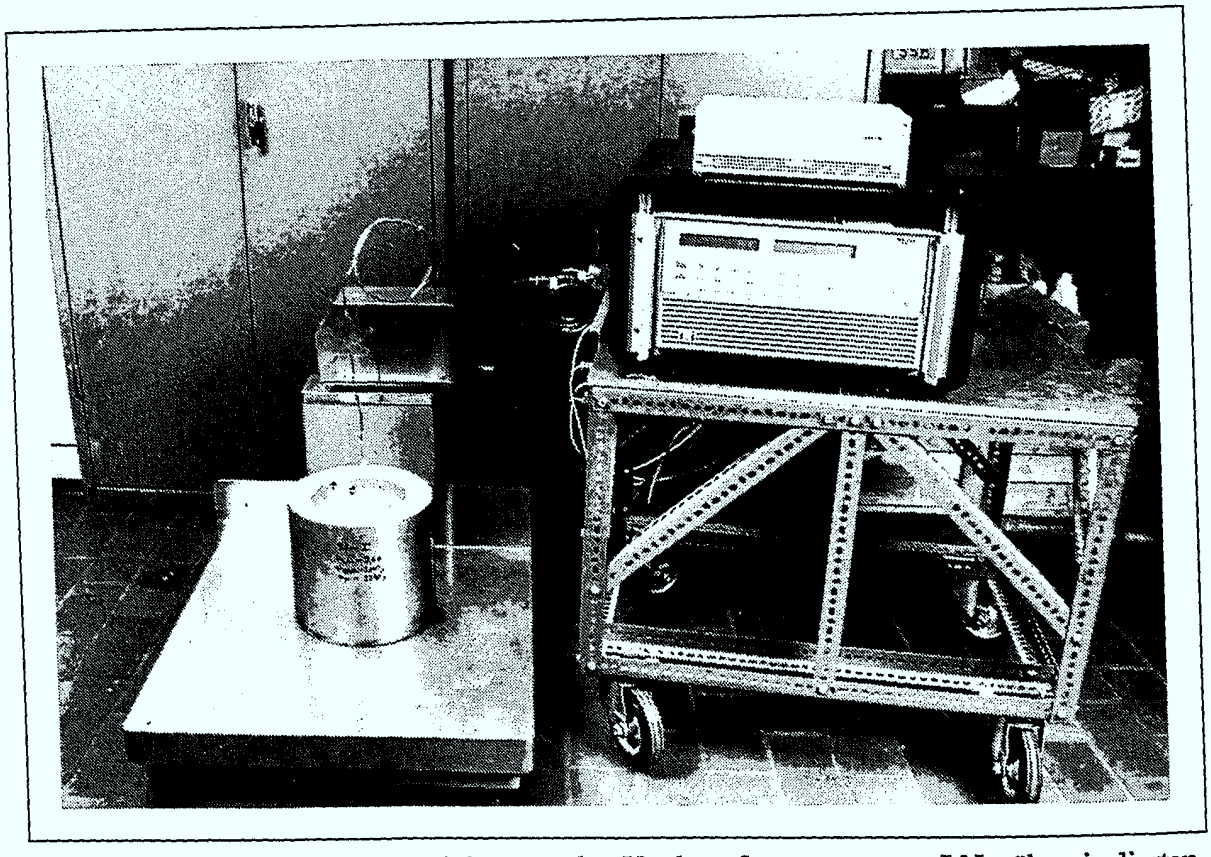


Bild 3.1: Versuchsaufbau zur Messung der Verdampfungsraten von LN_2 über isolierten Probekörpern. Zu sehen ist rechts die mobile Meßdatenerfassung, links die Waage und der isolierte Betonuntergrund.

Der Versuchsaufbau zur Messung von Verdampfungsraten (Bild 3.1 und 3.2) entspricht den aus der Literatur bekannten Versuchsaufbauten, wie sie auch für andere Flüssigkeiten verwendet werden [WEL82].

Auf der Waage K 120 der Fa. Sauter (Meßbereiche 0-12kg, bzw. 0-120kg, Meßgenauigkeit *0,01kg, bzw. 0,1kg*), mit Anschluß 0-10V an die Meßdatenerfassungsanlage HP 3852A werden die später beschriebenen Behälter mit den zu untersuchenden Probenkörpern gebracht. Auf die Probenoberfläche wird LN_2 ausgebracht. Die Waage mißt das Gesamtgewicht aus Masse der Probe und der zeitabhängigen LN_2-Masse. Durch Subtraktion des Gewichtes der Probe ergibt sich die LN_2-Masse in Abhängigkeit von der Zeit. Aus dem LN_2-Massenverlust kann man den Wärmeeintrag in den LN_2 errechnen. Vor Versuchsbeginn wird die LN_2-Anfangsmasse mit der Waage 3802 MP der Fa. Sartorius (Meßbereich 0-12kg, Meßgenauigkeit *0,001kg*) bestimmt.

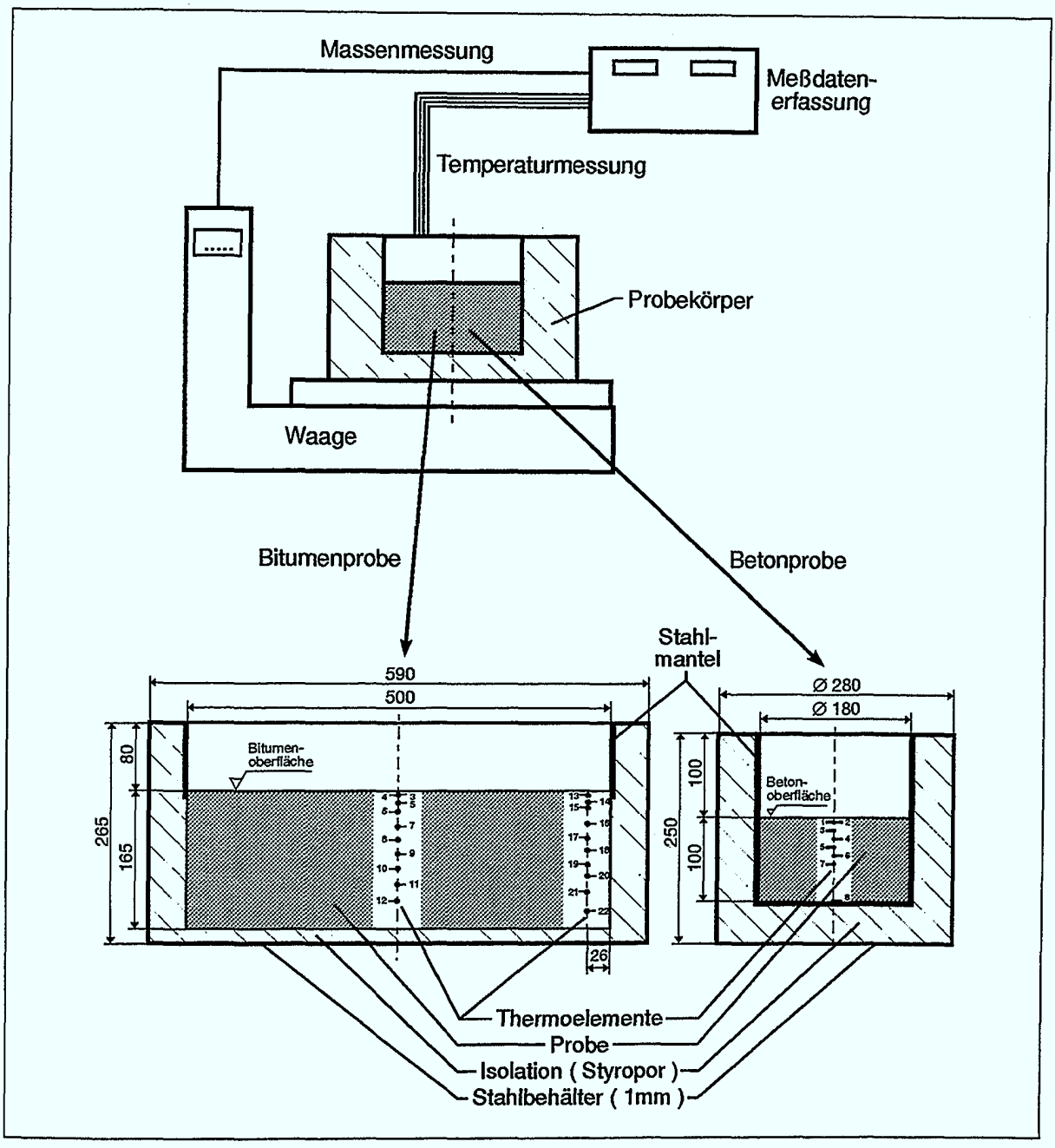


Bild 3.2: Versuchsaufbau zur Messung der Verdampfungsraten von LN_2 über isolierten Probekörpern

Die Untersuchung wird für die Untergründe Bitumen und Beton durchgeführt. Als Bitumenprobe wird ein Stück aus einer alten Fahrbahndecke verwendet, das am Rand mit einem ca. 10cm hohen und 1mm dicken Metallkragen aus rostbeständigem Stahl (DIN 1.4571) zur Einschließung des LN_2 versehen ist. Bei der Betonprobe handelt es sich um Beton der Gruppe B1, hergestellt und transportiert nach DIN 1045, der Festigkeitsklasse B25, mit einer

Korngröße bis 32mm, einem Zementgehalt von 270 kg/m³ und einem Zusatzstoffgehalt von 40 kg/m³. Er hatte bei Lieferung eine mittlere Dichte von 2363 kg/m³. Der Beton wird direkt in hierfür speziell angefertigten Behälter gegossen und muß nach DIN 1045 vier Wochen abbinden. Nach Ablauf dieser Zeit betrug die Dichte 2317 kg/m³ [PIT93]. Es werden zwei Betonproben angefertigt, die beide in gleichem Umfang zum Einsatz kommen. Die Stoffwerte und Abmessungen der Bitumen- und Betonproben sind in Tabelle 3.4 auf Seite 39 angegeben. Die Probekörper (Bitumen, Beton) werden nach allen Seiten, mit Ausnahme der Oberseite, mit ca. 10 cm Styropor isoliert und zum Transport in einer Metallkiste untergebracht.

In Tabellen 3.2 und 3.3 ist die Lage der Thermoelemente, ausgehend von der Oberfläche, verzeichnet. Die Thermoelemente Nr.1 und 2 der Bitumenprobe und das Thermoelement Nr.8 der Betonprobe liegen jeweils an der Unterseite. Die Ausrichtgenauigkeit der Thermoelemente beträgt ±0,5mm.

Tabelle 3.2: Lage der Thermoelemente in der Bitumenprobe.

Thermoelement Nummer	Abstand von der Oberfläche [mm]	Thermoelement Nummer	Abstand von der Oberfläche [mm]
1	165,0	12	132,0
2	165,0	13	4,5
3	3,5	14	12,5
4	4,5	15	20,0
5	14,0	16	39,0
6	24,5	17	56,0
7	42,0	18	71,0
8	58,5	19	88,0
9	75,0	20	102,0
10	93,0	21	121,0
11	112,0	22	144,0

Oberflächenrauhigkeiten beeinflussen den Wärmeeintrag aus dem Untergrund in den LN_2. Deshalb sind in Tabelle 3.4 die aus ca. 150 Einzelmessungen gemittelten Werte der Rauhigkeitstiefe und des Abstandes der Rauhigkeitsspitzen angegeben. Die in Tabelle 3.4 angegebenen Werte für Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Untergründe sind experimentell ermittelt worden: Die Dichte wird bestimmt durch Masse- und Volumenmessung, die Wärmekapazität durch Messung der verdampften LN_2-Masse beim Eintauchen in LN_2 bis zum thermischen Ausgleich. Die Wärmeleitfähigkeit kann aus der

Messung der Temperaturen in verschiedenen Tiefen der Probe bestimmt werden [PIT93]. Dazu wird u.a. die Lösungsroutine E04ABF der NAG-Library verwendet.

Tabelle 3.3: Lage der Thermoelemente in der Betonprobe.

Thermoelement Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8
Abstand von der Oberfläche [mm]	5,0	5,0	15,0	25,0	35,0	45,0	55,0	100,0

Tabelle 3.4: Gegenüberstellung der Stoffwerte und geometrischen Daten der Probekörper aus Bitumen und Beton.

		Bitumen	**Beton**
Fläche	[m²]	0,15	0,0254
Tiefe	[m]	0,165	0,100
Dichte	[kg/m³]	2120 ±20	2300 ±20
Wärmekapazität	[kJ/kg K]	0,78 ±0,05	0,84 ±0,05
Wärmeleitfähigkeit	[W/m K]	2,1 ±0,5	2,3 ±0,5
Feuchte des Untergrundes	[g/kg]	0	0 - 20
Rauhigkeitstiefe	[mm]	1,15	1,5
Abstand der Rauhigkeitsspitzen	[mm]	1,5	2

Zur Untersuchung des Einflusses der Feuchte im Untergrund werden die Betonproben mehrere Tage mit Wasser bedeckt. Der dabei erzielte Feuchtigkeitsgehalt in der Probe wird über Wägung ermittelt. Die Gesamtmasse des Betons nach mehreren Tagen Wasserbedeckung liegt im Bereich des Lieferzustandes (flüssiger Beton). Vor Versuchsbeginn wird der Probeboden vom Oberflächenwasser befreit.

Die Genauigkeit der Massemessung wird ausführlich in Anhang A diskutiert und beträgt abhängig vom jeweiligen Untergrund

$$\Delta m_{LN_2,Bitumen} = \pm 1{,}64kg \ , \tag{3.4}$$

$$\Delta m_{LN_2,Beton} = \pm 0{,}34kg \ . \tag{3.5}$$

Die Genauigkeit der Temperatur- und Zeitmessung ist in Gleichungen 3.1 bis 3.3 auf Seite 35 angegeben.

3.1.2. Versuchablauf und durchgeführte Versuche

Nach Bestimmung der Anfangsmenge wird der flüssige Stickstoff aus einem Dewargefäß in kürzest möglicher Zeit (je nach Menge 1-2s) auf die Probenoberfläche aufgebracht und gleichzeitig wird die Messung gestartet. Dabei wird die Gesamtmasse in Abhängigkeit von der Zeit t alle 0,4s aufgezeichnet. Ist der LN_2 vollständig verdampft, ist der Versuch beendet. Übliche Versuchszeiten liegen im Bereich bis ca. 400s. Nach Versuchsende werden die Proben zunächst auf Beschädigungen untersucht. Infolge der Temperaturabnahme durch die Verdampfung dauert es mehrere Stunden, bis er wieder Raumtemperatur hat, so daß mit jedem Probenkörper maximal ein Versuch pro Tag durchgeführt werden kann.

In Tabelle 3.5 sind die Randbedingungen aller 25 Versuche mit Bitumen und Beton (trocken und feucht) enthalten. Es wurden 9 Versuche zur Verdampfung von LN_2 über Bitumen, 6 Versuche zur Verdampfung von LN_2 über trockenem Beton und 10 Versuche zur Verdampfung über feuchtem Beton durchgeführt, wobei auf jedem Betonuntergrund 8 Versuche durchgeführt werden. Dabei kommen beide Betonuntergründe in gleichem Umfang zum Einsatz. Nach Auswertung der Versuche mit feuchtem Beton zeigt sich, falls die Oberfläche nicht vollständig vom Oberflächenwasser befreit wird, eine meßbare Verlängerung der Verdampfungszeit (siehe Kapitel 3.1.3), so daß die Betonoberfläche vor Versuchsdurchführung abgetrocknet bzw. eine definierte Wassermenge aufgebracht wird.

Tabelle 3.5: Durchgeführte Versuche zur Verdampfung von LN_2 über Bitumen und Beton (trocken/feucht)

Versuch Nr.	Unter-grund	Datum	Bild	Anfangs masse [kg]	Anfangs-temperatur [°C]	Dauer der Verdampfg. [s]	Feuchte d. Probe [g/kg]	Oberflächen -wasser [ml]
1		10.12.92		- [1]	19	369	-	-
2		11.12.92		- [1]	22,6	300	-	-
3		17.12.92		- [1]	19	217	-	-
4		28.01.93		2,1	18,8	54	-	-
5	Bitumen	31.03.93		3,9	21	144	-	-
6		01.04.93		2,6	19,6	64	-	-
7		05.05.93		4	21,8	148	-	-
8		06.05.93		2	20,9	52	-	-
9		18.05.93	3.3	6,8	24	370	-	-
10		08.06.93		1,26	23,5	>258[2]	-	-
11		08.06.93	3.4	1,26	23,5	345	-	-
12		16.06.93		0,68	20,7	130	-	-
13		16.06.93		0,36	21	60	-	-
14		17.06.93		0,69	18,9	139	-	-
15		17.06.93		0,36	19,5	58	-	-
16		23.06.93		1,25	19,1	234	20	- 1
17	Beton	23.06.93		0,66	19,6	127	20	- 1
18		29.06.93	3.5	1,26	19,2	197	20	trocken
19		29.06.93		1,25	18,7	203	20	trocken
20		05.07.93		1,26	24	257	20	40
21		05.07.93		1,26	23,4	280	20	- 1
22		19.07.93		1,26	19,3	256	20	40
23		19.07.93		1,26	19,2	292	20	80
24		21.07.93		1,26	17,9	205	20	trocken
25		21.07.93		1,24	17,7	201	20	trocken

[1]Wurde nicht gemessen

[2]Messung wurde vor Versuchsende abgebrochen

3.1.3. Ergebnisse

In den Bildern 3.3 bis 3.5 sind die experimentellen Ergebnisse der Verdampfungsversuche über Bitumen und Beton (trocken/feucht) dargestellt. Dazu werden die gemessenen Werte des Massenverlustes über der Zeit und der Temperaturen in verschiedenen Tiefen des Untergrundes über der Zeit dargestellt. Ein Vergleich mit entsprechenden Rechnungen erfolgt in Kapitel 5. Bei allen Versuchen haben die Thermoelemente an der Unterseite der Proben keine Temperaturänderung aufgezeichnet.

Bild 3.3 auf Seite 44 zeigt die Verdampfung von 6,8kg LN_2 über Bitumen, Bild 3.4 auf Seite 45 die von 1,26kg LN_2 über Beton. Am Anfang ist die Zunahme der Masse durch das Aufbringen des LN_2 sichtbar. Daran schließt die Massenabnahme durch Verdampfung an. Nach 380s (Beton 330s) ist der LN_2 vollständig von der Oberfläche verdampft. Entsprechend dem Abstand zur Oberfläche sprechen die Thermoelemente in der Tiefe des Untergrundes mit unterschiedlicher Verzögerung an. Nach Ende des Verdampfungsvorganges steigt die Temperatur wieder an, weil nun Wärme aus der Umgebung aufgenommen wird.

Der zu erwartende Verlauf der Masse über der Zeit müßte aufgrund der Phänomene des Film-, Übergangs- und Blasensiedens durch eine zunächst kleine Verdampfungsrate, die sich durch den verbesserten Wärmeübergang zwischen Untergrund und kryogener Flüssigkeit im Bereich des Übergangssiedens erhöht und im Bereich des Blasensiedens wieder kleiner wird, zu erkennen sein. Dies ist dem gemessenen LN_2-Massenverlauf und Temperaturverlauf über der Zeit nicht zu entnehmen: Zu Beginn ist die Verdampfungsrate größer (d.h. auch die LN_2-Massenabnahme) als gegen Ende, was jedoch keine Aussage über den Siedezustand an der Oberfläche erlaubt.

Bild 3.5 auf Seite 46 zeigt die Verdampfung von 1,26kg LN_2 über feuchtem Beton. Nach Aufbringen des LN_2 findet dabei zunächst eine langsame Verdampfung statt, an die sich nach ca. 40s eine Phase der schnelleren Verdampfung anschließt. Dieser Bereich wird schnell durchlaufen und es schließt wiederum ein Bereich der langsameren Verdampfung an. Nach ca. 200s ist der LN_2 von der Oberfläche verdampft. Die Zeit bis zur vollständigen Verdampfung des LN_2 von der Oberfläche verlängert sich, wenn die Oberfläche mit Wasserresten bedeckt ist (vgl. Tabelle 3.5). Dennoch bleibt die Zeit bis zur vollständigen Verdampfung in den hier untersuchten Fällen mit einer zusätzlichen Benetzung der Oberfläche mit Wasser (bis 80ml, was einer Wasserhöhe von ca.3,1mm über der Oberfläche entspricht) geringer als bei trockenem Beton. Grund für die kürzere Verdampfungszeit ist die Abgabe der Erstarrungsenthalpie des im Untergrund vorhandenen Wassers, was eine zusätzliche "Wärmequelle" im Untergrund in oberflächennahen Schichten bedeutet.

Nach Aufbringen des LN_2 wird durch Verdampfung dem Untergrund Wärme entzogen, bis die Temperatur an der Oberfläche den Gefrierpunkt des Wassers erreicht. Das im Untergrund

vorhandene Wasser erstarrt zu Eis, die Erstarrungsenthalpie wird frei. Durch den Phasenübergang ändern sich die Stoffwerte entsprechend der Zusammensetzung Beton/Wasser bzw. Beton/Eis. Die Abgabe der Erstarrungsenthalpie tieferer Schichten und die bessere Wärmeleitfähigkeit des Beton/Eis- gegenüber dem Beton/Wassergemisch bewirken eine schnellere Temperaturabnahme der Oberfläche und damit einen geringeren Wärmeübergang.

Optische Beobachtungen der verdampfenden Flüssigkeit sind während der gesamten Versuchsdauer durch eine Dampfwolke über der Flüssigkeit nicht möglich. Erst gegen Ende des Versuchs, wenn nur noch einzelne Reste an der Oberfläche sieden, ist die Oberfläche einsehbar.

Nach Versuchsende werden die Oberflächen der Probenkörper auf Beschädigungen untersucht. Die Inspektion der Oberfläche der Bitumenprobe zeigt, daß diese sehr widerstandsfähig gegen die beträchtlichen Temperaturunterschiede ist. Es sind keine Risse zu erkennen. Lediglich kleine Partikel werden aus der Oberfläche gelöst, die nach Ende der Verdampfung lose auf der Oberfläche liegen.

Auch die Betonprobe weist nach jedem Versuch ohne Feuchte keine Beschädigungen auf. Auf jeder Betonprobe werden fünf Versuche mit Feuchte im Probenkörper durchgeführt. Bei feuchtem Beton ist nach Verdampfungsende auf der Oberfläche eine dünne weiße Schicht aus gefrorenem Oberflächenwasser (Reif) sichtbar. Nach den ersten vier Versuchen ist keine Beschädigung der Oberfläche erkennbar; nach dem fünften Versuch (Nr. 24 bzw. 25) sind auf der Oberfläche beider Proben kleine Risse sichtbar, so daß die Proben für weitere Experimente nicht mehr benutzt wurden.

Wie in Tabelle 3.5 zu sehen ist, wurde auch die Anfangsmasse variiert. Damit kann der Einfluß der LN_2-Schichtdicke auf den Verdampfungsprozess untersucht werden; er kommt durch den hydrostatischen Druck des LN_2 zustande. Im Rahmen aller in dieser Arbeit durchgeführten Versuche mit Bitumen und Beton liegt dieser Einfluß auf die Verdampfung jedoch in der Fehlerbandbreite und kann folglich nicht isoliert werden. Zum Vergleich mit Rechnungen werden deshalb später nur die Versuche mit größerer Anfangsmasse herangezogen, um deren Gültigkeit auch für größere Zeiten zu demonstrieren.

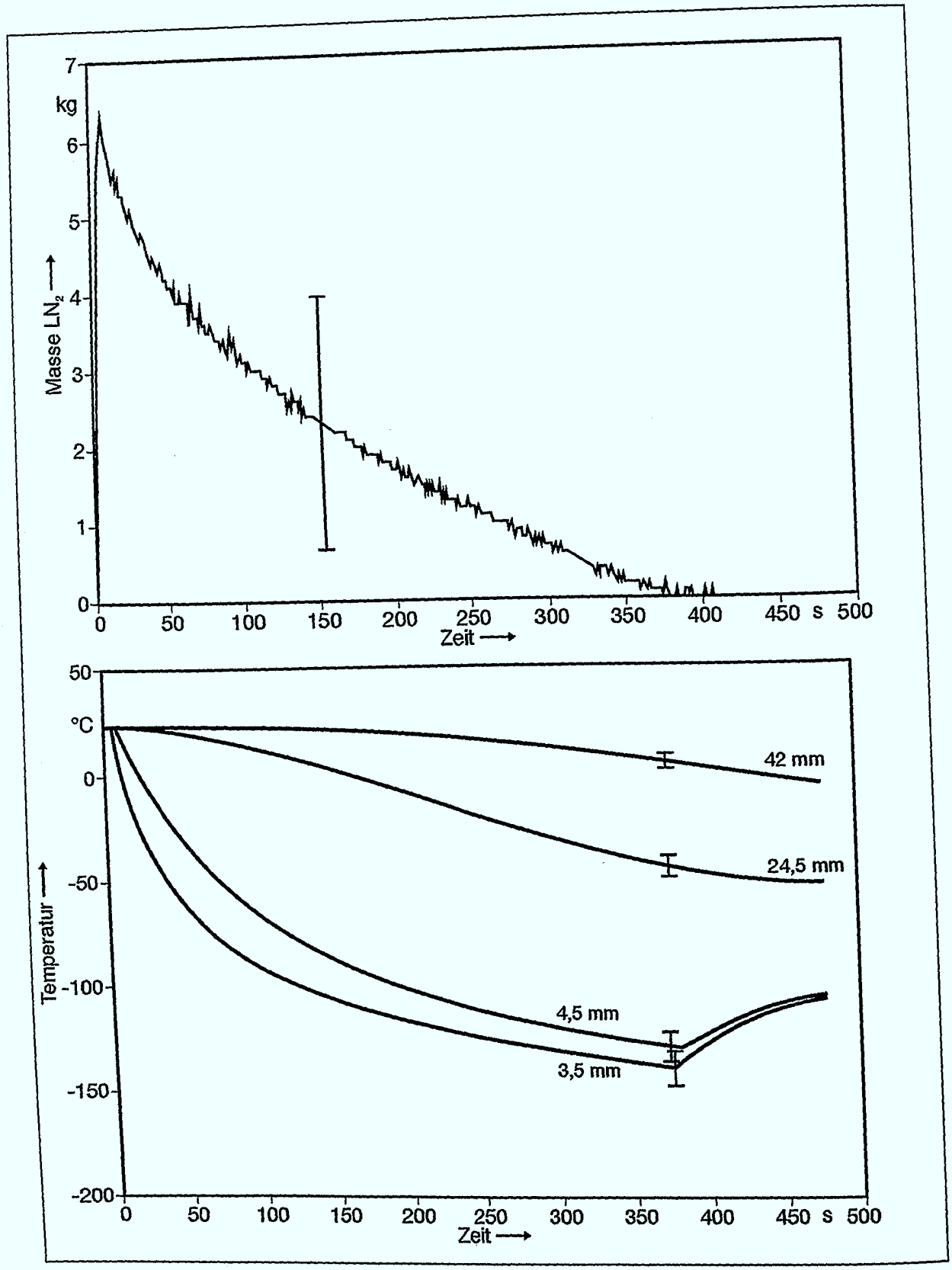


Bild 3.3: Darstellung der experimentellen Ergebnisse der Masse über der Zeit und der Temperaturen in verschiedenen Tiefen des Probekörpers über der Zeit einer Verdampfung von 6,8 kg (8,5 l) LN_2 auf Bitumen

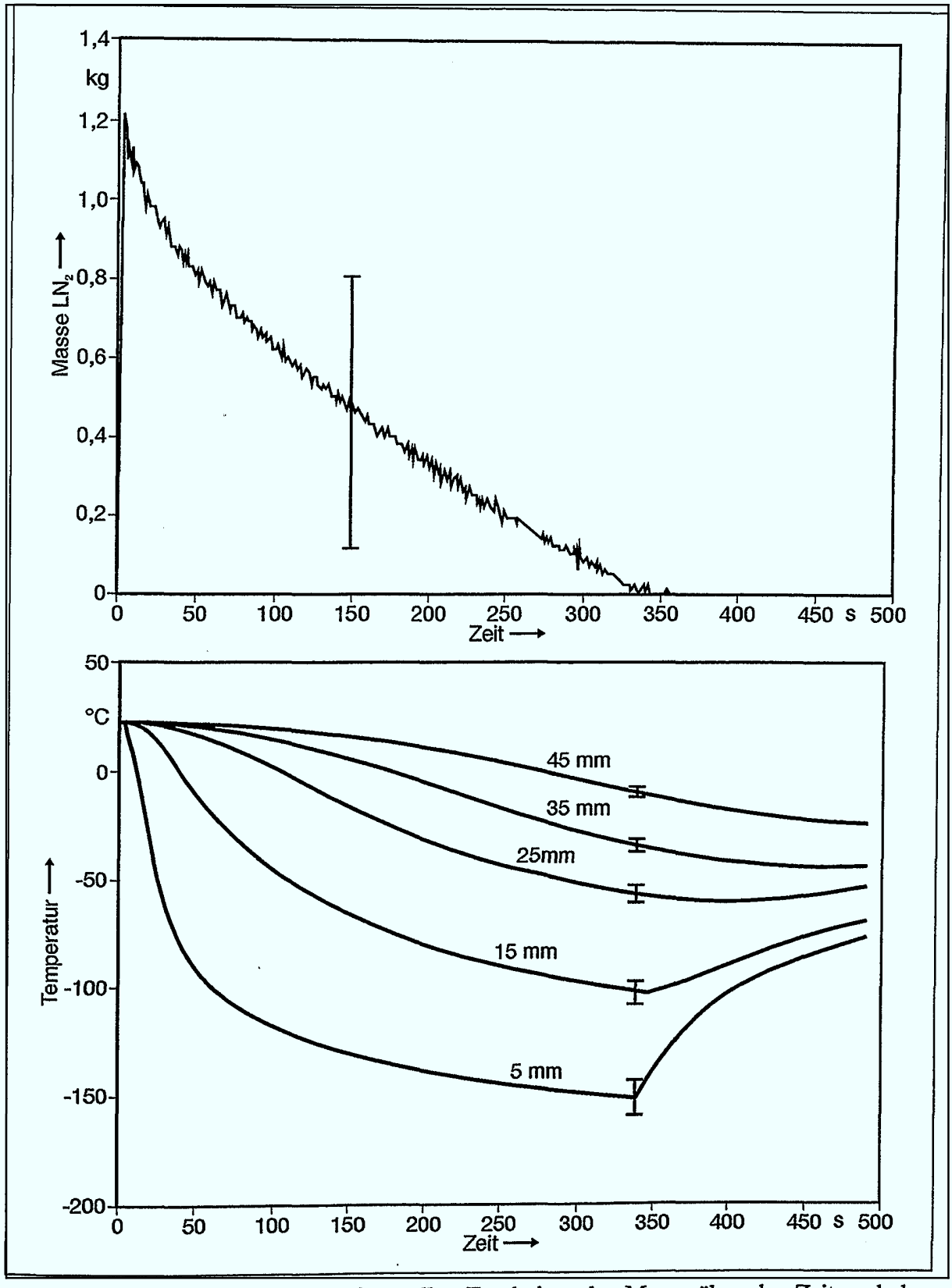


Bild 3.4: Darstellung der experimentellen Ergebnisse der Masse über der Zeit und der Temperaturen in verschiedenen Tiefen des Probekörpers über der Zeit einer Verdampfung von 1,26 kg (1,5 l) LN_2 auf trockenem Beton

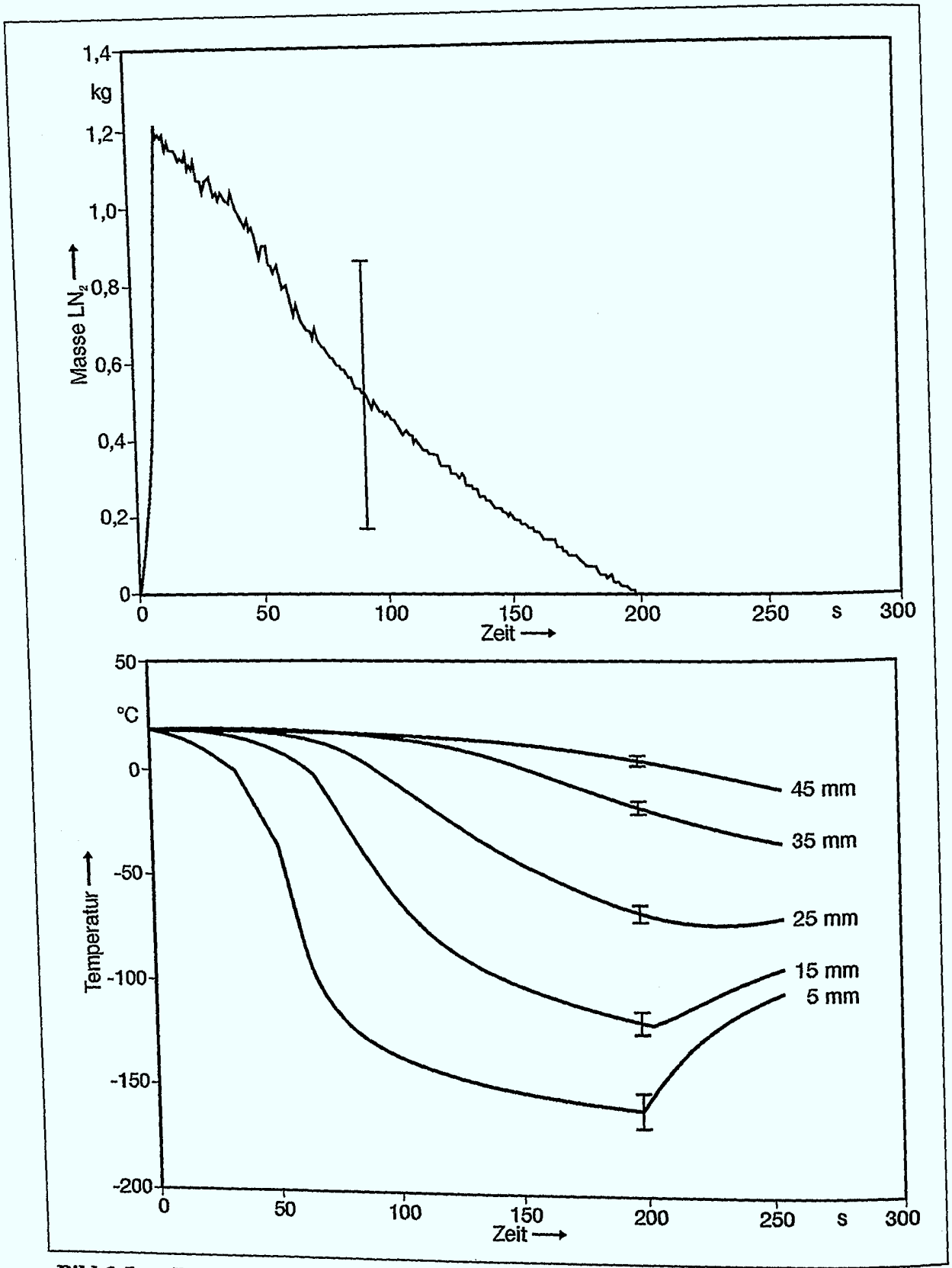


Bild 3.5: Darstellung der experimentellen Ergebnisse der Masse über der Zeit und der Temperaturen in verschiedenen Tiefen des Probekörpers über der Zeit einer Verdampfung von 1,26 kg (1,5 l) LN_2 über feuchtem Beton

3.2. Untersuchung der Lachenausbreitung und -verdampfung von flüssigem Stickstoff über Wasser

3.2.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus



Bild 3.6: Ansicht der KIWI-Versuchseinrichtung. Im Vordergrund befindet sich die Meßdatenerfassungsanlage. Am linken Bildrand ist der LN_2-Behälter zu sehen, der bei den Versuchen mit kontinuierlicher Freisetzung verwendet wird.

Zur systematischen experimentellen Untersuchung und zum Nachweis von Phänomenen und Einzeleffekten der radialen Ausbreitung einer Lache aus kryogener Flüssigkeit, wie beispielsweise der Ausbreitung als "Ring" (vgl. Kapitel 2), wird die sogenannte KIWI-Versuchseinrichtung (**Ki**ppvorrichtung zur Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von flüssigem Stickstoff über **W**asser bei **i**nstationären Bedingungen) gebaut.

KIWI stellt einen 60° Kreisausschnitt mit zentraler Zuleitung (am Kreismittelpunkt), bei der am äußeren Radius zur Vereinfachung die Wand begradigt wird. Die Draufsicht (Bild 3.7) zeigt den Versuchsaufbau. Die Freisetzung/Zuleitung des LN_2 erfolgt aus der Kippe im "Kreismittelpunkt". Die Kippe ist drehbar im 0,5m x 1m großen Trägerkasten untergebracht. Daran schließen in einem Winkel von 60° zueinander die seitlichen 12m langen Stellwände an.

Die Rückwand ist mit 13,25m etwas länger als die seitlichen Stellwände. Die Stellwände und der Trägerkasten sind an der Unterseite mit einer Folie, die den Boden bildet, wasserdicht verschraubt. Die Höhe der seitlichen Stellwände beträgt 0,6m, die Wassertiefe 0,5m, die Gesamtfläche 72m² und das Wasservolumen 36m³. Die Experimentiereinrichtung ist auf einem ebenerdigen Fundament im Freien aufgebaut.

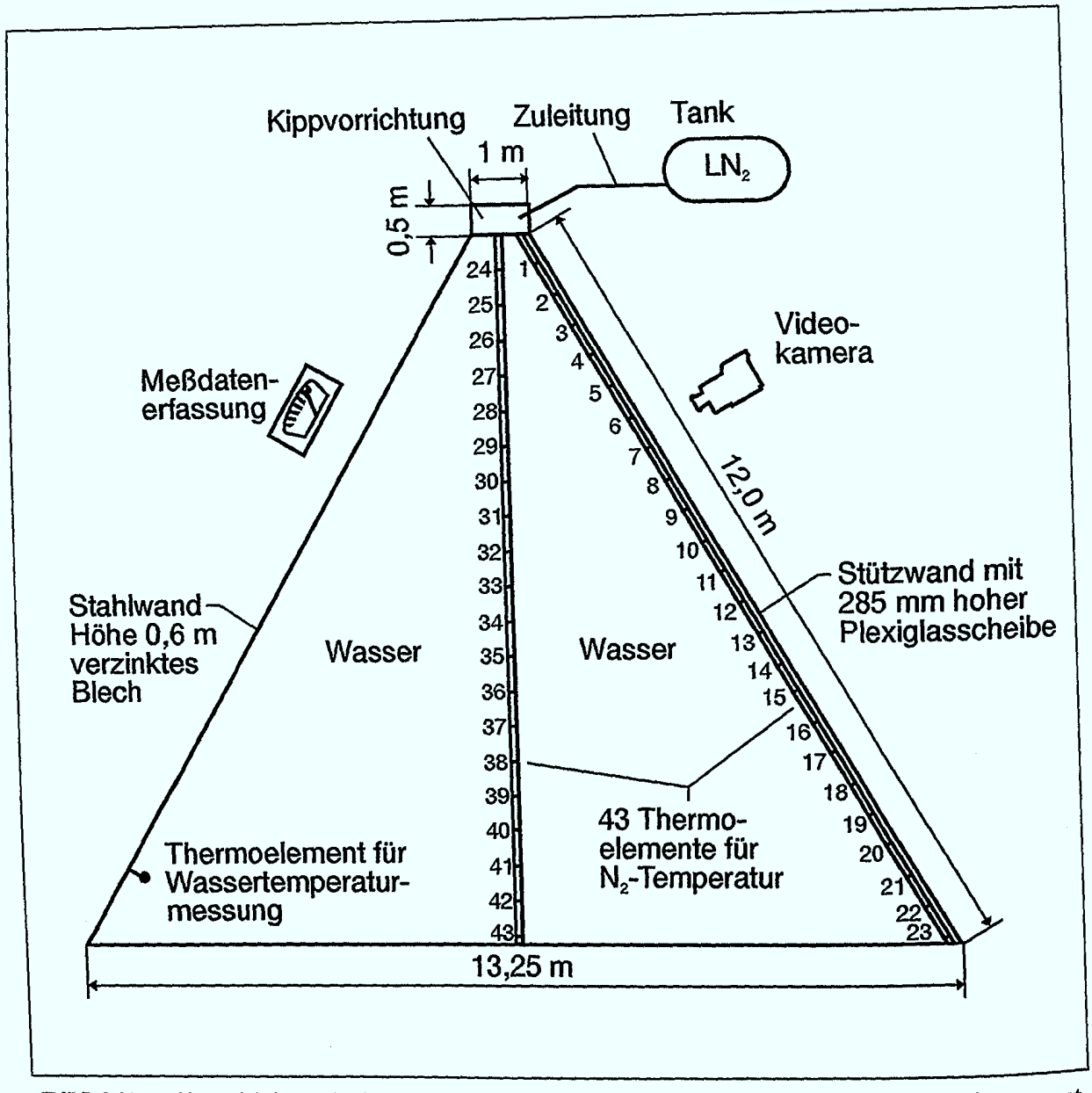


Bild 3.7: Draufsicht auf die KIWI-Versuchseinrichtung mit den Positionen der insgesamt 43 Thermoelemente. Auf der rechten Seite (Videokamera) ist ein Teil der Wand aus Plexiglas.

An einer Seite ist zur optischen Beobachtung der Lache mit der Videokamera Video 8 Pro der Fa. Sony durchgehend eine 285mm hohe Plexiglasscheibe angebracht. Weil kalter Stickstoffdampf schwerer als die umgebende Luft ist, fällt die entstehende kalte Dampfwolke über die seitlichen Wände vor die Plexiglasscheibe und behindert die Sicht. Um dies auszuschalten, wird über der Plexiglasscheibe eine ca. 1,5m hohe Folie angebracht (siehe Bild 3.6 auf Seite 47), welche die Dampfwolke von der Vorderseite der Plexiglasscheibe fernhält.

Der Einsatz von KIWI ist nur für die Untersuchung der Ausbreitung nicht-brennbarer kryogener Flüssigkeiten zulässig. Es sind schlagartige Freisetzungen von Mengen bis 80 l möglich. Die maximale Freisetzungsrate der kontinuierlichen Versuche liegt bei ca. 2,5 l/s.

Für Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung (Bild 3.8) sind als zusätzliche Einrichtungen erforderlich: Stickstoff-Druckgasflaschen, Druckgasleitung, ein 600 Liter fassender LN_2-Behälter, eine Einspeiseleitung sowie ein Diffusor zum Abbau der Geschwindigkeit des LN_2 zur gleichmäßigen Verteilung in der Kippe. Mit den N_2-Druckgasflaschen wird ein Druck im Behälter aufgebracht, der zur Ausspülung von LN_2 durch die Einspeiseleitung erforderlich ist. Der LN_2-Massenabnahme wird mit einer Waage der Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik (Meßbereich 0-1000kg, Meßgenauigkeit *1kg*) gemessen und auf dem Schreiber LR 8100 der Fa. Yokogawa ausgegeben.

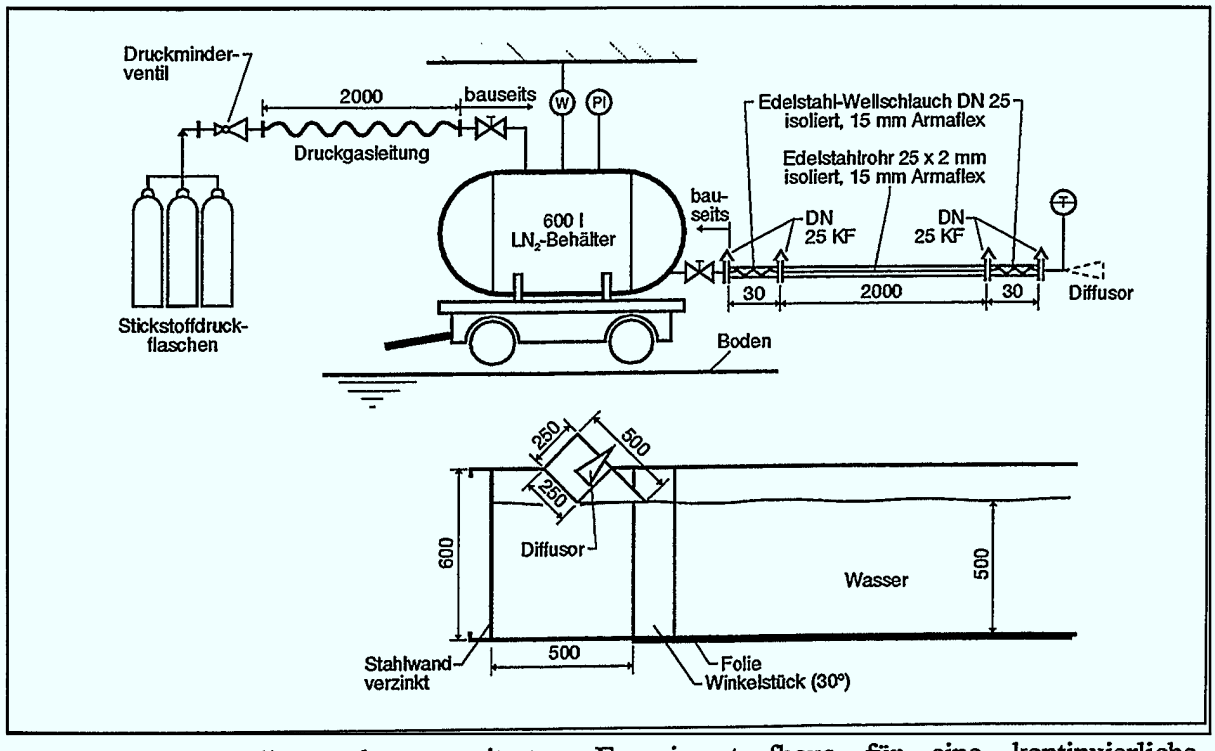


Bild 3.8: Darstellung des erweiterten Experimentaufbaus für eine kontinuierliche Freisetzung.

Zur meßtechnischen Erfassung der Lachenausbreitung werden in Ausbreitungsrichtung 43 NiCr-Ni-Thermoelemente angebracht, die über das Temperatur-Zeit-Verhalten Auskunft geben, zu welchem Zeitpunkt Kontakt zu gasförmigem oder flüssigem Stickstoff vorliegt. Die Messung der Ausbreitung erfolgt in zwei Ästen. Der erste Ast (Thermoelemente 1-23) verläuft in einem Abstand von 320mm parallel zur Plexiglasscheibe. Der zweite Ast (Thermoelemente 24-43) in der Symmetrieachse der KIWI. Das erste Thermoelement befindet sich bei jedem Ast im Abstand von 0,4m vom Kippenrand. Der Abstand zwischen den Thermoelementen beträgt je 0,5m. Aufgrund des Dichteverhältnisses LN_2/Wasser taucht die Lache zu 80% unter den Wasserspiegel. Deshalb werden die Thermoelemente in Höhe der Wasseroberfläche installiert, so daß die Lache auch bei geringer Höhe erfaßt werden kann.

Es wird außerdem ein Modell der KIWI-Versuchanlage im Maßstab 1:10 komplett aus Plexiglas angefertigt, um Konvektionsvorgänge im Wasser und die "ringförmige" Ausbreitung der LN_2-Lache genauer zu untersuchen. Die Seitenlängen betragen entsprechend 1,2m bzw. 1,3m, die Größe der Aussparung für die Kippvorrichtung 0,05m×0,1m. Die Höhe der seitlichen Wände, die mit Silikon auf einer 1,5m×1,2m großen Plexiglasscheibe verklebt sind, beträgt 15cm, die Wasserhöhe 10 cm und das eingefüllte Wasservolumen 78 Liter. Mit einem Schieber kann die 0,05m×0,1m große rechteckige Aussparung für die Kippvorrichtung zur Befüllung mit LN_2 abgetrennt und danach mit bis zu 0,5 l LN_2 befüllt werden. Die LN_2-Ausbreitung auf der Oberfläche kann durch die Plexiglasscheiben von den Seiten und von unten beobachtet werden. Die Sicht von oben auf die Lache wird durch die Dampfwolke verhindert.

3.2.2. Versuchsablauf und durchgeführte Versuche

Zunächst sollen die Versuche mit schlagartiger Freisetzung behandelt werden. Um Verdampfungsverluste zu minimieren, wird die Kippe mit LN_2 zunächst vorgekühlt. Anschließend kann die freizusetzende Menge LN_2 in der Kippe eingestellt und binnen kürzestmöglicher Zeit durch Drehen der Kippe (Dauer: max. 1s) auf die Wasseroberfläche freigesetzt werden. Der Start der Messung erfolgt, sobald die Kippe eine bestimmte Winkelstellung erreicht hat. Die Thermoelementspannungen werden von der bereits beschriebenen mobilen Meßdatenerfassung HP 3852 A alle 0,4s abgefragt, in Temperaturwerte umgerechnet und auf Festplatte gespeichert. Die Gesamtmeßdauer beträgt ca. 100s.

Für die kontinuierlichen Versuche wird der Versuchsaufbau entsprechend Bild 3.8 erweitert. Bevor der 600-Liter-LN_2-Behälter mit Druck beaufschlagt wird, wird die Übertragungsleitung durch Zuleitung von LN_2 vorgekühlt. Die Temperatur der Übertragungsleitung wird mittels Thermoelement an der Außenwand vor dem Diffusor gemessen. Die Vorkühlung ist erforderlich, um bei den eigentlichen Versuchen eine Dampfbildung in der Leitung zu verhindern; geringe Dampfgehalte beeinflussen die Freisetzungsrate stark. Nach Aufbringen

des gewünschten Druckes ($p_{abs,max}$ = *0,45 MPa)* wird gewartet, bis der Druck im Behälter konstant bleibt. Nach Öffnen des LN_2-Auslaßventils strömt LN_2 in die Kippe und von dort aus auf die Wasseroberfläche. Während des Versuchs wird der Tankinnendruck konstant gehalten, was zur Erzielung eines konstanten Volumenstroms erforderlich ist. Der Start der Messung erfolgt zeitgleich mit dem Beginn der Freisetzung. Der Meßzyklus entspricht dem der Versuche mit schlagartiger Freisetzung, die Dauer der Messung liegt zwischen 300s und 1000s. In den meisten Versuchen wird nach ca. 60s die LN_2-Freisetzung beendet, weil der stationäre Radius einer kontinuierlichen Freisetzung schon nach wenigen Sekunden erreicht und damit der dynamische Teil der Ausbreitung abgeschlossen ist. Der Lachenradius, die eigentliche Meßgröße, wird sich im folgenden nur unwesentlich verändern, weshalb von Versuchen mit längerer Freisetzungsdauer abgesehen wird.

In den Tabellen 3.6 auf Seite 53 und 3.7 auf Seite 54 sind die Randbedingungen der durchgeführten Versuche zusammengestellt. Von den insgesamt 42 Versuchen entfallen 24 Versuche auf die schlagartige Freisetzung (Tabelle 3.6). Die Anfangsmenge variiert von 20 bis 80 l LN_2. 18 Versuche dienen der Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens bei kontinuierlicher Freisetzung (Tabelle 3.7). Die Freisetzungsrate variiert dabei von 1,0 bis 2,5 l/s und die Freisetzungsdauer von 60 bis 172 s. Insgesamt werden während der Versuche ca. 7000 l LN_2 freigesetzt. Im Gegensatz zu den Versuchen mit schlagartiger Freisetzung des LN_2 wird bei den Versuchen mit kontinuierlicher Freisetzung eine z.T. mehrere Zentimeter dicke Eisschicht beobachtet, deren Dicke in Tabelle 3.7 angegeben ist. Zu dem Zeitpunkt, an dem die Versuche durchgeführt wurden traten z.T. starke Windböen auf. Bei der Auswertung muß daher bei den jeweiligen Versuchen die Windgeschwindigkeit mit berücksichtigt werden.

Eine detaillierte Genauigkeitsanalyse wird in Anhang A vorgestellt. Danach beträgt die Genauigkeit der Radienmessung (Radien liegen im Bereich bis ca. 6m) während der Ausbreitung nach Auswertung der Thermoelementaufzeichnungen maximal

$$\Delta r = {}^{+\,0{,}33}_{-\,0{,}01}\ m\ , \tag{3.6}$$

und nach Auswertung der Videoaufzeichnungen

$$\Delta r = \pm\ 0{,}1 m\ . \tag{3.7}$$

Hat die Lache einen nahezu konstanten Radius erreicht, beträgt der maximale Fehler der Radienbestimmung

$$\Delta r = {}^{+\,0{,}51}_{-\,0{,}01}\ m\ . \tag{3.8}$$

Die Genauigkeit der Zeit beträgt

$$\Delta t = {}^{+\,1}_{-\,1{,}4}\ s\ , \tag{3.9}$$

nach Auswertung der Thermoelementaufzeichnungen bzw.

$$\Delta t = \frac{1}{25} s \,, \tag{3.10}$$

nach Auswertung der Videoaufzeichnung.

Bei den Versuchen mit schlagartiger Freisetzung beträgt der maximale Fehler in der Bestimmung der Anfangsmasse

$$\Delta m = {}^{+\,0,8}_{-\,5,9}\ kg \,. \tag{3.11}$$

Die Genauigkeit der Bestimmung des Flüssigkeitsanteils am freigesetzten Massenstroms beträgt für eine kleine Freisetzungsrate (0,8 kg/s bzw. 1,0 l/s),

$$\Delta \dot{m}_{ges} = \Delta \dot{m} + \Delta \dot{m}_v = {}^{+\,43}_{-\,79} \cdot 10^{-3}\, \frac{kg}{s} \,, \tag{3.12}$$

und für eine große Freisetzungsrate (2 kg/s bzw. 2,5 l/s),

$$\Delta \dot{m}_{ges} = \Delta \dot{m} + \Delta \dot{m}_v = {}^{+\,43}_{-\,278} \cdot 10^{-3}\, \frac{kg}{s} \,. \tag{3.13}$$

Tabelle 3.6: Randbedingungen bei den Versuchen mit schlagartiger Freisetzung von flüssigem Stickstoff auf der KIWI-Anlage

Versuch Nr.	Datum	Bild	Anfangs-volumen [l]	Freisetzungs-dauer [s]	durchschnittl. Windgeschw. [m/s]	Wasser-temperatur [°C]	Atmosphärische Bedingungen Luftdruck [kPa]	Lufttemp. [°C]	rel. Feuchte [%]
1	11.08.94		40	1	-	21,0	99,47	23,0	65
2	11.08.94		40	1	-	21,0	99,46	21,0	65
3	31.08.94		20	1	0,16	20,5	99,98	26,0	44
4	31.08.94		20	1	0,40	21,0	99,98	26,5	44
5	31.08.94		20	1	0,61	21,0	99,98	26,5	44
6	01.09.94		40	1	0,77	21,0	99,98	23,0	61
7	01.09.94		40	1	0,63	21,0	99,98	21,5	61
8	01.09.94		40	1	1,99	21,0	99,98	21,5	61
9	01.09.94		50	1	1,75	21,0	99,98	22,0	61
10	06.09.94	3.10	60	1	0,7	19,5	100.21	19,5	80
11	06.09.94	3.10	40	1	0,2	19,0	100.21	20,0	80
12	06.09.94		60	1	0,1	17,5	100,21	20,0	80
13	06.09.94		60	1	0,44	17,5	100,21	19,5	80
14	06.09.94		60	1	-	18,0	100,21	19,0	80
15	06.09.94		80	1	0,25	17,5	100,21	19,0	80
16	09.09.94		80	1	2,51	17,0	99,63	14,0	67
17	09.09.94		80	1	1,49	15,5	99,63	14,0	67
18	09.09.94		80	1	1,98	15,0	99,63	15,0	67
19	09.09.94		63	1	2,05	15,5	99,63	16,0	67
20	23.09.94		80	1	0,73	17,0	100,84	26,0	61
21	23.09.94		80	1	1,99	17,0	100,84	24,0	61
22	23.09.94	3.10	80	1	0,15	17,0	100,84	25,0	61
23	23.09.94		80	1	0,24	16,0	100,84	25,0	61
24	23.09.94		80	1	0,13	17,5	100,84	26,0	61

Tabelle 3.7: Randbedingungen bei Versuchen mit kontinuierlicher Freisetzung von flüssigem Stickstoff auf der KIWI-Anlage

Versuch Nr.	Datum	Bild	Volumen-strom [l/s]	Freisetzungs-dauer [s]	durchschnittl. Windgeschw. [m/s]	Eisdicke [mm]	Wasser-temperatur [°C]	Atmosphärische Bedingungen Luftdruck [kPa]	Lufttemp. [°C]	rel. Feuchte [%]
25	09.11.94		1,2	112	0,6	-	12,0	99,2	11,5	82
26	09.11.94		1,9	153	0,0	-	11,0	99,2	10,5	82
27	11.11.94		1,5	172	0,8	-	10,0	100,2	10,0	82
28	11.11.94		2,5	117	0,6	-	10,6	100,3	9,5	82
29	22.11.94		1,9	110	0,0	-	11,6	101,1	12,0	73
30	22.11.94		1,8	108	0,0	-	10,8	101,4	11,0	73
31	23.11.94		2,1	216	0,0	-	10,0	101,5	12,0	74
32	28.11.94		1,3	65	0,0	5 - 10	9,9	102,3	10,0	88
33	28.11.94		2,2	213	0,0	10 - 20	9,6	102,3	9,6	88
34	29.11.94		1,1	72	0,0	5 - 8	8,6	102,0	7,0	82
35	29.11.94	3.11	1,0	60	0,0	5 - 10	8,1	102,0	4,0	82
36	29.11.94		1,2	62	0,0	5 - 10	8,3	102,0	3,0	82
37	30.11.94		-	-	0,0	-	7,2	101,7	6,0	84
38	30.11.94		2,2	66	0,0	5 - 8	5,9	101,7	6,0	84
39	30.11.94	3.11	2,1	66	0,6	5 - 8	6,4	101,7	5,0	84
40	01.12.94	3.11	1,5	64	0,6	4 - 13	5,0	101,5	8,0	69
41	01.12.94		2,0	81	0,6	5 - 15	4,7	101,5	8,0	69
42	01.12.94	3.11	2,5	73	0,6	-	4,5	101,5	6,0	69
			2,5 → 0	73 - 121						

3.2.3. Ergebnisse

Bei der Ausbreitung von LN_2 ist die Lache von der entstehenden Dampfwolke bedeckt, die schwerer ist als die umgebende Luft. In der Anfangsphase ist noch die Vorderkante der Lache sichtbar, die jedoch schnell von der nacheilenden Dampfwolke verdeckt und überholt wird. Während sich die Lache ausbreitet, ist ein "Knacken" zu hören, was vermutlich auf die einsetzende Eisbildung zurückzuführen ist. Hat die Lache eine gewisse Größe erreicht, brechen aus ihrer Front einzelne kleine Inselchen aus, die sich mit nahezu konstanter Geschwindigkeit weiterbewegen. Die Lache ist erst wieder bei Verdampfungsende sichtbar, wenn sich die Dampfwolke lichtet. Dann jedoch liegt keine geschlossene Lache mehr vor, sondern nur noch einzelne kleine LN_2-Inselchen, die auf Eisschollen sieden.

Die Kontur der Lache wird durch die seitliche Plexiglasscheibe der KIWI-Versuchsanlage mit der Videokamera aufgezeichnet. Bei den Versuchen mit schlagartiger Freisetzung ist die Lachenkontur klar erkennbar. Bei den Versuchen mit kontinuierlicher Freisetzung ist die Kontur der Lache wegen der teils geringen Lachenhöhe optisch nicht erkennbar und kann daher nicht ausgewertet werden.

Bild 3.9 zeigt als Beispiel die Lachenkontur einer schlagartigen Freisetzung von 60 l LN_2 auf der KIWI-Versuchsanlage für verschiedene Zeiten. Die Ausbreitungsrichtung verläuft von links nach rechts. Deutlich zu erkennen ist die Wasserverdrängung. Man sieht ferner, daß die Lache im vorderen Bereich dicker ist und sich mit zunehmender Entfernung vom Freisetzungsort zuerst im Zentrum verdünnt. Die Lache schiebt eine Bugwelle an Wasser vor sich her. Der Dampffilm zwischen Lache und Wasser ist nicht zu erkennen, weil er zu geringe Abmessungen hat (Größenordnung 0,5mm).

Die Messung der Ausbreitung erfolgt, wie bereits beschrieben, in zwei Richtungen (Thermoelemente 1-23 bzw. 24-43). Für alle durchgeführten Versuche ohne Wind führen beide Messungen zum gleichen Ergebnis. Auch eine Windgeschwindigkeit bis ca. 0,8 m/s zeigt keinen meßbaren Einfluß. Zu Beginn der Ausbreitung ist die Lache unbeeinflußt vom Wind, weil die kinetische Energie der Lache groß ist. Gegen Ende der Ausbreitung, wenn die kinetische Energie kleiner wird, gewinnt der Wind zunehmend an Einfluß. Größere Windgeschwindigkeiten, wie beispielsweise bei Versuch Nr. 21 (vgl. auch Bild 3.11 auf Seite 58) zeigen, daß die Lache insbesondere gegen Ende der Ausbreitung deutlich beeinflußt wird. So wird an der Meßschiene der Thermoelemente 24-43, die genau in Windrichtung liegt und die Lachenausbreitung der Windgeschwindigkeit entgegengesetzt gerichtet ist, ein kleinerer Lachenradius gemessen als an der anderen Schiene (Thermoelemente 1-23), wo der Wind in einem Winkel von ca. 30° zur Lachenausbreitungsgeschwindigkeit angreift. Der Einfluß des Windes läßt sich in diesem Fall jedoch nicht genau quantifizieren, weil durch die Nähe der Meßschiene zur Berandung, wo die hochgezogene Plastikfolie die Windverhältnisse beeinflußt,

keine eindeutige Aussage über die tatsächliche Windgeschwindigkeit und -richtung getroffen werden kann. Daher werden für folgende Auswertungen stets die Ergebnisse der Thermoelemente 24-43 verwendet. Der Wind führt zu einer Aufrauhung der Wasseroberfläche, wobei durch Wellenbewegung im Wasser die Ausbreitung der Lache zusätzlich beeinflußt wird.

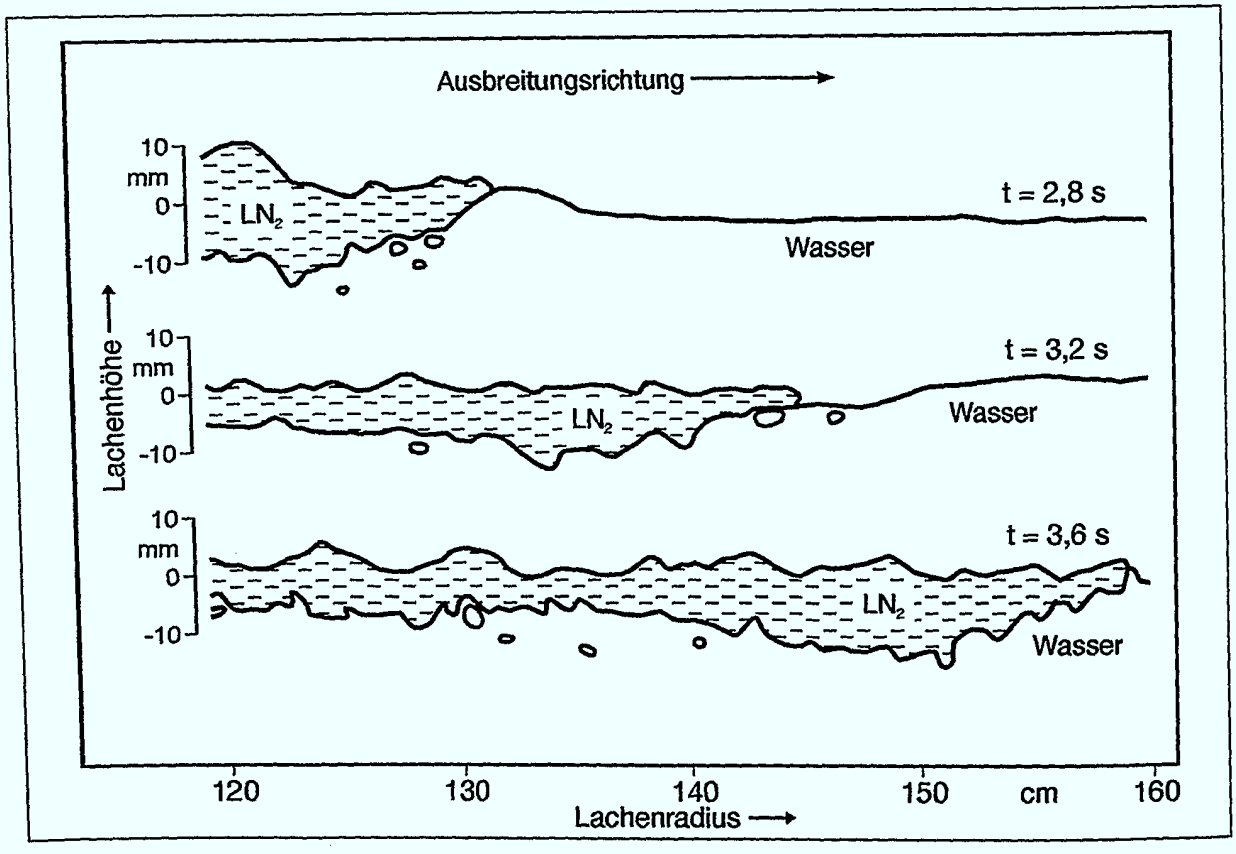


Bild 3.9: Lachenkontur einer sich ausbreitenden LN_2-Lache nach einer schlagartigen Freisetzung von 60 l LN_2 auf Wasser für verschiedene Zeitpunkte. Die Bilder wurden der Videoaufzeichnung durch die Plexiglasscheibe entnommen.

Die Auswertung der Temperaturaufzeichnungen ist in den Bildern 3.10 und 3.11 für insgesamt sieben verschiedene Experimente dargestellt. Bild 3.10 zeigt Ergebnisse von Experimenten zur schlagartigen Freisetzung von 40, 60 bzw. 80 l LN_2, Bild 3.11 solche der Experimente zur kontinuierlichen Freisetzung von 1.0, 1.5, 2.1 und 2.5 l/s. Die in Tabelle 3.6 erwähnten Versuche zur schlagartigen Freisetzung von 20 Liter werden in der Auswertung nicht berücksichtigt, weil durch die geringe Lachenhöhe die Aufzeichnungen der Thermoelemente keine eindeutigen Aussagen zulassen. Die Versuchsparameter der dargestellten Versuche sind Tabellen 3.6 und 3.7 zu entnehmen.

Bei schlagartiger Freisetzung (Bild 3.10) breitet sich der flüssige Stickstoff auf der Wasseroberfläche bei allen hier betrachteten Anfangsvolumina zu Beginn in etwa gleich schnell aus (weiße Symbole). Nach ca. 10 bis 15s zeigen sich Unterschiede im weiteren Verlauf, die durch die unterschiedlichen Anfangsvolumina bedingt sind. Die Lache beginnt sich zunächst in ihrem Zentrum aufzulösen. Durch Eisbildung an den Thermoelementen kann der hinteren Lachenkante (schwarze Symbole) in einigen Fällen nicht eindeutig ein Zeitpunkt zugewiesen werden, sondern es kann nur ein Zeitbereich angegeben werden [BRM95].

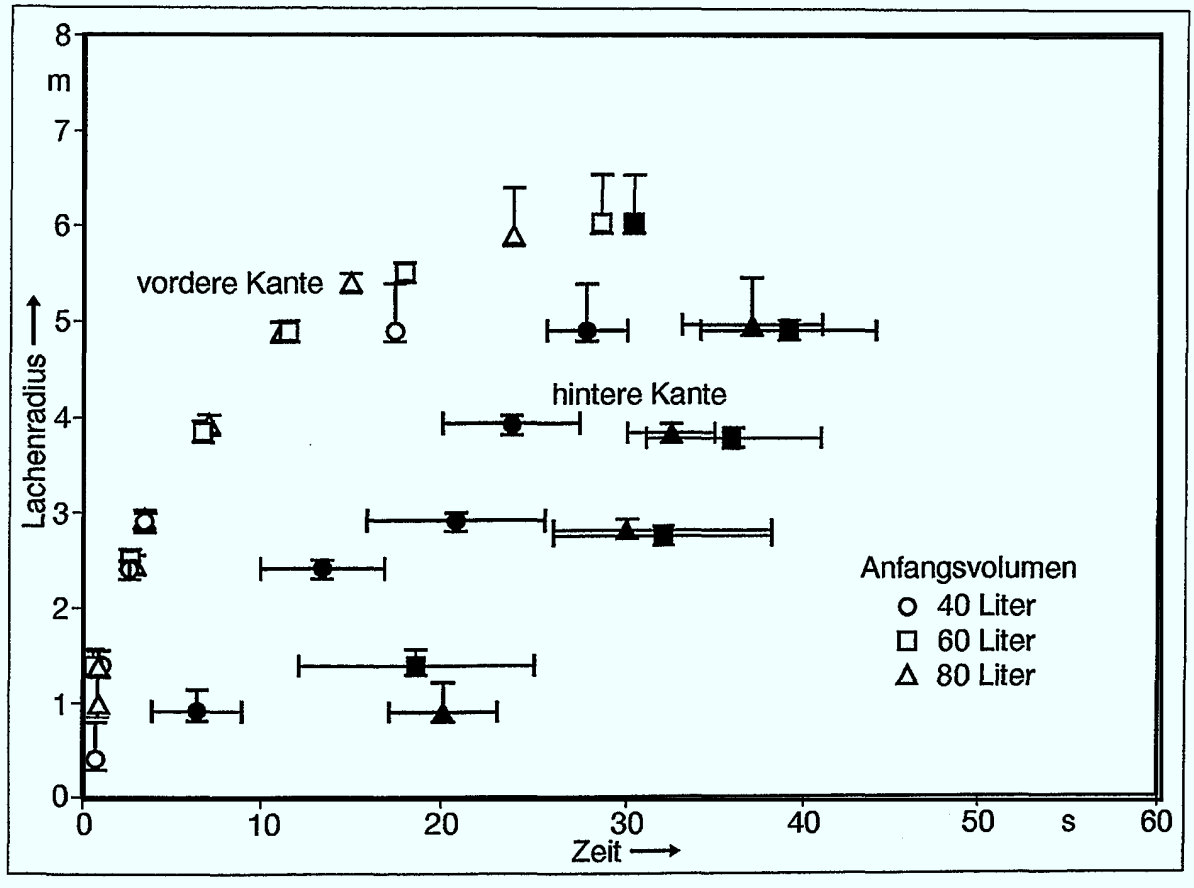


Bild 3.10: Meßergebnisse des Ausbreitungsverhaltens der Lache bei schlagartiger Freisetzung mit 40, 60 und 80 l LN_2 auf Wasser. Die leeren Zeichen symbolisieren, daß die Lache den Ort erreicht hat, die ausgefüllten Zeichen, daß die Lache den Ort verläßt.

Bei kontinuierlicher Freisetzung (Bild 3.11) ist eine deutliche Abhängigkeit des Lachenradius von der Freisetzungsrate erkennbar. Bei größeren Freisetzungsraten breitet sich die Lache schneller aus und erreicht einen größeren maximalen Lachenradius. Die hintere Lachenkante kann auch hier aus den gleichen Gründen wie bei den schlagartigen Versuchen nicht in allen

Fällen eindeutig ermittelt werden [BRM95]. Nach Versuchsende werden häufig LN_2-Inselchen in der Nähe bzw. an den Thermoelementen beobachtet, was auch auf den Meßwertaufzeichnungen zu verzeichnen ist. Dadurch läßt sich nicht immer eindeutig ein Zeitpunkt des Verdampfungsendes festlegen. Es kann jedoch häufig ein Zeitbereich angegeben werden, in dem sich die Lache auflöst. Der Versuch mit einer Freisetzungsrate von 2,5 l/s LN_2 hat mit 121s am längsten gedauert. Bei diesem Versuch ist ab 73s der Behälter allmählich leergelaufen. Im Experiment konnte ein kleiner werdender Lachenradius durch Verringerung des zugeführten Volumenstroms beobachtet werden (Bild 3.11).

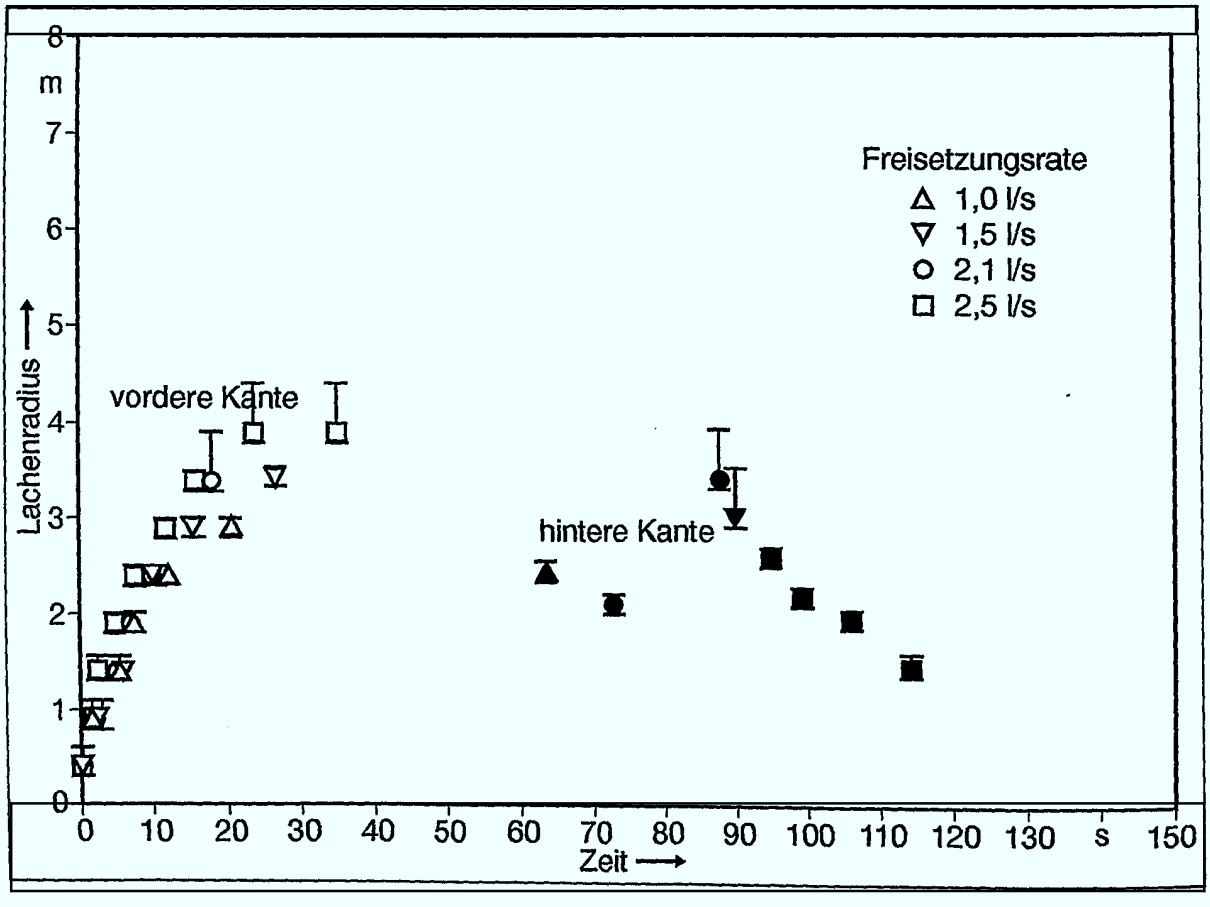


Bild 3.11: Meßergebnisse des Ausbreitungsverhaltens der Lache bei kontinuierlicher Freisetzung mit einem Volumenstrom von 1.0, 1.5, 2.1 und 2.5 l/s LN_2 auf Wasser. Die leeren Zeichen symbolisieren, daß die Lache den Ort erreicht hat, die ausgefüllten Zeichen, daß die Lache den Ort verläßt.

Bei den Versuchen mit schlagartiger Freisetzung bildet sich keine geschlossene Eisdecke, sondern eine aus einzelnen kleinen schalenförmigen Eisinseln (Durchmesser ca. 10-15mm) bestehende, wabenartige Eisstruktur (siehe Bild 3.12). Diese kommt aber erst in einigem

Abstand von der Kippe zustande. In der Nähe der Kippe werden zwar einige Eisinseln beobachtet, jedoch setzten sich diese nicht zu der wabenartigen Struktur zusammen.

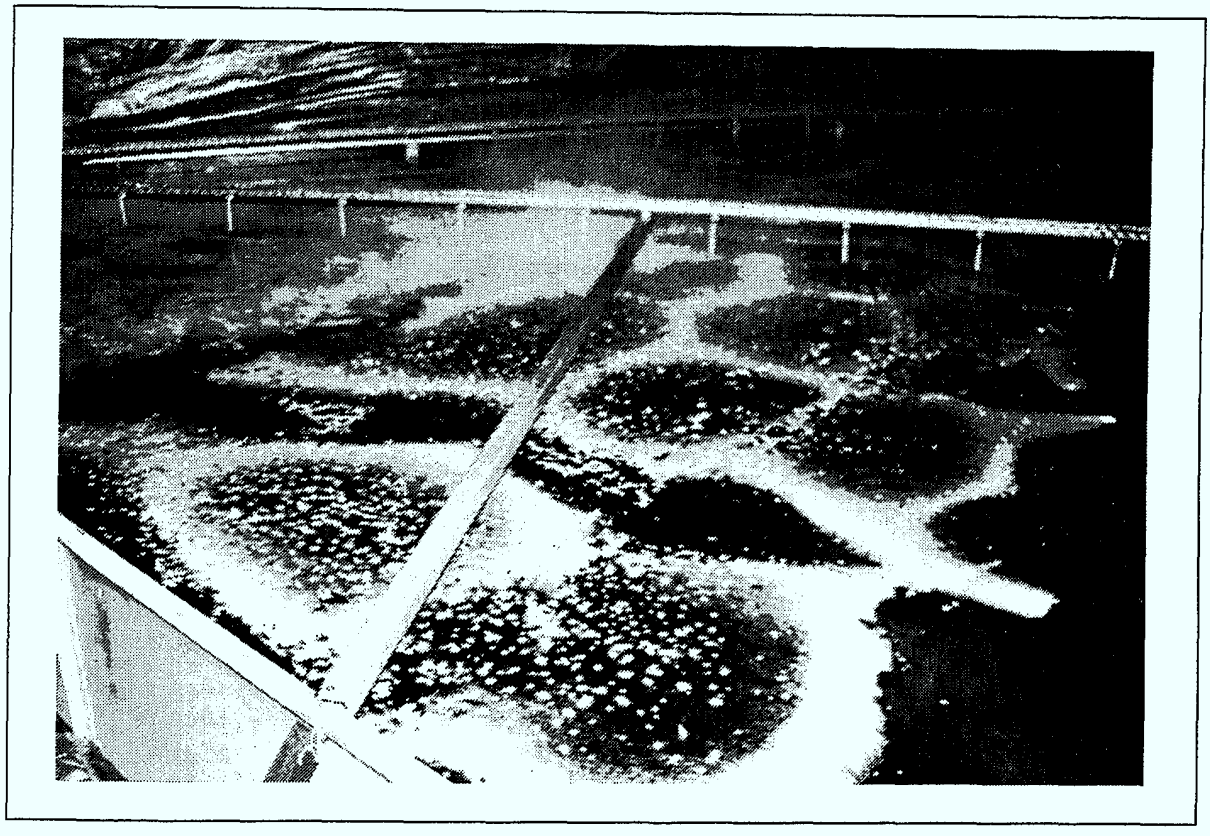


Bild 3.12: Typische Eisstruktur am Ende eines Experimentes mit schlagartiger Freisetzung. Zu sehen sind die wabenartigen Strukturen des Eises sowie kleine Reste siedenden Stickstoffes.

Bei den Versuchen mit kontinuierlicher Freisetzung ist diese Wabenstruktur nicht zu erkennen. Vielmehr ist eine fast vollständig geschlossene Eisschicht mit bizarren Strukturen an der Oberfläche vorhanden. Bei länger dauernden Versuchen ist die Eisdecke in mehrere Schollen von maximal ca. 3m Durchmesser auseinandergebrochen. Die einzelnen Schollen krümmen sich so stark, daß deren Rand bis zu 20cm unter den Wasserspiegel gedrängt wird. Bei noch länger dauernden Freisetzungen bildet sich an der Oberfläche erneut Eis, welches sich unter die Wasseroberfläche krümmt. Es werden daher auch mehrfach verschieden stark gewölbte Eisschollen übereinander beobachtet.

Diese Phänomen kann damit erklärt werden, daß durch die andauernde Verdampfung an der Eisoberfläche die Temperatur dort sinkt. Aufgrund der positiven Dehnung mit sinkender Temperatur und dem vorhandenen Temperaturgradienten über der Schichtdicke erfährt das Eis an der Oberfläche eine größere Dehnung als an der Unterseite. Dies führt zu Druckspannungen

an der Oberfläche des Eises und zum Auseinanderbrechen der vorher geschlossenen Eisdecke in einzelne Schollen. Diese wölben sich unter die Wasseroberfläche; Wasser tritt zwischen den Schollengrenzen an die Oberfläche, eine neue Eisschicht bildet sich und der beschriebene Vorgang läuft erneut ab, was zu den beschriebenen mehrfachen, verschieden stark gewölbten Eisschichten führt.

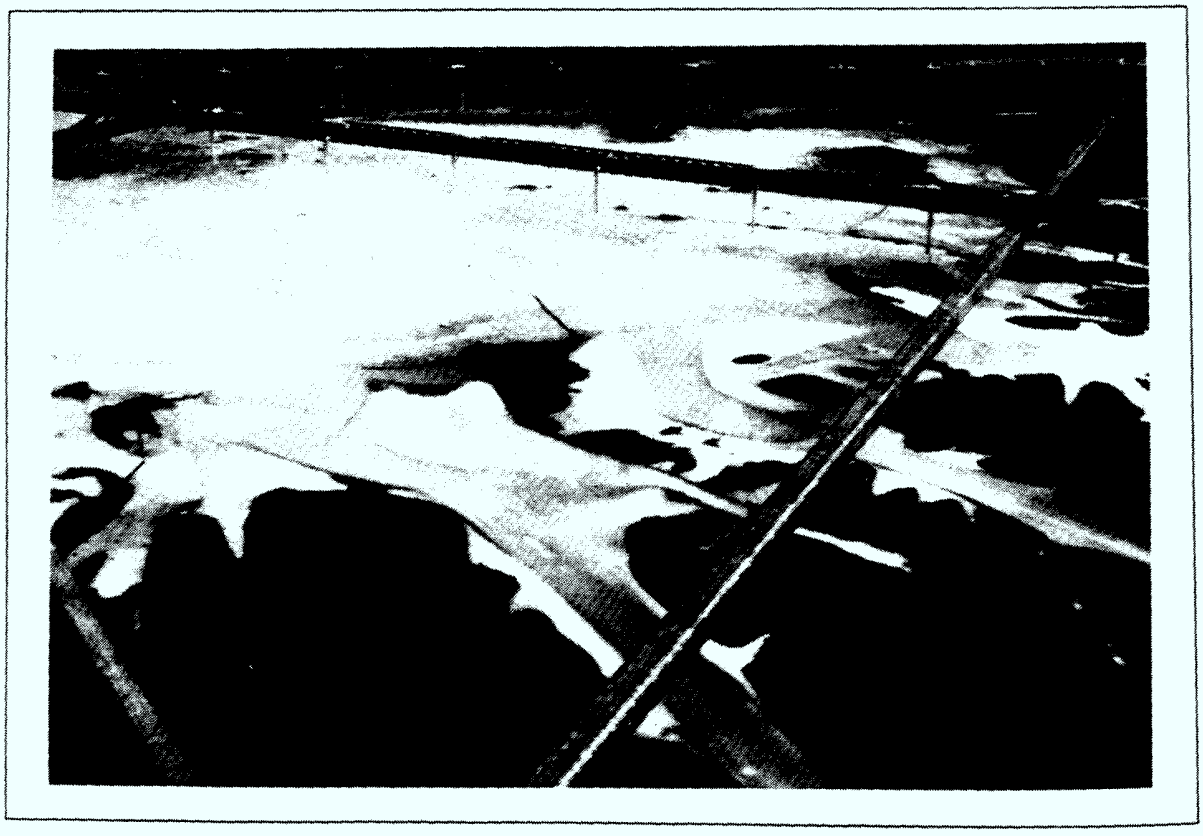


Bild 3.13: Typische Eisstruktur am Ende eines Experimentes mit kontinuierlicher Freisetzung. Zu sehen sind die strahlartig fortgesetzten Frontverläufe des Eises sowie kleine Reste siedenden Stickstoffes.

Zur genaueren Untersuchung der Eisbildung im Wasser, Konvektionsuntersuchungen und Ausbreitung des LN_2 auf der Wasseroberfläche wird in das Plexiglasmodell der KIWI-Versuchsanlage der Farbstoff Kaliumpermanganat ins Wasser eingebracht, der sich zunächst hauptsächlich am Boden niederschlägt. Die Ausgangswassertemperatur bei allen Versuchen beträgt 12-16°C. Bei der schlagartigen Ausbringung von maximal 0,5 l LN_2 auf das Wasser werden folgende Beobachtungen und Messungen gemacht:

- Die Lachenausbreitung als Teil eines "Ringes" kann bestätigt werden (Bild 3.14).
- Während der Ausbreitung des LN_2 ist keine Eisbildung zu beobachten.
- Die bei den KIWI-Versuchen beobachtete Eis-Wabenstruktur bildet sich nicht aus.

- Verweilen einzelne LN_2-Inseln längere Zeit über einem Ort, setzt Eisbildung ein. Übliche Eisdicken liegen im Bereich bis 1mm. Die kleinen Eisinseln haben die selbe konkave Form wie die kleinen Eisinseln, aus denen sich die wabenförmige Struktur des Eises bei den Versuchen auf KIWI zusammensetzt.
- Am Boden des Modells wird über denjenigen Stellen, an denen sich Eis bildet, der Farbstoff am Grund beiseite geschwemmt.
- In verschiedenen LN_2-Lachen sind feste kleine weiße Bestandteile erkennbar. Nach Analyse in einem Massenspektrometer handelt es sich dabei um ausgefrorene Bestandteile der Umgebungsluft, im wesentlichen um Kohlendioxid (CO_2).



Bild 3.14: Schlagartige Freisetzung von ca. 0,5 l LN_2 auf dem 1:10 Plexiglasmodell der KIWI-Versuchsanlage. Deutlich zu erkennen ist die Ausbreitung der Lache als Teil eines Ringes. Zur Verbesserung des Kontrastes wurde das Wasser bei manchen Versuchen mit Kaliumpermanganat eingefärbt.

Diese Beobachtungen lassen den Schluß zu, daß mit einigem Zeitverzug eine Konvektionsströmung unter der Lache einsetzt, sich Eisinseln mit ähnlichen Formen wie diejenigen aus der wabenartigen Eisstruktur auf der KIWI-Anlage bilden und ein Stofftransport

aus der Umgebung in die Lache erfolgt, dessen Einfluß auf die Verdampfung jedoch vernachlässigbar ist (siehe Tabelle 2.2 auf Seite 20).

Es wurden keine Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung unternommen, weil die Bildung einer zusammenhängenden Eisschicht das Modell hätte zerstören können.

3.3. Untersuchung der Lachenausbreitung und -verdampfung von flüssigem Wasserstoff über Wasser und Aluminium

3.3.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus



Bild 3.15: Ansicht des Freisetzungsortes zwischen zwei Gebäuden auf einem verlassenen Militärgelände in Lieberose/Cottbus. Deutlich zu erkennen ist die isolierte Übertragungsleitung des flüssigen Wasserstoffs zum Freisetzungsort.

Zur experimentellen Untersuchung der Ausbreitung einer Lache aus Flüssigwasserstoff wird der in den nachfolgenden Bildern 3.16 bis 3.20 dargestellte Versuchsaufbau gewählt. Weil bei solchen Versuchen die Explosion der entstehenden H_2-Dampfwolke nicht ausgeschlossen werden kann, können derartige Versuche nicht auf dem Gelände der KFA durchgeführt werden; jedoch bot sich die Möglichkeit, in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin und der Battelle Ingenieurtechnik GmbH Eschborn die Experimente auf einem verlassenen Militärgelände bei dem Dorf Drachhausen, etwa 20 km nördlich von Cottbus, durchzuführen.

Als besondere Schutzmaßnahme muß zur Absicherung gegen elektrostatische Aufladung die gesamte Versuchsanlage geerdet werden, für die Messdatenerfassungsanlage eine Schutzhaube

angefertigt und eine Fernauslösung zum Start der Messung installiert werden. Die Gebäude wurden weitgehend gasdicht versiegelt. Die komplette Kontrolle und Steuerung des Versuches erfolgte aus dem ca. 200m entfernten Bunker, der gleichzeitig als Personen-Schutzraum dient. Der Freisetzungsort war von dort aus nur über die installierte Fernsehanlage einsehbar.

Tabelle 3.8: Stoffdaten der verwendeten Untergründe (bei Umgebungstemperatur)

Stoffwerte		**Wasser**	**Aluminium**
Dichte	[kg/m³]	1000	2700
Wärmekapazität	[kJ/kg K]	4,187	0,879
Wärmeleitfähigkeit	[W/m K]	0,6	204

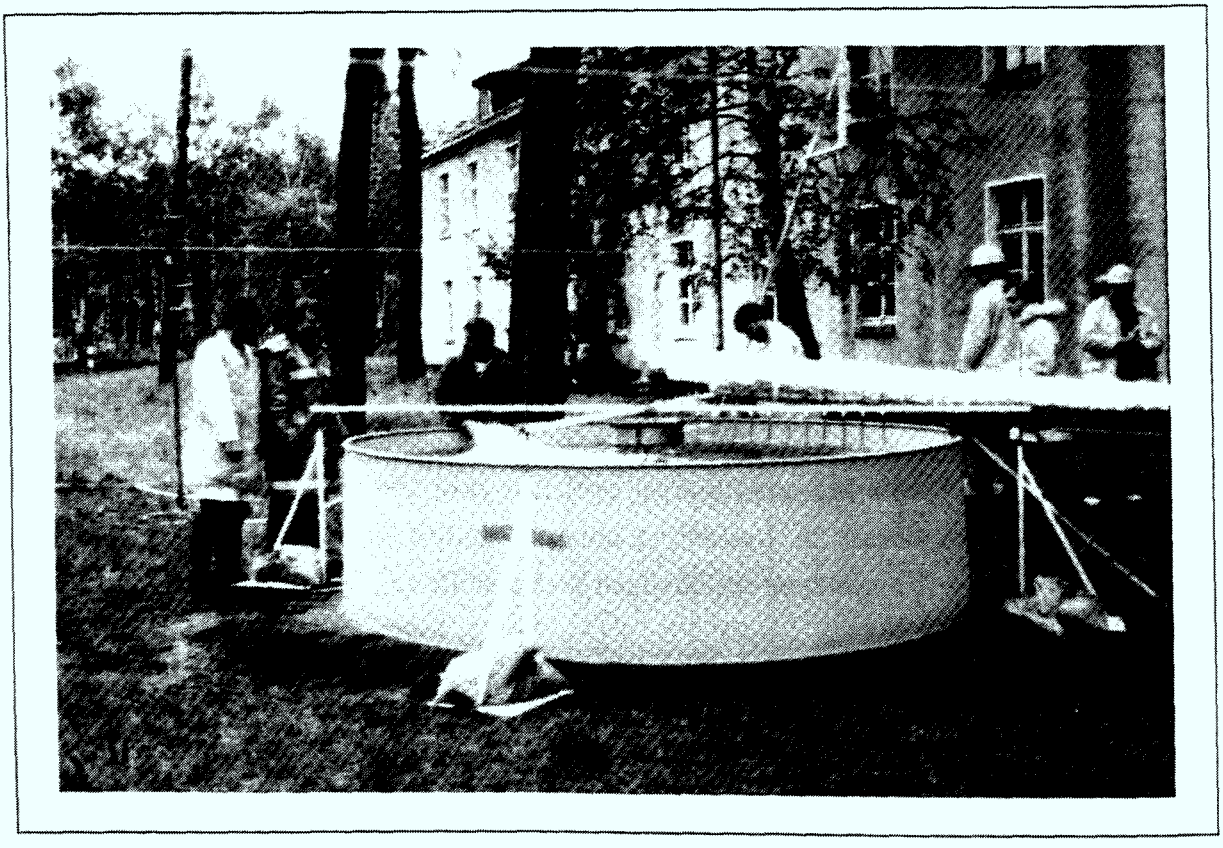


Bild 3.16: Experimenteinrichtung zur kontinuierlichen Freisetzung von flüssigem Wasserstoff auf Wasser.

Um die Gaswolkenausbreitung zwischen Gebäuden untersuchen zu können, wird der Freisetzungsort zwischen zwei Gebäuden gewählt (Bild 3.15). Für die Ausbreitung der Flüssigwasserstoff-Lache, die nach Vorausrechnungen mit dem später beschriebenen LAuV-

Code (vgl. Kapitel 4) nur einen Durchmesser von max. 2m erreicht, ist dies jedoch ohne Bedeutung. Die Lachenausbreitung wird auf zwei verschiedenen Untergründen, einem flüssigen (Wasser) und einem festen Untergrund (Aluminium), untersucht, die sich zum einen bezüglich ihres Aggregatzustandes, zum anderen wesentlich in den Stoffwerten (vgl. Tab. 3.8) unterscheiden. Auf jedem Untergrund werden zwei Versuche durchgeführt.

In Bild 3.18 sind die Abmessungen beider Untergründe sowie die zugehörigen Thermoelementpositionen in einem Bild dargestellt. Das Wasserbecken hat einen Durchmesser von 3500mm, eine Höhe von 1000mm und wird mit ca. 10 m^3 Wasser gefüllt. Es besteht aus einem Stahlmantel als Wand und einer PVC-Folie zur Auskleidung. Meßbrücke und Diffusorhalter werden mit vier Stützen außerhalb des Beckens arretiert und nivelliert.

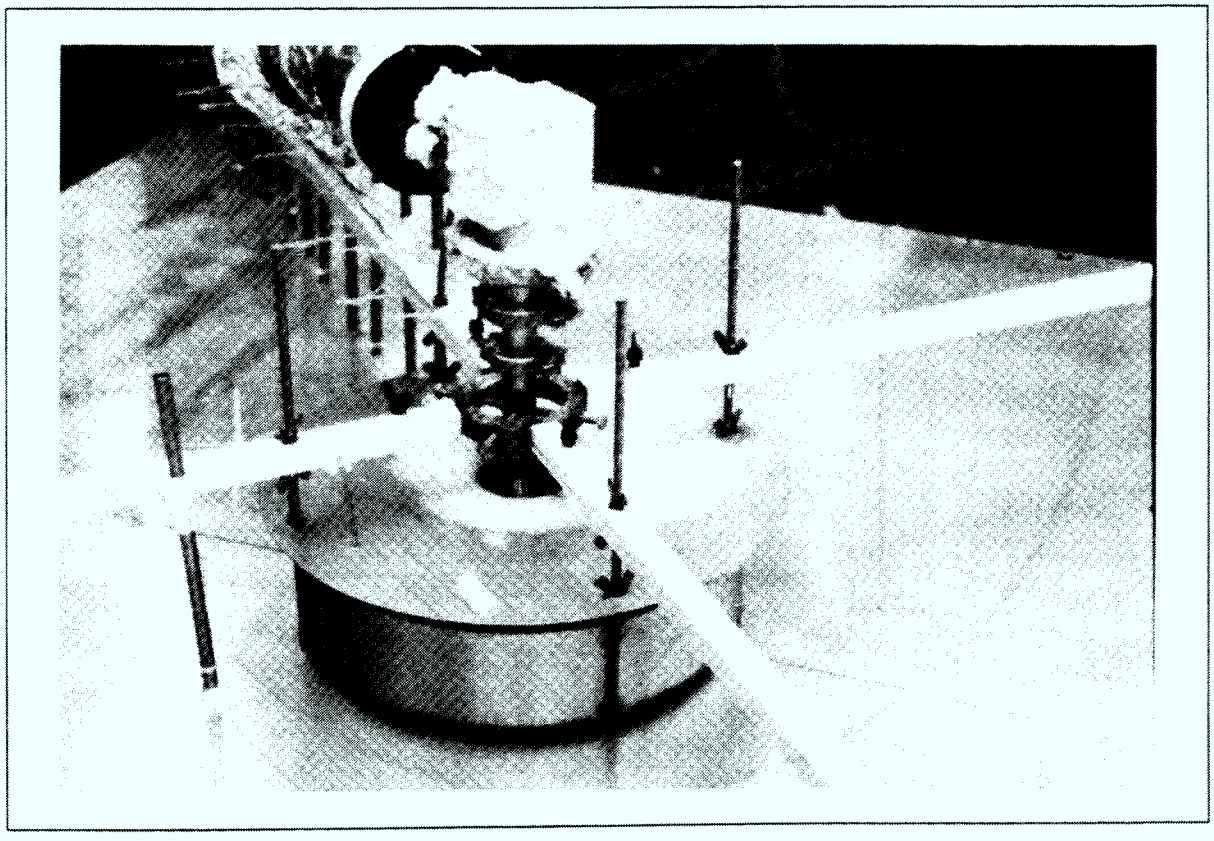


Bild 3.17: Auslaßvorrichtung zur kontinuierlichen Freisetzung von flüssigem Wasserstoff, aufgenommen nach Beendigung eines Versuchs. Zu erkennen ist ferner der Aluminiumuntergrund, die Zuleitung für den Wasserstoff sowie die Instrumentierung zur Messung der Lachenausbreitung.

Der Aluminiumuntergrund (Bild 3.18) besteht aus zwei 2mx1m großen, 20mm starken Platten, die an den Stoßstellen mit Silikon abgedichtet werden. Die Aluminiumplatten werden mit einem Doppel-T-Trägergerüst verschraubt. Die Auflager des Gerüstes sind mittels

Gewindestangen und Kontermutter höhenverstellbar, um Geländeunebenheiten bis 300mm ausgleichen zu können. An den Eckpunkten der Aluminiumoberfläche sind zur Aufnahme und Arretierung des Meßgestänges und des Diffusorhalters Gewindestangen eingeschraubt.

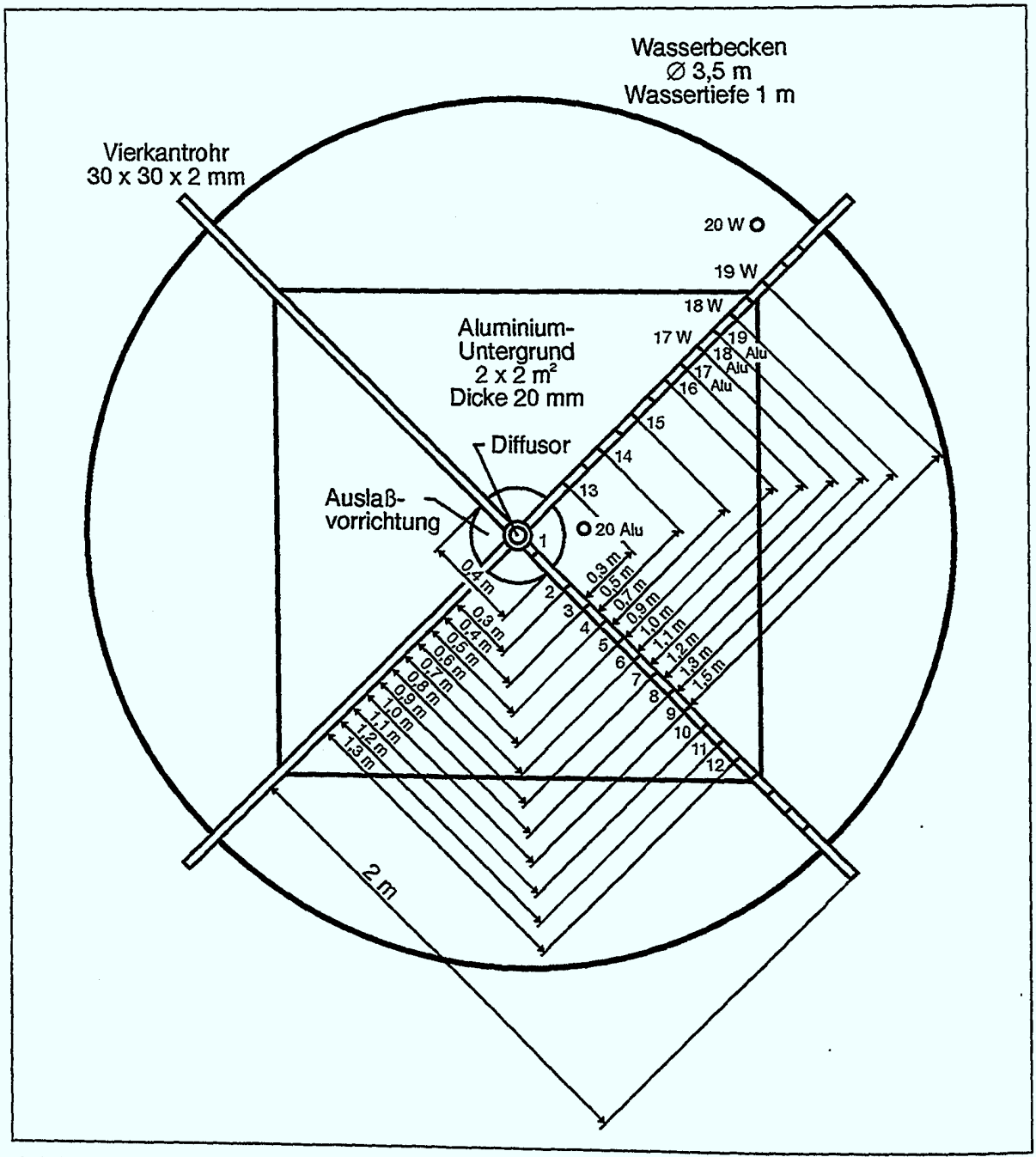


Bild 3.18: Draufsicht auf den zur Untersuchung der Lachenausbreitung von LH_2 verwendeten Aluminium- und Wasseruntergrund mit dem dazugehörigen Trägergerüst für die Thermoelemente und der Auslaßvorrichtung.

Zur Messung der Lachenausbreitung kommen insgesamt 20 NiCr-Ni Mantelthermoelemente zum Einsatz, die entsprechend Bild 3.18 positioniert sind. Die Thermoelementspannungen werden mittels der bereits näher beschriebenen Meßdatenerfassungsanlage alle 0,2s gemessen, in Temperaturen umgerechnet und sowohl auf Festplatte als auch auf Diskette gespeichert.

Thermoelement Nr. 1 ist in der Auslaßvorrichtung untergebracht, um den Beginn der LH_2-Freisetzung zu bestimmen. Thermoelement Nr. 20 ist am Rand des Beckens im Wasser installiert bzw. beim Aluminiumuntergrund an der Unterseite der Platte. Die übrigen Thermoelemente sind in Ausbreitungsrichtung mit einem Abstand von 0,1 bzw. 0,2m zueinander angebracht. Durch die unterschiedlichen Abmessungen der verwendeten Untergründe ist die Anordnung der Thermoelemente am Rand unterschiedlich (in Bild 3.18 durch den Zusatz "A" für den Aluminiumuntergrund und "W" für Wasser gekennzeichnet). Weil eine Eindringung von Wasserstoff unter den Wasserspiegel wegen der niedrigen Dichte zu vernachlässigen ist, werden die Thermoelemente diesmal in 0,5-1mm Höhe über der Wasseroberfläche installiert.

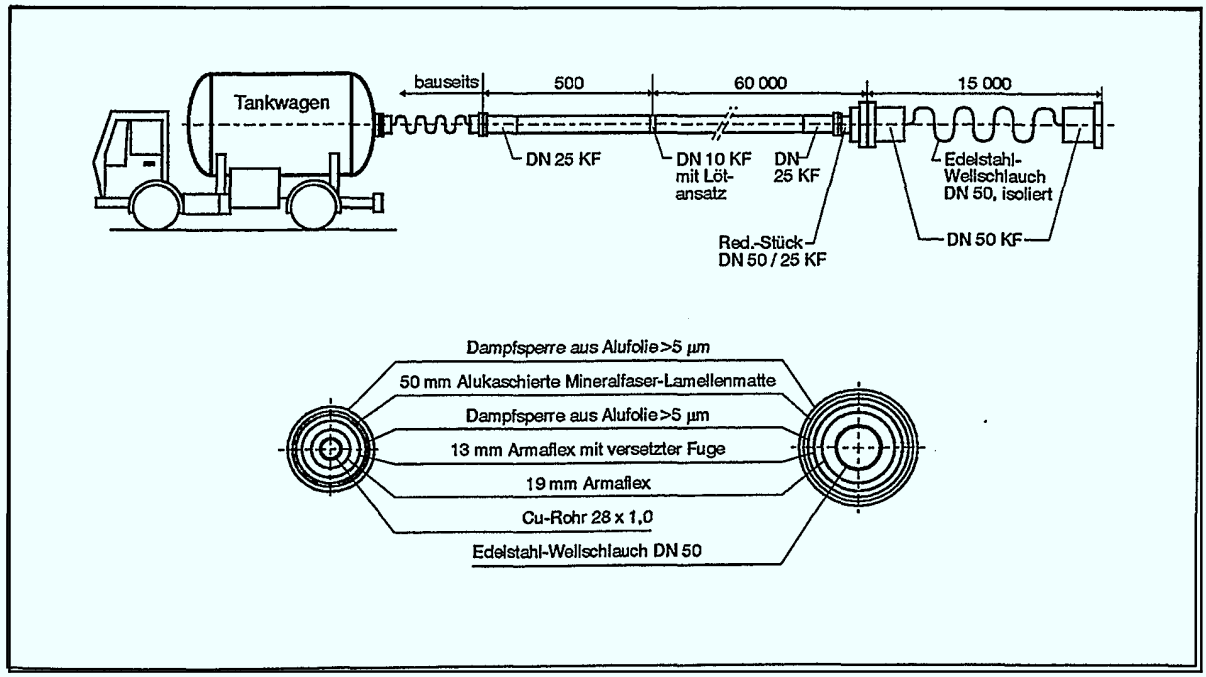


Bild 3.19: LH_2-Zuleitung vom 40m³ Tankwagen einschließlich Schnitt durch die Kälteisolierung der Leitung.

Die Freisetzung des LH_2 erfolgt mittels einer ca. 75m langen Zuleitung aus einem ca. 40m³ LH_2 fassenden Tanklastzug der Fa. Messer-Griesheim. Die Zuleitung ist mit einer Spezialisolierung mit Dampfsperre versehen (Bild 3.19) um zu verhindern, daß Sauerstoff sich an der kalten Leitung niederschlägt, auf den Untergrund tropft und dort chemisch reagiert.

Über der Freisetzungsstelle mündet die Zuleitung in einen Kleinflansch DN50, an den die Auslaßvorrichtung angeschlossen ist (Bild 3.20).

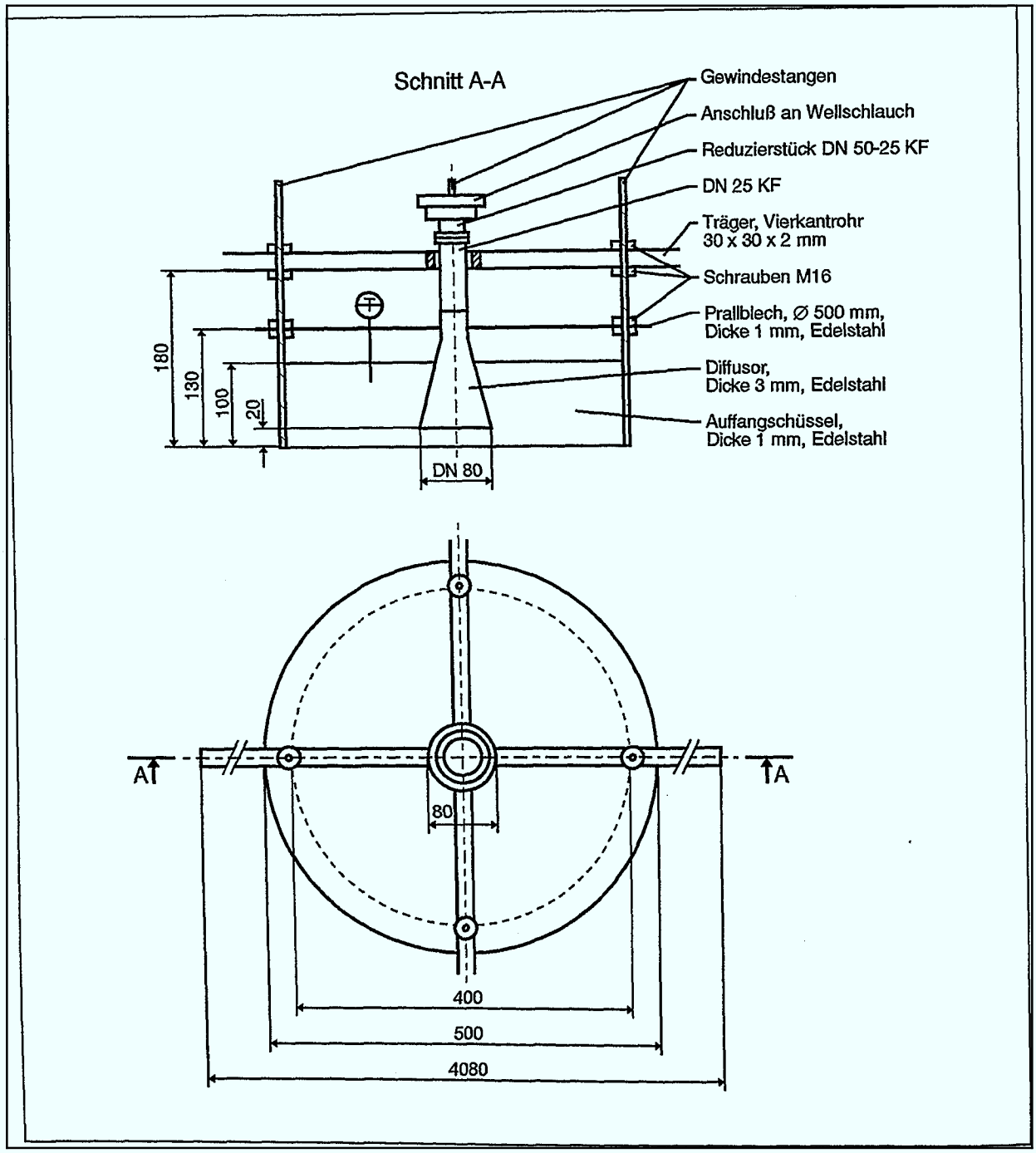


Bild 3.20: Auslaßvorrichtung mit Diffusor, Auffangschüssel und Prallblech

Die Auslaßvorrichtung (Bild 3.20) besteht aus einem Diffusor, einer Auffangschüssel und einem Prallblech. Der Diffusor dient dazu, die LH_2-Austrittsgeschwindigkeit zu reduzieren. Über die Kante der Auffangschüssel strömt der LH_2 auf die jeweilige Oberfläche. Das

Prallblech hat die Aufgabe, den möglicherweise anfangs aus der Schüssel reflektierten LH_2 zurückzuhalten und damit zu einer schnelleren Abkühlung der ganzen Vorrichtung beizutragen. Die Auslaßvorrichtung ist an der Meßbrücke befestigt und über Einstellschrauben nivellierbar, so daß der Rand der Schüssel waagerecht ausrichtbar ist und seine gleichmäßige Verteilung des LH_2 über den Umfang gewährleistet werden kann.

Alle meteorologischen Daten sind von der BAM aufgezeichnet worden, die Konzentrations- und Temperaturverteilung in der Wasserstoffgaswolke von Battelle und zur Verfügung gestellt worden [MAR94]. Die selbst aufgezeichneten Daten beziehen sich ausschließlich auf die Ausbreitung der Lache.

In Tabelle 3.8 sind die Stoffdaten der verwendeten Untergründe angegeben.

Weiterhin wurde die Verdampfung und Ausbreitung des Wasserstoffes mittels Videokameras aus verschiedenen Blickrichtungen aufgezeichnet. Auch die Ausbreitung der Lache wird von einer Videokamera, die geschützt in einem der Gebäude installiert ist, aufgezeichnet.

3.3.2. Versuchsablauf und durchgeführte Versuche

Die Windrichtung wird einige Zeit vor Versuchsbeginn kontrolliert und muß stabil sein, um eine mögliche Gefährdung des Personals im ca. 200 m entfernten Bunker auszuschließen. Zusätzlich wird vor Versuchsbeginn eine Rauchbombe gezündet, um die Driftrichtung der Gaswolke und Turbulenzen optisch erkennen zu können.

Bevor der LH_2-Behälter mit Druck beaufschlagt wird, wird die Übertragungsleitung mit den normalen Verdampfungsverlusten des Behälters vorgekühlt, um bei den eigentlichen Freisetzungexperimenten eine Dampfbildung in der Leitung zu verhindern. Die Öffnung des LH_2-Schnellschlußventils erfolgt dann fernausgelöst mit Helium-Druckgas aus dem Bunker. Nach Öffnen des LH_2-Ventils kann mittels einer On-Line-Thermoelement- und Videoüberwachung anhand im Bunker installierter Monitore genau ermittelt werden, wann im Auffangbehälter der Auslaßvorrichtung LH_2 vorhanden ist. Zu diesem Zeitpunkt wird die Messung gestartet. 62s nach dem ersten LH_2-Austritt wird das Schnellschlußventil geschlossen und somit die Freisetzung beendet.

Es werden insgesamt sechs Versuche durchgeführt. In den ersten beiden Versuchen wird der LH_2-Strahl senkrecht nach unten aus einer Höhe von ca. 1,5m auf eine Aluminium-Prallplatte (Fläche ca. 0,5 m^2) gerichtet, die in einer Höhe von ca. 1m angebracht ist. Diese beiden Versuche werden von der BAM und Battelle zur Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens der H_2-Gaswolke zwischen Gebäuden durchgeführt [SCH94]. Die Ausbreitung und Verdampfung des flüssigen Wasserstoffes wird bei diesen Versuchen nicht gemessen. Zwei Versuche (Versuche 3 und 4) werden auf dem Wasserbecken und zwei weitere (Versuche 5 und 6) werden auf einem Aluminiumuntergrund durchgeführt. Bei den vier letztgenannten Versuchen

(Versuche 3-6) wird die Lachenausbreitung gemessen. In Tabelle 3.9 sind die Randbedingungen für die Versuche mit Flüssigwasserstoff angegeben. Die aufgeführten Daten sind [MAR94] entnommen. Die Windgeschwindigkeit liegt während aller Versuche in Freisetzungshöhe am Freisetzungsort, d.h. zwischen den Gebäuden, im Bereich 0-1 m/s [MAR94]. Die mittlere Sonneneinstrahlung während der Versuche beträgt ca. 250 W/m^2.

Tabelle 3.9: Randbedingungen der Versuche mit kontinuierlicher LH_2-Freisetzung in Lieberose/Cottbus nach [MAR94].

Versuch-Nr.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Datum	19.05.94	19.05.94	19.05.94	19.05.94	19.05.94	19.05.94
Untergrund	Platte	Platte	Wasser	Wasser	Alu.	Alu.
LH_2-Volumenstrom [l/s]	4,5	4,5	5	5	6	6
Freisetzungsdauer [s]	50	61	62	62	62	62
Untergrundtemp. [°C]	-	-	11,3	11,0	11,4-2,8	5,5-4,0
Windgeschwindigkeit [m/s]	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1
Lufttemperatur [°C]	12	12	12	12	11	10
Luftdruck [kPa]	98,3	98,3	98,5	98,5	98,6	98,6
rel. Feuchte der Luft [%]	96,5	96,5	96,7	96,7	97,0	97,0

Aus der in Anhang A ausführlich erläuterten Genauigkeitsanalyse folgt für die Genauigkeit des Lachenradius während der Ausbreitungsphase

$$\Delta r_{ges} = {}^{+0,085}_{-0,01}\, m\,, \tag{3.14}$$

und wenn die Lache einen nahezu konstanten Radius erreicht hat:

$$\Delta r_{ges} = {}^{+0,11}_{-0,01}\, m\,. \tag{3.15}$$

Die Genauigkeit der Zeitangaben beträgt

$$\Delta t_{ges} = {}^{+\ 1}_{-\ 1,2}\, s \tag{3.16}$$

bei Auswertung der Thermoelementaufzeichnungen, bzw.

$$\Delta t_{ges} = \frac{1}{25} s \tag{3.17}$$

bei Auswertung der Videoaufzeichnung.

Der Fehler der Massen- bzw. Volumenstrombestimmung beträgt

$$\Delta \dot{m}_{ges} = -20 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s} \text{, bzw.} \tag{3.18}$$

$$\Delta \dot{V}_{ges} = \frac{\Delta \dot{m}_{ges}}{\rho_l} = \pm 0{,}25 \frac{l}{s} . \tag{3.19}$$

3.3.3. Ergebnisse

Tritt der Wasserstoff über die Kante der Auslaßvorrichtung, bildet sich gut sichtbar eine geschlossene Lache aus (Bild 3.21). Weil der kalte H_2-Dampf schon wenige Kelvin über Siedetemperatur Auftrieb gegenüber der umgebenden Luft hat, ist schon bei kleinen Windböen, wenn der gasförmige Wasserstoff (GH_2) über die Lache geblasen wird, zeitweise der Lachenrand zu erkennen. Der Lachenradius bleibt nicht konstant, sondern vergrößert und verkleinert (pulsiert) sich. Aus der Lachenfront lösen sich einzelne kleine Inseln, die sich radial vom Freisetzungszentrum wegbewegen.

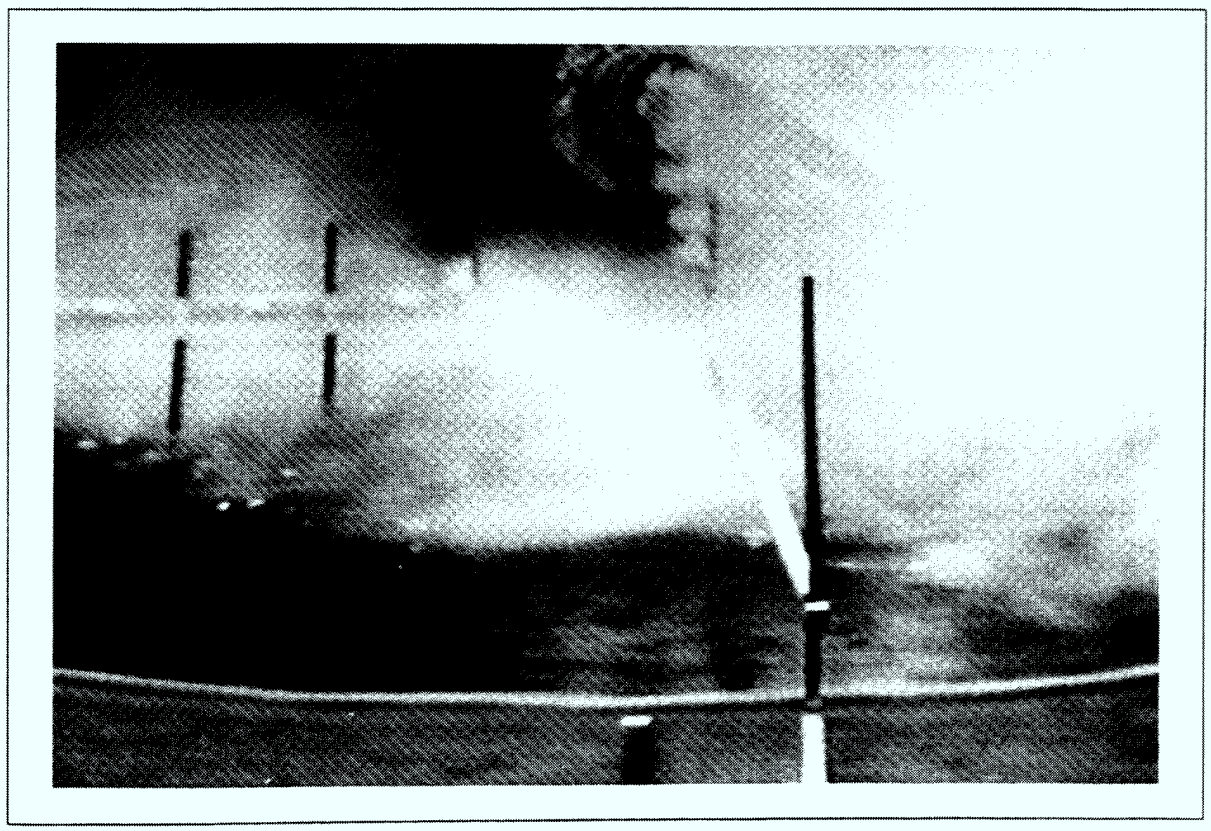


Bild 3.21: Kontinuierliche Freisetzung von flüssigem Wasserstoff auf Wasser und Ausbreitung der entstehenden Dampfwolke in der Umgebung.

Bei der Freisetzung über Wasser ist auf den Videoaufzeichnungen nach Beendigung des Versuchs an den Stellen, über denen Wasserstoff siedete, eine massive mehrere Millimeter dicke Eisschicht sichtbar. Eine Messung der Eisdicke ist jedoch nicht möglich, weil nach Beendigung eines Versuchs aus Sicherheitsgründen der Versuchsort erst nach einer gewissen Verweilzeit betreten werden konnte. Als der Freisetzungsort durch die Meßtrupps freigegeben wird, ist das Eis bereits geschmolzen. Die gebildete Eissschicht beträgt im Durchmesser ca. 1m und entspricht so in etwa der gemessenen Lachengröße. Die kreisrunde Form der Eisschicht wird von einzelnen strahlartigen "Eisbahnen" unterbrochen (Bild 3.23 auf Seite 73), die wesentlich größere Abstände vom Freisetzungsort als die übrige Eisschicht erreichen und sich z.T. bis zum Rand des Beckens ziehen.



Bild 3.22: Kontinuierliche Freisetzung von flüssigem Wasserstoff auf Aluminium und Ausbreitung der entstehenden Dampfwolke in der Umgebung.

Zu Beginn der Freisetzung von Flüssigwasserstoff ist sowohl auf den Videoaufzeichnungen als auch bei den Meßwerten der Thermoelementaufzeichnungen zu Beginn der Freisetzung eine kurzzeitige Vergrößerung der Lache zu erkennen, die sich fast bis an den Beckenrand bzw. über den Rand des Aluminiumuntergrundes hinauszieht. Durch das bereits erwähnte pulsartige Verhalten der Lache kann der Lachenradius nicht genau bestimmt werden, sondern es kann nur

ein Bereich angegeben werden, in dem er sich bewegt (Bild 3.24 auf Seite 74). Die kalte H_2-Dampfwolke über der Lache bedingt das Ausfrieren der Feuchte in der Umgebungsluft, so daß das Ende der Freisetzung optisch nicht ausgemacht werden kann und keine Informationen über das Auflösungsverhalten einer Wasserstofflache gewonnen werden können.

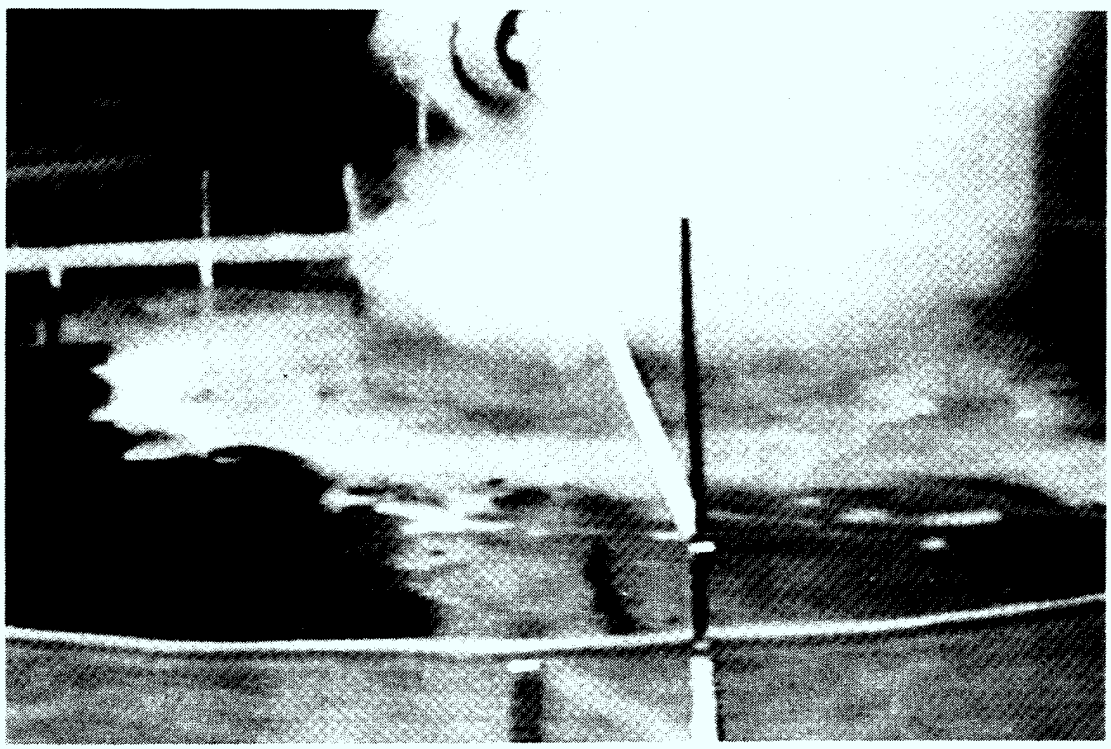


Bild 3.23: Eisschicht auf der Wasseroberfläche nach Beendigung des Versuches mit kontinuierlicher Freisetzung von LH_2.

Ebenfalls bei der Freisetzung über der Aluminiumoberfläche sorgt die pulsartige Ausbreitung der Lache für das Ablösen einzelner kleiner LH_2-Inselchen, die sich sogar über die Ränder der $2x2m^2$ großen Platte hinaus wegbewegen und auf den Erdboden tropfen. Für diesen Versuch ist die Aufzeichnung der Videokamera, welche die Lachenausbreitung beobachtet, durch einen Defekt der Kamera nicht auswertbar, so daß zur weiteren Auswertung auf die Aufzeichnungen der anderen Videokameras mit wesentlich größerem Bildausschnitt und auf Fotografien von den Bildschirmen der Videokontrolle während des Versuches zurückgegriffen werden muß.

Mögliche Ursache für das pulsartige Verhalten der Lache sind im LH_2 mitgeführte H_2-Dampfblasen, die in der Auffangschüssel aufsteigen. Im Zusammenwirken mit Turbulenzen des LH_2 in der Auffangschüssel strömt dieser ungleichmäßig aus. Auch Chirivella [CHI86] erwähnt ein "pulsartiges" Verhalten der LH_2-Lache. Bei seinem Versuch wurde LH_2 mit einem

Massenstrom von 8,8 kg/s (zum Vergleich hier ca. 0,4 kg/s) über einen Zeitraum von 41s auf verdichtetem Sand freigesetzt (vgl. Kapitel 2.2.1). Zur gleichmäßigen Verteilung des LH_2 wurde ebenfalls ein Diffusor verwendet, allerdings ohne Auffangschüssel.

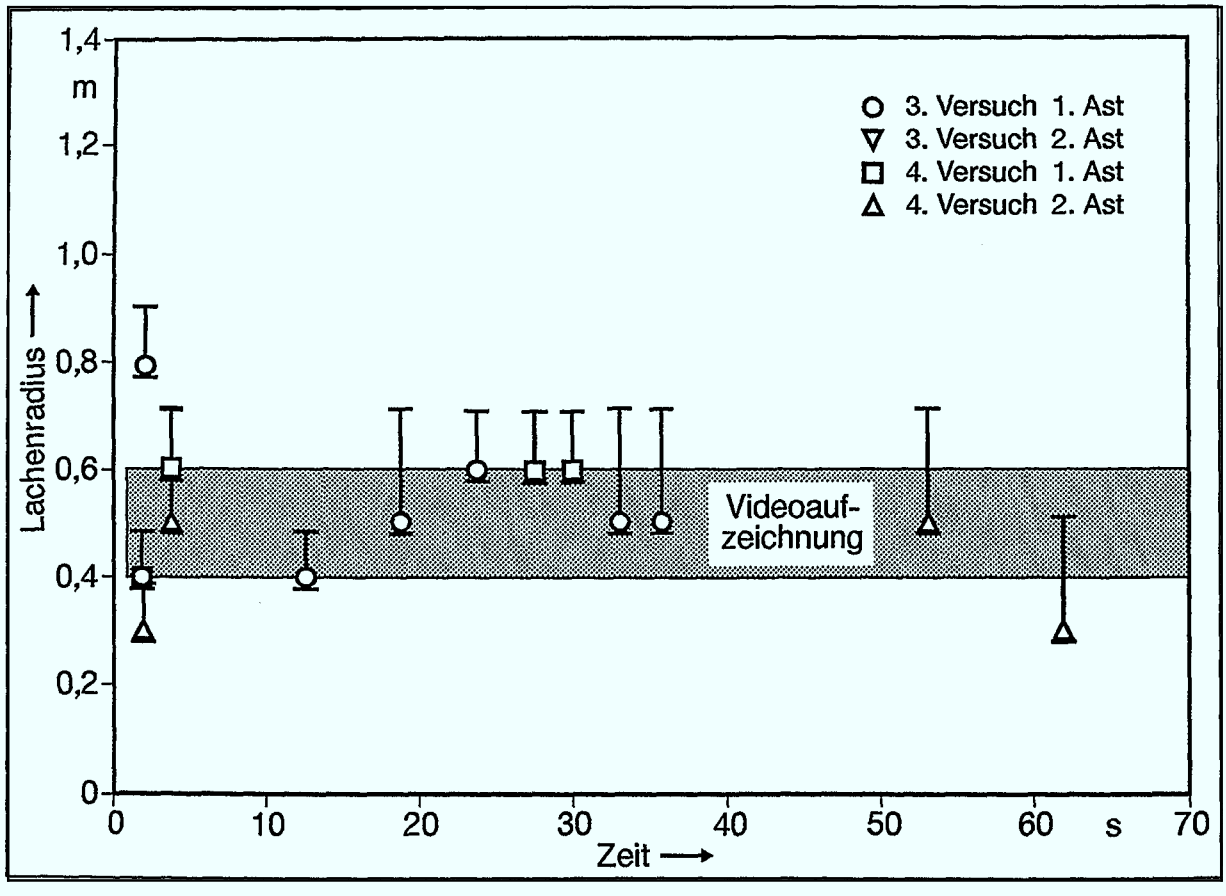


Bild 3.24: Lachenradius über der Zeit aus Temperatur- und Videoaufzeichnungen beim Ausbreitungsversuch mit kontinuierlicher Freisetzung von 5 l/s LH_2 auf Wasser.

Die ausgewerteten Informationen aus den Videoaufzeichnungen und den Thermoelementaufzeichnungen der Versuche über der Wasseroberfläche sind in Bild 3.24 und der Versuche über der Aluminiumoberfläche in Bild 3.25 enthalten. Der Vergleich zwischen diesen Experimenten und Rechnungen erfolgt in Kapitel 5.

Die Messung der radialen Ausbreitung mit Hilfe der Thermoelemente erfolgt, wie bereits beschrieben, in zwei Richtungen (90° zueinander). Bei Versuch Nr.3 hat nur der erste Ast (Thermoelemente 1-12) die Ausbreitung verfolgen können. Die Thermoelemente des zweiten Astes (Thermoelemente 13-19) verzeichnen keinen Kontakt zum LH_2, obwohl nach Auswertung der Videoaufzeichnungen Thermoelement 13 (r=0,3m) ständig in Kontakt mit LH_2 gewesen sein müßte. Bei Versuch Nr.4 kann nach Auswertung der Thermoelement-

Aufzeichnungen des ersten Astes keine eindeutige Aussage über die Lachenausbreitung getroffen werden. Hier zeigt Thermoelement Nr.13 einen dauerhaften Kontakt zum LH_2 an, Thermoelement Nr.14 (r=0,5m) nur kurze Kontakte wie sie z.B. durch einzelne LH_2-Inseln hervorgerufen werden.

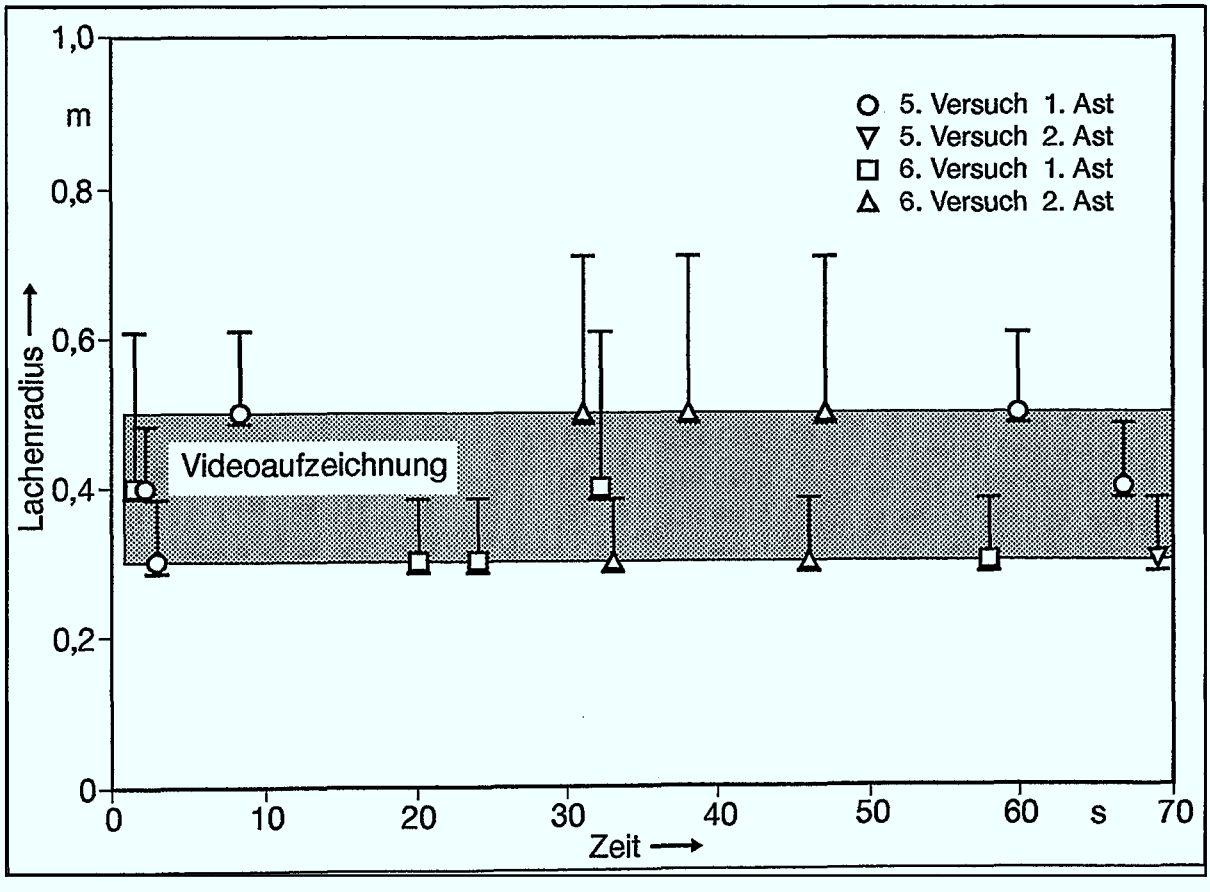


Bild 3.25: Lachenradius über der Zeit aus Temperatur- und Videoaufzeichnungen beim Ausbreitungsversuch mit kontinuierlicher Freisetzung von 6 l/s LH_2 auf Aluminium.

Bei allen Versuchen über der Aluminiumoberfläche wird die Ausbreitung von beiden Thermoelement-Ästen gemessen. Die Thermoelement-Aufzeichnungen in Versuch Nr.5 zeigen deutlich das pulsierende Verhalten der Lache, erkennbar dadurch, daß Thermoelement Nr. 4 (r=0,5m) in kurzer Zeit beträchtliche Temperaturschwankungen zeigt. Auf dem zweiten Ast hat Thermoelement Nr.13 kontinuierlich Kontakt zum LH_2. Das in der Anordnung nächste Thermoelement Nr.14 (r=0,5m) zeigt keinen eindeutigen Kontakt zum LH_2 an. Bei Auswertung von Versuch Nr. 6 zeigt sich aus den Aufzeichnungen des ersten Astes bei den Thermoelementen Nr. 2 und 3 (r=0,3 bzw. 0,4m) eindeutiger Kontakt zum LH_2.

Thermoelement Nr.4 (r=0,5m) zeigt keinen LH_2-Kontakt an. Aus den Aufzeichnungen des zweiten Astes ist hingegen ein LH_2-Kontakt des Thermoelementes Nr. 14 deutlich erkennbar.

3.4. Fazit der Versuche mit flüssigem Stickstoff und flüssigem Wasserstoff

Es wird die Verdampfung von LN_2 über Bitumen und Beton untersucht. Bei Beton wird zusätzlich der Einfluß der Feuchte im Untergrund betrachtet. Der Verlauf der Masse über der Zeit zeigt für die Untergründe ohne Feuchte zu Beginn der Verdampfung eine größere Massenabnahme als gegen Ende. Durch Feuchte im Untergrund verkürzt sich die Verdampfungszeit wesentlich und der Verlauf der Masse über der Zeit zeigt einen anderen Verlauf als bei trockenem Untergrund. Die kürzeste Verdampfungszeit ergibt sich bei feuchtem Untergrund mit abgetrockneter Oberfläche. Auf dem Untergrund vorhandene Wasserreste verlängern die Verdampfungsdauer demgegenüber; bis zu der hier betrachteten Wassermenge, die max. ca. 3,1mm Wasserhöhe über der Oberfläche entsprach, geht sie jedoch nicht über die Dauer der Verdampfung über trockenem Beton hinaus.

Die LN_2-Versuche auf der KIWI-Versuchsanlage sind die bislang einzigen Experimente, in denen Ausbreitung und Verdampfung einer kryogenen Flüssigkeit auf Wasser systematisch untersucht worden sind. Bei den Versuchen mit schlagartiger Freisetzung hat sich die Lache als Ring auf der Wasseroberfläche ausgebreitet. Die gemessenen maximalen Lachenradien betragen 4-6m. Nach Versuchsende ist auf der Wasseroberfläche eine wabenförmige Eisstruktur zu erkennen, welche sich aus vielen kleinen Eisinselchen zusammensetzt. Bei den Versuchen mit kontinuierlicher Freisetzung von LN_2 über unterschiedliche Zeiträume stellt sich nach wenigen Sekunden ein stationärer Lachenradius ein. Die gemessenen maximalen Lachenradien betragen 3-5m. Nach Versuchsende zeigt sich auf der Wasseroberfläche eine z.T. mehrere Zentimeter dicke Eisschicht. Bei den länger dauernden Versuchen ist die Eisdecke auseinandergebrochen und die Ränder einzelner Schollen ragen mehrere Zentimeter unter die Wasseroberfläche. An der vorderen Front der Eisschicht zeigten sich strahlartig in Ausbreitungsrichtung der vorigen LN_2-Freisetzung mehrere Zentimeter breite Eisbahnen.

Auf dem 1:10 Plexiglasmodell der KIWI-Versuchsanlage wird die schlagartige Freisetzung von ca. 0,5 l LN_2 auf Wasser untersucht. Es kann nachgewiesen werden, daß unter einzelnen LN_2-Inseln eine Konvektionsströmung einsetzt, in der Lache ausgefrorene Bestandteile der Luft enthalten sind, und es kann das Aufbrechen der Lache gegen Ende der Ausbreitung beobachtet werden.

Es sind Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung von LH_2 auf Wasser und Aluminium durchgeführt worden. Dabei wird die Ausbreitung der Lache gemessen und, soweit möglich, optisch beobachtet. Der Lachenradius einer kontinuierlichen LH_2-Freisetzung auf Wasser mit einem Volumenstrom von 5 l/s beträgt ca. 0,6m; der Lachenradius einer kontinuierlichen LH_2-

Freisetzung auf Aluminium mit einem Volumenstrom von 6 l/s beträgt ca. 0,5m. Aus der Lachenfront lösen sich ständig kleine LH_2-Inselchen, die fortan bis zu ihrer vollständigen Verdampfung auf der Wasseroberfläche treiben bzw. bei den Versuchen über Aluminium sich z.T. über den Rand der Platte hinaus bewegen und auf den Untergrund tropfen. Nach Versuchsende ist auf der Wasseroberfläche an der Stelle, wo vorher die Lache siedete, eine Eisschicht sichtbar. Am Umfang der Eisschicht werden ca. 4-6 mehrere Zentimeter breite "Eisbahnen" beobachtet, die strahlartig vom Zentrum der vorigen Freisetzung wegführen und durchaus vergleichbar mit denjenigen der Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung von flüssigem Stickstoff auf Wasser sind.

4. Modellierung der Lachenausbreitung und Verdampfung

Im folgenden werden die theoretischen Grundlagen des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten LachenAusbreitungs- und Verdampfungscode (LAuV) wiedergegeben. Kapitel 4 gliedert sich in einen Teil, der die Ausbreitung der Flüssigkeitslache beschreibt (Kapitel 4.1) und einen Teil, der die Wärmeeinleitung aus dem Untergrund erläutert (Kapitel 4.2).

Weil die Kenntnis der getroffenen Vereinbarungen und Vereinfachungen Leistungen und Einschränkungen eines Modells auf Basis der "Shallow Layer" Gleichungen wiedergeben, soll in Kapitel 4.1.1 zunächst deren Ableitung, die der Literatur nicht entnommen werden konnte, nachvollzogen werden. Ausgehend von den "Shallow-Layer" Gleichungen wird in Kapitel 4.1.2 das dem LAuV-Code zugrundeliegende Finite-Differenzen Lösungsverfahren beschrieben. In Kapitel 4.2 wird die Wärmeeinleitung aus dem Untergrund in die Lache beschrieben. Es wird hier unterschieden zwischen der Wärmeeinleitung aus einem festem Untergrund (Kapitel 4.2.1) und aus einem flüssigem Untergrund (Kapitel 4.2.2). Die instationäre Wärmeeinleitung aus dem festen Untergrund in die Lache wird durch eine eindimensionale analytische Lösung sowie ein zweidimensionales Finite-Differenzen Lösungsverfahren der bekannten Fourier-Gleichung (Gleichung 2.4 auf Seite 16) mit und ohne Wärmequellen im Untergrund ermittelt. Der Wärmeeintrag aus einem flüssigen Untergrund in die Lache (Kapitel 4.2.2) kann nach experimentellen Untersuchungen im Labormaßstab für Zeiten kleiner 50-60s als konstant angenommen werden, obwohl im Experiment während dieser Zeit Eisbildung beobachtet wurde. Um die Eisbildung zu simulieren wird in Kapitel 4.2.2 ein Finite-Differenzen Rechenmodell vorgestellt, welches Eisbildung und -wachstum infolge Verdampfung von kryogener Flüssigkeit auf einer Wasseroberfläche berechnen kann.

4.1. Ausbreitungsverhalten einer Flüssigkeitslache

4.1.1. Ableitung der "Shallow Layer" Gleichungen

Bei der Ableitung sollen folgende Anfangsbedingungen gelten:

1. Die Dichte des Untergrundes und der Lache ist zeitlich und örtlich konstant. Der Einfluß der Blasenbildung auf die Dichte der Lache soll vernachlässigt werden.
2. Es handelt sich um eine ebene radiale Ausbreitung der Lache.
3. Die Lachengeschwindigkeit in jedem Volumenelement über der Lachenhöhe ist konstant. Diese Annahme ist bei geringen Lachenhöhen und geringer Reibung zwischen Lache und Untergrund (Dampffilm) als realistisch anzusehen.
4. Im Fall der kontinuierlichen Freisetzung wird der Lache über einen definierten Zeitraum Volumen zugeführt. Die Richtung der Geschwindigkeit des zugeführten Volumens steht

senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und wird im Modell als flächenbezogener Volumenstrom w berücksichtigt. Bei schlagartiger Freisetzung wird ein Anfangsvolumen vorgegeben und die Geschwindigkeit des zugeführten Volumens gleich Null gesetzt.

5. Die Verdampfung wird als Volumenverlust durch die Oberseite des Lachenelements interpretiert. Die Richtung des durch die Oberfläche verdampften Volumens steht senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und wird im Modell als flächenbezogener Volumenstrom v durch die Oberfläche berücksichtigt.

Wie später gezeigt wird, können bei der Umsetzung der Shallow-Layer-Gleichungen in einen Rechencode mit diesen Annahmen Ergebnisse erzielt werden, die durchaus vergleichbar mit Ergebnissen experimenteller Untersuchungen zur Ausbreitung und -verdampfung einer Lache aus kryogener Flüssigkeit sind.

Massenerhaltung

Die in Bild 4.1 angegebenen Vektoren bezeichnen flächenbezogene Volumenströme. Die Volumenänderung des inkrementellen Elements mit Radius r, Lachengeschwindigkeit u und Lachenhöhe h über einem Zeitschritt ist nun gleich der Summe der durch die jeweilige Fläche tretenden Volumenströme. Die Dichte der kryogenen Flüssigkeit ρ_l wird zeitlich und örtlich als konstant angenommen. Deswegen gilt für die zeitliche Änderung des infinitesimalen Volumens d^2V (vergl. Bild 4.1):

$$\begin{aligned}\frac{\partial(d^2V)}{\partial t} = \sum d^2\dot{V}_i = {} & (u - \frac{\partial u}{\partial r}\frac{dr}{2})(h - \frac{\partial h}{\partial r}\frac{dr}{2})d\varphi(r - \frac{dr}{2}) \\ & - (u + \frac{\partial u}{\partial r}\frac{dr}{2})(h + \frac{\partial h}{\partial r}\frac{dr}{2})d\varphi(r + \frac{dr}{2}) + d\varphi r dr w - d\varphi r dr v\end{aligned} , \tag{4.1}$$

der Winkel des betrachteten Lachenausschnitts $d\varphi$ ist konstant und das infinitesimale Volumen $d^2V = d\varphi \; r \, dr \, h$. Unter Vernachlässigung des differentiellen Gliedes 3. Ordnung und unter Verwendung der Randbedingung, daß der inkrementelle Radius dr unabhängig von t ist, folgt

$$\frac{\partial(rh)}{\partial t} + \frac{\partial(ruh)}{\partial r} + r(v - w) = 0 , \tag{4.2}$$

bzw.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial(ruh)}{\partial r} + v - w = 0 . \tag{4.3}$$

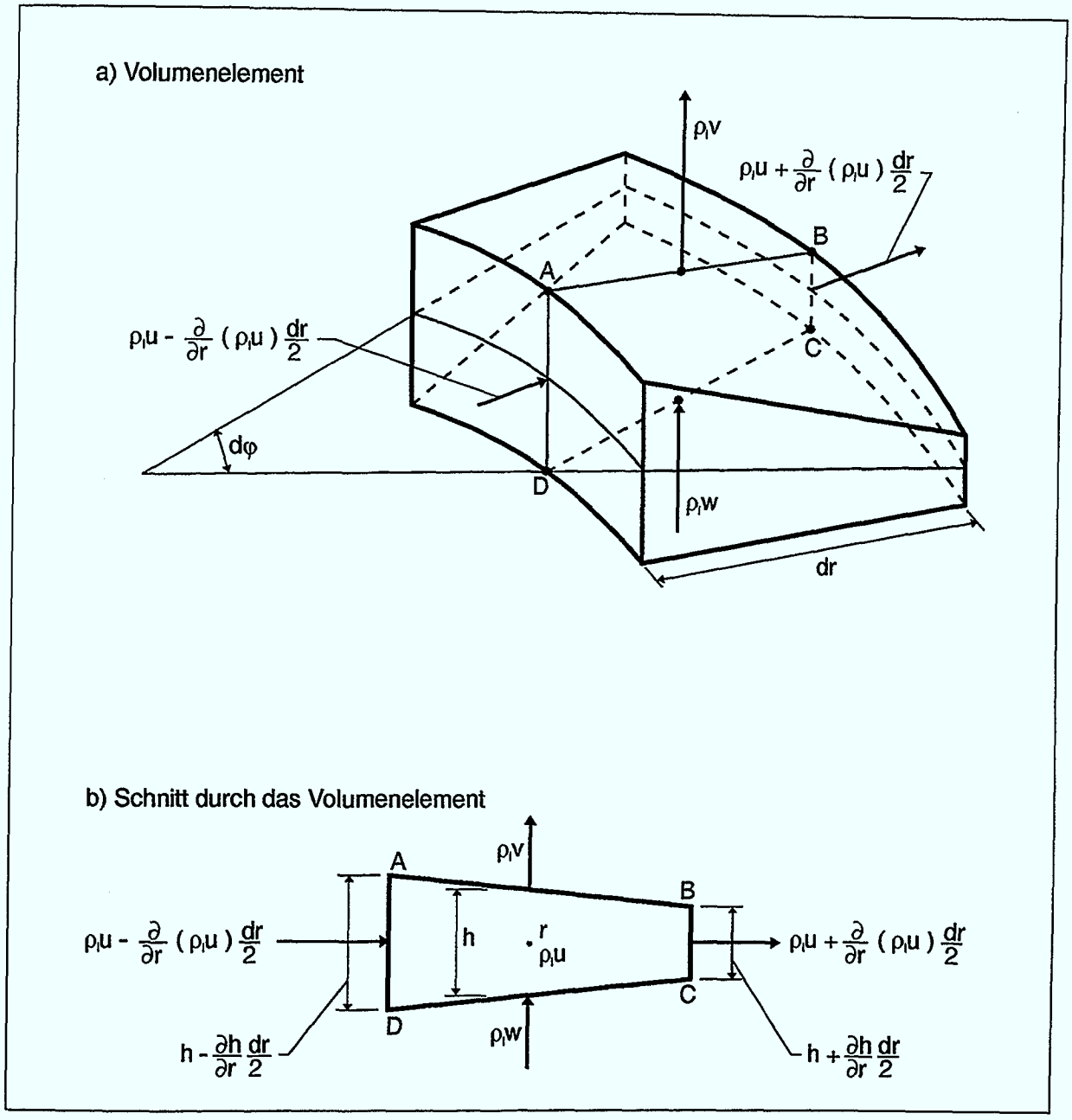


Bild 4.1: Differentielles Volumenelement einer sich ausbreitenden Flüssigkeitslache

Impulserhaltung

Der mittlere statische Druck $\overline{p}$ einer Lache an der Stelle r über der Höhe h beträgt

$$\overline{p} = \frac{1}{2}\rho_l g h \ . \tag{4.4}$$

Breitet sich die Flüssigkeitslache auf einer Wasseroberfläche aus, wird ihr im Gegensatz zur Ausbreitung auf einem festen Untergrund eine Arbeit zugeführt, welche aus dem Auftrieb resultiert. Die differentielle Arbeit dW ist das Produkt aus dem statischen Druck $p=\rho_l g h$ an der Unterseite der Lache, der Lachenfläche $A = d\varphi r dr$ und der Änderung der Höhe an der Lachenunterseite infolge des Auftriebs dh_1. Die Höhe dh_1 bezeichnet anschaulich die Änderung der Eintauchtiefe der Lache unter den Wasserspiegel über der Länge dr und kann aus einfachen Geometrieüberlegungen abgeleitet werden, wobei ρ_w die Dichte des Wassers ist.

$$dh_1 = \frac{\rho_l}{\rho_w} dh = \frac{\rho_l}{\rho_w}\frac{\partial h}{\partial r} dr \ . \tag{4.5}$$

Daraus folgt für die zugeführte Arbeit dW

$$dW = pA dh_1 = \rho_l g h d\varphi r dr dh_1 = \rho_l g h d\varphi r dr \frac{\rho_l}{\rho_w}\frac{\partial h}{\partial r} dr \ . \tag{4.6}$$

Die Änderung der Arbeit über dr (dW/dr) bezogen auf die Fläche A ergibt den Auftriebsdruck p_A, der in Bild 4.2 eingezeichnet ist

$$p_A = \rho_l g h \frac{\rho_l}{\rho_w}\frac{\partial h}{\partial r} \ . \tag{4.7}$$

Die Impulskraft der Lache zu einem betrachteten Zeitpunkt t am Ort r ist durch das Produkt aus Massenstrom $d^2\dot{m}$ und Lachengeschwindigkeit u

$$u \cdot d^2\dot{m} = \rho_l u^2 d\varphi r dr \tag{4.8}$$

gegeben. In Bild 4.2 ist die Impulskraft auf die Fläche A bezogen.

Die Differenz aus zugeführtem und verdampftem Massenstrom $d^2\dot{m}_r$ multipliziert mit der Geschwindigkeit u ergibt

$$u \cdot d^2\dot{m}_r = \rho_l (w - v) d\varphi r dr u \ . \tag{4.9}$$

In Bild 4.2 sind zugeführter und verdampfter Massenstrom auf die Fläche A bezogen und getrennt eingezeichnet.

An den seitlichen Begrenzungen des Lachenelementes greift der Druck $\overline{p}$ an, der einen Einfluß auf die radiale Ausbreitung der Lache ausübt $(\overline{p}_r)$. Den Beitrag kann man sich aus Geometrieüberlegungen ableiten:

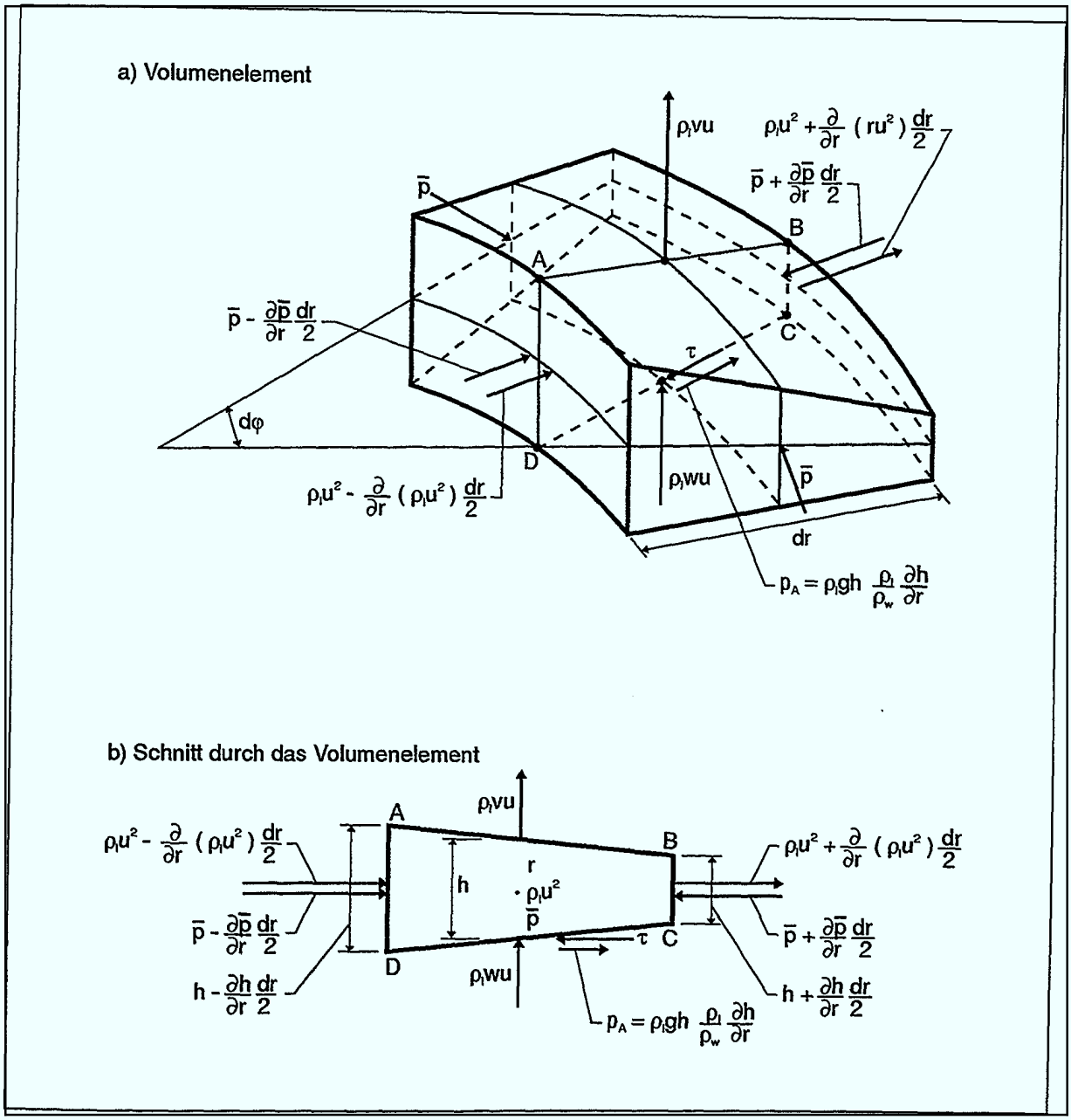


Bild 4.2: Kräftebilanz in einem differentiellen Volumenelement einer sich ausbreitenden Flüssigkeitslache

$$\sin\frac{d\varphi}{2} = \frac{\bar{p}_r}{\bar{p}} . \tag{4.10}$$

Für $d\varphi \to 0$ gilt:

$$\sin\frac{d\varphi}{2} \cong \frac{d\varphi}{2} . \tag{4.11}$$

Die Kraft d^2F_r in Ausbreitungsrichtung ergibt sich aus dem Produkt der infinitesimalen Druckkomponenten in Ausbreitungsrichtung $\bar{p}_r$ und der Fläche $A_r = hdr$ zu

$$d^2F_r = \overline{p}_r h dr = \overline{p} h dr \frac{d\varphi}{2} \,. \tag{4.12}$$

Zwischen Untergrund und Lache tritt die Scherspannung τ auf. Sie ist der Ausbreitungsgeschwindigkeit u entgegengerichtet und u.a. abhängig von Eigenschaften des Untergrundes und den thermohydraulischen Vorgängen an der Oberfläche. Hierauf wird später ausführlicher eingegangen.

Die Ableitung der zweiten Shallow-Layer-Gleichung geht vom Newton'schen Grundgesetz der Mechanik aus

$$\frac{\partial(d^2 m u)}{\partial t} = \sum d^2 F_i \,. \tag{4.13}$$

Lösen der linken Seite von Gleichung 4.13 ergibt unter Verwendung von Gleichung 4.3 auf Seite 80:

$$\frac{\partial(d^2 m u)}{\partial t} = \rho_l d\varphi r dr h \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{h}\left(w - v - \frac{1}{r}\frac{\partial(ruh)}{\partial r} \right) \right]. \tag{4.14}$$

Die Summe der auf das inkrementelle Lachenelement wirkenden Kräfte ergibt sich aus dem Produkt der Vektoren in Bild 4.2 mit der jeweiligen Fläche:

$$\begin{aligned} \sum d^2 F_i = & \left[\rho_l u^2 - \frac{\partial}{\partial r}(\rho_l u^2)\frac{dr}{2} + \overline{p} - \frac{\partial \overline{p}}{\partial r}\frac{dr}{2} \right] d\varphi \left(r - \frac{dr}{2} \right)\left(h - \frac{\partial h}{\partial r}\frac{dr}{2} \right) \\ & - \left[\rho_l u^2 + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_l u^2)\frac{dr}{2} + \overline{p} + \frac{\partial \overline{p}}{\partial r}\frac{dr}{2} \right] d\varphi \left(r + \frac{dr}{2} \right)\left(h + \frac{\partial h}{\partial r}\frac{dr}{2} \right) \\ & + \rho_l w u d\varphi r dr - \rho_l v u d\varphi r dr - \tau d\varphi r dr + \rho_l g h \frac{\rho_l}{\rho_W}\frac{\partial h}{\partial r} d\varphi r dr + 2\overline{p} h dr \frac{d\varphi}{2} \,. \end{aligned} \tag{4.15}$$

Vollständige Auflösung der Klammern und Division durch $d\varphi$ führt zu:

$$\begin{aligned} \frac{\sum d^2 F_i}{d\varphi} = & - \rho_l u^2 h dr - \rho_l u^2 r dr \frac{\partial h}{\partial r} - \overline{p} h dr - \overline{p} r dr \frac{\partial h}{\partial r} \\ & - \rho_l \frac{\partial u^2}{\partial r} r h dr - \rho_l \frac{\partial u^2}{\partial r}\frac{\partial h}{\partial r}\frac{dr^3}{4} - \frac{\partial \overline{p}}{\partial r} r h dr - \frac{\partial \overline{p}}{\partial r}\frac{\partial h}{\partial r}\frac{dr^3}{4} \\ & + \rho_l w u r dr - \rho_l v u r dr - \tau r dr + \rho_l g h \frac{\rho_l}{\rho_W}\frac{\partial h}{\partial r} r dr + \overline{p} h dr \,. \end{aligned} \tag{4.16}$$

Nun wird entsprechend Gleichung 4.13 der erste Teil der Berechnung (Gleichung 4.14) mit diesem Teil (Gleichung 4.16) gleichgesetzt und durch $d\varphi$ gekürzt. Die differentiellen Summanden höherer Ordnung (dr^3) werden vernachlässigt. Umstellen der Gleichung, Division durch $\rho_l h r dr$ und Einsetzen des mittleren statischen Druckes $\overline{p} = 1/2 \rho_l g h$ ergibt

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{rh}\frac{\partial(ruh)}{\partial r} + \frac{\tau}{\rho_l h} + \frac{u^2}{r} + \frac{u^2}{h}\frac{\partial h}{\partial r} + g\frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial u^2}{\partial r} - g\frac{\rho_l}{\rho_W}\frac{\partial h}{\partial r} = 0 \,. \tag{4.17}$$

Durch differentielle Umformung, Erweiterung und $F=\tau\ /\rho_l$ (Einheit: m^2/s^2) sowie dem Dichteverhältnis $\delta = (1-\rho_l/\rho_W)$ erhält man den zweiten Teil der Shallow-Layer-Gleichungen

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u^2}{2} + \delta g h\right) + \frac{F}{h} = 0 \,. \tag{4.18}$$

Bei einer Freisetzung über Land ist $\delta=1$.

In der Formulierung nach Brandeis [BRA83B] wird zusätzlich eine Impulsänderung durch Quelle und Verdampfung

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{w}{h}(u - u_b) + \frac{v}{h}(u_t - u) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u^2}{2} + \delta g h\right) + \frac{\tau}{\rho_l h} = 0 \,, \tag{4.19}$$

über die Geschwindigkeit u_b des zugeführten Massestroms und die Geschwindigkeit u_t der Verdampfung berücksichtigt.

Die Reibungskraft $F(u,h)$ zwischen Untergrund und Lache wird im Bereich der turbulenten Reibung mit

$$F_{turb}(u,h) = \tilde{C} \cdot u^2 \,, \tag{4.20}$$

und im Bereich der laminaren Reibung mit

$$F_{lam}(u,h) = \frac{\nu u}{h} \,, \tag{4.21}$$

angenommen. Für die Annahme einer turbulenten Strömung muß

$$Re_{krit} = \frac{uh}{\nu} > 2320 \,, \tag{4.22}$$

gelten. Andernfalls liegt eine laminare Strömung vor. Beide Reibungsterme werden zu einem Gesamtreibungsterm addiert, was zwar einen kleinen Fehler in der Bestimmung der Reibungskräfte im Übergangsbereich verursacht, aber den großen Vorteil des "nahtlosen" Übergangs zwischen turbulenter und laminarer Reibung hat [WEB87B]. Die empirische Konstante $\tilde{C}$ ist der sogenannte Chézy-Koeffizient. Er hängt ab von Stoffeigenschaften der kryogenen Flüssigkeit und des Untergrundes sowie dem Vorhandensein von Film- bzw. Blasensieden und muß für jede Flüssigkeit empirisch ermittelt werden. Nach Webber ist der Chézy-Koeffizient für kryogene Flüssigkeiten 10^{-3} [WEB87B].

4.1.2. Mathematisches Lösungsverfahren

Die Umsetzung des hyperbolischen Differentialgleichungssystems aus Massenerhaltung (Gleichung 4.2 auf Seite 80) und Impulserhaltung (Gleichung 4.18) der Shallow-Layer-Gleichungen erfolgt mit Hilfe des expliziten Finite-Differenzen-Lösungsverfahrens. Über die in 4.1.1 genannten Randbedingungen hinaus sollen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Es werden sowohl schlagartige als auch kontinuierliche Freisetzungen betrachtet.
- Die Ausbreitung der Lache wird nicht begrenzt, z.B. durch Hindernisse.
- Die Zuleitung kryogener Flüssigkeit erfolgt stets zentral.
- Die Geschwindigkeit u in radialer Richtung ist zu Beginn der Freisetzung Null (impulsfrei).

Das Lösungsverfahren der Shallow-Layer-Gleichungen lautet (k bezeichnet das zeitliche, n das örtliche Inkrement):

$$h_n^{k+1} = h_n^k - \frac{\Delta t}{\Delta r}\left(u_1 h_n^k - u_2 h_{n-1}^k\right) - \left(v - w\right)\Delta t \,, \tag{4.23}$$

$$u_n^{k+1} = u_n^k - \frac{\Delta t}{\Delta r}\left(\frac{u_1}{2}u_n^k - \frac{u_2}{2}u_{n-1}^k\right) - \delta g \frac{\Delta t}{\Delta r}\left(h_n^k - h_{n-1}^k\right) - \frac{\Delta t}{h_n^k}\cdot F(u_n^k, h_n^k) \,, \tag{4.24}$$

mit

$$u_1 = \frac{1}{2}\left(u_{n+1}^k + u_n^k\right) \,, \tag{4.25}$$

$$u_2 = \frac{1}{2}\left(u_n^k + u_{n-1}^k\right) . \tag{4.26}$$

Im Mittelpunkt der Lache ist die Geschwindigkeit Null. Daraus folgt:

$$u_0^{k+1} = u_0^k = 0 \,, \tag{4.27}$$

$$h_0^{k+1} = h_0^k\left(1 - \frac{\Delta t}{\Delta r}u_1\right) - \left(v - w\right)\Delta t \,. \tag{4.28}$$

Gemäß den Randbedingungen wird die Anfangslache ohne jeglichen Impuls angesetzt.

$$u^0(r) = 0 \,. \tag{4.29}$$

Dadurch ergibt sich eine rein gravitationsbedingte Ausbreitung der Lache.

Bei einer schlagartigen Freisetzung befindet sich zum Zeitpunkt $t=0$ das Volumen V_0 der kryogenen Flüssigkeit in Ruhe auf dem Untergrund und verdampft nicht. Anschließend wird eine (gedachte) Hülle entfernt und die kryogene Flüssigkeit breitet sich bei gleichzeitiger Verdampfung auf dem Untergrund aus. Die Lachenhöhe über dem Radius (Anfangsradius $R_0=h^0(0)$) wird zu Beginn der Berechnung wie folgt definiert:

$$h^0(r) = 2\left(\frac{V_0}{\pi}\right)^{1/3}\left(1 - \left(\frac{V_0}{\pi}\right)^{-2/3} r^2\right). \tag{4.30}$$

Bei der kontinuierlichen Freisetzung wird über einen bestimmten Zeitraum der Lache zentral kryogene Flüssigkeit zugeführt. Auch für die kontinuierliche Freisetzung gilt Gleichung 4.29. Der zentral zugeführte flächenbezogene Volumenstrom w ergibt sich aus

$$w^0(r) = \frac{2\dot{V}}{\pi R_0^2}\left(1 - \frac{r}{R_0}\right)^2. \tag{4.31}$$

Die kryogene Flüssigkeit wird der Lache im Zentrum der Ausbreitung innerhalb des Radius R_0 zugeführt. Im Fall der schlagartigen Freisetzung ist $w=0$.

Es ist möglich, den zugeführten Volumenstrom entweder als zeitlich konstant oder als transient anzunehmen. Im zweiten Fall kann über zu definierende Punktepaare (Zeit, Freisetzungsmenge) der gewünschte zeitabhängige Volumenstrom eingegeben werden. Zwischen diesen Punkten wird der Volumenstrom linear interpoliert.

Die Stabilitätsbedingung des Finite-Differenzen-Lösungsverfahrens [BRA83B] (Gleichungen 4.23 und 4.24) ist gegeben durch:

$$\frac{\Delta t}{\Delta r} < \frac{1}{|u_{max}| + c_{max}}. \tag{4.32}$$

Die Geschwindigkeit u_{max} bezeichnet die durch die Rechnung bestimmte orts- und zeitabhängige maximale Geschwindigkeit der Lache. Die Geschwindigkeit c_{max} ist die maximal mögliche Geschwindigkeit, die dann vorliegt, wenn die Lache an dem Punkt ihrer größten Höhe die potentielle Energie vollkommen in kinetische Energie umsetzen würde:

$$c_{max} = \sqrt{2gh_{max}}. \tag{4.33}$$

4.2. Verdampfungsverhalten einer Lache aus kryogener Flüssigkeit

4.2.1. Verdampfung über einem festen Untergrund

4.2.1.1. Analytische Lösung der instationären Wärmeleitgleichung

Ein einfacher Lösungsansatz der bekannten Fourier-Gleichung, der optional auch in LAuV verwendet wird, ist die in Gleichung 2.6 auf Seite 16 angegeben. Dieser wird bei Ausbreitungscodes zur Bestimmung des Wärmeeintrages aus dem Untergrund recht häufig verwendet und ist auch Bestandteil neuerer Programmentwicklungen [WEB91, RAJ81]. Weil dieser zufriedenstellende Übereinstimmung mit experimentellen Werten [WEB87A, ZAB60] zeigt und damit eine konservative Berechnung ermöglicht sowie wenig Rechenzeit in Anspruch nimmt, ist dessen Anwendung durchaus sinnvoll.

Die aus Gleichung 2.6 auf Seite 16 abgeleitete flächenbezogene Verdampfungsrate der Lache beträgt:

$$v = \frac{\lambda \Delta T}{\rho_l \Delta h_{fg} (\pi a)^{1/2} \left(t - t'\right)^{1/2}} \quad , \tag{4.34}$$

mit der Temperaturleitzahl a und der Wärmeleitfähigkeit λ des Untergrundes sowie der Verdampfungsenthalpie Δh_{fg} der kryogenen Flüssigkeit. Die Zeit t ist die Dauer des Versuches und die Zeit t' ist die Zeit, in der das betrachtete Flächenelement erstmalig in Kontakt mit der sich ausbreitenden kryogenen Flüssigkeit kommt. Denn: Breitet sich eine Lache aus, erreicht sie am Rand "frischen" Untergrund, der sich auf Umgebungstemperatur befindet, während der Untergrund in ihrem Zentrum schon eine bestimmte Zeit mit kryogener Flüssigkeit bedeckt ist. Deshalb ist eine Differenzierung zwischen inneren und äußeren Bereichen der Oberfläche unter einer Lache aus kryogener Flüssigkeit zweckmäßig.

Darüber hinaus ist es z.B. möglich, daß die Lache zunächst über ihren stationären Radius hinauswächst, sich anschließend verkleinert und dann wieder vergrößert (z.B. durch Änderung des zugeführten Volumenstroms). In Zeiten der Nicht-Bedeckung wird aus der Umgebung Wärme an die Oberfläche abgegeben, welche dazu beiträgt, die Temperatur der Oberfläche entsprechend der Temperaturdifferenz und des vorliegenden Wärmeübergangskoeffizienten zur Umgebungsluft wieder zu erhöhen. Wie noch gezeigt wird, tritt dieses Verhalten der Lache in vielen Fällen der Freisetzung auf. Deshalb soll dies in der Berechnung des Wärmestroms aus dem Untergrund mit Gleichung 4.34 insofern berücksichtigt werden, daß für jedes Flächenelement die Zeit der tatsächlichen Bedeckung mit kryogener Flüssigkeit (t') ermittelt wird. Es kann jedoch keine Abschätzung für die Temperaturerhöhung in Zeiten der Nicht-Bedeckung gemacht werden. Ebenso wenig können mit Gleichung 4.34 radiale Wärmeleiteffekte erfaßt werden. Im Ansatz der 2D-Wärmeleitung mit differenzierter

Betrachtung des Wärmestroms durch die Oberfläche (Kapitel 4.2.1.2) werden allerdings auch diese Einflüsse berücksichtigt. Zudem treten für $t \rightarrow 0$ bei Anwendung von Gleichung 4.34 Abweichungen zu experimentellen Werten auf, weil die errechnete Verdampfungsrate gegen unendlich geht. Die Lachenausbreitung und -verdampfung ist in manchen Fällen aber schon nach wenigen Sekunden abgeschlossen, so daß eine genauere Betrachtung der Verdampfung zweckmäßig sein kann. Zudem ist es mit dem Ansatz von Gleichung 4.34 nicht möglich, Wärmequellen im Untergrund zu simulieren, wie dies z.B. bei feuchtem Untergrund notwendig ist.

4.2.1.2. Numerische Lösung der instationären Wärmeleitgleichung

Insbesondere wenn die Lache längere Zeit eine konstante Größe hat, kann durch horizontale Wärmeleitung im Untergrund Wärme aus benachbarten, noch warmen Schichten nachgeführt werden und die Verdampfung der Lache beeinflussen. Im folgenden wird ein zweidimensionales numerisches Lösungsverfahren der instationären Wärmeleitgleichung vorgestellt, welches zur Bestimmung der Wärmestromdichten durch die Oberfläche auf Film- und Blasensiedekorrelationen zurückgreift, die von [BRN65] für Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Helium validiert worden sind. In Zeiten der Nicht-Bedeckung wird auch die Temperaturänderung des Untergrundes entsprechend der Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Umgebung berechnet.

Es existiert eine Reihe verschiedener numerischer Lösungsverfahren von Gleichung 2.4 auf Seite 16. Ein Standardlösungsverfahren ohne Wärmequellen im Untergrund ist das nachfolgend skizzierte 2 dimensionale Finite-Differenzen-Verfahren (FD-Verfahren) mit folgenden Randbedingungen:

- Korrelationen für die Wärmestromdichte durch die Oberfläche werden der Literatur entnommen [BRN65]. Dadurch ist implizit eine ideal-glatte Oberfläche vorausgesetzt.
- Es wird ein rotationssymmetrischer Körper betrachtet (2D).
- Die Stoffwerte des Untergrundes werden als konstant und homogen angenommen.

Es gibt verschiedene Lösungsansätze für den Wärmestrom zwischen Oberfläche und kryogener Flüssigkeit in Abhängigkeit von deren Temperaturdifferenz. Die hier verwendeten und in Kapitel 2.2.2.1 bereits genauer beschriebenen Ansätze verschiedener Autoren wurden von Brentari [BRN65] u.a. für LN_2 und LH_2 experimentell bestätigt. Diese werden für die Bestimmung der Wärmestromdichten durch die Oberfläche (Randbedingung) herangezogen. Wegen der Ungenauigkeiten im Experiment bei der Messung der Nukijama-Kurve (meist hat man hier Fehler in der Größenordnung von 50%) liefern auch neuere Korrelationen keine genaueren Aussagen.

Falls die Oberfläche nicht mit kryogener Flüssigkeit bedeckt ist, wird der Wärmestrom durch die Oberfläche entsprechend folgender Beziehung angenommen

$$\dot{q}_{Ob} = \frac{Nu \cdot \lambda_L}{R} \Delta T \approx 15{,}4 \cdot 10^{-3} \frac{(T_U - T_{Ob})^{4/3}}{T_U^{1/3}} \frac{W}{m^2}, \tag{4.35}$$

wobei T_U die Umgebungstemperatur und T_{Ob} die Temperatur der festen Oberfläche ist. R ist der Radius der Lache, λ_L die Wärmeleitfähigkeit der Luft und ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Umgebung. Damit kann auch ein Anstieg der Untergrundtemperatur simuliert werden, wenn der Ort zunächst mit kryogener Flüssigkeit bedeckt war, wodurch die Oberflächentemperatur verringert würde, und anschließend wieder frei würde, wobei dann der Wärmeeintrag aus der Umgebung für dessen Erwärmung sorgt.

Als numerisches Lösungsverfahren von Gleichung 2.4 auf Seite 16 wird das Finite-Differenzen-(FD)-Verfahren für rotationssymmetrische Körper verwendet

$$\begin{aligned} T^{k+1}(r,z) = T^k(r,z) + \frac{\lambda_B \Delta t}{\rho_B c_{p,B}} \Bigg\{ & \frac{T^k(r+\Delta r,z) - T^k(r-\Delta r,z)}{r 2\Delta r} \\ & + \frac{T^k(r+\Delta r,z) - 2T^k(r,z) + T^k(r-\Delta r,z)}{\Delta r^2} \\ & + \frac{T^k(r,z+\Delta z) - 2T^k(r,z) + T^k(r,z-\Delta z)}{\Delta z^2} \Bigg\} \end{aligned}, \tag{4.36}$$

λ_B bezeichnet die Wärmeleitfähigkeit, ρ_B die Dichte und $c_{p,B}$ die spezifische Wärmekapazität des Untergrundes. z bezeichnet den Abstand von der Oberfläche (die Tiefe).

Die Ränder, mit Ausnahme der Oberfläche, werden als wärmeisoliert angenommen.

4.2.1.3. Modellierung eines feuchten Untergrundes

Zur Simulation von feuchten Untergründen ist eine Erweiterung erforderlich, die den Phasenübergang des im Untergrund enthaltenen Wassers in die Wärmebilanz mit aufnimmt. Durch den Phasenübergang ändern sich auch die Stoffwerte des Untergrundes entsprechend dem Massengehalt an festen Bestandteilen und Wasser und/oder Eis.

Neben den in Kapitel 4.2.1.2 genannten Randbedingungen wird vorausgesetzt, daß die Feuchte des Untergrundes homogen verteilt sei. Ein Volumenelement besteht zu Beginn der Berechnung aus Wasser und festem Untergrund (z.B. Beton). Die Stoffwerte werden entsprechend dem Verhältnis Beton/Wasser berechnet. Wird diesem Volumenelement Wärme entzogen, kühlt es zunächst soweit ab, bis die Temperatur im Volumenelement die Erstarrungstemperatur des Wassers erreicht. In diesem ersten Bereich wird die Temperatur im Untergrund mittels Gleichung 4.36 berechnet. Bei weiterem Wärmeentzug wird das im Volumenelement vorhandene Wasser zu Eis erstarren und unter Annahme, daß die Temperatur

in diesem Element während dessen konstant bleibt, die Erstarrungenthalpie abgegeben. Durch die Erstarrung ändert sich die Stoffzusammensetzung des betrachteten Volumenelementes (Wasser, Eis, Beton) und mit ihr die Stoffwerte. Ist das enthaltene Wasser im Volumenelement zu Eis erstarrt, wird bei andauerndem Wärmeentzug die Temperatur mittels Gleichung 4.36 berechnet, allerdings mit den Stoffwerten von Beton/Eis.

Für die Modellierung des Phasenüberganges wurde angenommen, daß die Temperatur in einem betrachteten Volumenelement beim Phasenübergang konstant bleibt und damit der instationäre Teil der Wärmeleitgleichung gleich Null ist:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{\Phi}{\rho c_p} \quad , \tag{4.37}$$

mit den Stoffwerten des Untergrundes und der volumenbezogenen Wärmeerzeugungsrate Φ. Es soll eine konstante Feuchte γ_W entsprechend dem Massenverhältnis von im Untergrund vorhandenem Wasser m_W und dem Untergrund m_B ($\gamma_W = \frac{m_W}{m_B}$) angenommen werden

$$\gamma_W^0(r,z) = \gamma_0 \, . \tag{4.38}$$

Die volumenbezogene Wärmeerzeugungsrate $\Phi = \frac{\dot{q}}{V}$ ergibt sich aus der abgegebenen Erstarrungsenthalpie des Wassers $\Delta h_{ls,W}$ und dem Massenanteil des Wassers γ_W im Untergrund

$$\dot{q} = \frac{m_W}{\Delta t}\Delta h_{ls,W} = \gamma_W \frac{m_B}{\Delta t}\Delta h_{ls,W} \quad , \tag{4.39}$$

$$\frac{\Phi}{\rho c_p} = \frac{\gamma_W \Delta h_{ls,W}}{c_p \Delta t} \, . \tag{4.40}$$

Daraus und aus Gleichung 4.37 läßt sich nun zunächst der Anteil an Wasser im betrachteten Volumenelement zum Zeitpunkt $k+1$ bestimmen, der um den Eisanteil vermindert ist

$$\gamma_W^{k+1}(r,z) = \gamma_W^k(r,z) - \frac{\lambda_B \Delta t}{\rho_B \Delta h_{ls,W}}\left\{\frac{T^k(r+\Delta r,z) - T^k(r-\Delta r,z)}{r2\Delta r} + \frac{T^k(r+\Delta r,z) - 2T^k(r,z) + T^k(r-\Delta r,z)}{\Delta r^2} + \frac{T^k(r,z+\Delta z) - 2T^k(r,z) + T^k(r,z-\Delta z)}{\Delta z^2}\right\} \, . \tag{4.41}$$

Durch den Phasenübergang von Wasser zu Eis ändern sich die Stoffwerte des Untergrundes entsprechend der Zusammensetzung Wasser/Eis/fester Untergrund:

$$\rho_B(r,z) = \sum(\gamma_i \rho_i) \, , \tag{4.42}$$

$$c_{p,B}(r,z) = \sum(\gamma_i c_{p_i}) \, , \tag{4.43}$$

$$\lambda_B(r,z) = \sum\left(\gamma_i \lambda_i \frac{\rho_B(r,z)}{\rho_i}\right), \tag{4.44}$$

4.2.2. Verdampfung über einem flüssigen Untergrund (Wasser)

Von vielen Autoren wird in der Simulation der Ausbreitung einer kryogenen Flüssigkeit auf Wasser die Annahme einer konstanten Verdampfungsrate verwendet. Diese Annahme kann aufgrund experimenteller Untersuchungen mit flüssigem Stickstoff und Flüssigerdgas für Zeiten bis ca. 50-60s in guter Näherung verwendet werden [DRA75A] und ist auch in dem LAuV-Code optional enthalten. Die flächenbezogene Verdampfungsrate ergibt sich aus

$$v = \frac{\dot{q}}{\Delta h_{fg} \rho_l}. \tag{4.45}$$

Die darin enthaltene und konstant angenommene Wärmestromdichte $\dot{q}$ entspricht in etwa der Wärmestromdichte im Filmsiedebereich bei der Temperaturdifferenz ΔT aus Siedetemperatur der kryogenen Flüssigkeit und der Ausgangstemperatur der Probe.

Bekanntlich erstarrt Wasser bei 0°C zu Eis, wobei die Erstarrungsenthalpie frei wird. Durch die andauernde Verdampfung kryogener Flüssigkeit wird dem Eis weiter Wärme entzogen; dadurch wächst die Eisschicht, die Oberflächentemperatur wird kleiner und es ist zumindest fraglich, ob dann die Annahme eines konstanten Wärmestroms durch die Oberfläche weiterhin gelten kann.

Im LAuV-Code ist optional ein Modell zur Eisbildung und -wachstum infolge der Lachenausbreitung und -Verdampfung einer kryogenen Flüssigkeit auf der Wasseroberfläche enthalten.

In der Modellierung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Zur Bestimmung des Wärmestromes zwischen Wasseroberfläche und Lache werden die in Kapitel 2.2.2.1 angegebenen Wärmeübergangskorrelationen [BRN65] verwendet,
- die Bewegung der Wasseroberfläche wird vernachlässigt,
- die Stoffwerte von Eis sind unabhängig von der Temperatur,
- die Konvektion im Wasser wird vernachlässigt, was bei niedrigen Wassertemperaturen zulässig ist [DRA75A],
- die Beschleunigung der Lache durch den Auftrieb des Eises wird vernachlässigt,
- die Oberfläche des Eises wird als eben vorausgesetzt.

In Bild 4.3 ist das Prinzip der Eisberechnung wiedergegeben; Δr und Δz sind hierin äquidistant. Das Wachstum der Eisschicht ist hierin schon fortgeschritten. In der Eissschicht wird der Temperaturverlauf entsprechend Gleichung 4.36 auf Seite 90 berechnet. Zur Berechnung der Eisbildung wird Gleichung 4.41 verwendet. Der Massenanteil an Wasser in einem

Volumenelement beträgt zu Beginn 100% ($\gamma_W=1$). Findet in einem Volumenelement der Phasenübergang zu Eis statt, beträgt die Temperatur in diesem Element 0°C. Die Wärme $\dot{Q}_4$ resultiert aus der Erstarrungsenthalpie des Wassers im Volumenelement und der Beträge der Wärmen aus den benachbarten Schichten $\dot{Q}_5$, $\dot{Q}_6$ und $\dot{Q}_7$. Die Wärme $\dot{Q}_7$ folgt aus der Wärmeleitung des Wassers. Ist das Wasser im Volumenelement zu Eis erstarrt, beträgt der Massenanteil an Wasser 0% ($\gamma_W=0$).

Der Vorteil der hier vorgestellten Rechenmethode gegenüber analytischen Lösungen der Eisbildung liegt darin, daß nicht a priori eine Eisbildung angenommen werden muß, sondern zunächst eine Abkühlung der Oberfläche stattfindet, wobei die Temperatur der Oberfläche insbesondere bei kurzen Verdampfungszeiten nicht notwendigerweise den Gefrierpunkt erreichen muß.

4.3. Verwendete Stoffwerte

Der LAuV-Code ist in der Lage, die Lachenausbreitung von Flüssigwasserstoff (LH_2), Flüssigstickstoff (LN_2) und Flüssigerdgas (LNG) zu simulieren. In Tabelle 4.1 sind die im LAuV-Code enthaltenen Stoffwerte dieser Gase aufgeführt. Die Stoffwerte von LNG sind jedoch von der Zusammensetzung abhängig und für die übliche Zusammensetzung (87% Methan, 13%Äthan) nicht vollständig der Literatur entnehmbar. Deshalb werden in Tabelle 4.1 für einige LNG-Stoffwerte die Daten von Methan angegeben.

Es existieren zwei Modifikationen von Wasserstoff: Ortho- und Para-Wasserstoff, die sich durch die unterschiedliche Spinorientierung der Molekülkerne voneinander unterscheiden (beim Ortho-Wasserstoff gleichgerichtet, beim Para-Wasserstoff entgegengerichtet). Weil die Gleichgewichtskonzentration stark temperaturabhängig ist (25% Para-Wasserstoff bei Umgebungstemperatur, 95% Para-Wasserstoff bei Siedetemperatur), muß die bei der Umwandlung freiwerdende Energiemenge (708,8 kJ/kg) bei der Verflüssigung und langfristigen Speicherung berücksichtigt werden [KOM80]. Die in Tabelle 4.1 angegebenen und in den folgenden Rechnungen benutzten konzentrationsabhängigen Werte beziehen sich immer auf die jeweilige Gleichgewichtskonzentration von Ortho- und Para-Wasserstoff.

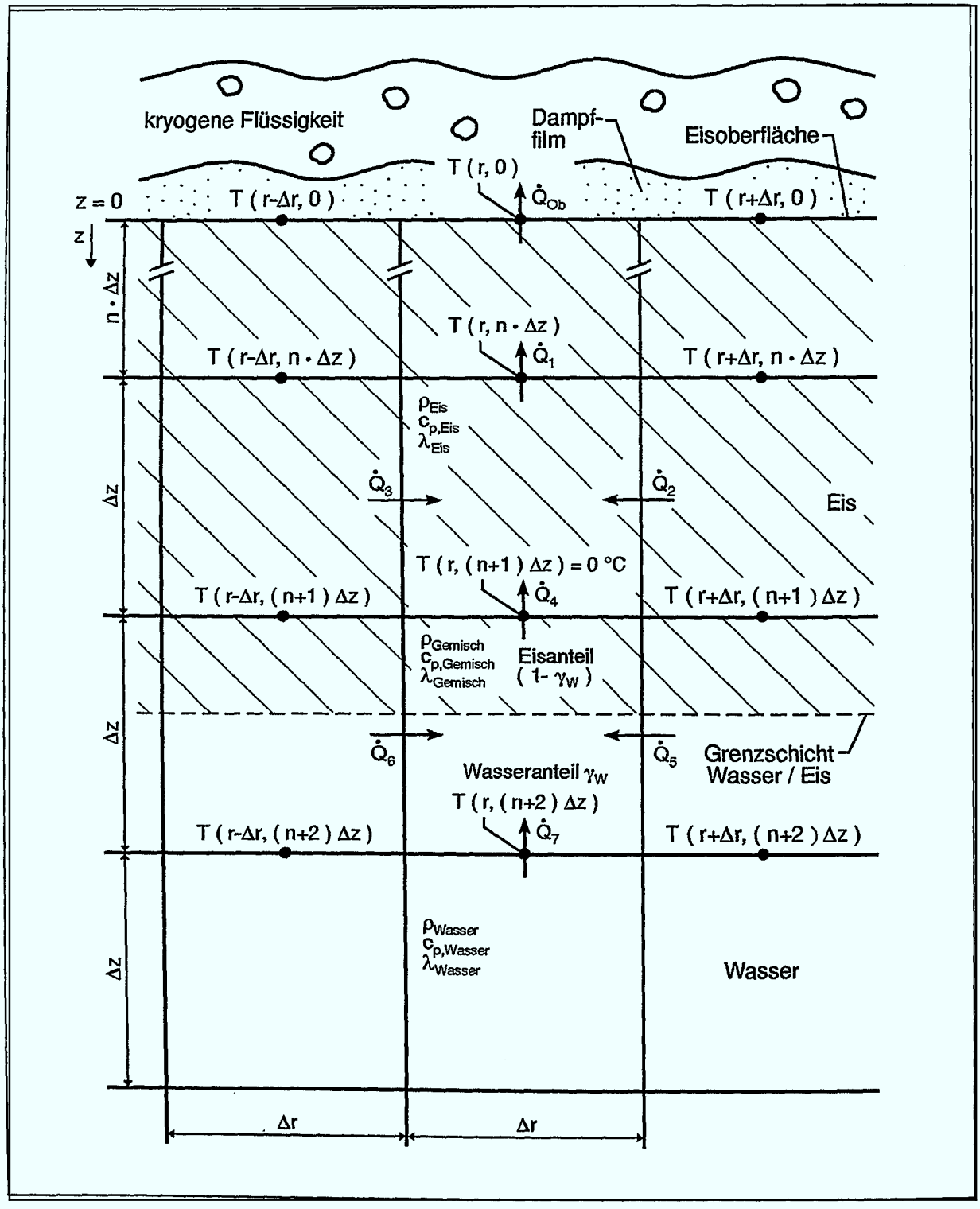


Bild 4.3: Simulation des Eiswachstums mit dem LAuV-Code

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der Stoffwerte von Wasserstoff, Erdgas und Stickstoff (bei Umgebungsdruck), die u.a. zur Berechnung der Lachenausbreitung der jeweiligen flüssigen Phasen bedeutsam sind. Quellen der Daten sind [BOC90, EIC92, KOM80, FIS85, VDI77, WIN89, SYC87, HOR75, CAR81, VAR75]. Die mit * gekennz. Werte sind Stoffwerte von Methan.

Kenngröße	Wasserstoff	Erdgas	Stickstoff
Siedetemperatur T_S [K]	20,3	111,65	77,4
Normdichte ρ_{NTP} [kg/m³]	0,0838	0,6512	1,25
Dampfdichte $\rho_{G(T_S)}$ [kg/m³]	1,34	1,82	4,5
Flüssigkeitsdichte $\rho_{l(T_S)}$ [kg/m³]	70,78	450	800
Dichteverhältnis ρ_l/ρ_{NTP}	845	649	646
Verdampfungsenthalpie Δh_{lg} [kJ/kg]	454	511,9	201
spez. Wärme Dampf $c_p(T_S)$ [kJ/(kg K)]	28,83	2,238	1,038
spez. Wärme Dampf $c_p(T_U)$ [kJ/(kg K)]	20,45	2,22	0,741
spez. Wärme Flüssigkeit $c_p(T_S)$ [kJ/(kg K)]	9,69	3,35	2,0
Oberflächenspannung σ [10^{-3} N/m]	1,92	12,94	8,50
Wärmeleitfähigkeit Dampf λ (T_U) [W/(m K)]	0,162	0,033	0,022
Wärmeleitfähigkeit Flüssigkeit λ (T_S) [W/(m K)]	0,099	0,186	0,138
dyn. Viskosität Dampf η (T_U) [10^{-6} N s/m²]	8,75	15,0	6,0
dyn. Viskosität Flüssigkeit η (T_S) [10^{-6} N s/m²]	134,6	113,0 *	158,0
Diffusionskoeffizient ζ (T_U) [10^{-5} m²/s]	6,6	1,6	1,344
Dichteverhältnis zu Luft $(\rho_G/\rho_L)_{NTP}$	0,065	0,5	0,96
Zündgrenzen in Luft [%]	4 - 75	5,3-15	-
minimale Zündenergie in Luft [mJ]	0,019	0,29	-
Unterer Heizwert ΔH_u [kJ/kg]	119 930	50 020	-
Oberer Heizwert ΔH_o [kJ/kg]	141 860	55 530	-
Detonationsüberdruck [MPa]	1,47	1,68	-
Detonationsgeschwindigkeit in Luft [km/s]	2,0	1,8	-
Detonationsgrenzen in Luft [Vol.-%]	18,3-59	6,3-14	-
Explosionsenergie [kg TNT/m³ NTP Brenngas]	2,02	7,03	-
Explosionsenergie [kg TNT/kg Brennstoff]	24	11	-
Verbrennungsgeschwindigkeit c [m/s]	3,46	0,43	-

5. Testen und Verifizieren des LAuV-Codes

Die Umsetzung der beschriebenen Lösungen in ein Rechenprogramm erfolgt im sogenannten LAuV-Code (**L**achen**A**usbreitung **u**nd **V**erdampfung) in der Programmiersprache FORTRAN 77 auf einem IBM-Großrechner unter VM/CMS. Übliche Rechenzeiten liegen auf diesem Rechner im Bereich mehrerer Sekunden bis ca. 10 Minuten. Der interaktiv organisierte LAuV-Code berechnet simultan Ausbreitungs- und Verdampfungsvorgänge kryogener Flüssigkeiten. Die wesentlichen Merkmale des LAuV-Codes sind:

- Aufgrund der implementierten Stoffdaten anwendbar auf die Ausbreitung von Flüssigwasserstoff (LH_2), Flüssigstickstoff (LN_2) und Flüssigerdgas (LNG),
- schlagartige und kontinuierliche (konstante und transiente) Freisetzungen können behandelt werden,
- die Stoffwerte für folgende Untergründe sind enthalten: Wasser, Bitumen, Beton und Aluminium. Eingabe und Speicherung der Stoffwerte weiterer Untergründe bzw. Variation der vorgegebenen Stoffwerte sind interaktiv möglich,
- bei einer Ausbreitung auf Wasser kann Eisbildung an der Wasseroberfläche simuliert werden. Optional kann bei einer Ausbreitung auf Wasser auch mit einer konstanten Verdampfungsrate gerechnet werden, wie sie für diesen Fall der Ausbreitung von vielen Autoren verwendet wird,
- bei einer Ausbreitung auf festem Untergrund kann zur Berechnung des aus dem Untergrund in die Lache fließenden Wärmestroms optional eine eindimensionale analytische oder eine zweidimensionale numerische Lösung der instationären Wärmeleitgleichung verwendet werden.

Zunächst wird der LAuV-Code auf seine Leistungsfähigkeit hin untersucht. Dazu werden numerische Stabilitätsbetrachtungen für den Fall einer schlagartigen Freisetzung von 1000 l LN_2 auf Wasser durchgeführt (Kapitel 5.1). Anschließend wird der LAuV-Code auf die Ausbreitung von 500 l LH_2 auf Wasser angewendet, wobei der Unterschied zwischen schlagartiger und kontinuierlicher Freisetzung untersucht wird (Kapitel 5.2). Der Einfluß der Verdampfung auf die Ausbreitung wird in Kapitel 5.3 durch Annahme verschiedener Untergründe untersucht und speziell bei Verdampfung über Wasser wird in Kapitel 5.4 das Ergebnis der Rechnung zur Eisbildung im Wasser vorgestellt. In Kapitel 5.5 wird der LAuV-Code mit anderen Ausbreitungscodes verglichen. Beim Vergleich mit dem GASP-Code [WEB87B] wird der LAuV-Code gleichzeitig mit dem Experiment von [MOO86] verglichen, welches das einzig bislang bekannt gewordene Experiment ist, in dem speziell die Lachenausbreitung einer kryogenen Flüssigkeit (hier LNG) untersucht wird. In Kapitel 5.6 werden die im LAuV-Code enthaltenen Wärmebetrachtungen anhand der selbst durchgeführten

Experimente zur Verdampfung von LN_2 über Bitumen und Beton (siehe Kapitel 3.1) validiert. Die Validierung bezüglich Ausbreitung und Verdampfung von LN_2 auf Wasser erfolgt in Kapitel 5.7 an Hand der Ergebnisse der KIWI-Versuche (siehe Kapitel 3.2). Die Validierung bezüglich Ausbreitung und Verdampfung von LH_2 auf Wasser und Aluminium erfolgt in Kapitel 5.8 mit den Ergebnissen der in Kapitel 3.3 beschriebenen Versuche.

5.1. Numerische Stabilitätsbetrachtung

Die numerische Stabilitätsbetrachtung des LAuV-Codes soll repräsentativ für den Fall einer schlagartigen Freisetzung von 1000 l LN_2 auf Wasser durchgeführt werden. Bei den Rechnungen wird eine konstante Verdampfungsrate angenommen, d.h. Eisbildung vernachlässigt. Die Gitter- und Zeitschrittweiten wurden äquidistant gewählt. Zunächst wird die Zeitschrittweite Δt konstant gehalten und die Gitterweite Δr variiert (Bild 5.1), anschließend die Gitterweite Δr konstant gehalten und die Zeitschrittweite Δt variiert (Bild 5.2).

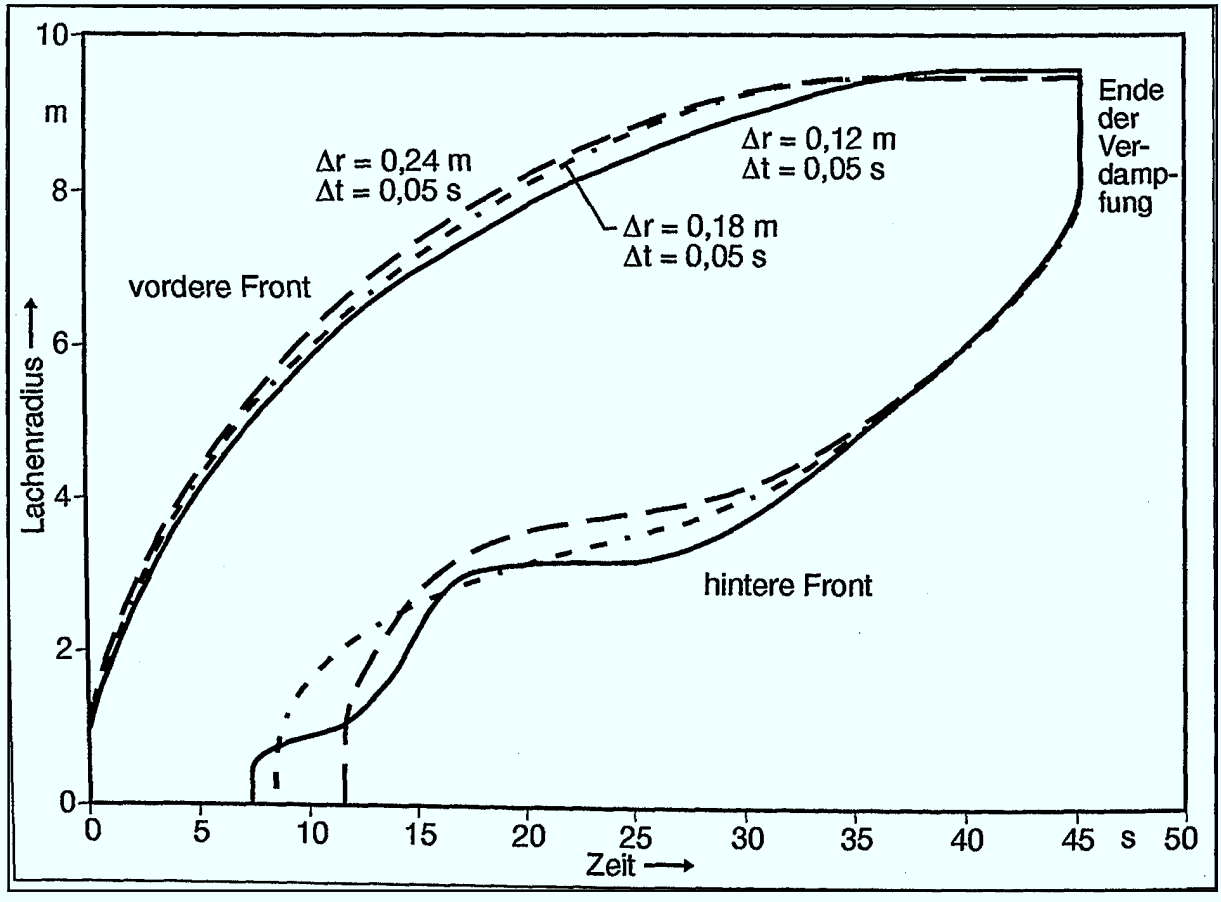


Bild 5.1: Ergebnisse der LAuV-Rechnungen für die Ausbreitung von 1000 l LN_2 auf Wasser für den Fall einer schlagartigen Freisetzung. Bei der Rechnung wurde die Zeitschrittweite Δt konstant gehalten und die Gitterweite Δr variiert.

Von den Ergebnissen der LAuV-Rechnungen ist in Bild 5.1 und 5.2 nur der zeitliche Verlauf der Lachenfronten dargestellt. Anfangs zeigt sich nur eine Ausweitung der Lache mit der Zeit; nach ca. 7 s entsteht eine zweite (hintere) Lachenfront, die sich von $r=0$ nach außen bewegt. Es existieren von da an also zwei Lachenfronten und die Lache nimmt die Form eines Ringes an.

In Bild 5.1 wird die Zeitschrittweite mit $\Delta t=0{,}05s$ konstant gehalten, und die Gitterweite Δr im Bereich 0,12m-0,24m variiert. Für eine Gitterweite größer 0,24m wird die Rechnung instabil und führt zum Abbruch. Für Gitterweiten kleiner 0,12m zeigen sich keine Abweichungen zum Verlauf bei Verwendung von $\Delta r=0{,}12m$. Insgesamt betrachtet sind durch Variation der Gitterweite an der vorderen Front der Lache kaum Abweichungen vorhanden, an der hinteren Front zeigen sich jedoch größere Abweichungen. Insgesamt kann die Abweichung der Lachenfläche durch Verwendung unterschiedlicher Gitterweiten an der vorderen Front mit max. ca. ± 10% bestimmt werden.

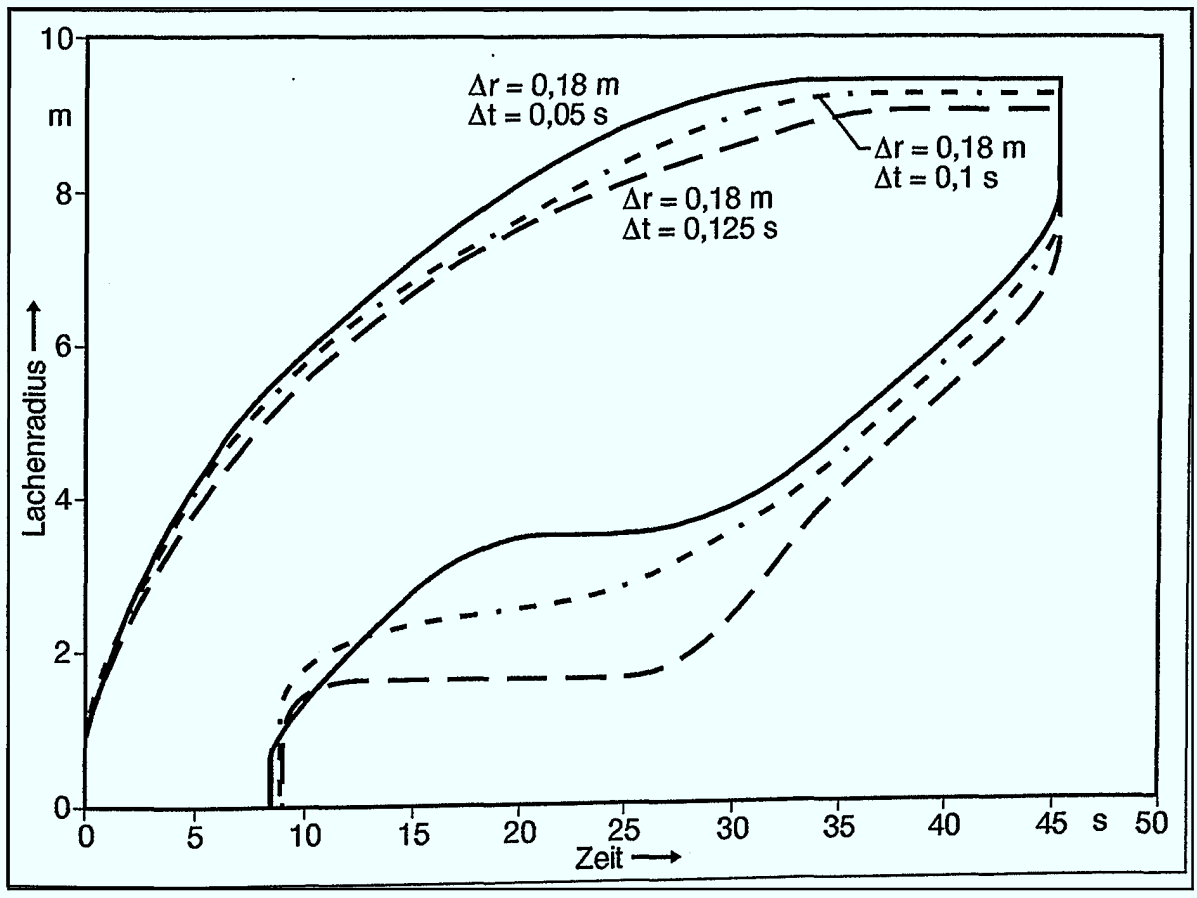


Bild 5.2: Ergebnisse der LAuV-Rechnungen für die Ausbreitung von 1000 l LN_2 auf Wasser für den Fall einer schlagartigen Freisetzung. Bei der Rechnung wurde die Gitterweite Δr konstant gehalten und die Zeitschrittweite Δt variiert.

In Bild 5.2 wird die Gitterweite mit $\Delta r=0,18m$ vorgegeben, um den Einfluß durch Variation der Zeitschrittweite Δt zu untersuchen. Dazu wird die Zeitschrittweite im Bereich von 0,05 bis 0,125s variiert. Über diesen Bereich hinaus gehende Zeitschrittweiten führen zu Instabilitäten und zum Abbruch der Rechnung. Zeitschrittweiten kleiner 0,05s zeigen keine Abweichungen zum Verlauf bei Verwendung von $\Delta t=0,05s$. Durch Variation der Zeitschrittweite wird die vordere Front der Lache wenig beeinflußt. Die hintere Kante der Lache zeigt jedoch deutliche Abweichungen in der Zeit 10-30s. Insgesamt beträgt die Abweichung in der Lachenfläche ca. ± 10%.

5.2. Freisetzung von 500 Litern Flüssigwasserstoff über Wasser

In diesem Rechenbeispiel soll der Unterschied zwischen einer schlagartigen und einer kontinuierlichen Freisetzung von 500 l Flüssigwasserstoff auf Wasser untersucht werden. Um den Unterschied zwischen schlagartiger und kontinuierlicher Freisetzungen deutlich zu machen, wird für diese Rechnung eine konstante Verdampfungsrate verwendet (Eisbildung im Wasser wird nicht simuliert). Die kontinuierliche Freisetzung erfolgt mit einer in Rate von 250 l/s, 100 l/s, 50 l/s bzw. 25 l/s. Die Dauer der Freisetzung beträgt folglich 2s, 5s, 10s und 20s. In Bild 5.3 ist der Verlauf der Lachenränder über der Zeit, in Bild 5.4 das Volumen über der Zeit und in Bild 5.5 die pro Zeiteinheit aus der Lache verdampfende LH_2-Masse über der Zeit dargestellt.

Die vordere Front der Lache breitet sich bei schlagartiger Freisetzung zunächst schnell aus und wird erst bei einem Radius von ca.3,5m merklich langsamer. Schon nach einer Zeit von ca. 2s bricht die Lache vom Zentrum her auf und es bilden sich zwei Lachenfronten, d.h. die Lache ist nicht mehr kreis-, sondern ringförmig. Beide Fronten bewegen sich in radialer Richtung vom Zentrum der Freisetzung weg, bis die Lache nach ca. 6s vollständig verdampft ist. Der Verlauf des Volumens über der Zeit (Bild 5.4) ist wegen der Annahme einer konstanten Verdampfungsrate direkt von der Lachenfläche abhängig. Zu Beginn der Freisetzung nimmt das Lachenvolumen wegen der geringen Lachenfläche langsam ab. Die Lachenfläche und damit die Verdampfung aus der Lache erreicht nach ca. 4-5s ihr Maximum. Zu diesem Zeitpunkt ist jedoch die Lache schon nicht mehr geschlossen, sondern in der Mitte bereits aufgebrochen und somit ringförmig.

In Bild 5.3 ist auch der Fall einer kontinuierlichen Freisetzung mit einer Rate von 25 l/s dargestellt. Gegenüber der schlagartigen Freisetzung breitet sich die Lache langsamer aus. Nach ca. 4s löst sich ein Teil der Lache am äußeren Rand ab und es entstehen zwei voneinander unabhängige Lachen, eine kreisförmige, die bis zum Ende der Freisetzung von LH_2 erhalten bleibt, und eine ringförmige, die der kreisförmigen vorauseilt und schnell verdampft ist. In einigen Rechnungen löst sich der Lachenring nicht ab, sondern es kommt nur

zu einer kurzzeitigen Vergrößerung des Lachenradius, bevor der stationäre Zustand erreicht wird. Dies ist hauptsächlich abhängig von Stoffeigenschaften (wie beispielsweise Dichte und Verdampfungsenthalpie) der sich ausbreitenden kryogenen Flüssigkeit, aber auch vom zugeführten Volumenstrom. Im stationären Zustand ist die Geschwindigkeit der Lache im Zentrum hoch und an der vorderen Lachenfront null. Am Ende der Freisetzung nimmt die Lachenhöhe im Zentrum infolge der dort herrschenden hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit sehr schnell ab und die Lache bricht dort zuerst auf. Es bildet sich eine ringförmige Lache, deren hintere Front sich vom Zentrum weg bewegt. Gleichzeitig verringert sich ihr maximaler Radius und die vordere Front bewegt sich in Richtung des Lachenzentrums.

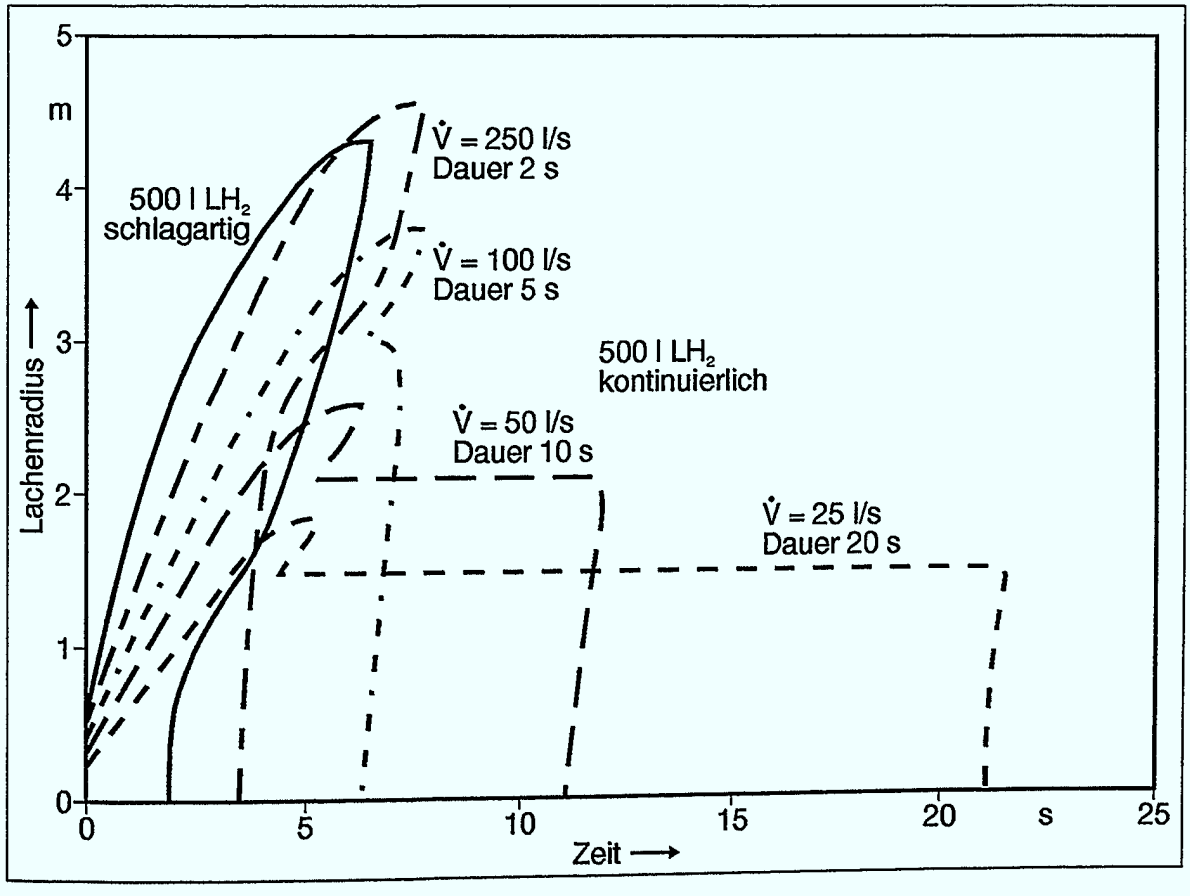


Bild 5.3: Ergebnisse der LAuV-Rechnungen für eine Ausbreitung von insgesamt jeweils 500 l LH_2 über Wasser. Dargestellt ist der Lachenradius über der Zeit bei schlagartiger Freisetzung bzw. bei kontinuierlichen Freisetzungen mit verschiedenen Raten (Δr=0,18m, Δt=0,05s).

Bei Betrachtung des Lachenvolumens über der Zeit ist für den selben Fall (25 l/s) zunächst die Zunahme des Lachenvolumens erkennbar. Weil der Lache in den ersten Sekunden mehr Volumen zugeführt wird als über die von ihr eingenommene Fläche verdampft werden kann,

sammelt sich überschüssiges Lachenvolumen an, welches durch eine kurzzeitige Vergrößerung der Lachenfläche (den ersten Ring) abgeführt wird. Erst dann stellt sich der stationäre Zustand (zugeführte Menge = verdampfte Menge) ein. Nach Beendigung der Freisetzung nimmt das Lachenvolumen (entsprechend der Lachenfläche) bis zur vollständigen Verdampfung ab.

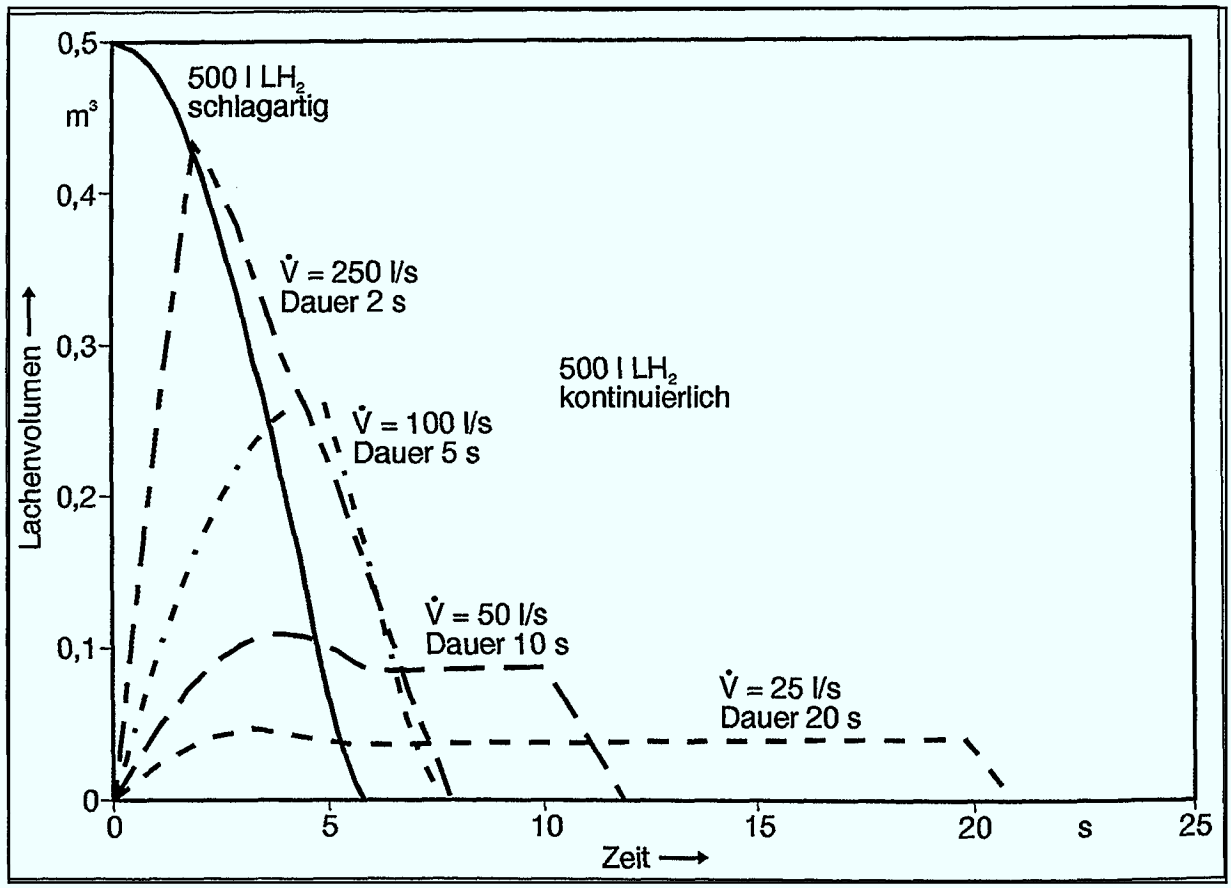


Bild 5.4: Ergebnisse der LAuV-Rechnungen für eine Ausbreitung von insgesamt jeweils 500 l LH_2 über Wasser. Dargestellt ist das zeitabhängige Lachenvolumen bei einer schlagartigen Freisetzung bzw. bei kontinuierlichen Freisetzungen mit verschiedenen Raten (Δr=0,18m, Δt=0,05s).

Für größere Volumenströme (50 l/s bzw. 100 l/s) zeigt die Lachenausbreitung ein ähnliches Verhalten zur Ausbreitung mit einem Volumenstrom von 25 l/s. Der stationäre Zustand wird allerdings später erreicht. Dadurch und durch Verkürzung der Freisetzungszeit verringert sich die Dauer des stationären Zustandes der Lache und ist im Fall der Freisetzungsrate von 100 l/s so gerade noch erkennbar. Interessant ist hierbei, daß nach der LAuV-Rechnung die Lache nach 6s bis 7s aus zwei ringförmigen Teilen besteht.

Der Fall der Freisetzungsrate von 250 l/s über 2s führt interessanterweise zu einem größeren maximalen Lachenradius wie die schlagartige Freisetzung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu

Beginn ist kleiner, weil die Lache wegen der anfangs geringeren Menge eine kleinere Höhe hat, welche die Ausbreitung weniger antreibt. Dadurch hat dieser Fall der Freisetzung gegenüber der schlagartigen Freisetzung in der Anfangsphase eine geringere Lachenfläche, was zu einer geringeren Verdampfung führt und damit zu einem "Volumenvorteil" der quasi-kontinuierlichen Freisetzung, der den größeren Radius bewirkt. Prinzipiell unterscheiden sich die Ausbreitung nach einer schlagartigen und kontinuierlichen Freisetzung innerhalb 2s im Ausbreitungsverhalten der Lache so wenig, daß es naheliegend ist, den hier untersuchten Übergangsbereich nicht, wie in der Literatur üblich, als quasi-kontinuierlich, sondern als quasi-schlagartig zu bezeichnen.

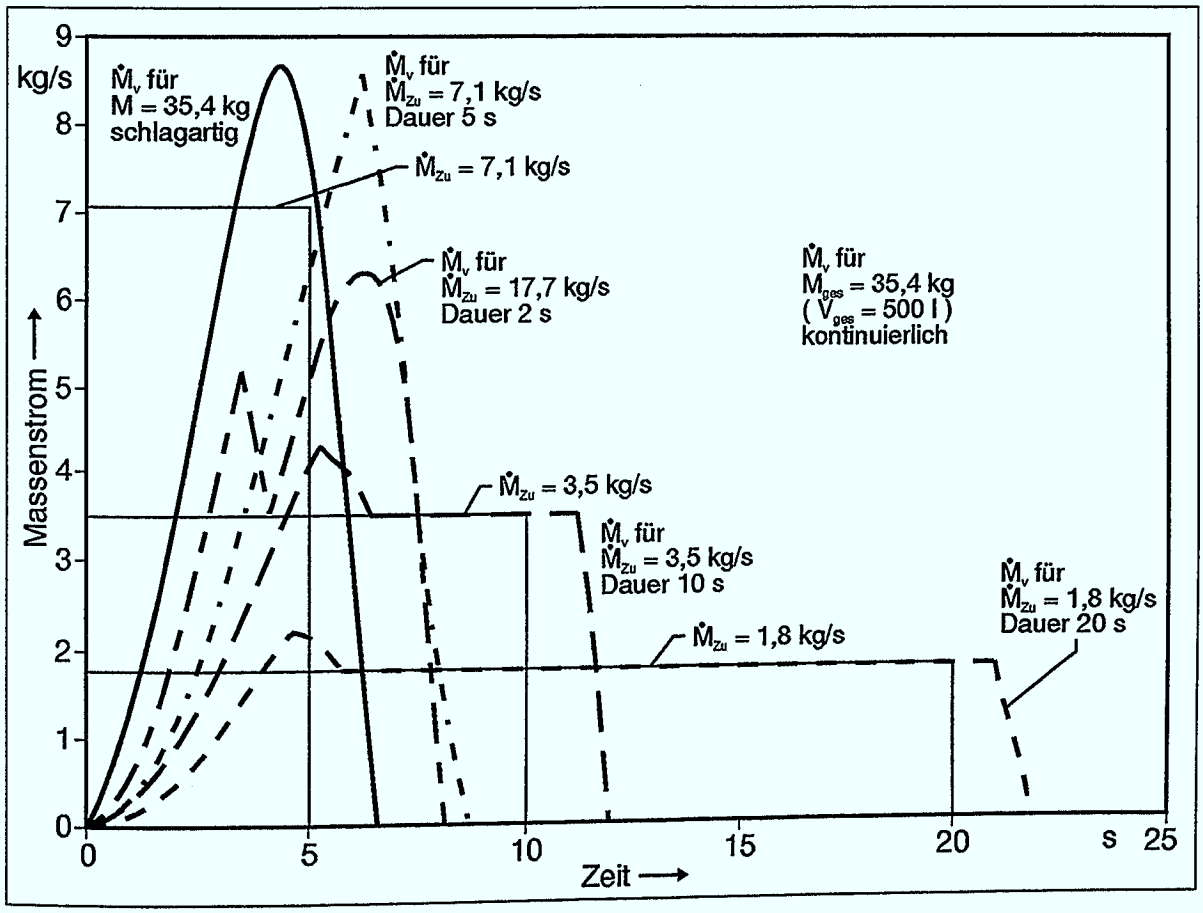


Bild 5.5: Ergebnisse der LAuV-Rechnungen für eine Ausbreitung von insgesamt jeweils 500 l LH_2 über Wasser. Dargestellt ist die pro Zeiteinheit verdampfte LH_2-Masse sowie die pro Zeiteinheit zugeführte LH_2-Masse einer schlagartigen Freisetzung bzw. kontinuierlicher Freisetzungen mit verschiedenen Raten (Δr=0,18m, Δt=0,05s).

In Bild 5.5 ist neben der pro Zeiteinheit verdampften LH_2-Masse bei einer schlagartigen und kontinuierlichen Freisetzungen von 35,4 kg (500 l) LH_2 mit unterschiedlichen Raten auch der zugeführte Massenstrom bei den kontinuierlichen Freisetzungen dargestellt. Bei Betrachtung der schlagartigen Freisetzung ist zu erkennen, daß die aus der Lache pro Zeiteinheit verdampfte LH_2-Masse trotz des Aufbrechens der Lache bis ca. 5s allmählich zunimmt, einen Maximalwert von ca. 8,8 kg/s (125 l/s) LH_2 erreicht und wieder kleiner wird. Bei Betrachtung der kontinuierlichen Freisetzungen fällt beim zugeführten Massenstrom von 17,7 kg/s (250 l/s) LH_2 auf, daß die pro Zeiteinheit verdampfte LH_2-Masse zunächst ein Maximum erreicht, anschließend kleiner und erneut dann wieder größer wird, bis sie ihr Maximum von ca. 6,0 kg/s (85 l/s) LH_2 erreicht. Die Ausprägung der zwei Maxima kann durch das Aufbrechen der Lache begründet werden, wodurch die Lachenfläche und mit ihr die pro Zeiteinheit verdampfte LH_2-Masse kleiner wird. Durch die weitere Ausbreitung der vorderen Front der Lache und der etwas verzögerten Ausbreitung der hinteren Front vergrößert sich die Lachenfläche, was zu dem zweiten Maximum führt. Ein interessantes Ergebnis zeigt die Freisetzung von 7,1 kg/s (100 l/s) LH_2 über 5s im Vergleich zur schlagartigen Freisetzung. Mit einem Zeitverzug von wenigen Sekunden wird der gleiche Betrag der pro Zeiteinheit verdampften LH_2-Masse erreicht. In den beiden Fällen einer kontinuierlichen Freisetzung von 3,5 kg/s (50 l/s) bzw. 1,8 kg/s (25 l/s) LH_2 pendelt sich die Verdampfungsrate nach Durchlaufen eines Maximums auf den zugeführten Massenstrom ein; sie verharrt dort bis kurz nach Beendigung der Freisetzung.

5.3. Freisetzung von 125 m³ Flüssigwasserstoff über verschiedenen Untergründen

Zur Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Untergründe auf die Ausbreitung und Verdampfung der Lache wird exemplarisch der Fall einer kontinuierlichen Freisetzung mit einer Rate von 2500 l/s LH_2 über 50s auf Wasser (mit und ohne Eisbildung) und Bitumen berechnet. In Bild 5.6 sind die Ergebnisse der LAuV-Rechnungen zum Lachenradius, in Bild 5.7 zum Lachenvolumen und in Bild 5.8 zur pro Zeiteinheit verdampften LH_2-Masse über der Zeit dargestellt.

Die beiden Rechnungen zur Ausbreitung auf Wasser zeigen deutlich das Ablösen eines Lachenringes nach ca. 15 bis 20 s. Aufgrund der Annahme eines konstanten Wärmestromes in die Lache bei der Rechnung ohne Eisbildung bleibt der Lachenradius und das Lachenvolumen nach Ablösen des Lachenringes konstant. In diesem Fall ist die pro Zeiteinheit zugeführte Menge gleich der verdampften Menge.

Bei gleichen Randbedingungen, aber unter der Annahme von Eisbildung auf der Wasseroberfläche (damit zeitabhängiger Wärmestrom aus dem Untergrund in die Lache) erreicht der äußere Lachenradius des abgelösten Ringes einen kleineren Wert als im vorher

beschriebenen Fall ohne Eisbildung. Anschließend bleibt der Lachenradius nicht, wie im vorher beschriebenen Fall, konstant, sondern vergrößert sich aufgrund des größer werdenden Lachenvolumens. Weil die Verdampfungsrate nicht konstant über der Zeit ist, entsteht eine Differenz zwischen zugeführter und verdampfter Masse, die dazu führt, daß sich der Lachenradius verändert. In diesem Fall ist die pro Zeiteinheit verdampfte Masse kleiner als die zugeführte (Bild 5.8), wodurch sich der Lachenradius vergrößert.

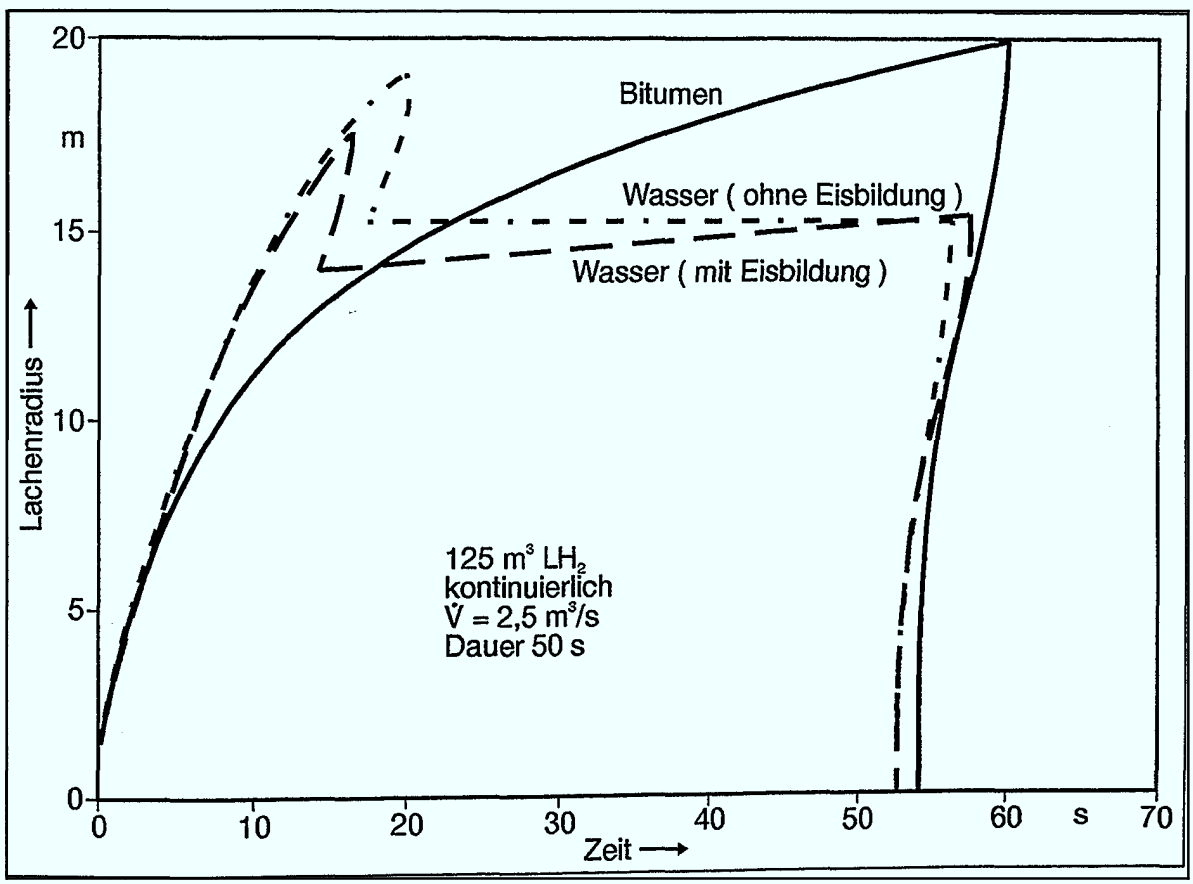


Bild 5.6: Ergebnisse der LAuV-Rechnungen zur Lachenausbreitung einer 50s dauernden LH_2-Freisetzung mit einer Rate von je 2500 l/s über Wasser (mit und ohne Eisbildung) und Bitumen (mit der 1D-analytischen Lösung der instationären Wärmeleitgleichung) ($\Delta r=0{,}18m$, $\Delta t=0{,}05s$).

Die Rechnung der Lachenausbreitung auf Bitumen zeigt nicht den bei der Ausbreitung auf Wasser ermittelten Lachenring, obwohl das Lachenvolumen nach ca. 10s deutlich kleiner wird (Bild 5.7). Das anschließend wieder größer werdende Lachenvolumen ist durch die kleiner werdende Wärmestromdichte bedingt. Der im Vergleich zur Ausbreitung auf Wasser schneller

wachsende Lachenradius ist auf die geringere Verdampfungsrate wegen der schnelleren Abkühlung der Oberfläche zurückzuführen.

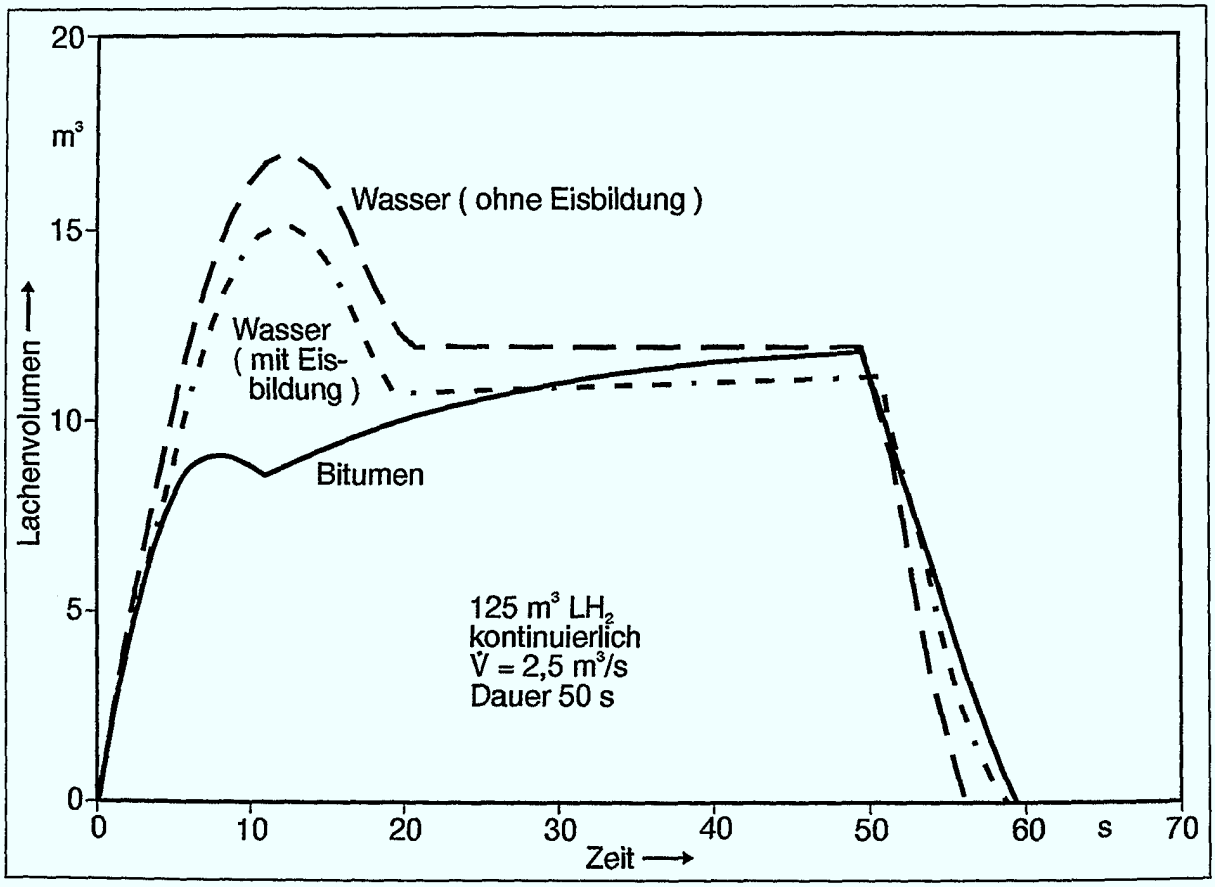


Bild 5.7: Ergebnisse der LAuV-Rechnungen zum Lachenvolumen einer 50s dauernden LH_2-Freisetzung mit einer Rate von je 2500 l/s über Wasser (mit und ohne Eisbildung) und Bitumen (mit der 1D-analytischen Lösung der instationären Wärmeleitgleichung) ($\Delta r=0{,}18m$, $\Delta t=0{,}05s$).

Damit läßt sich die Ausbreitung prinzipiell in zwei Bereiche unterteilen, die durch unterschiedliche Kräftegleichgewichte bestimmt sind:

1. Dynamischer Bereich
   Die Ausbreitung der Lache ist in diesem Bereich durch das Gleichgewicht von Massenträgheitskraft und Gravitationskraft gegeben.
2. Viskoser Bereich
   Dieser Bereich der Lachenausbreitung ist durch das Gleichgewicht von Gravitationskraft und viskosen Kräften gegeben, die durch den in die Lache fließenden Wärmestrom beeinflußt werden.

Im Übergangsbereich zwischen den Bereichen 1 und 2 liegt ein "Mischzustand" beider Bereiche vor. Auch die Ergebnisse des Lachenausbreitungsmodells GASP [WEB87B] lassen auf eine ähnliche Einteilung in verschiedene Ausbreitungs-Phasen schließen. Webber definiert jedoch zusätzlich einen Übergangsbereich zwischen Bereich 1 und 2, in dem die Strömung der Lache von turbulent nach laminar übergeht.

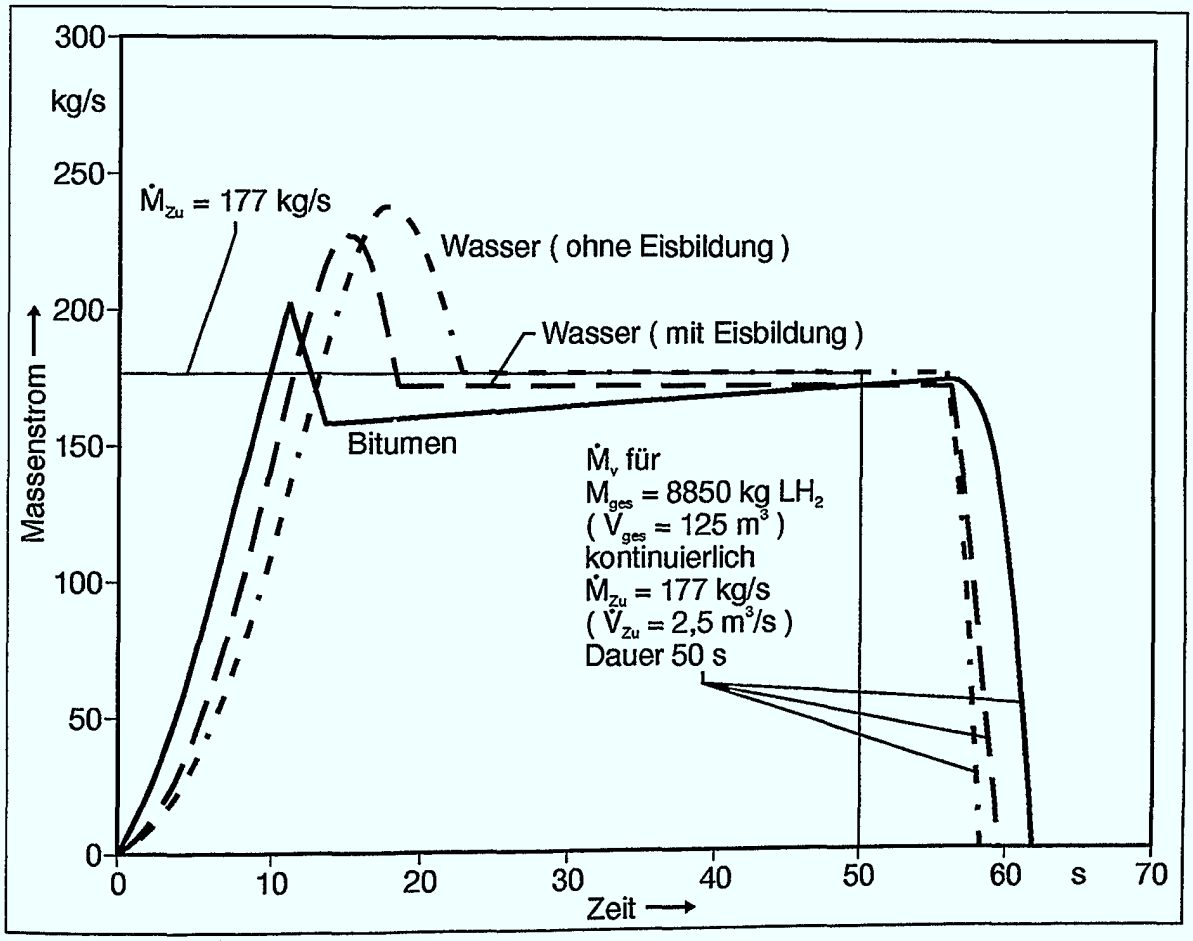


Bild 5.8: Ergebnisse der LAuV-Rechnungen zur Lachenausbreitung einer 50s dauernden LH_2-Freisetzung mit einer Rate von je 2500 l/s über Wasser (mit und ohne Eisbildung) und Bitumen (mit der 1D-analytischen Lösung der instationären Wärmeleitgleichung). Dargestellt ist die pro Zeiteinheit verdampfte LH_2-Masse sowie die pro Zeiteinheit zugeführte LH_2-Masse (Δr=0,18m, Δt=0,05s).

In Bild 5.8 ist in allen Fällen eine kurzzeitige Vergrößerung der pro Zeiteinheit verdampften Masse vor Erreichen des stationären Zustandes sichtbar. Abhängig vom Wärmeeintrag in die Lache und der Lachenfläche ist der Betrag verschieden. Im Fall eines konstanten Wärmeeintrages in die Lache (Wasser ohne Eisbildung) ist im stationären Zustand die

zugeführte Masse gleich der verdampften Masse. In den beiden anderen Fällen ist der Wärmeeintrag in die Lache zeitlich veränderlich. Dadurch ist im stationären Zustand die zugeführte Masse größer als die verdampfte Masse, so daß sich der Lachenradius vergrößert (Bild 5.6).

5.4. Eisbildung im Wasser

Bei Eisbildung unter einer Lache aus kryogener Flüssigkeit wird im LAuV-Code die freiwerdende Erstarrungsenthalpie in die Wärmebetrachtung aus dem Untergrund mit einbezogen und der Wärmeeintrag aus dem Untergrund in die Lache wird durch die Gleichungen des Film-, Übergangs- und Blasensiedens bestimmt (siehe Kapitel 2.2.2.1). Eisbildung und -wachstum sind nur von der Bedeckungszeit abhängig, also von dem Zeitraum, in welchem die kryogene Flüssigkeit an der Oberfläche siedet. In Bild 5.9 ist das Wachstum der Eisschicht infolge einer LH_2- bzw. LN_2-Verdampfung über einer Wasseroberfläche dargestellt. Es wird angenommen, die Wasseroberfläche sei zur Zeit *t=0s* vollkommen mit LH_2 (LN_2) bedeckt. Die aus dem Untergrund abgeführte Wärme führt zunächst zur Abkühlung der obersten Schicht. Es bildet sich nicht *spontan* Eis, sondern erst nach ca. 5s. In der Darstellung in Bild 5.9 ist der auftretende Zeitverzug wegen des großen Maßstabes allerdings nicht sichtbar.

Der Vergleich des Eisdickenwachstums aufgrund LN_2- und LH_2-Verdampfung an der Oberfläche zeigt zunächst für die Wasserstoffverdampfung ein schnelleres Eisdickenwachstum. Wegen der höheren Siedetemperatur des Stickstoffs wird der minimale Filmsiedepunkt (MFB-Punkt) schneller erreicht. Dadurch findet der Übergang zum Blasensieden eher statt und die Eisschicht wächst bei der LN_2-Verdampfung an der Oberfläche nach einiger Zeit schneller als bei der Verdampfung von LH_2.

Der Einfluß der einsetzenden Eisbildung auf die Lachenausbreitung wird in mehreren Rechnungen untersucht. Als Fazit kann festgehalten werden, daß bei einer schlagartigen Freisetzung wegen der kurzen Verdampfungszeit Eisdicken von ca. 2-3mm errechnet werden und der Einfluß auf den Lachenradius im Vergleich zu einer Rechnung mit konstanter Verdampfungsrate (ohne Eisbildung) zu max. ca. 10% Abweichung gegen Ende der Verdampfung führt. Bei einer kontinuierlichen Freisetzung hingegen zeigen sich deutliche Abweichungen insbesondere bei länger dauernden Freisetzungen. Bei der Annahme einer konstanten Verdampfungsrate wird sich nach einiger Zeit ein konstanter Lachenradius einstellen. Mit Berücksichtigung der Eisbildung hingegen ist der Wärmeeintrag in die Lache veränderlich, wodurch sich der Lachenradius bei einer LH_2-Freisetzung vergrößert. Bei einer LN_2-Freisetzung wird sich der Lachenradius wegen des früher stattfindenden Überganges zum Blasensieden auch früher wieder verkleinern.

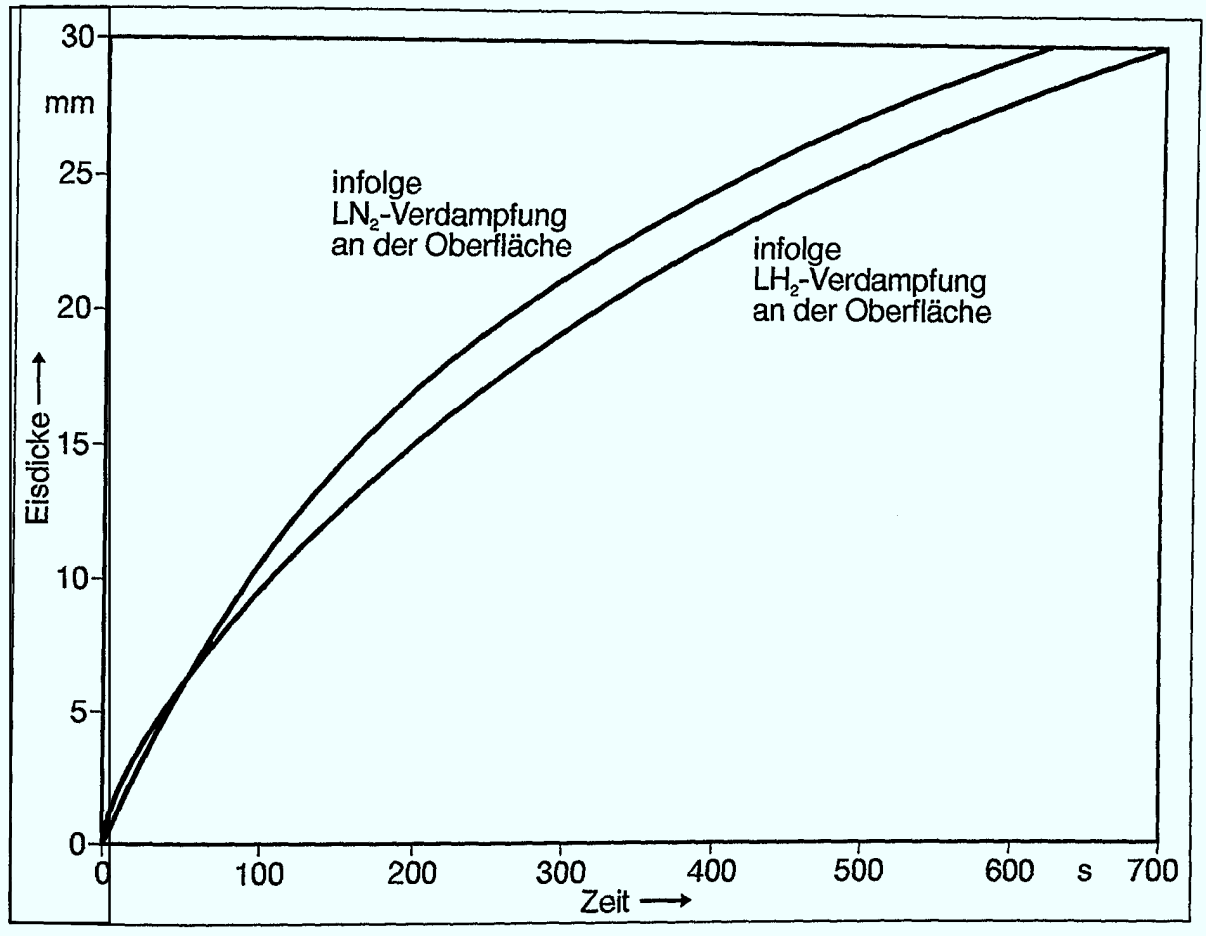


Bild 5.9: Ergebnisse der LAuV-Rechnungen zu Eisbildung und -wachstum. Zur Berechnung wurde angenommen, die Wasseroberfläche sei vollkommen mit LH_2 (LN_2) bedeckt und die einzige Wärmequelle ist die Wärme aus dem Untergrund (*Δr=0,08m, Δz=0,00125m, Δt=0,1s*).

5.5. Vergleich von LAuV mit anderen Ausbreitungs-Codes

Ein Vergleich des LAuV-Codes mit anderen in der Literatur beschriebenen Ausbreitungscodes gestaltet sich insofern schwierig, weil es bislang nur vereinzelt Rechnungsergebnisse einer Flüssigwasserstoffausbreitung gibt [EIC92, BRW81] und die Programme nicht zugänglich sind. Einige der Literatur entnehmbare Lösungsverfahren des mechanistischen Modells sind im Rahmen dieser Arbeit im Programmpaket LACHE zusammengefaßt worden und es sind damit eigene Rechnungen durchgeführt worden (Bild 5.10 und 5.11). Meist sind die angegebenen Lösungsverfahren nur auf bestimmte Arten der Freisetzung anwendbar (vgl. Tabelle 2.3 auf Seite 21), so daß je nach Art der Freisetzung (schlagartig/kontinuierlich) und Untergrund (fest/flüssig) die Zahl der zur Verfügung stehenden Lösungsverfahren variiert. Es existieren kaum Lösungsverfahren, die sowohl festen als auch flüssigen Untergrund simulieren können.

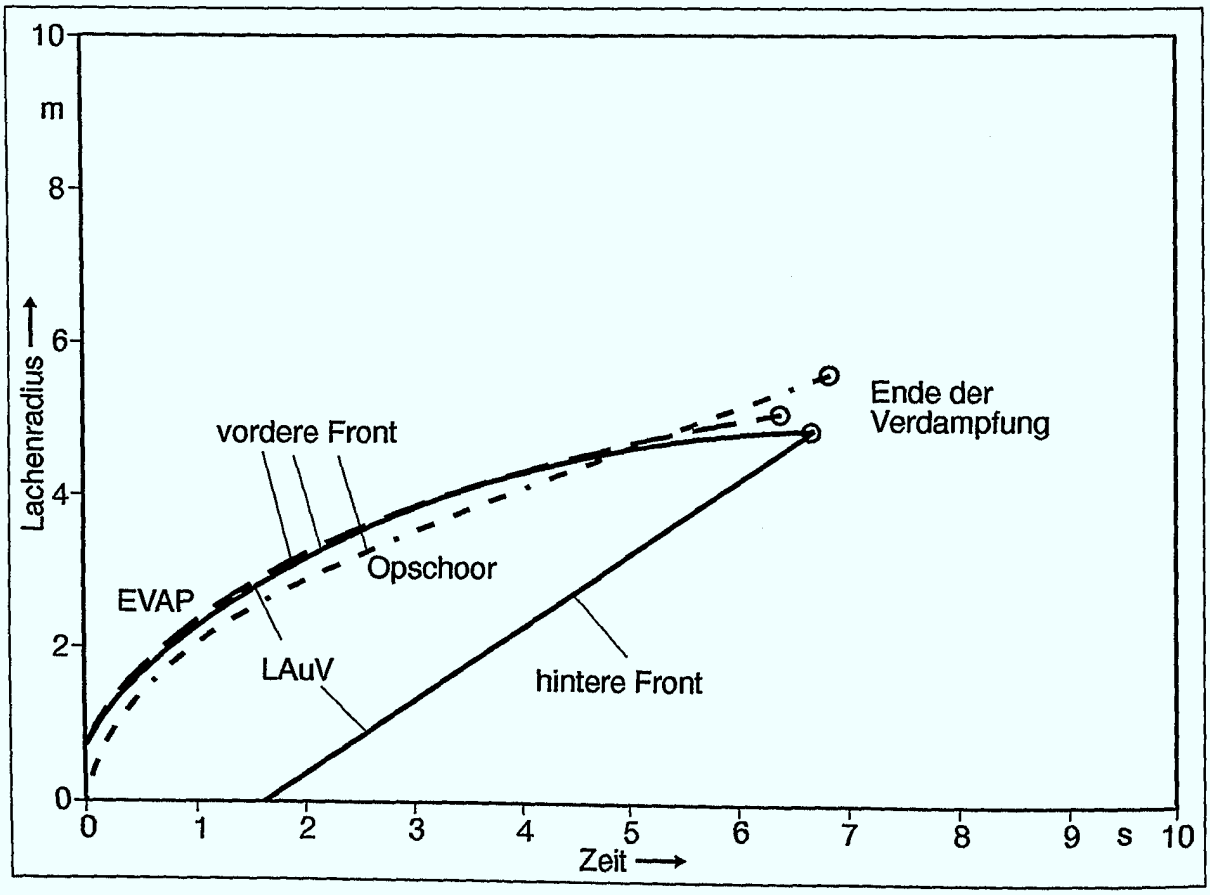


Bild 5.10: Vergleich der Ergebnisse von Rechnungen zur Lachenausbreitung zwischen EVAP [FAR90], dem Modell von Opschoor [OPS77] sowie LAuV für den Fall einer schlagartigen Freisetzung von 1000 l LH_2 über Wasser (ohne Eisbildung) (Δr=0,08m, Δt=0,05s).

Als Modellfall wird die schlagartige Freisetzung von 1000 l LH_2 über Wasser herangezogen. Die Verdampfungsrate wird konstant über der Zeit angenommen, d.h. Eisbildung im Wasser wird vernachlässigt. In Bild 5.10 sind die Ergebnisse der Berechnungen mit EVAP [FAR90], dem Modell von Opschoor [OPS77] sowie LAuV dargestellt. Bei der Berechnung der Lachenausbreitung verwendet LACHE die gleichen Stoffwertedateien wie LAuV. Weil das einfache mechanistische Modell die Ausbreitungsrechnung beendet, wenn eine minimale Lachenhöhe erreicht wird (i.A. 1mm), ist ein Teil der kryogenen Flüssigkeit bei Ende der Rechnung noch nicht verdampft. In den Darstellungen in Bild 5.10 und 5.11 ist das Ende der Lachenausbreitung durch einen Kreis versinnbildlicht.

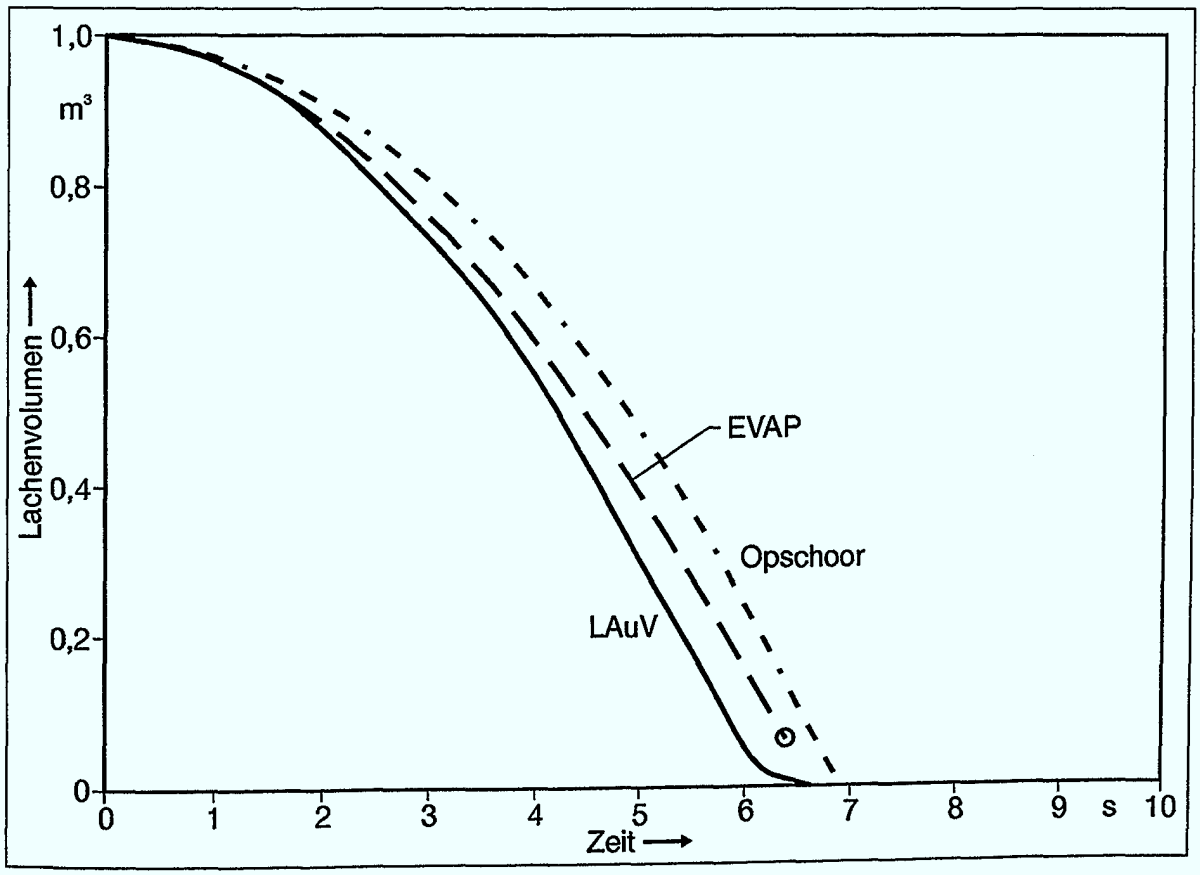


Bild 5.11: Vergleich der Ergebnisse der Berechnung des Lachenvolumens zwischen EVAP [FAR90], dem Modell von Opschoor [OPS77] sowie LAuV für den Fall einer schlagartigen Freisetzung von 1000 l LH_2 über Wasser (ohne Eisbildung) (Δr=0,08m, Δt=0,05s).

Zunächst wird deutlich, daß das Ausbreitungsverhalten der vorderen Lachenfront von allen Modellen ähnlich simuliert wird. Der maximale Lachenradius wird nach Opschoor mit ca. 6m etwas höher bestimmt als von EVAP und LAuV. Die Zeit bis zur vollständigen Verdampfung

wird bei allen Rechnungen mit 6.5-7s in etwa gleich groß bestimmt. Das Lachenvolumen nimmt zu Beginn der Freisetzung durch die geringe Lachenfläche langsam ab. Nach 3s sind erst ca. 200-300 l LH_2 verdampft. Wegen der sich ständig vergrößernden Lachenfläche nimmt bei EVAP und Opschoor die Massenabnahme durch Verdampfung bis zum Ende der Simulation ständig zu. Die Simulation wird beendet, obwohl bei der EVAP-Rechnung noch ca. 50 Liter LH_2 nicht verdampft sind. Die Opschoor-Rechnung teilt nicht diese Problematik, weil hier eine analytische Lösung des mechanistischen Modellansatzes verwendet wird, die vom Lachenvolumen abhängt. Im LAuV-Modell erreicht die Lachenfläche und damit die aus der Lache pro Zeiteinheit verdampfte Masse ein Maximum und wird gegen Ende der Simulation durch die Ausbreitung als "Ring" wieder kleiner. Die Lachenausbreitung wird bis zur vollständigen Verdampfung des LH_2 simuliert.

Der Vergleich von LAuV mit dem Ausbreitungscode GASP [WEB87B] (in Anhand D.3 ausführlich erläutert) dient zugleich der Validierung gegenüber Flüssigerdgas anhand experimenteller Daten von LNG-Ausbreitungsversuchen aus [MOO86]. Es werden keine Genauigkeitsangaben zu den Messungen gemacht. Die dargestellte GASP-Rechnung wird [WEB91] entnommen. Für die GASP- und für die LAuV-Rechnung werden die in [MOO86] angegebenen Stoffwerte des trockenen Betonuntergrundes ($a = 5 \cdot 10^{-7}\ m^2/s$, $\rho_B = 1936\ kg/m^3$, $\lambda_B = 1{,}7\ Wm^{-1}K^{-1}$) und die eindimensionale analytische Lösung der instationären Wärmeleitgleichung (Gleichung 4.34 auf Seite 88) verwendet. Die kontinuierliche Freisetzung erfolgt in der GASP-Rechnung mit einer konstanten Rate, in der LAuV-Rechnung mit einer zeitabhängigen Rate, wie sie in Tabelle 5.1 durch das Experiment vorgegeben wird. LAuV interpoliert linear zwischen den angegebenen Werten. Für die LAuV-Rechnung wird ferner angenommen, die Freisetzung sei nach 300s beendet. Leider liegt von diesem LNG-Experiment keine Information zum hinteren Lachenradius bzw. zum Zeitpunkt der Beendigung der Freisetzung vor.

In Bild 5.12 sind die experimentellen Ergebnisse von [MOO86] den Ergebnissen von LAuV und denen von GASP gegenübergestellt. Das experimentell ermittelte Ausbreitungsverhalten der vorderen Lachenfront wird von dem GASP-Code in guter Näherung simuliert. Laut Angaben von Webber [WEB91] ist es für die Berechnungen erforderlich, die Rauhigkeit der Oberfläche $a_r = 1cm$ zu wählen (vgl. Kapitel 2.2.3.4).

Tabelle 5.1: Zeitabhängige Freisetzungsrate der Versuche mit LNG von [MOO86]

Zeit [s]	0	150	300
Freisetzungsrate [l/s]	46,86	41,56	37,44

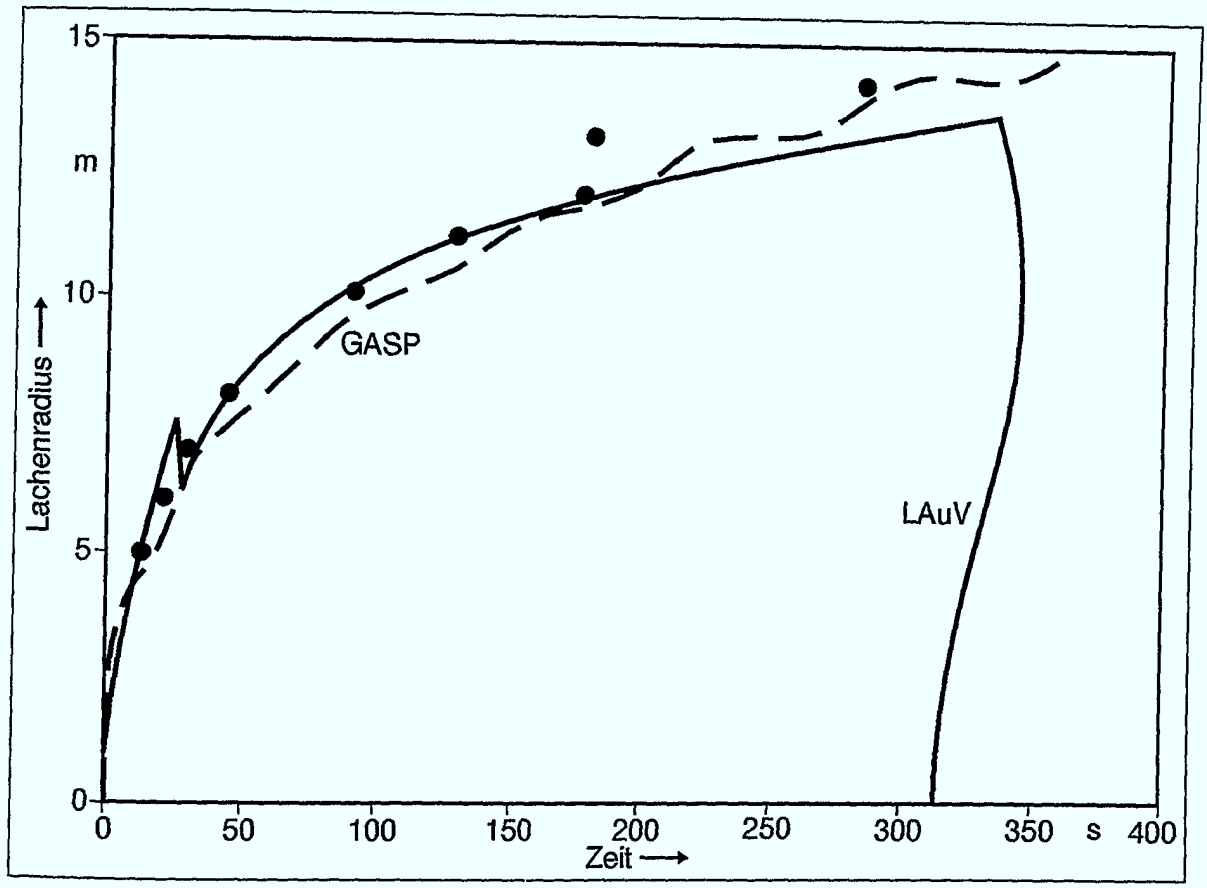


Bild 5.12: Vergleich der Ergebnisse von Rechnungen mit LAuV und GASP mit Experimenten zur Lachenausbreitung von LNG über trockenem Beton [MOO86, WEB91] (Δr=0,08m, Δt=0,05s).

Die LAuV-Rechnungen erfolgen ohne Annahme einer Rauhigkeit. Deutlich sichtbar ist der sich ablösende Lachenring nach ca. 25s und der anschließende Bereich des Gleichgewichtes zwischen Gravitationskräften und viskosen Kräften. Nach 300s wird in der Rechnung die LNG-Zufuhr beendet. Nach ca. 350s ist die Lache vollständig verdampft. Die Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen ist vor allem in der ersten Hälfte der Ausbreitung sehr gut. Abweichungen treten bei den Meßpunkten bei 13m und 14m auf. Wie bereits erwähnt, liegen keine Angabe zur Meßgenauigkeit bei diesem Experiment vor, so daß nicht gesagt werden kann, ob sich der errechnete Lachenradius auch bei den Meßpunkten bei 13m und 14m innerhalb der Fehlerbandbreite befindet.

Prinzipiell sind die Rechnungen beider Codes durchaus vergleichbar. Die experimentellen Ergebnisse werden von beiden im betrachteten Zeitbereich bestätigt. Der sich zu Beginn der Freisetzung ablösende Lachenring wird im Experiment zwar nicht beobachtet; dennoch ist die Übereinstimmung insgesamt als zufriedenstellend zu bewerten.

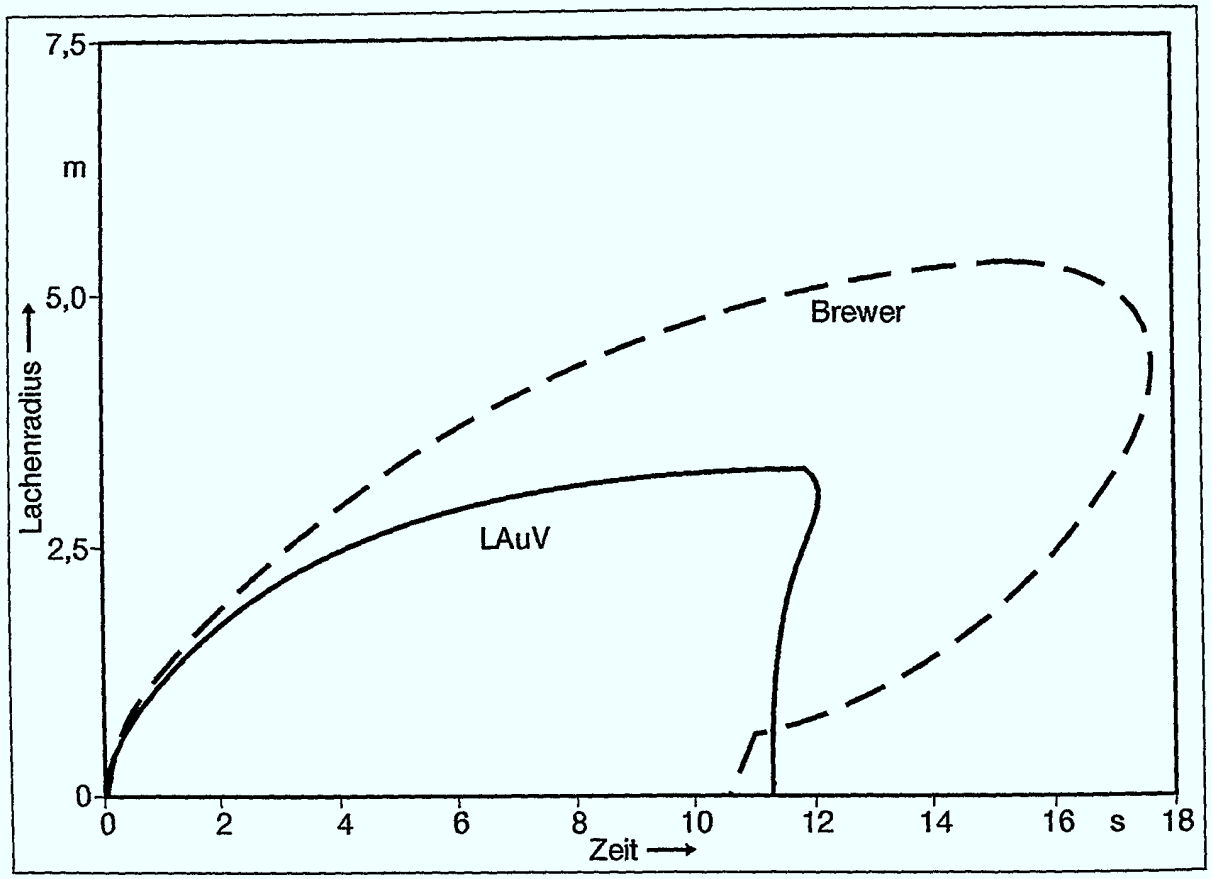


Bild 5.13: Vergleich der Ergebnisse von Rechnungen mit dem LAuV-Code und mit dem Ausbreitungscode von Brewer [BRW81] für den Fall einer kontinuierlichen Freisetzung von LH_2 mit einer Rate von 152 l/s über 10s ($\Delta r=0{,}2m$, $\Delta t=0{,}05s$)

Der bislang einzige bekannte Versuch, ein Modell zur Simulation der Lachenausbreitung und Verdampfung auf Basis der Shallow-Layer-Gleichungen auf Flüssigwasserstoff anzuwenden, ist von Brewer [BRW81] unternommen worden. Auch er verwendet zur Lösung der Differentialgleichungen das Finite Differenzen Lösungsverfahren, berichtet aber von erheblichen numerischen Instabilitäten, so daß er letzten Endes nur zwei erfolgreiche Berechnungen präsentieren kann. Die Unterschiede zum Lösungsverfahren im LAuV-Code können nicht endgültig geklärt werden, weil nur eine sehr kurze Beschreibung des Codes existiert, in der die Randbedingungen nicht aufgeführt werden [BRW81]. Wegen der Rechenprobleme wird von [BRW81] für weitere Lachenberechnungen das Fay-Modell [FAY73] verwendet. Deshalb ist der Brewer-Code auch in der Übersicht über vorhandene Modelle (Tabelle 2.3 auf Seite 21) nicht aufgeführt.

Eine der beiden erfolgreichen Rechnungen mit dem Brewer-Code auf Basis der Shallow-Layer-Gleichungen wird in Bild 5.13 mit der entsprechenden LAuV-Rechnung verglichen. Beide Modelle gehen von einer kontinuierlichen Freisetzung mit einer Rate von 152 l/s über 10s aus.

Leider werden keine Angaben zu den Stoffwerten des Untergrundes, zu den Annahmen über den Wärmeeintrag in die Lache und zu den verwendeten Stoffwerten des LH_2 gemacht, so daß für die vorliegende LAuV-Rechnung die Standard-Stoffwerte von trockenem Beton (Tabelle 3.4 auf Seite 39) und Wasserstoff verwendet werden. Deshalb ist der quantitative Verlauf des Lachenradius beider Rechnungen nicht ohne weiteres vergleichbar.

Beide Modelle zeigen das Aufbrechen der Lache in der Mitte nach Beendigung der Flüssigkeitszufuhr. Im Gegensatz zu Brewer's Code bricht die Lache in der LAuV-Rechnung jedoch etwas später auf und erreicht mit ca. 3m einen kleineren maximalen Lachenradius wie nach der Berechnung von Brewer (5m). Nach LAuV ist die Verdampfung nach 12s beendet, nach Brewer's Code benötigt die Verdampfung 18s. Die Abweichungen können vielfältige Gründe haben, die nicht weiter diskutiert werden sollen.

5.6. Nachrechnung der Verdampfungsversuche mit LN_2

Im folgenden wird eine Nachrechnung der in Kapitel 3.1 beschriebenen Verdampfungsversuche von flüssigem Stickstoff (LN_2) über Bitumen und trockenem sowie feuchtem Beton mit den in LAuV enthaltenen Wärmetransportmodellen durchgeführt. Zur Nachrechnung werden die eindimensionale analytische Lösung (Gleichung 2.6 auf Seite 16 bzw. 4.34 auf Seite 88, im folgenden "1D-Lösungsansatz" genannt) und das in Kapitel 4.2.1.2 beschriebene numerische Lösungsverfahren (im folgenden "2D-Lösungsansatz" genannt) der instationären Wärmeleitgleichung verwendet. Bei Verwendung des 2D-Lösungsansatzes werden zur Berechnung des Wärmeeintrages in die Lache die in Kapitel 2 vorgestellten Wärmeübergangskorrelationen verwendet. Die der Rechnung zugrunde liegenden Stoffwerte der Untergründe sind in Kapitel 3.1, die des LN_2 in Tabelle 4.1 auf Seite 95 angegeben.

In den Bildern 5.14 bis 5.16 ist exemplarisch der Vergleich zwischen experimentell und rechnerisch ermitteltem Massenverlust durch Verdampfung von LN_2 auf den verschiedenen Untergründen dargestellt. Die unterschiedlichen Anfangsmassen folgen aus den verschieden großen Oberflächen der Proben (vgl. Tabelle 3.4 auf Seite 39).

In Bild 5.14 ist der experimentell ermittelte LN_2-Massenverlust durch Verdampfung von anfangs 6,8 kg LN_2 über Bitumen den Ergebnissen der LAuV-Rechnungen gegenübergestellt. Entsprechend der in Kapitel 3.1 angegebenen Randbedingungen wird bei der Rechnung die Oberflächentemperatur zu Beginn mit 24°C angenommen. Bei Verwendung des 1D-Lösungsansatzes folgt eine exponentielle Abhängigkeit der Wärmestromdichte aus dem Untergrund in die Flüssigkeit und damit der noch vorhandenen LN_2-Masse von der Zeit. Im 2D-Lösungsansatz wird die Wärmestromdichte durch die Oberfläche in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur durch die in Kapitel 2.2.2.1 angegebenen Beziehungen des Film- und Blasensiedebereichs bestimmt. Die Simulation beginnt im Filmsiedebereich.

Durch das Aufbringen des LN_2 auf die Oberfläche der Probe kann der Verlauf der Massenabnahme über der Zeit während der ersten Sekunden des Versuches experimentell nicht ermittelt werden. Eine Diskussion der Ergebnisse erfolgte bereits in Kapitel 3.2. Der Vergleich der Rechnungen zeigt während der ersten Sekunden des Versuches und für Zeiten größer 150s Unterschiede. In den ersten Sekunden der Simulation wird im 1D-Lösungsansatz ein höherer Wärmestrom in die Lache als im 2D-Lösungsansatz vorhergesagt und damit die noch vorhandene LN_2-Masse zu niedrig bestimmt. Im Vergleich zu den Meßwerten wird die verdampfte LN_2-Masse zu Beginn des Versuchs von beiden Ansätzen zu niedrig simuliert; dadurch ergibt sich für die folgenden Zeitschritte eine im Vergleich zur Messung zu hohe LN_2-Masse. Weil die LN_2-Masse in der Simulation mit dem 2D-Ansatz ab ca. 150s eine höhere Verdampfungsrate aufweist als im Experiment bestimmt wurde, können für länger dauernde Freisetzungen auf Bitumen größere Abweichungen auftreten.

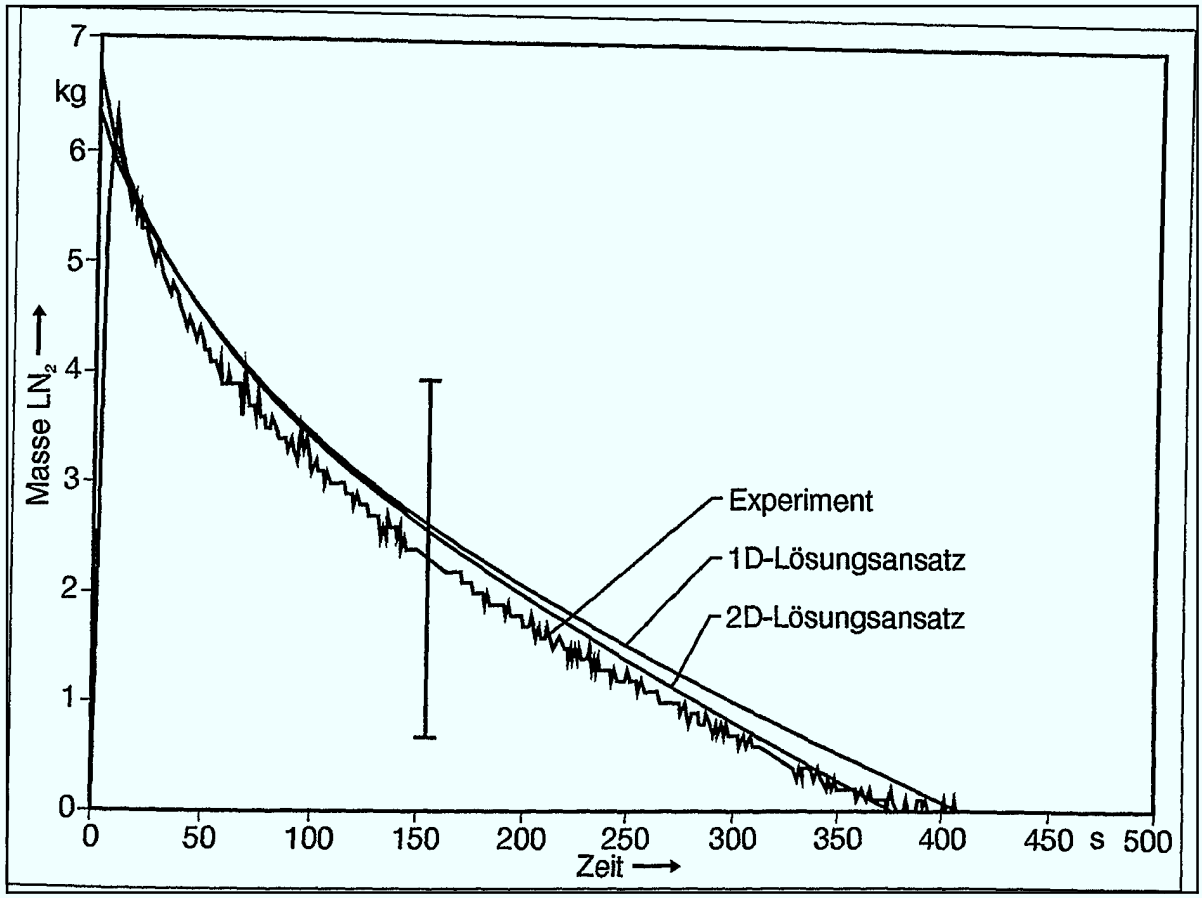


Bild 5.14: Darstellung der experimentellen und numerischen Ergebnisse des Massenverlustes über der Versuchszeit *t* bei einer Freisetzung von 6,8 kg LN_2 auf Bitumen (*Δr=0,011m, Δz=0,0025m, Δt=0,05s*).

In Bild 5.15 ist die experimentell ermittelte Abhängigkeit der LN_2-Masse über der Zeit für einen Versuch zur Verdampfung auf trockenem Beton mit Vergleichsrechnungen des 1D- und 2D-Lösungsansatzes gegenübergestellt. Auch hier ist der zu Beginn des Versuches simulierte Wärmestrom in den LN_2 bei Anwendung des 1D-Lösungsansatzes höher als im 2D-Lösungsansatz, d.h. der Massenverlust größer. Für Zeiten größer 200s bestimmt der 1D-Lösungsansatz den in den LN_2 fließenden Wärmestrom jedoch etwas niedriger als der 2D-Lösungsansatz. Im Vergleich zum Experiment stimmt der durch Verwendung des 1D-Lösungsansatzes vorhergesagte LN_2-Massenverlauf zu Beginn der Freisetzung genauer mit den Messungen überein als der 2D-Lösungsansatz. Für größere Zeiten scheint der 2D-Lösungsansatz die Messung besser wiedergeben zu können.

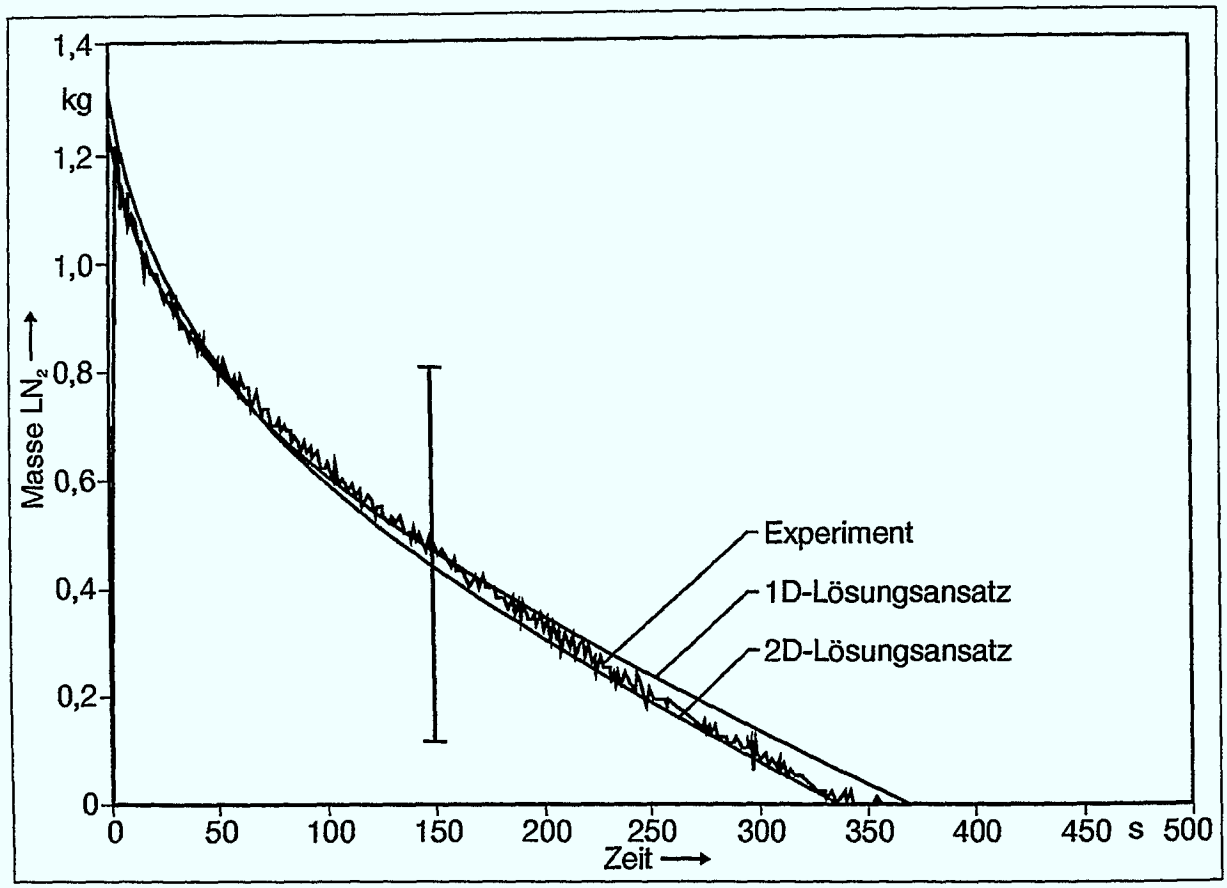


Bild 5.15: Darstellung der experimentellen und numerischen Ergebnisse des Massenverlustes über der Versuchszeit t bei einer Freisetzung von 1,26 kg LN_2 auf trockenem Beton ($\Delta r=0{,}0045m$, $\Delta z=0{,}005m$, $\Delta t=0{,}05s$).

In Bild 5.16 ist das Ergebnis der experimentell und rechnerisch bestimmten Verdampfung von LN_2 auf feuchtem Beton dargestellt. Eine Erklärung für den Verlauf der Kurve erfolgte bereits in Kapitel 3.1.3. Der in der Rechnung simulierte Phasenübergang des im Untergrund enthaltenen Wassers zu Eis und die Abgabe der Erstarrungsenthalpie ist für den "geschwungenen" Verlauf der Masse über der Zeit verantwortlich. Der dargestellte Versuch wird mit abgetrockneter Oberfläche durchgeführt. Der LAuV-Code ist nicht in der Lage, eine mit einer dünnen Wasserschicht bedeckte Oberfläche eines festen Untergrundes zu simulieren.

Insgesamt betrachtet, kann der "geschwungene" Verlauf gut angenähert werden. Abweichungen zwischen Experiment und Rechnung ergeben sich bei ca. 50s. Es ist denkbar, daß durch Erstarrung von Wasserresten an der Oberfläche sich eine dünne Eisschicht ausbildet, die zunächst isolierend auf den Wärmetransport aus dem Untergrund wirkt und so zu der Verzögerung beiträgt. Für Zeiten größer ca. 80s zeigen Simulation und Experiment wieder gute Übereinstimmung.

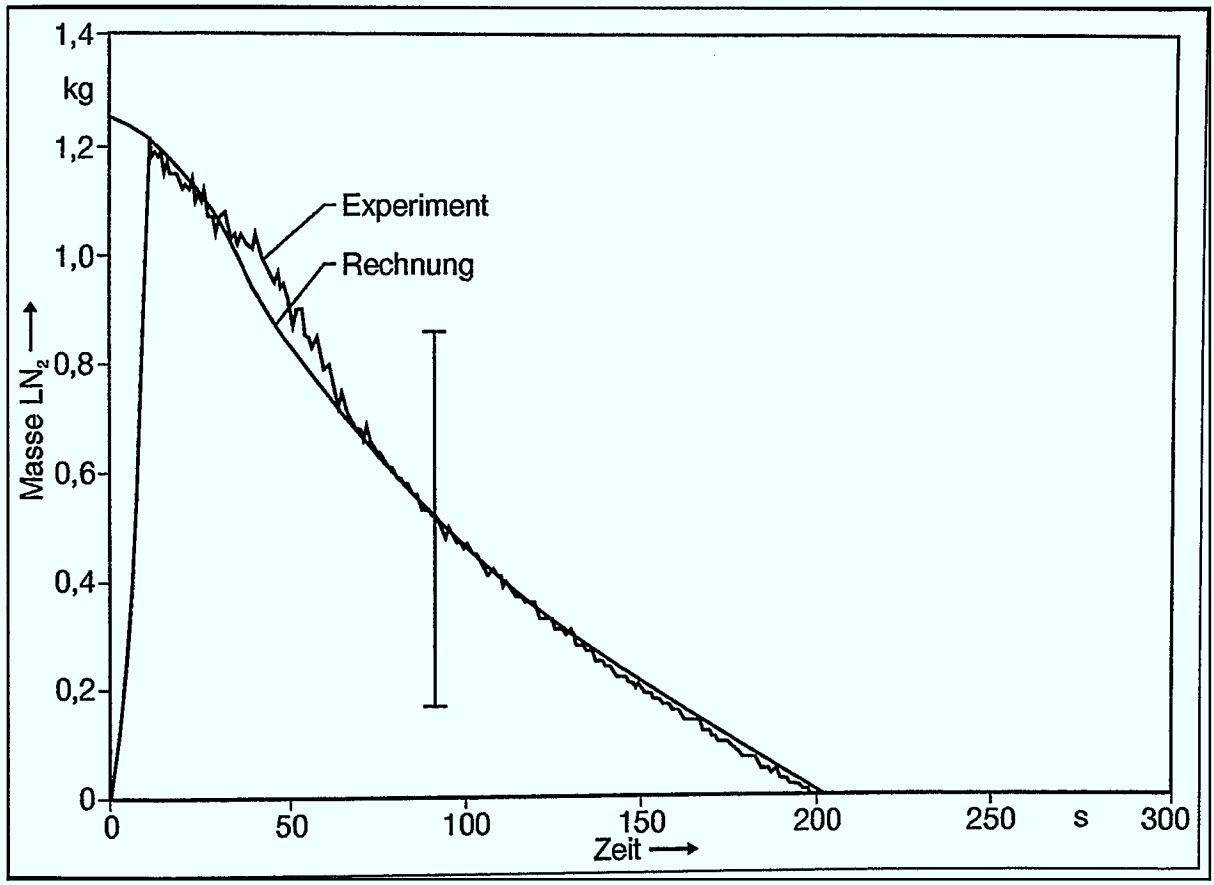


Bild 5.16: Darstellung der experimentellen und numerischen Ergebnisse des Massenverlustes über der Versuchszeit t bei einer Freisetzung von 1,26 kg LN_2 über feuchtem Beton ($\Delta r=0{,}0045m$, $\Delta z=0{,}001m$, $\Delta t=0{,}05s$).

5.7. Nachrechnung der Ausbreitungsversuche mit LN_2

In den Bildern 5.17 bis 5.23 sind die Ergebnisse der Versuche mit schlagartiger und kontinuierlicher Freisetzung von flüssigem Stickstoff über Wasser auf der KIWI-Anlage sowie die entsprechenden Nachrechnungen mit dem LAuV-Code dargestellt. Die Beschreibung der Experimente ist Kapitel 3.2. zu entnehmen. Die Randbedingungen aller durchgeführten Versuche sind in Tabelle 3.6 auf Seite 53 und Tabelle 3.7 auf Seite 54 enthalten. Bei den folgenden Nachrechnungen zur Lachenausbreitung und -verdampfung von LN_2 wurden die unterschiedlichen Wassertemperaturen und die Eisbildung im Wasser berücksichtigt. Die folgenden Mengenangaben beziehen sich auf die KIWI-Geometrie (60°-Kreisausschnitt).

5.7.1. Versuche mit schlagartiger Freisetzung

Bei den Versuchen mit schlagartiger Freisetzung von LN_2 auf Wasser bildet sich, wie in Kapitel 3.1.3 bereits beschrieben, keine geschlossene Eisdecke, sondern eine aus vielen einzelnen Eisinseln bestehende "wabenförmige" Eisstruktur. Im Zentrum der Waben liegt kein Eis vor. Die maximale Eisdicke an den Wabenrändern beträgt maximal 1cm.

Wie in Kapitel 5.4 ausgeführt, ist die Eisdicke bei der Simulation mit dem LAuV-Code alleine von der Benetzungsdauer mit LN_2 abhängig. Für die hier vorgestellten schlagartigen Versuche beträgt die Benetzungsdauer maximal ca. 30s. Für eine Benetzungsdauer von 30s wird eine Eisdicke von 3,5mm errechnet, wobei die Eisschicht bei der Simulation durchgehend ist. Die im Experiment aufgetretene wabenartige Struktur kann LAuV wegen der Vernachlässigung der Konvektionsströmung im Wasser nicht simulieren. Unter Berücksichtigung, daß im Experiment ein Teil der Wasseroberfläche nicht mit Eis bedeckt ist und das vorhandene Eis dicker ist, kann eine befriedigende Übereinstimmung zwischen der berechneten mittleren Eisdicke und der im Versuch beobachteten festgestellt werden.

Bild 5.17 zeigt die Ergebnisse von Experiment und Rechnung für eine schlagartige Freisetzung von 40 Litern LN_2 über der Wasseroberfläche. Die Ausgangswassertemperatur beträgt 19,5°C und die durchschnittliche Windgeschwindigkeit über der Versuchsdauer 0,2m/s.

Die vordere Lachenfront kann vom LAuV-Code zufriedenstellend simuliert werden. Die Simulation der hinteren Lachenfront zeigt größere Abweichungen, die wie folgt bedingt sein können: Im Experiment ist die hintere Lachenfront durch das Ablösen einzelner LN_2-Inseln bei Unterschreiten einer minimalen Schichtdicke bestimmt, welche durch Oberflächenspannung und Reibungskräfte beeinflußt wird. Dadurch befinden sich im Lacheninneren einzelne LN_2-Inseln, die bei der Simulation noch als Teil der Lache betrachtet werden.

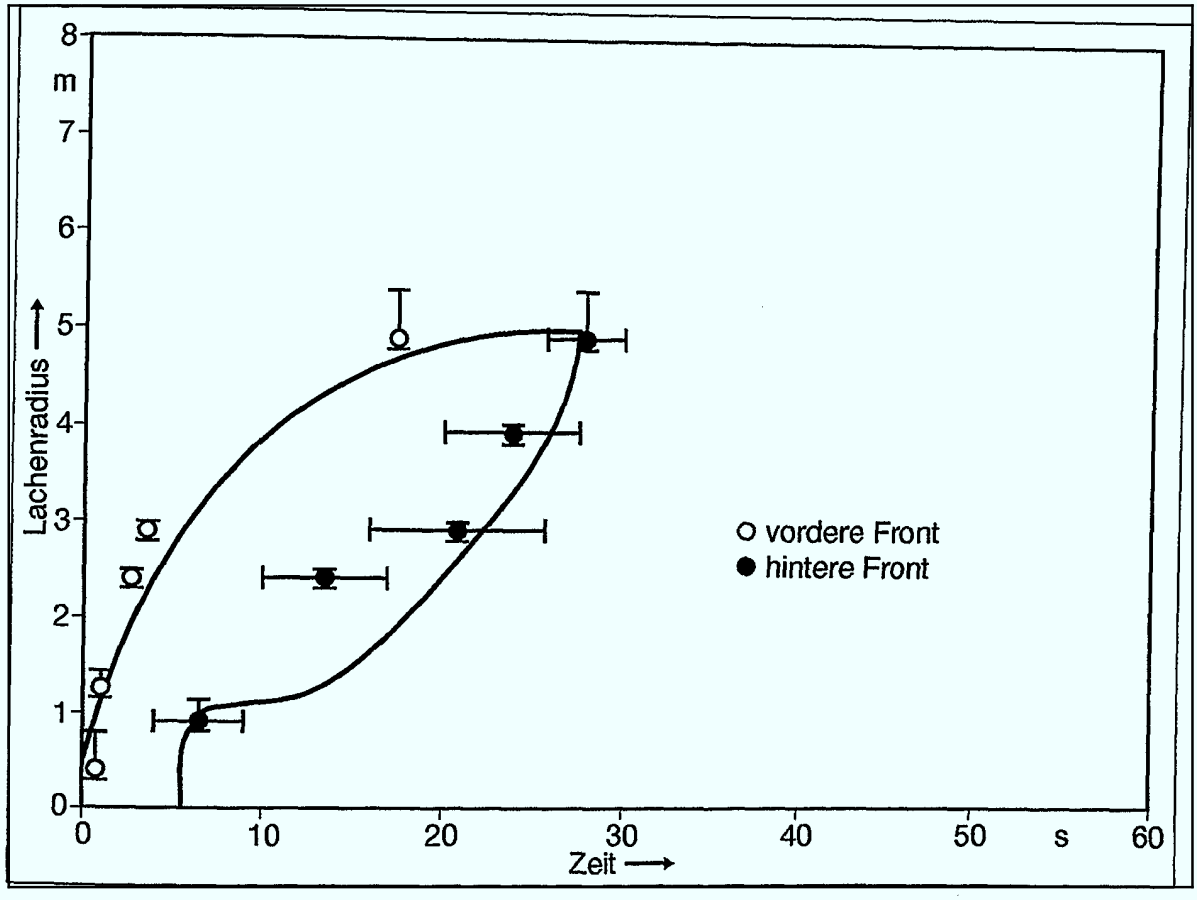


Bild 5.17: Vergleich zwischen den Ergebnissen von Experiment und LAuV-Rechnung für eine schlagartige Freisetzung von 40 l LN_2 über einer Wasseroberfläche (*Δr=0,08m, Δt=0,05s*).

Die Ergebnisse von Experiment und Rechnung bei einer schlagartigen Freisetzung von 60 l LN_2 über der Wasseroberfläche sind in Bild 5.18 dargestellt. Bei diesem Versuch lag die Ausgangswassertemperatur bei 19°C und die durchschnittliche Windgeschwindigkeit bei 0,7m/s, wobei die Windrichtung wechselte. Bei diesem Versuch ist die hintere Lachenfront durch Wellenbewegung der Wasseroberfläche nicht eindeutig nachzuweisen. Insgesamt kann die Rechnung das Ausbreitungsverhalten der vorderen Lachenfront mit guter Übereinstimmung zum Experiment simulieren.

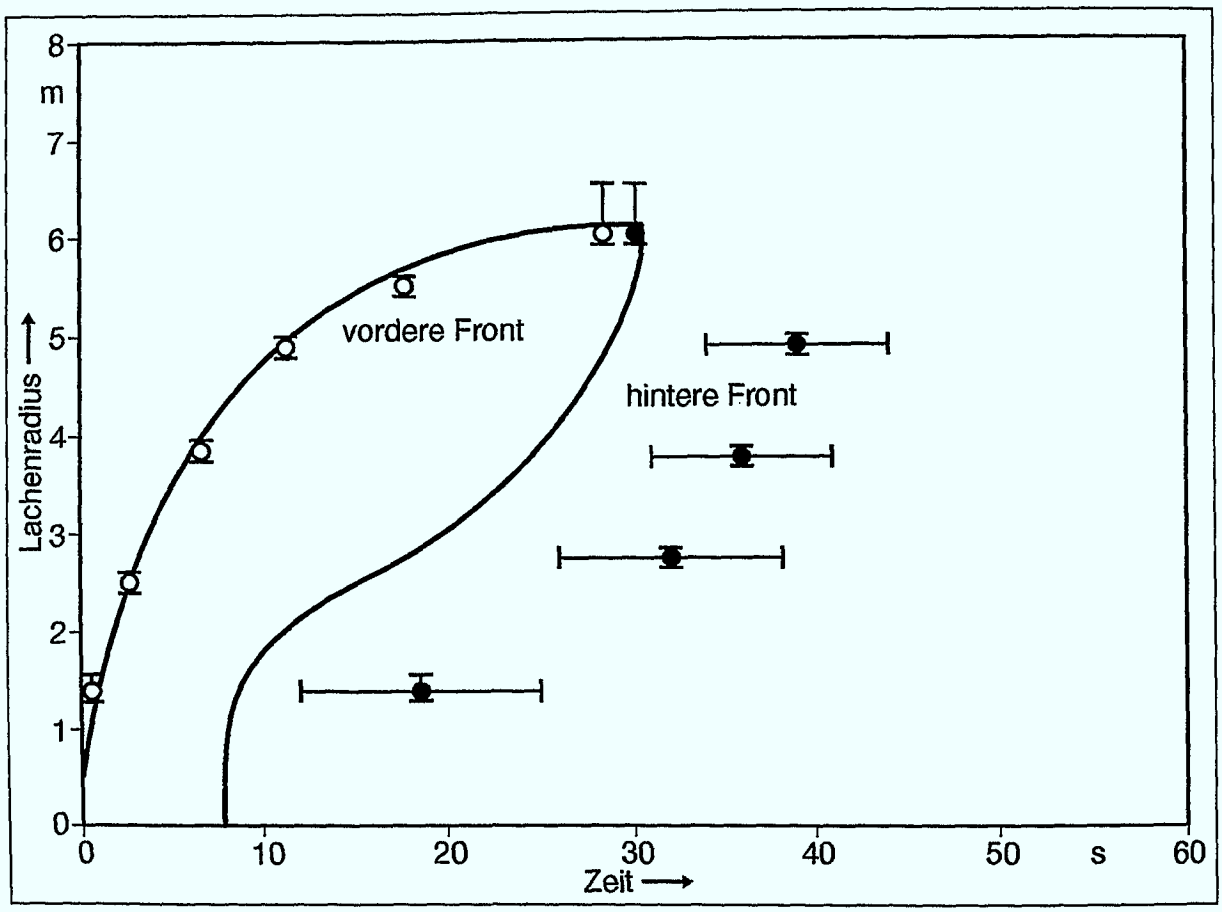


Bild 5.18: Vergleich zwischen den Ergebnissen von Experiment und LAuV-Rechnung bei einer schlagartigen Freisetzung von 60 l LN_2 über einer Wasseroberfläche (*Δr=0,08m, Δt=0,05s*)

In Bild 5.19 sind die Ergebnisse von Experiment und Rechnung bei einer schlagartigen Freisetzung von 80 Liter LN_2 über Wasser dargestellt. Die Ausgangswassertemperatur liegt bei 19°C und die durchschnittliche Windgeschwindigkeit bei ca. 2m/s, wobei die Windrichtung der in Bild 5.19 dargestellten Ausbreitung entgegengesetzt ist.

Das Ausbreitungsverhalten zu Anfang der Freisetzung bis zu einem Radius von ca. 4m kann von LAuV gut nachgerechnet werden. Der in der Rechnung vorhergesagte maximale Lachenradius von 6,7 m wird jedoch im Experiment (6,0m) nicht bestätigt. Die Abweichung beträgt ca. 0,7m. Berücksichtigt man den maximalen Fehler in der Bestimmung des maximalen Radius von ca. +0,5m, läßt sich die Abweichung zwischen Experiment und Rechnung relativieren.

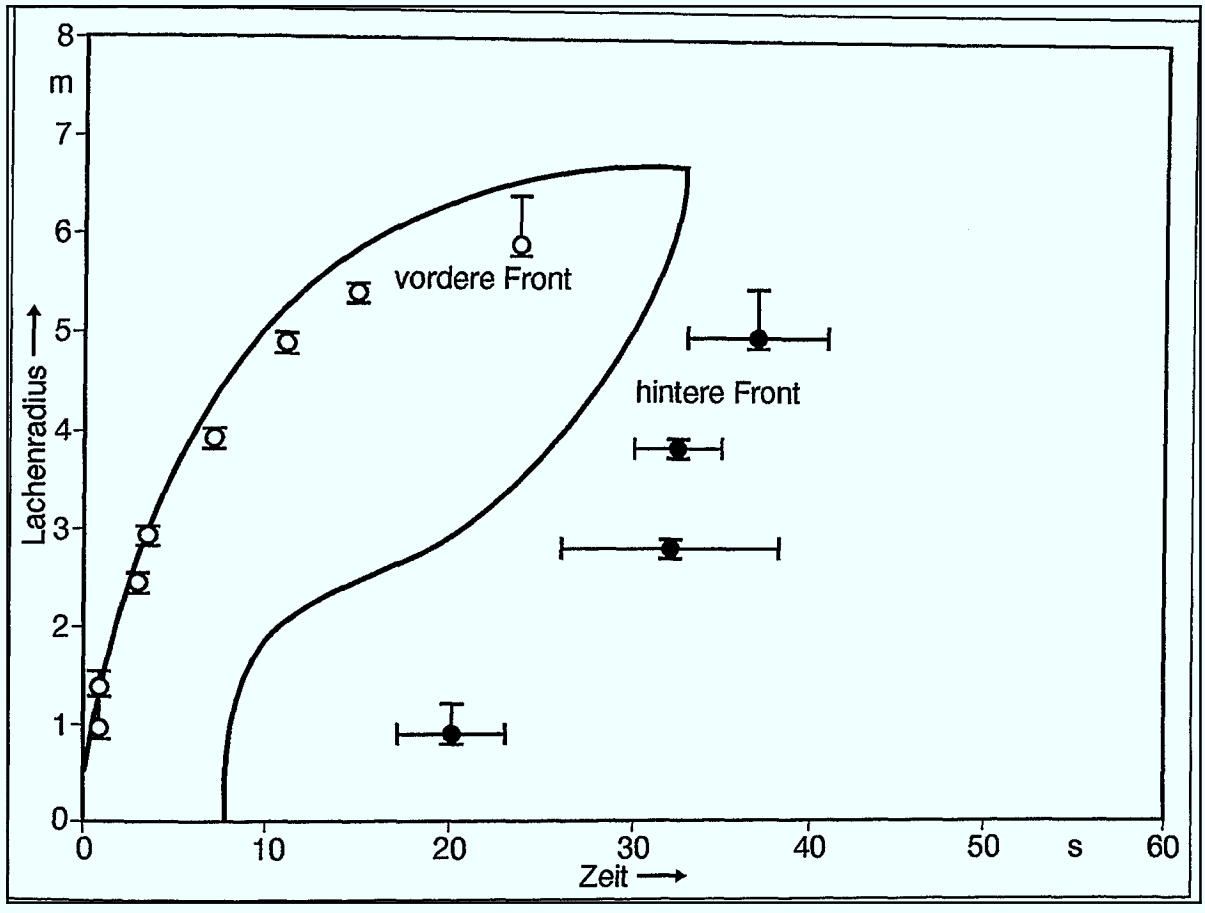


Bild 5.19: Vergleich zwischen den Ergebnissen von Experiment und LAuV-Rechnung bei einer schlagartigen Freisetzung von 80 l LN_2 über einer Wasseroberfläche (*Δr=0,08m, Δt=0,05s*)

5.7.2. Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung

In den Bildern 5.20 bis 5.23 sind die Ergebnisse der Experimente und der Rechnungen zur kontinuierlichen Freisetzung von 1,0 bis 2,5 l/s LN_2 über der Wasseroberfläche dargestellt. Die Randbedingungen der Versuche sind in Tabelle 3.7 auf Seite 54 angegeben.

In Bild 5.20 ist die Ausbreitung einer Lache bei einer kontinuierlichen Freisetzung mit einer Rate von ca. 1 l/s dargestellt. Die Ausgangswassertemperatur beträgt ca. 8°C und die Freisetzungsdauer ca. 60s. Bei diesem Versuch herrschte absolute Windstille. Die zweite Front einer sich auflösenden Lache ("hintere Lachenkante") war bei diesem Experiment nicht nachweisbar.

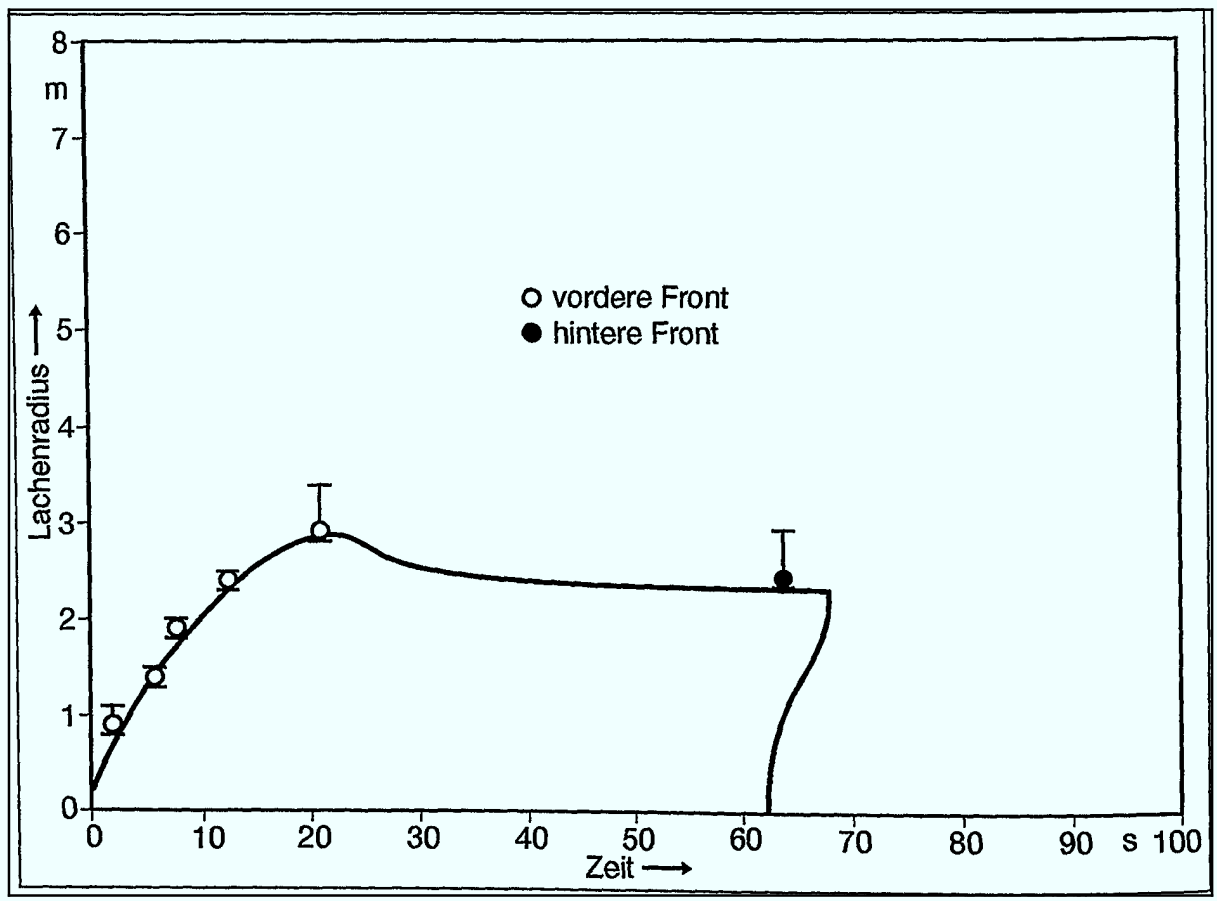


Bild 5.20: Vergleich zwischen den Ergebnissen von Experiment und LAuV-Rechnung bei einer kontinuierlichen Freisetzung von ca. 1,0 l/s (Dauer 60s) über einer Wasseroberfläche (Δr=0,05m, Δt=0,05s).

Die Ausbreitung der Lache kann in den ersten Sekunden der Freisetzung vom LAuV-Code gut nachvollzogen werden. Der von der Rechnung vorhergesagte maximale Radius kann im Experiment insofern bestätigt werden, als das nächste Thermoelement (0,5m weiter entfernt)

keinen Kontakt mit flüssigem Stickstoff verzeichnet. Im Bereich von ca. 25s bis zum Ende der Freisetzung von flüssigem Stickstoff liegt der Lachenradius im Bereich von ca. 2,5 bis 3m. Der Zeitpunkt des Verdampfungsendes kann nur an einem Meßpunkt eindeutig bestimmt werden, weil durch Eisbildung an den übrigen Meßpunkten keine eindeutige Aussage möglich ist.

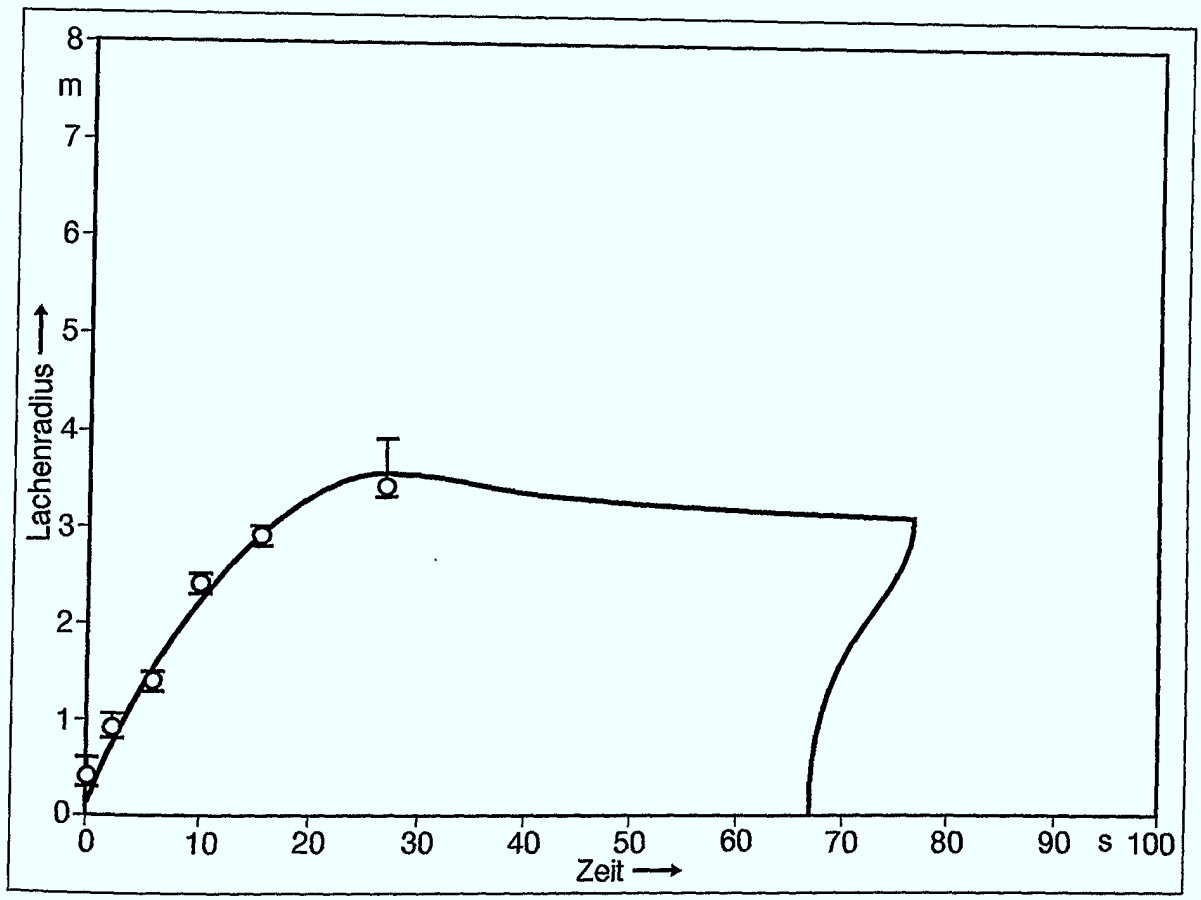


Bild 5.21: Vergleich zwischen den Ergebnissen von Experiment und LAuV-Rechnung bei einer kontinuierlichen Freisetzung von ca. 1,5 l/s (Dauer 64s) über einer Wasseroberfläche ($\Delta r=0,05m$, $\Delta t=0,05s$).

Bild 5.21 zeigt die experimentellen Ergebnisse und das Ergebnis der LAuV-Rechnung für eine kontinuierliche Freisetzung von ca. 1,5 Liter/s LN_2 über der Wasseroberfläche. Die Ausgangswassertemperatur beträgt 5°C, die durchschnittliche Windgeschwindigkeit 0,6m/s und die Dauer der Freisetzung ca. 64s.

Das Ausbreitungsverhalten der LN_2-Lache kann vom LAuV-Code gut simuliert werden. Auch der in der Rechnung bestimmte maximale Lachenradius stimmt in etwa mit den Meßwerten überein. Die Lache hat sich nicht über diesen Meßpunkt ausgedehnt. Durch Eisbildung an den Thermoelementen ist es jedoch nicht möglich, die Auflösung der Lache zu verfolgen.

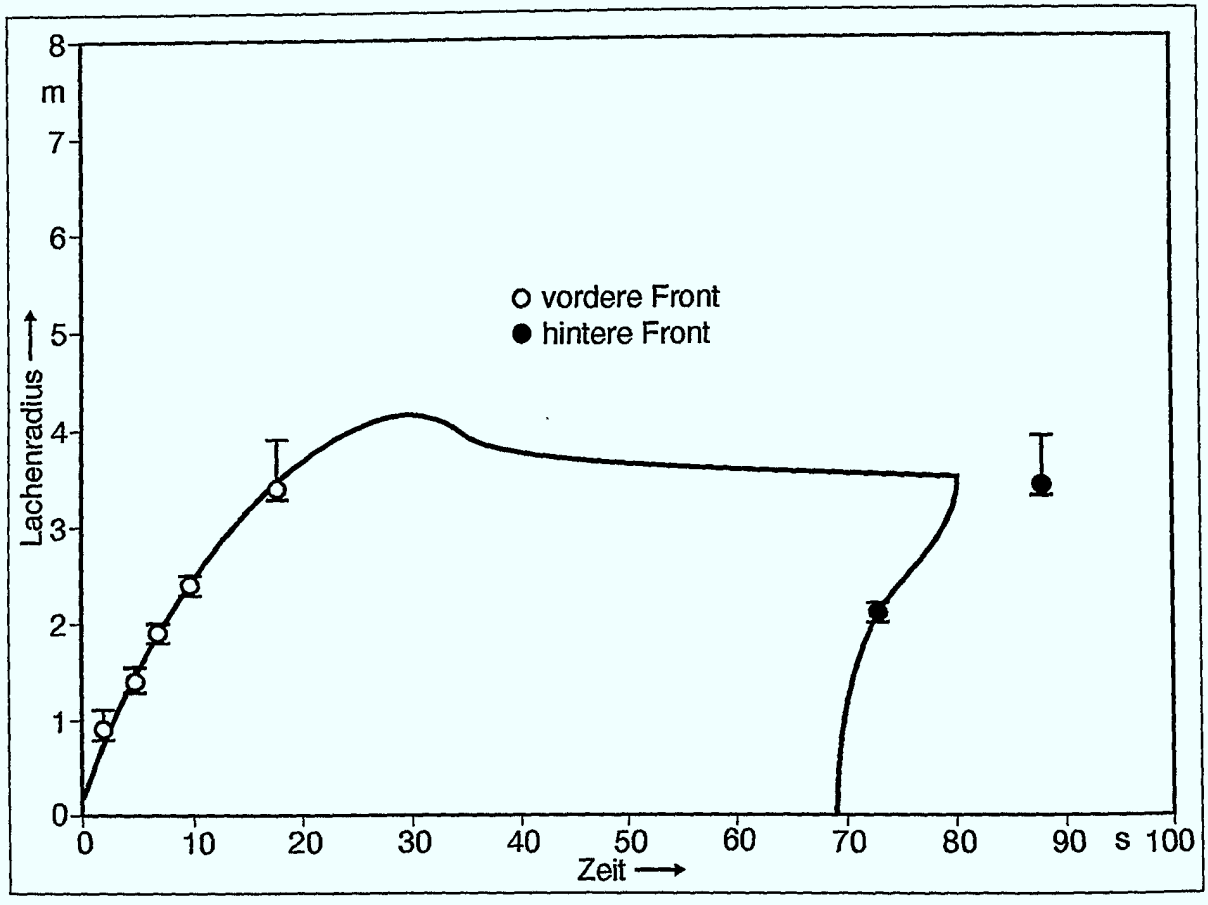


Bild 5.22: Vergleich zwischen den Ergebnissen von Experiment und LAuV-Rechnung bei einer kontinuierlichen Freisetzung von ca. 2,1 l/s (Dauer 66s) über einer Wasseroberfläche ($\Delta r=0,05m$, $\Delta t=0,05s$).

Bild 5.22 zeigt die Ergebnisse von Experiment und Rechnung einer kontinuierlichen Freisetzung von 2,1 l/s LN_2 über einer Wasseroberfläche. Die Ausgangswassertemperatur beträgt 6.4°C, die durchschnittliche Windgeschwindigkeit 0,6m/s und die Dauer der Freisetzung ca. 66s.

Das Ausbreitungsverhalten der Lache kann von der Rechnung bis ca. 3,5m gut simuliert werden. Das Thermoelement bei 3,5m zeigt auch bis ca. 90s Kontakt zu LN_2 an. Der von der Rechnung bestimmte maximale Lachenradius kann jedoch im Experiment nicht bestätigt werden. Der Meßpunkt bei 4m verzeichnete keinen Kontakt mit LN_2. Bedingt durch die Abweichung bei Bestimmung des maximalen Radius ist es denkbar, daß sich die Lache bis knapp vor das Thermoelement bei 4m ausgedehnt hat und anschließend wieder kleiner geworden ist. Weiterhin war es bei diesem Experiment möglich, mit zwei Thermoelementen den hinteren Lachenradius der sich auflösenden Lache zu messen. Im Vergleich zur LAuV-

Rechnung geht das Auflösungsverhalten der Lache im Experiment langsamer als nach der Rechnung vonstatten, wodurch sich auch das Verdampfungsende zu größeren Zeiten hin verschiebt.

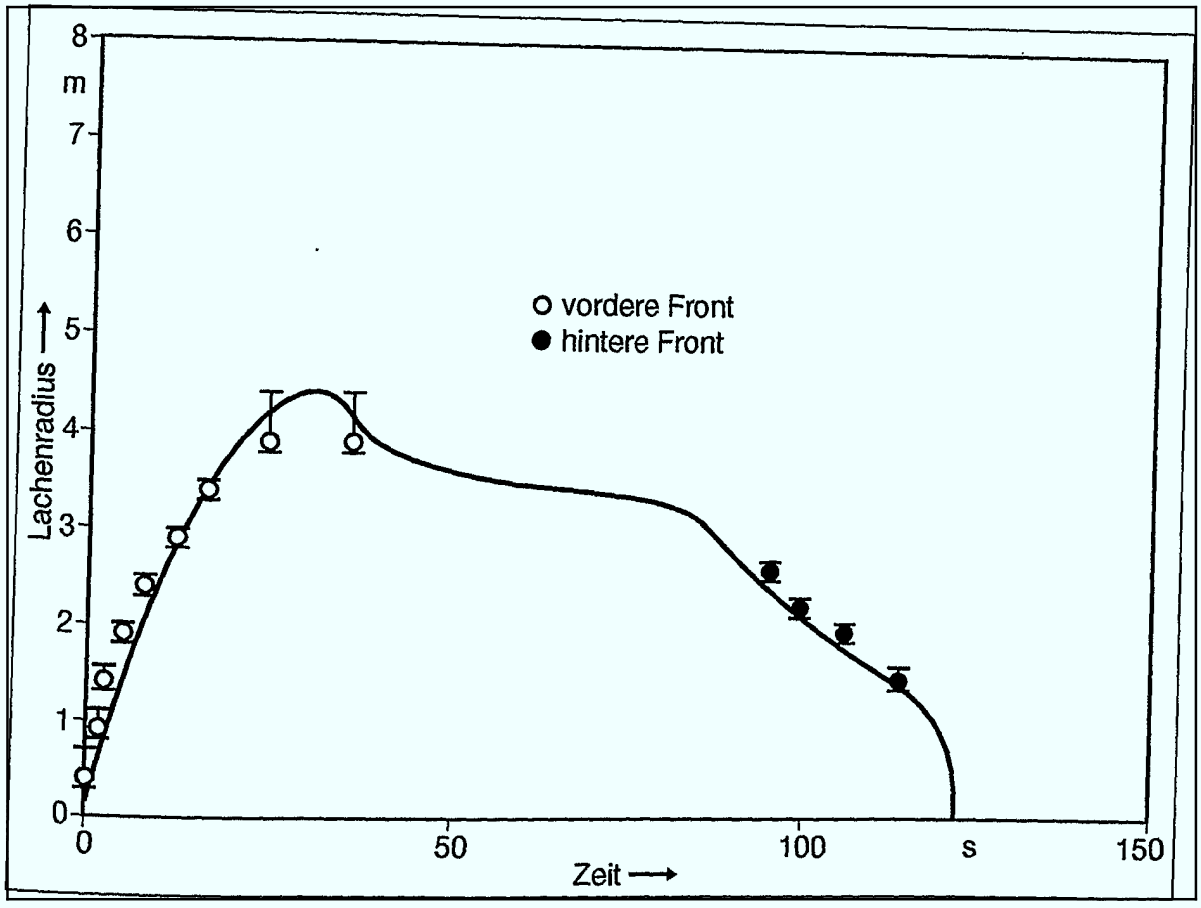


Bild 5.23: Vergleich zwischen den Ergebnissen von Experiment und LAuV-Rechnung bei einer kontinuierlichen Freisetzung von ca. 2,5 l/s (Dauer 121s) über einer Wasseroberfläche. Die LAuV-Rechnung erfolgt mit einer zeitabhängigen Freisetzungsrate (Δr=0,05m, Δt=0,05s).

In Bild 5.23 sind die Ergebnisse des Experimentes und der LAuV-Rechnung einer kontinuierlichen Freisetzung mit einer Rate von ca. 2,5 l/s LN_2 dargestellt. Die Ausgangswassertemperatur beträgt 4.5°C, die durchschnittliche Windgeschwindigkeit 0,6m/s und die Dauer der Freisetzung ca. 121s. Bei diesem Versuch wurde der Behälter, aus dem der LN_2 freigesetzt wird, gegen Ende des Versuches allmählich leerlaufen gelassen. Dadurch wird eine ab ca. 73s sich verringernde Freisetzungsrate erzielt. In der Rechnung wird dies simuliert durch eine konstante Freisetzungsrate von 2,5 l/s über 73s und eine anschließend linear auf Null abnehmende von 73s bis 121s.

Das Ausbreitungsverhalten der Lache kann, wie in den anderen Versuchen, zu Beginn der Ausbreitung bestätigt werden. Der in der Rechnung bestimmte maximale Lachenradius ist mit ca. 4,5m genau an der Position eines Thermoelementes. Im Experiment wird der maximale Lachenradius mit 4m bestimmt. Damit liegt der von der Rechnung bestimmte Lachenradius innerhalb der Fehlerbandbreite. Ein überraschendes Ergebnis ist zum einen die Beobachtung des sich verkleinernden Lachenradius im Experiment und darüber hinaus deren Simulation durch die Verringerung der Freisetzungsrate im LAuV-Code, für die sich eine sehr gute Übereinstimmung ergibt.

5.8. Nachrechnung der Ausbreitungsversuche mit LH_2

Die Randbedingungen zu den Versuchen mit flüssigem Wasserstoff sind in Tabelle 3.9 auf Seite 70 enthalten. Die Ergebnisse der Experimente und der LAuV-Rechnungen sind in den Bildern 5.24 und 5.25 enthalten. Die verwendeten Stoffwerte von Wasser und Aluminium sind in Tabelle 3.8 auf Seite 64 dargestellt. Die Windgeschwindigkeit liegt im Bereich 0-1 m/s bei wechselnder Windrichtung.

In Bild 5.24 sind die Meßergebnisse der Ausbreitung von Flüssigwasserstoff auf Wasser mit einer Freisetzungsrate von 5 l/s dargestellt. Im Experiment fällt auf, daß die Lache sich zu Beginn der Freisetzung über den stationären Zustand hinaus vergrößert (Meßpunkt bei 0,8m) und im stationären Zustand nicht konstant bleibt, sondern sich allmählich weiter vergrößert. Das Verdampfungsende kann meßtechnisch nicht erfaßt werden.

Bei der Rechnung wird ein konstanter Volumenstrom von 5 Liter/s LH_2 über 62s und Eisbildung im Wasser angenommen. Die Rechnung simuliert einen sich ablösenden Lachenring sowie anschließend einen sich allmählich vergrößerndem Lachenradius. Das Verdampfungsende liegt bei ca. 64s, das im Experiment jedoch nicht eindeutig zu bestimmen ist.

Im Vergleich zwischen Experiment und Rechnung kann das von der Rechnung simulierte Ausbreitungsverhalten im Prinzip bestätigt werden, wenngleich im Experiment der sich ablösende Lachenring etwas früher und größer ist als in der Rechnung. Im anschließenden stationären Zustand beschreibt die Lache sowohl in der Rechnung als auch im Experiment einen Radius von ca. 0,5m und vergrößert sich langsam. Abweichungen zwischen Experiment und Rechnung können durch einzelne Windböen bedingt sein, deren Einfluß aufgrund wechselnder Windrichtung nicht abschätzbar sind.

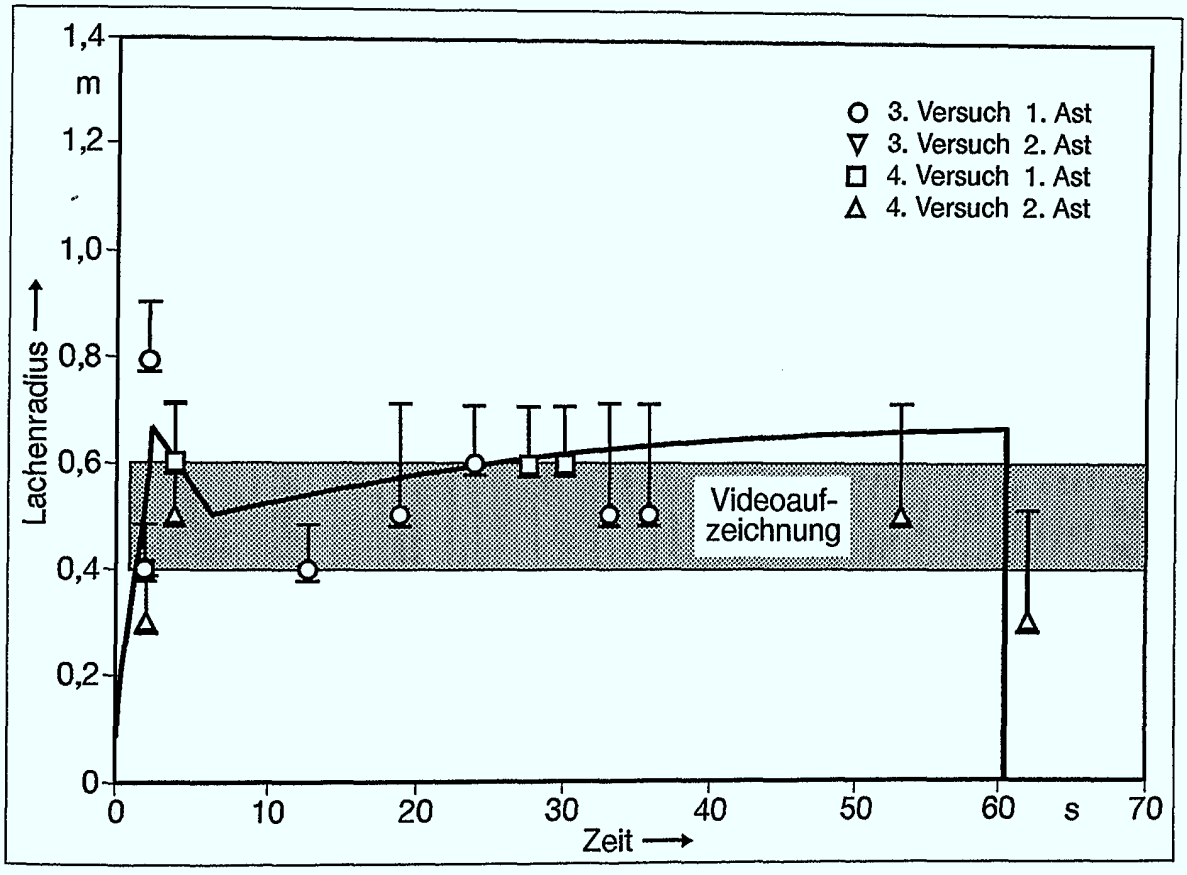


Bild 5.24: Vergleich zwischen den Ergebnissen von Experiment und LAuV-Rechnung bei einer kontinuierlichen Freisetzung von ca. 5 l/s LH_2 über einer Wasseroberfläche (*Δr=0,04m, Δt=0,05s*).

In Bild 5.25 sind die Meßergebnisse der kontinuierlichen Freisetzung von 6 l/s LH_2 über Aluminium und eine entsprechende LAuV-Rechnung dargestellt. Auch hier wird im Experiment deutlich, daß sich die Lache zunächst über den stationären Radius hinaus vergrößert. Der anschließende stationäre Zustand ist durch eine ständige Vergrößerung des Lachenradius charakterisiert. Das Verdampfungsende liegt bei ca. 68 s.

Für die Rechnung wird eine konstante Freisetzungsrate von 6 l/s über 62s angenommen. Zur Wärmebetrachtung aus dem Untergrund wird der 1D-Lösungsansatz (Gleichung 4.34 auf Seite 88) verwendet. Der stationäre Zustand wird nach ca. 10s erreicht. Der Vergleich zwischen Experiment und Rechnung zeigt im Ganzen zufriedenstellende Übereinstimmung. Die Rechnung simuliert den Lachenring nicht, weil durch die Verwendung von Gleichung 4.34 auf Seite 88 der Wärmestrom zu Beginn der Freisetzung so groß ist, daß der sich ablösende Lachenring sofort verdampft. Im weiteren Verlauf der Freisetzung kann der Lachenradius von den LAuV-Rechnungen in guter Näherung bestimmt werden. Abweichungen ergeben sich

gegen Ende der Verdampfung dadurch, daß das Verdampfungsende im Experiment nicht genau bestimmt werden kann.

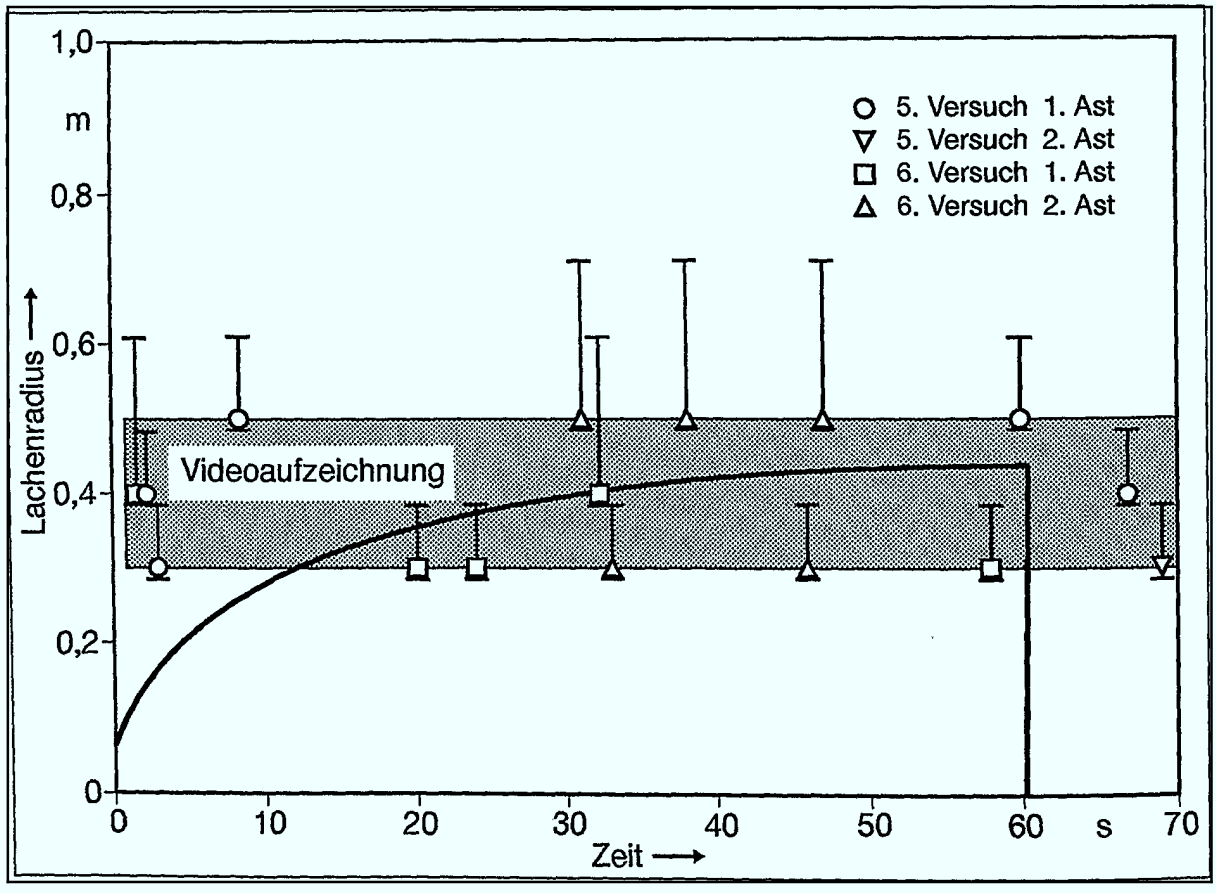


Bild 5.25: Vergleich zwischen den Ergebnissen von Experiment und LAuV-Rechnung bei einer kontinuierlichen Freisetzung von ca. 6 l/s LH_2 über einer Aluminiumoberfläche.
($\Delta r=0,04m$, $\Delta t=0,05s$).

Die einzigen der Literatur entnehmbaren Experimente mit Flüssigwasserstoff, in denen versucht wurde, die Ausbreitung der Lache zu messen, sind von Chirivella [CHI86] in der Wüste von Nevada durchgeführt worden. Im Rahmen dieser Versuche wird vorrangig die Ausbreitung der Gaswolke untersucht. In einem Experiment werden im verdichteten trockenen Sand jeweils im Meterabstand Thermoelemente angebracht, um die Ausbreitung der Flüssigkeitslache zu messen. Bei diesem Versuch wird der Flüssigwasserstoff mit einer Rate von 124 l/s über 41s freigesetzt. Der Wasserstoff wird unter Zuhilfenahme von Heliumdruckluft (0.7MPa) ausgetrieben, wodurch durch Druckentlastung am Austritt ein Teil des Wasserstoffs spontan verdampft (Flash-Verdampfung) und dadurch die Flüssigkeitsmenge reduziert. Während der Freisetzung wird ein Lachenradius zwischen 2 und 3m im Zeitbereich

von ca. 5s nach Start des Versuchs bis ca. 45s erreicht [CHI86]. Dieser Bereich ist in Bild 5.26 als "Thermoelement-Aufzeichnung" bezeichnet.

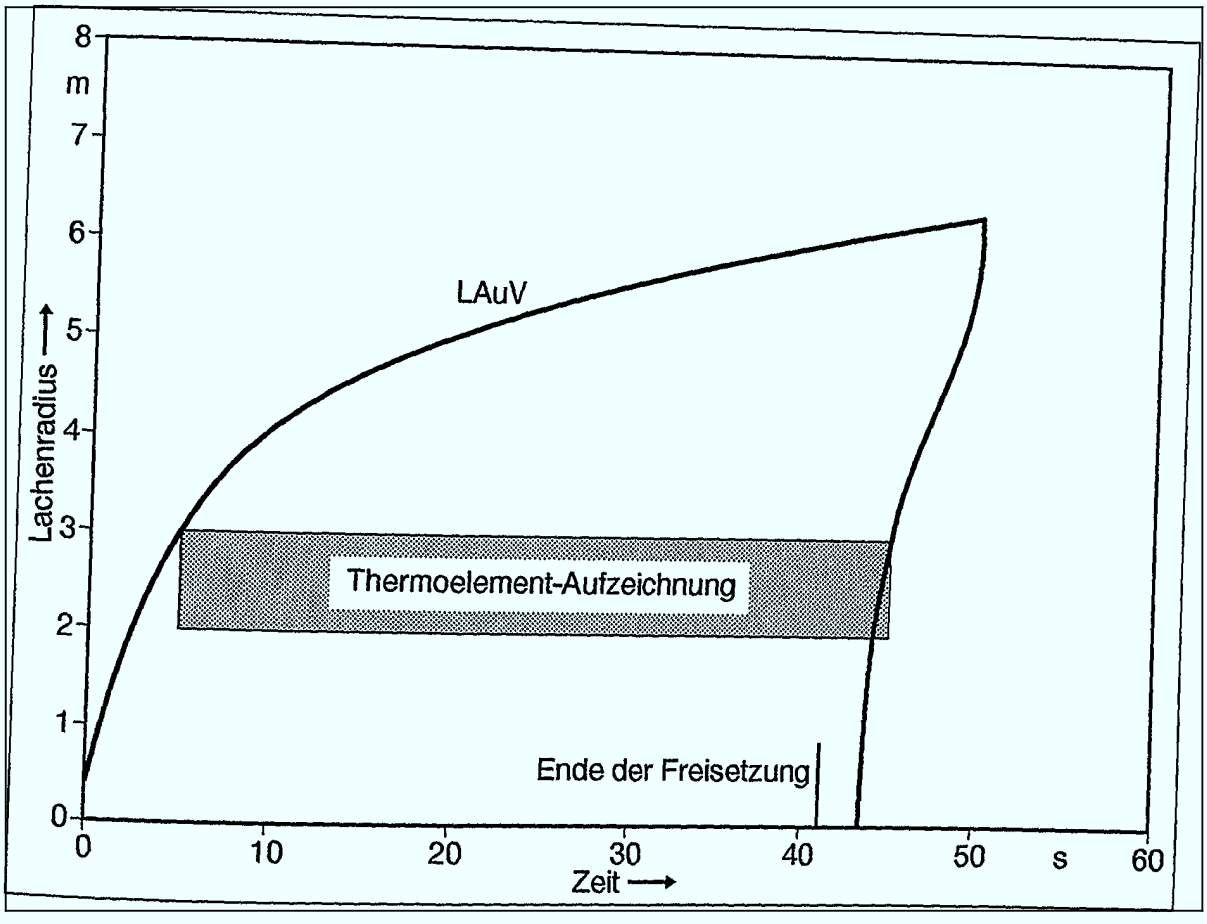


Bild 5.26: LAuV-Rechnung zur Lachenausbreitung von LH_2 auf trockenem Sand. Nachrechnung des NASA-Experimentes [CHI86]. Die Freisetzungsrate beträgt 80 l/s bei einer Dauer von 41s (Δr=0,08m, Δt=0,05s).

Derjenige Anteil, welcher mindestens spontan verdampft, kann durch Anwendung von Gleichung A.43 auf Seite 167 abgeschätzt werden. Dadurch ergibt sich die zur Ausbreitungsrechnung in Bild 5.26 verwendete Freisetzungsrate von 80 l/s. Der maximal erreichte Lachenradius beträgt nach LAuV-Rechnungen ca. 6.5m, die Zeit bis zur vollständigen Verdampfung 50s. Dadurch ist der Lachenradius größer als im Experiment gemessen wurde. Mögliche Ursachen sind in der Vermischung der sich ausbreitenden Lache mit dem Sand und die dadurch erhöhte Verdampfungsrate sowie Eindringung von LH_2 in den Sand. Die in [CHI86] beschriebenen Furchen nach Inspektion des Freisetzungsortes im Anschluß an das Experiment deuten zumindest auf Erosionsvorgänge an der Oberfläche hin. Die von [CHI86]

durchgeführte Abschätzung des Lachenradius mit dem Fay-Modell bestimmte einen Radius von 10,62m.

6. Vorausrechnung der Lachenausbreitung und -verdampfung im Hinblick auf mögliche Unfälle mit Freisetzung von flüssigem Wasserstoff

Verschiedene aussichtsreiche Anwendungsmöglichkeiten zum Einsatz von flüssigem Wasserstoff als Treibstoff bzw. Rohstoff (u.a. in der zivilen Luftfahrt [DAA92], beim Individualverkehr [PEH94]), befinden sich in der Projekt- bzw. Erprobungsphase; siehe auch das Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project [EQP91]. Vor der großtechnischen Einführung sind zur Abschätzung möglicher Gefahren Sicherheitsuntersuchungen zur unfallbedingten Freisetzung von Flüssigwasserstoff erforderlich, wobei die Lachenausbreitung und -verdampfung eine wichtige Rolle für den Zeitraum und den Umfang der Gefährdung spielt. Bislang gibt es kaum experimentelle bzw. analytische Untersuchungen dieser Fragestellungen [CHI86, EIC92], so daß auch neuere Studien [DAA92] auf die analytischen Ergebnisse von [BRW81] zurückgreifen müssen.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und anhand von Experimenten mit LH_2 validierte LAuV-Code soll im folgenden auf die störfallbedingte Freisetzung von LH_2-Mengen in der Größenordnung angewendet werden, wie sie in Zukunft in den verschiedenen Projekten gehandhabt werden sollen. Die Anwendung des LAuV-Codes erfolgt für die LH_2-Menge eines Tankzuges sowie für die LH_2-Menge des vielleicht aussichtsreichsten Projektes zum künftigen Einsatz von Flüssigwasserstoff, dem CRYOPLANE der Deutsche Aerospace Airbus [DAA92]. Eine weitere Anwendung des LAuV-Codes auf noch größere Mengen ergibt sich aus der Flüssigwasserstoffversorgung per Schiffstransport im Rahmen des Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHHPP).

6.1. Freisetzung von Flüssigwasserstoff in den Größenordnungen des Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project

Das Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHHPP) ist ein 100 MW_{el} Energieumwandlungs- und Versorgungssystem auf Wasserstoffbasis [EQP91]. Der in Québec aus Wasserkraft erzeugte Strom wird über Hochspannungsleitungen zum drucklosen alkalischen Elektrolyseur transportiert und zur Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff genutzt. Anschließend wird der Wasserstoff in mehreren Stufen gereinigt und nach Erhöhung des para-Wasserstoffgehalts im katalytischen Konverter verflüssigt. Ohne Zwischenspeicher wird der Flüssigwasserstoff nun in die im Hafen liegenden Bargen (doppelwandige, vakuumisolierte Behälter; Volumen 3600 m^3; Füllgrad 85%) gefüllt. Zum Abtransport werden die Bargen zum Ende des Docks transportiert und über eine Hebevorrichtung zu Wasser gelassen. Mit Hilfe eines Schleppers und von Winden wird nun

Barge für Barge in eine Krippe geschoben, wo maximal fünf Bargen und das Schubschiff Platz finden. Die Bargen können in das eigens für deren Transport entworfene Schiff (Barge Carrier, maximale Beladung 5 Bargen) einzeln oder als Bargenkette eingeschwommen werden. Dazu kann der Barge Carrier Teile seines Rumpfes mit Wasser fluten, so daß ein Einschwimmen der Bargen möglich ist.

Im gedachten Zielhafen Hamburg flutet der Barge Carrier erneut Teile des Rumpfes, wodurch die Bargen aufschwimmen und mit Schleppern und Winden entladen werden. Es existieren nun zwei mögliche Wege, die die Bargen einnehmen können. Zum einen besteht die Möglichkeit, die ausgeschwommenen Bargen mittels einer Hebevorrichtung an Land zu heben und am LH_2-Terminal zu deponieren, zum anderen sollen Bargen zur Airbusbetankung (Kapitel 6.2) über die Elbe nach Finkenwerder geschleppt werden. Hier wird der Wasserstoff seiner Verwendung als Roh- bzw. Treibstoff zugeführt.

Prinzipiell sind auf allen Stationen Unfälle mit Freisetzung von Flüssigwasserstoff denkbar, deren Wahrscheinlichkeit in erster Näherung in [LVS90] behandelt wird. Die kritischste Phase ist die, wenn die Bargen aus dem Schiff ausgeschwommen werden und zur Lagerung am LH_2-Terminal angehoben bzw. von einem Schlepper ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen nach Finkenwerder transportiert werden [EQP91]. Durch Beschädigung der Tanks (Kollision) kann es so zu einer kontinuierlichen Freisetzung von LH_2 kommen oder auch, wenn Wasser in die Vakuumisolierung gelangt, zur Zerstörung des LH_2-Behälters mit schlagartiger Freisetzung des gesamten Inhaltes [LOD89].

Den folgenden Rechnungen des LAuV-Codes liegen die Fälle einer schlagartigen und kontinuierlichen (Dauer 60 s) Freisetzung des Netto-Tankinhaltes (3000 m^3) einer Barge zugrunde [BON94]. Als Untergrund wird Wasser mit der Annahme einer konstanten Wärmestromdichte in die Lache entsprechend Tabelle 2.2 auf Seite 20 verwendet.

Wie Bild 6.1 zeigt, erreicht der Lachenradius der schlagartigen Freisetzung ca. 120 m. Die Zeit bis zur vollständigen Verdampfung beträgt etwa 60s. Die kontinuierliche Freisetzung wird mit einer Rate von 50 m^3/s über 60 s angenommen. Der Lachenradius ist mit ca. 90 m etwas kleiner als der einer schlagartigen Freisetzung. Die Zeit bis zur vollständigen Verdampfung beträgt etwa 80s und ist somit wesentlich durch die Freisetzungsdauer bestimmt.

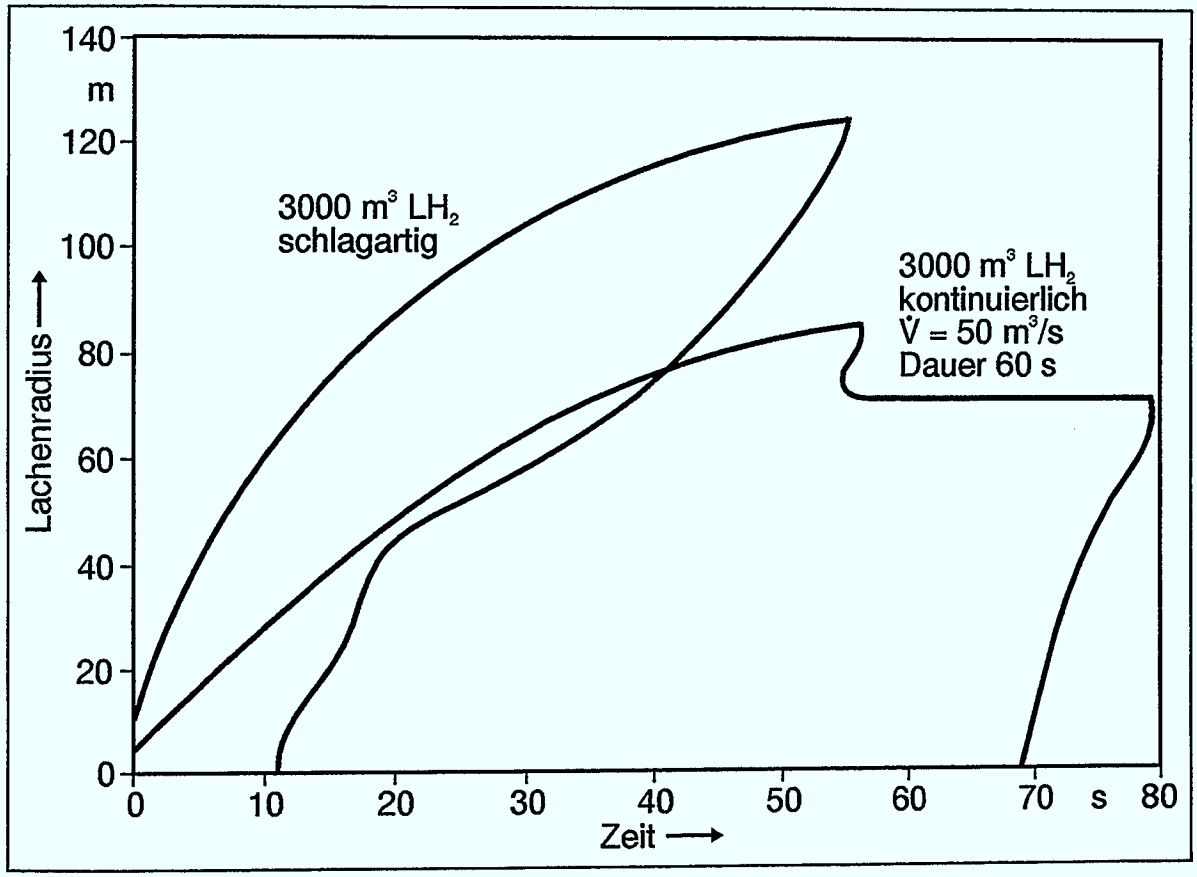


Bild 6.1: LAuV-Rechnung des Lachenradius in Abhängigkeit von der Zeit einer schlagartigen und kontinuierlichen (Dauer 60 s) Freisetzung von 3000 m³ LH_2 auf Wasser (ohne Eisbildung) ($\Delta r=0{,}8m$, $\Delta t=0{,}05s$).

Auch wenn eine stationäre Freisetzungsrate von 50 m³/s und eine Ausbreitung der Lache ohne Hindernisse unrealistisch scheint, so kann man daraus dennoch eine Abschätzung der Zeit bis zur vollständigen Verdampfung von Mengen Flüssigwasserstoff im großtechnischen Maßstab erhalten. Die sehr kurze Zeit bis zur vollständigen Verdampfung solcher großen Mengen schließt nicht aus, daß sich aus der Lache "kleinere Fraktionen" gelöst haben, die vereinzelt auf der Oberfläche treiben und sich über die hier genannten "nominalen" Lachenradien hinaus ausbreiten können.

6.2. Freisetzung von Flüssigwasserstoff in der Größenordnung des Tankinhaltes eines wasserstoffgetriebenen Flugzeuges

Das CRYOPLANE-Projekt der Deutschen Aerospace Airbus sieht einen umgebauten Airbus A310 mit Wasserstoffantrieb vor. Die derzeitigen Planungen beziehen sich auf einen Wasserstoffantrieb in einem "Demonstrator". Bei weiterer positiver Entwicklung und Optimierung auf den Wasserstoffantrieb ist eine Neukonstruktion unumgänglich, wie sie z.B. in den Entwürfen von Tupolev zu sehen sind, um die Vorteile des Wasserstoffs als Treibstoff zur Geltung zu bringen.

Die wesentlichen Unterschiede gegenüber konventionellen Flugzeugen liegen u.a. in der

- Anordnung der Tanks
  Die notwendige Wärmeisolierung der Tanks macht ein möglichst kleines Verhältnis von Oberfläche zu Volumen erforderlich und damit eine Anordnung in den Tragflächen unmöglich.
- Verringerung der Schadstoffemission
- Erhöhung der Zuladung
  Durch die höhere massenbezogene Verbrennungswärme des Wasserstoffs verringert sich das Startgewicht. Somit kann die Zuladung erhöht werden.

Eine umfassende Darstellung der Vor- und Nachteile des wasserstoffgetriebenen Flugzeuges würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Deshalb sollen im folgenden nur die Aspekte, die in Verbindung mit Flüssigwasserstoff stehen, genannt werden.

Der gegenwärtige Stand der Planung des CRYOPLANE sieht vier große Tanks mit einem Gesamtvolumen von 240m³ LH_2 über der Passagierkabine angeordnet vor. Der Vorrat wird zu gleichen Teilen auf zwei Tankgruppen aufgeteilt, die je aus einem großen und einem kleinen Tank bestehen. Der kleinere Tank (40m³) übernimmt die Rolle des aktiven Tanks, der die Triebwerke mit Treibstoff versorgt, der größere Tank (80m³) dient als Reserve, der den kleineren nach Bedarf auffüllt. Das Auffüllen des aktiven Tanks und die Versorgung der Triebwerke soll durch Pumpen gewährleistet werden. Die Versorgungsleitungen zu den Triebwerken sollen nicht doppelwandig sein, weil sich die Flüssigkeit ohnehin nicht lange darin aufhält. Um die Triebwerksfunktion nicht zu beeinträchtigen, ist Blasenbildung in den Zuleitungen jedoch unbedingt zu vermeiden. Unterkühlung der Flüssigkeit (Druckerhöhung über den Dampfdruck hinaus) ist eine Möglichkeit dafür [BAM94].

Vor der großtechnischen Einführung des LH_2 als Flugzeugtreibstoff ist es jedoch erforderlich, die vom Flüssigwasserstoff ausgehenden Gefahren möglichst realistisch abzuschätzen. Gerade die Anordnung der Tanks über der Passagierkabine hat deutliche sicherheitstechnische Vorteile, u.a. dadurch daß

- die Tanks z.B. im Falle einer Bauchlandung keinen Bodenkontakt haben,
- die Tanks bei Frontalkollision einen geringen Querschnitt bieten,
- die Stabilität des Rumpfes wegen des Eigengewichtes der Tanks erhöht werden muß und dieser so implizit mehr Sicherheit für die Passagiere bietet,
- der Abriß einer Tragfläche bei einem Unfall nicht zwangsläufig zur Zerstörung des Tankes führt.

Trotz Beachtung aller Sicherheitsvorkehrungen sind Fälle denkbar (z.B. Sabotage, Absturz kurz nach dem Start), wo es zu einer spontanen Zerstörung der Tanks und damit einer schlagartigen Freisetzung des gesamten Vorrates an LH_2 kommen kann. Ebenso ist es möglich, daß die Behälter dabei nicht vollständig zerstört werden, sondern der Inhalt über eine bestimmte Zeit freigesetzt wird.

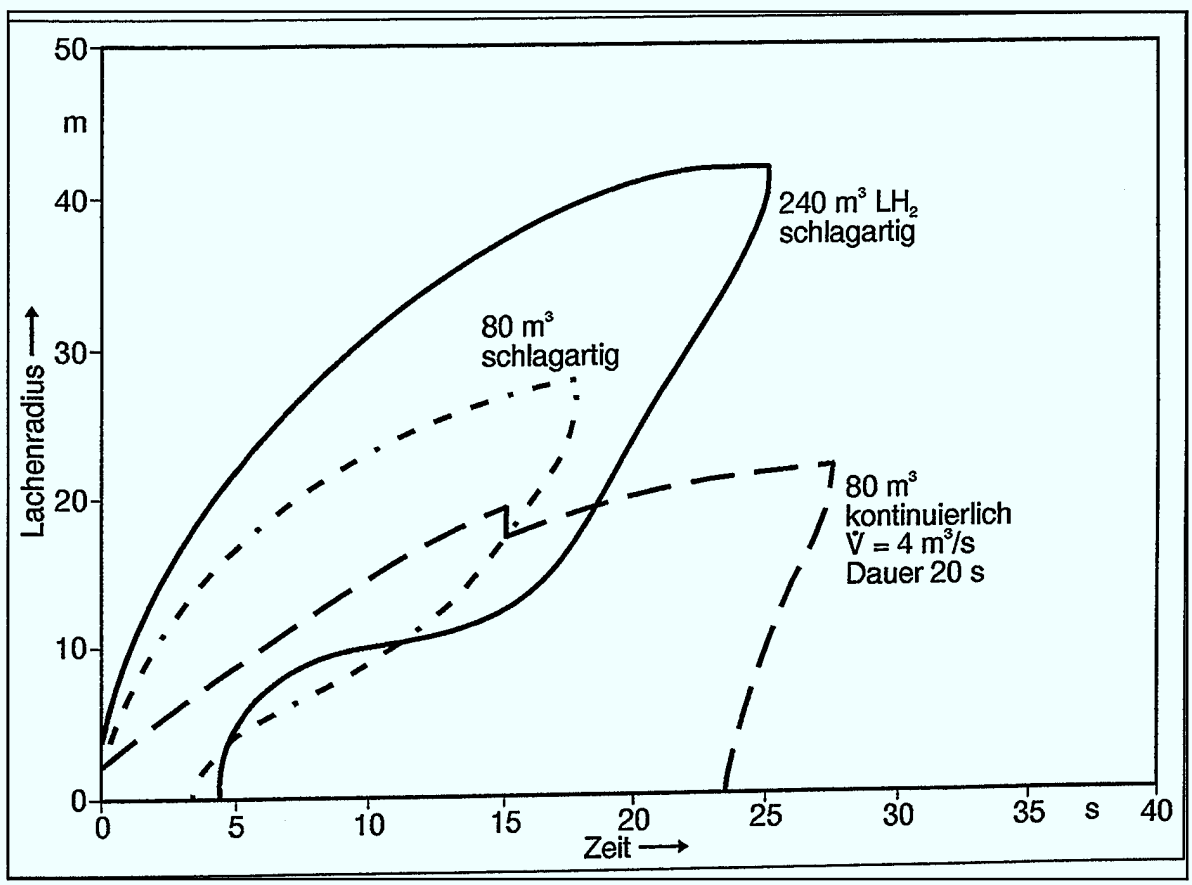


Bild 6.2: LAuV-Rechnung des Lachenradius in Abhängigkeit von der Zeit für die Fälle der schlagartigen Freisetzung von 80 bzw. 240m³ LH_2 und den einer kontinuierlichen Freisetzung von 80m³ LH_2 (Dauer 20s) auf trockenem Beton ($\Delta r=0{,}4m$, $\Delta t=0{,}05s$).

In den im folgenden dargestellten Rechnungen des LAuV-Codes werden LH_2-Freisetzungsmengen in der Größenordnungen der im CRYOPLANE eingebauten Tanks verwendet. Zunächst soll angenommen werden, der Inhalt eines größeren Tanks ($80m^3$) werde über 20s freigesetzt. Zwei weitere Rechnungen gehen von der schlagartigen bzw. kontinuierlichen (20s dauernden) Freisetzung der gesamten $240m^3$ LH_2 aus. Als Untergrund wird Beton (Feuchte 0%) angenommen und die analytische Lösung der Wärmebetrachtung aus dem Untergrund entsprechend Gleichung 4.34 auf Seite 88 verwendet.

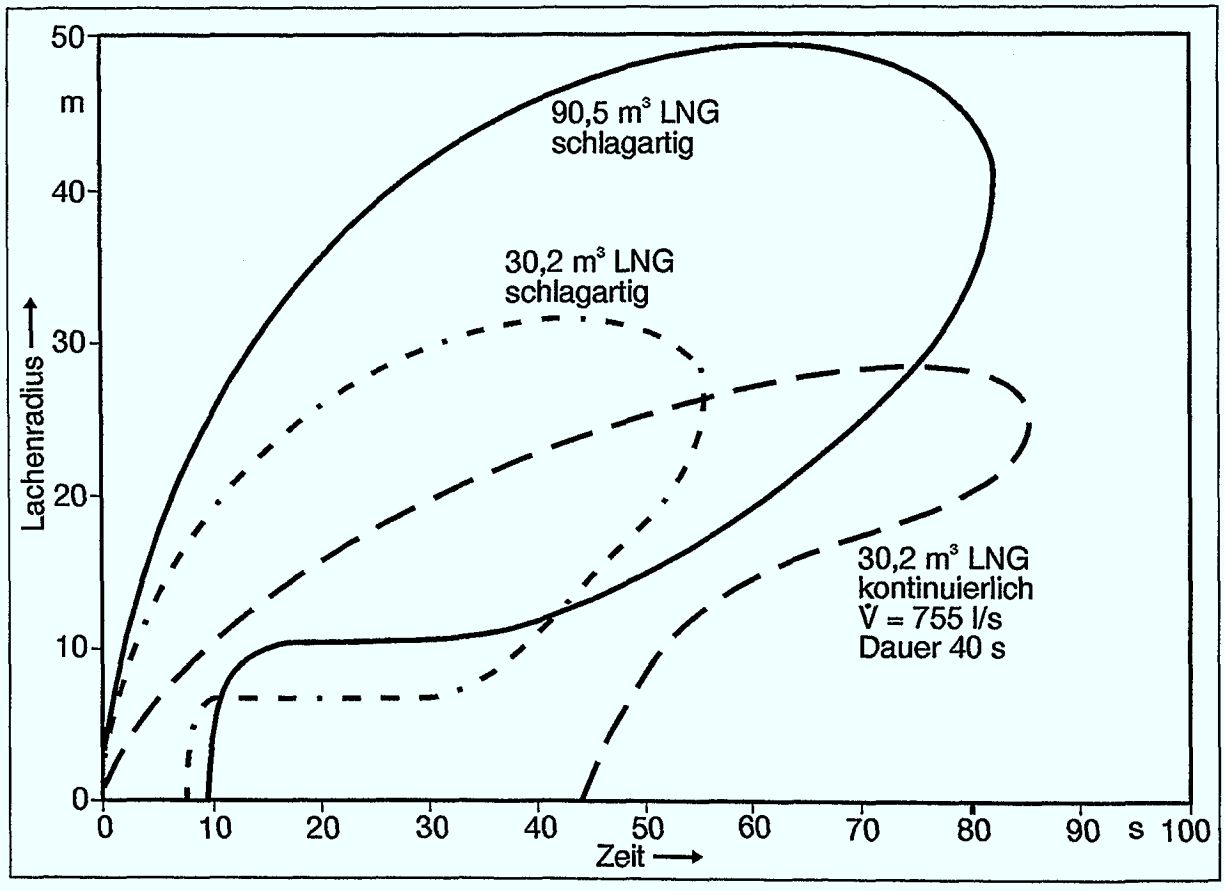


Bild 6.3: LAuV-Rechnung des Lachenradius in Abhängigkeit von der Zeit für die Fälle einer schlagartigen Freisetzung von $90.5m^3$ LNG sowie einer schlagartigen und kontinuierlichen (Dauer 40s) Freisetzung von $30.2\ m^3$ LNG jeweils auf trockenem Beton ($\Delta r=0{,}4m$, $\Delta t=0{,}05s$).

In Bild 6.2 sind die zeitabhängigen Lachenradien verschiedener schlagartiger Freisetzungen bzw. einer kontinuierlichen Freisetzung von LH_2 dargestellt. Die schlagartige Freisetzung der $240m^3$ ($80m^3$) LH_2 führt zu einem maximalen Lachenradius von ca. 42m (27m). Die Zeit bis zur vollständigen Verdampfung beträgt ca. 25s (18s). Die Lache bricht in beiden Fällen bereits

nach ca. 4s in der Mitte auf und bewegt sich im weiteren Verlauf ringförmig vom Freisetzungszentrum weg. Im Vergleich dazu ist der Lachenradius der kontinuierlichen Freisetzungen kleiner, obwohl sich die Dauer bis zur vollständigen Verdampfung nur unwesentlich verlängert (ca. 27s). Auch der maximale Lachenradius unterscheidet sich mit ca. 20m unwesentlich von dem der schlagartigen Freisetzung von 80m³. Die Lache bricht nach ca. 23s in der Mitte auf und bewegt sich dann ringförmig vom Freisetzungszentrum weg.

Zum Vergleich einer Freisetzung von Flüssigwasserstoff mit dem ebenfalls als Flugzeug-Treibstoff einsetzbaren Flüssigerdgas (LNG) wird angenommen, der Energieinhalt im Tank soll für ein Flugzeug mit Wasserstoffantrieb ebenso groß sein, wie für eines mit Erdgasantrieb. So ergibt sich die zum Vergleich für 240 m³ LH_2 heranzuziehende LNG-Menge aus dem Verhältnis der Dichten und Heizwerte beider kryogener Flüssigkeiten

$$V_{LNG} = V_{LH_2} \frac{\rho_{l,LH_2}}{\rho_{l,LNG}} \frac{\Delta H_{u,LH_2}}{\Delta H_{u,LNG}}, \tag{6.1}$$

zu 90.5 m³.

In Bild 6.3 ist die Lachenausbreitung einer schlagartigen Freisetzung von 90.5m³ LNG sowie einer schlagartigen und kontinuierlichen (Dauer 40s) Freisetzung von 30.2 m³ LNG jeweils auf trockenem Beton. Deutlich zu erkennen ist das Aufbrechen der Lache der schlagartigen Freisetzungen bereits nach ca. 7 bzw. 9s. Der sich ausbreitende Ring erreicht einen maximalen Radius von ca. 32m bzw. 50m. Ein interessantes Verhalten der LNG-Lache ist bei den schlagartigen Freisetzungen gegen Ende der Verdampfung (nach ca. 40s bzw. 60s) zu beobachten. Die vordere Lachenkante fällt zurück, der Ring verkleinert sich von beiden Seiten (ähnlich wie nach Beendigung der weiteren Zufuhr kryogener Flüssigkeit bei den kontinuierlichen Freisetzungen).

Die LNG-Lache der kontinuierlichen Freisetzungen mit einer Rate von 755 l/s breitet sich erwartungsgemäß langsamer aus als die einer schlagartigen Freisetzung. Sie bricht nach ca. 45s in der Mitte auf und erreicht ihr Maximum nach ca. 75s. Ein interessantes Ergebnis ist, daß die kontinuierliche Freisetzung zu keiner nennenswerten Verringerung des maximal erreichten Lachenradius führt. Die Zeit bis zur vollständigen Verdampfung verlängert sich jedoch um 30s. Im Gegensatz zur Freisetzung von Flüssigwasserstoff ist kein Übergang vom dynamischen zum viskosen Bereich der Ausbreitung festzustellen. Grund dafür ist die geringere Verdampfungsrate (Gleichung 4.34 auf Seite 88) aufgrund der höheren Siedetemperatur des LNG im Vergleich zum LH_2 und der verschiedenen Verdampfungswärmen.

Diese kurzen Verdampfungszeiten einer Freisetzung von Flüssigwasserstoff und damit kurze Gefährdungszeiten sind für Sicherheitsuntersuchungen ein nicht zu übersehender Vorteil gegenüber anderen konventionellen Treibstoffen, die sich nach einer unfallbedingten Freisetzung langsam verdunstend auf der Oberfläche ausbreiten und so zu einer

langanhaltenden Gefährdung führen. Die entstehenden Gase sind dann u.U. schwerer als die umgebende Luft und können so möglicherweise auch weiter entfernt liegende Zündquellen erreichen. Wasserstoffgas hat im Gegensatz dazu schon wenige Grad über Siedetemperatur Auftrieb gegenüber der umgebenden Luft, wodurch (ohne Wind) eine Ausbreitung der Dampfwolke in Bodennähe kaum zu erwarten ist. Inwieweit die Lachenform (Ring, Hindernisse) einen Einfluß auf die Dispersion ausübt, wird in Zukunft untersucht werden müssen.

6.3. Freisetzung von Flüssigwasserstoff in der Größenordnung des Tankinhaltes eines Tanklastzuges

Der Antrieb von Raketen und Raumfahrzeugen ist die z.Zt. bekannteste großtechnische Anwendung von flüssigem Wasserstoff als Treibstoff. Die Möglichkeit, Wasserstoff zum Transport und zur Speicherung zu verflüssigen, hat durch diese Anwendungen und Erfahrungen an Attraktivität gewonnen, um Volumen und Masse der Behälter zu sparen und damit Kosten zu reduzieren. So war es ein logischer Schritt, daß Gaserzeugungsunternehmen sich die vorhandenen Erfahrungen zunutze macht und ihre Wasserstofftransporte vom Druckgas auf die flüssige Phase umstellt [EWA91].

Neben den bereits erwähnten Anwendern von flüssigem Wasserstoff als Brennstoff existieren weitere in dem Bereich der Metallurgie bzw. dem elektronischen Bereich, die großen Wert auf die Reinheit des Gases legen. Es existiert also heute bereits ein Netz der Flüssigwasserstoffversorgung, welches bei verstärkter Nachfrage entsprechend ausgebaut werden könnte und damit hervorragende Möglichkeiten zur Einführung von Flüssigwasserstoff als alternativen Brennstoff bietet.

Durch die stärkere LH_2-Nutzung vergrößert sich natürlich auch die Wahrscheinlichkeit eines Unfalles, in dessen Verlauf aus einem Transportbehälter flüssiger Wasserstoff austritt. Die dabei auftretenden Vorgänge sind in Kapitel 2.1 beschrieben. Das Versorgungsnetz beruht vor allem auf dem Flüssigwasserstoff-Transport über die Straße direkt zum Verbraucher. Die Versorgung erfolgt hauptsächlich mit Tanklastzügen, die typischerweise Tankinhalte von ca. 40 m^3 LH_2 aufweisen.

Zur Berechnung der Lachenausbreitung mit dem LAuV-Code sollen zwei mögliche Fälle der Freisetzung angenommen werden. Zunächst soll der gesamte Tankinhalt von 40 m^3 LH_2 schlagartig freigesetzt werden. In einer weiteren Rechnung soll der Tankinhalt mit einem konstanten Volumenstrom von 1 m^3/s über 40s freigesetzt werden. Als Untergrund wird Bitumen angenommen und zur Berechnung des Wärmeeintrages in die Lache der eindimensionale Lösungsansatz (Gleichung 4.34 auf Seite 88) verwendet.

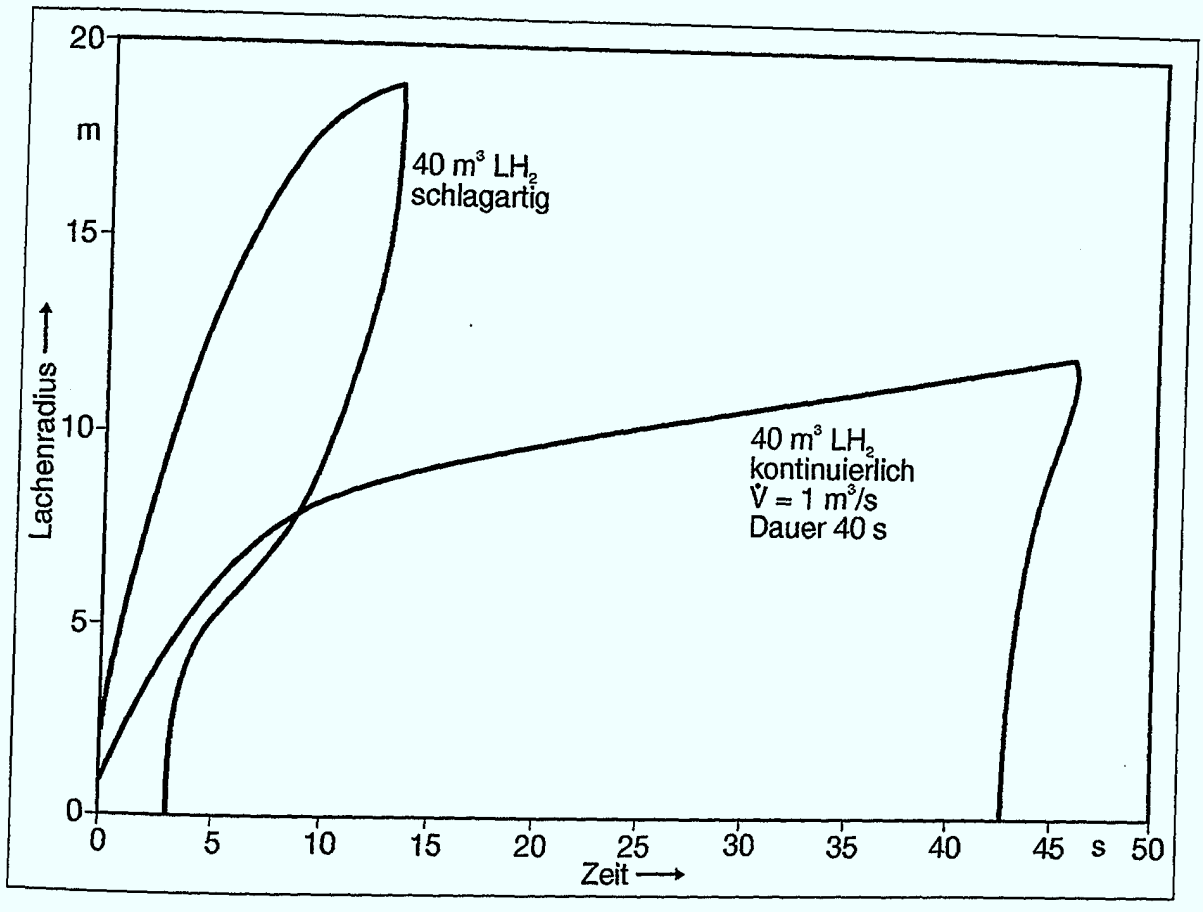


Bild 6.4: LAuV-Rechnung des Lachenradius in Abhängigkeit von der Zeit für die Fälle einer schlagartigen Freisetzung von 40 m³ LH_2 sowie einer kontinuierlichen Freisetzung mit einem Volumenstrom von 1 m³/s LH_2 (Dauer 40s) jeweils auf Bitumen (Δr=0,4m, Δt=0,05s).

Bild 6.4 zeigt die Entwicklung des Lachenradius über der Zeit nach der schlagartigen bzw. kontinuierlichen Freisetzung; Bild 6.5 zeigt das Lachenvolumen über der Zeit der beiden Freisetzungen; Bild 6.6 zeigt die pro Zeiteinheit verdampfte LH_2-Masse über der Zeit jeweils für die beiden vorher beschriebenen Fälle.

Bei kontinuierlicher Freisetzung mit einem Volumenstrom von 1 m³/s LH_2 über 40 s wird nach der LAuV-Rechnung ein Lachenradius von ca. 12 m erreicht, und nach ca. 47 s ist der gesamte LH_2 verdampft. Die aus der Lache pro Zeiteinheit verdampfte Masse erreicht dabei nach ca. 7s ein Maximum von ca. 70,8 kg/s (1 m³/s) LH_2. Anschließend wird die verdampfte Masse wieder geringer und bleibt fortan kleiner als die zugeführte Masse, wodurch sich der Lachenradius vergrößert. Wie bereits erwähnt, ist die kurzzeitige Vergrößerung der Verdampfungsrate durch Ansammlung eines "Überschußvolumens" bedingt, das durch Vergrößerung der Lachenfläche abgeführt wird (Bild 6.6). Die Lachenfläche und die Verdampfungsrate werden dann kleiner und erreichen ein lokales Minimum. Im anschließenden stationären Zustand ist die pro

Zeiteinheit aus der Lache verdampfte Masse geringer als die zugeführte Masse, weil der Wärmeeintrag in die Lache durch die instationäre Wärmeleitung mit der Zeit kleiner wird. Dadurch vergrößert sich der Lachenradius.

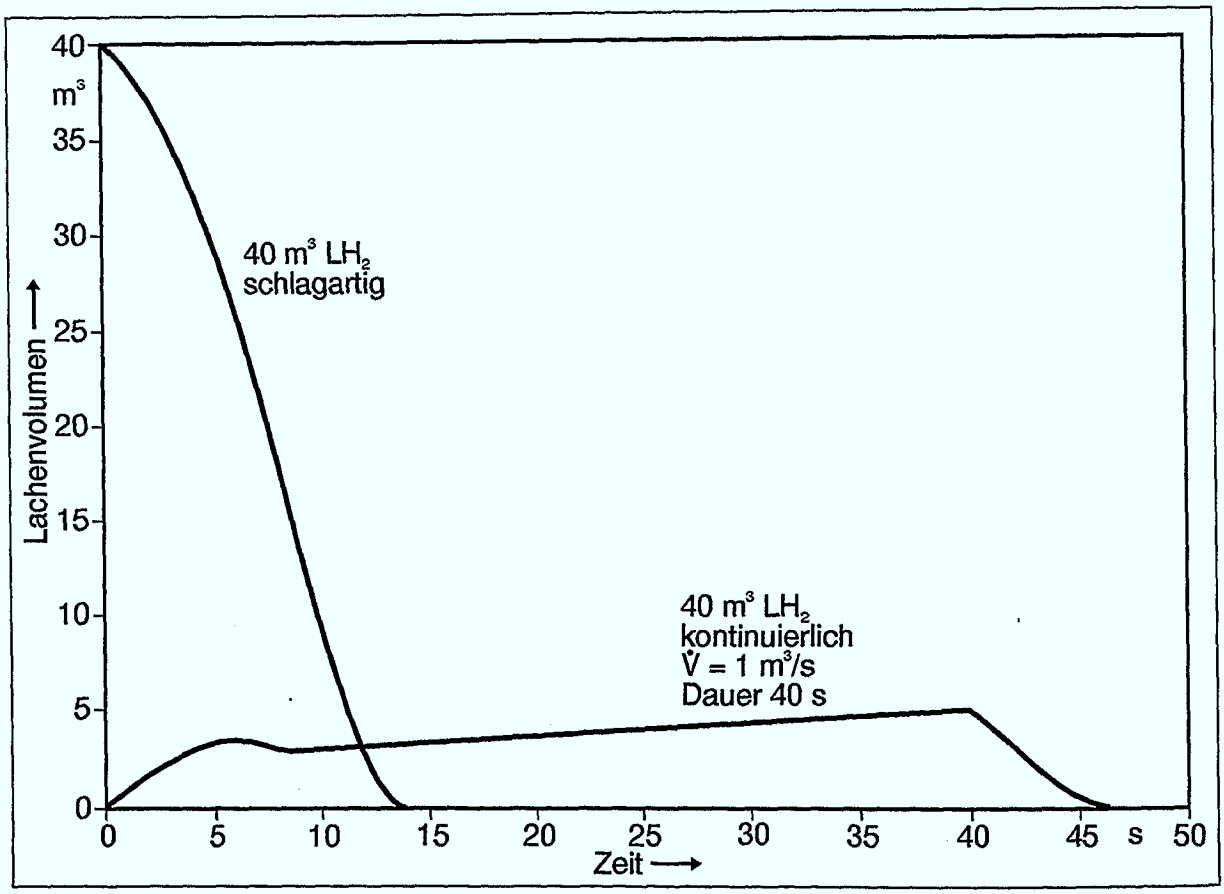


Bild 6.5: LAuV-Rechnung zum Lachenvolumen in Abhängigkeit von der Zeit für die Fälle einer schlagartigen Freisetzung von 40 m³ LH_2 sowie einer kontinuierlichen Freisetzung mit einem Volumenstrom von 1 m³/s LH_2 (Dauer 40s) jeweils auf Bitumen (*Δr=0,4m, Δt=0,05s*).

Wie in Bild 6.4 dargestellt, erreicht die Lache nach der LAuV-Rechnung infolge einer schlagartigen Freisetzung von 40 m³ LH_2 einen Lachenradius kleiner 20m und ist bereits nach ca. 14s vollständig verdampft. Das Lachenvolumen über der Zeit (Bild 6.5) zeigt zu Beginn und gegen Ende der Verdampfung eine verzögerte Volumenabnahme. Die aus der Lache pro Zeiteinheit verdampfte Masse (Bild 6.6) zeigt ein ausgeprägtes Maximum nach ca. 10s. Es wird ein Maximalwert von ca. 300 kg/s (4,2 m³/s) LH_2 erreicht.

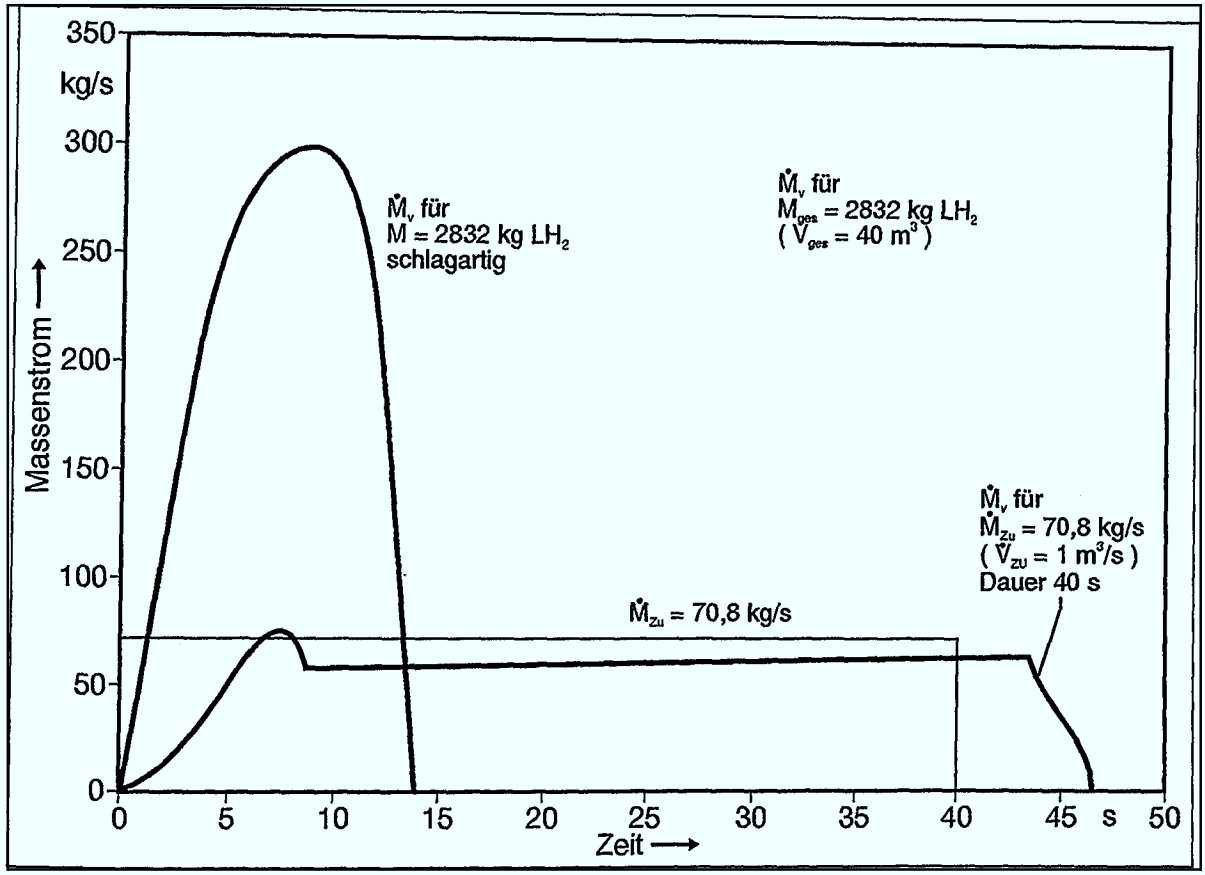


Bild 6.6: LAuV-Rechnung zur pro Zeiteinheit verdampften LH_2-Masse in Abhängigkeit von der Zeit für die Fälle einer schlagartigen Freisetzung von 40 m^3 LH_2 sowie einer kontinuierlichen Freisetzung mit einem Volumenstrom von 1 m^3/s LH_2 (Dauer 40s) jeweils auf Bitumen (Δr=0,4m, Δt=0,05s).

7. Zusammenfassung und Ausblick

Um die Risiken in Verbindung mit einem künftigen großtechnischen Einsatz von flüssigem Wasserstoff als Energieträger abschätzen zu können, ist es erforderlich, die sicherheitstechnischen Eigenschaften von flüssigem Wasserstoff zu kennen und das Verhalten bei einer unfallbedingten Freisetzung vorauszusehen. Simulationsrechnungen sind ein Instrumentarium solcher Sicherheitsanalysen. In dieser Arbeit wurde der Ausbreitungscode LAuV, der die Lachenausbreitung und Verdampfung von kryogenen Flüssigkeiten simuliert, entwickelt. Um den Rechencode zu verifizieren, wurden Experimente mit verschiedenen kryogenen Flüssigkeiten durchgeführt. Wegen der großen Gefahren bei Experimenten mit flüssigem Wasserstoff war es zweckmäßig, für Untersuchungen des Ausbreitungsverhaltens zunächst flüssigen Stickstoff zu verwenden.

Der Wärmeeintrag aus dem Untergrund ist die Hauptwärmequelle der Verdampfung. Daher wurden Verdampfungsexperimente mit flüssigem Stickstoff (LN_2) über isolierten Probenkörpern (Bitumen und trockenem sowie feuchtem Beton) durchgeführt, wobei der Einfluß des Wärmeeintrages aus dem Untergrund auf die Verdampfung untersucht wurde. Es zeigte sich erwartungsgemäß, daß die Verdampfungsrate über trockenem Beton und Bitumen zunächst groß ist und mit der Zeit abnimmt. Bei feuchtem Beton ergab sich ein anderes Verhalten derart, daß die Verdampfungsrate zunächst niedrig war, größer und anschließend wieder kleiner wurde. Die Verdampfungsdauer reduzierte sich gegenüber Versuchen auf trockenem Beton mit ansonsten gleichen Randbedingungen um ca. 30%. Ursache hierfür ist das Freiwerden der Erstarrungsenthalpie des im Untergrund enthaltenen Wassers der oberflächennahen Schichten.

Getrennt von diesen Verdampfungsexperimenten wurden Ausbreitungsversuche mit LN_2 durchgeführt. Eigens für diese Untersuchungen wurde das Experiment KIWI (**Ki**ppvorrichtung zur Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von flüssigem Stickstoff über **W**asser bei **i**nstationären Bedingungen) konstruiert. Die Grundfläche der KIWI stellt einen 60°-Kreisausschnitt mit begradigter Rückwand dar. Die Länge einer Seite beträgt ca. 12 m. Die Wassertiefe beträgt 0,5 m. Die Messung der Lachenausbreitung erfolgt über 43 an der Wasseroberfläche installierte Thermoelemente. Mit KIWI ist eine systematische Untersuchung von schlagartigen und kontinuierlichen LN_2-Freisetzungen möglich. Es wurden insgesamt 40 Versuche mit schlagartiger (Anfangsmengen 20 bis 80 l LN_2) und kontinuierlicher (Freisetzungsraten von 1 bis 2,5 l/s) Freisetzung unternommen. Die dabei gemessenen Lachenradien lagen im Bereich von 2 bis 6 m. Es zeigte sich, daß der Wind einen Einfluß auf die Form der Lache ausübt. Am Ende der Versuche war Eis auf der Wasseroberfläche sichtbar,

das je nach Art der Freisetzung (schlagartig/kontinuierlich) und Dauer der Verdampfung an der Oberfläche unterschiedliche Strukturen aufzeigt.

Es bot sich die Möglichkeit, in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung (BAM) und Battelle Ingenieurtechnik Experimente mit kontinuierlicher Freisetzung von Flüssigwasserstoff durchzuführen. In einer Gasse zwischen zwei Gebäuden (Abstand ca. 24m) einer verlassenen Kaserne in Lieberose/Cottbus wurde Flüssigwasserstoff mit einem Volumenstrom von 4,5-6 l/s LH_2 über Wasser und festem Untergrund (Aluminium) freigesetzt. Von den insgesamt sechs durchgeführten Experimenten wurde bei vier Versuchen die Ausbreitung des flüssigen Wasserstoffs gemessen. Bei der Ausbreitung auf Wasser entwickelte sich bei einer Freisetzungsrate von ca. 5 l/s eine Lache von ca. 0,6m Radius. Es lag nach Versuchsende eine zusammenhängende Eisschicht vor. Bei Ausbreitung auf Aluminium mit einer Freisetzungsrate von ca. 6 l/s wurde ein Lachenradius von ca. 0,4m gemessen.

Zur Simulation der Ausbreitung einer kryogenen Flüssigkeit wurde der Computercode LAuV (Lachen-Ausbreitung und Verdampfung) entwickelt. LAuV basiert auf den sogenannten "Shallow Layer" Gleichungen, einem Differentialgleichungssystem, das mit Hilfe des Finite-Differenzen-Lösungsverfahrens numerisch gelöst wird. Mit dem LAuV-Code können schlagartige und kontinuierliche Freisetzungen (auch transiente Freisetzungsraten sind möglich) von Flüssigwasserstoff (LH_2), Flüssigerdgas (LNG) und Flüssigstickstoff (LN_2) simuliert werden. Er beinhaltet optional eine einfache analytische Lösung der instationären Wärmeleitgleichung für den Wärmestrom aus dem Untergrund, mit der eine schnelle Berechnung möglich ist, und ein Modell auf Basis der Finite-Differenzen-Lösung der instationären Wärmeleitgleichung, das die hydrodynamischen Effekte an der Oberfläche und den Einfluß der Feuchte im Untergrund auf die Verdampfungsrate berücksichtigt. Bei Ausbreitungsrechnungen auf Wasser kann optional ein konstanter Wärmeeintrag in die Lache angenommen werden, was durch eine gute Übereinstimmung zu experimentellen Ergebnissen für Zeiten kleiner 50s zulässig ist oder eine zeit- und ortsabhängige Verdampfungsrate, die durch die entsprechenden Korrelationen des Film- und Blasensiedens bestimmt wird. Bei Verwendung letzterer wird Eisbildung und -wachstum im Wasser simuliert. LAuV ist der bislang einzige bekannte Code auf Basis der Shallow-Layer-Gleichungen, der erfolgreich auf die Lachenausbreitung von Flüssigwasserstoff angewendet werden konnte.

Mit dem neuentwickelten LAuV-Code wurden eine große Anzahl von Rechnungen und ein Vergleich zu anderen Rechencodes der Lachenausbreitung durchgeführt. Auf diese Weise konnten bei einer kontinuierlichen Freisetzung über festem Untergrund die bei Anwendung des britischen GASP-Codes beobachteten verschiedenen "Phasen" einer Lachenausbreitung bestätigt werden. Auch ein Vergleich der Ergebnisse von LAuV mit dem Brewer'schen Modell wurde durchgeführt. Die Validierung von LAuV für Flüssigwasserstoff und Flüssigstickstoff erfolgt anhand der eigenen Experimente, für Flüssigerdgas anhand der Nachrechnung von

Experimenten aus der Literatur [MOO86]. Die durchgeführten Verdampfungsversuche mit Flüssigstickstoff über Bitumen und Beton (trocken und feucht) wurden zur Validierung des in LAuV enthaltenen Teilmodells des Wärmestroms durch die Oberfläche benutzt. Insgesamt zeigt LAuV eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten.

Vorausrechnungen zur Freisetzung von Flüssigwasserstoff über verschiedenen Untergründen sollen der Abschätzung des Gefährdungspotentials in verschiedenen Projekten dienen. Bislang liegen in der Literatur kaum entsprechende Rechnungen vor, so daß statt dessen häufig auf die Ergebnisse von [BRW81] zurückgegriffen worden ist. Für das Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project wurde die Lachenausbreitung nach einer schlagartigen und kontinuierlichen Freisetzung von 3000m³ LH_2 über Wasser berechnet. Der maximale Lachenradius der schlagartigen/kontinuierlichen Freisetzung liegt bei ca. 125m/80m und die Verdampfungszeit bei ca. 55s/80s. Für die Größenordnung des Tankinhaltes des Projektes CRYOPLANE der Deutschen Aerospace Airbus GmbH wurde die schlagartige Freisetzung des gesamten LH_2-Vorrates von 240m³ bzw. die schlagartige und kontinuierliche Freisetzung von 80m³ aus dem größeren der insgesamt vier Tanks über einem Betonuntergrund ohne Feuchte berechnet. Als maximaler Lachenradius bei der schlagartigen Freisetzung von 80m³ wird 30m und für die Verdampfungszeit 24s vorhergesagt. Weiter wurde die schlagartige und kontinuierliche Freisetzung von 40 m³ LH_2 auf Bitumen berechnet. Dies ist in etwa das LH_2-Volumen eines vollbeladenen Tanklastzuges [EWA91]. Es wurde angenommen, der gesamte Inhalt werde schlagartig bzw. kontinuierlich freigesetzt. Der Lachenradius nach einer schlagartigen Freisetzung erreicht max. ca. 19 m und die Zeit bis zur vollständigen Verdampfung beträgt ca. 14 s. Bei einer kontinuierlichen Freisetzung mit einem freigesetzten Volumenstrom von 1 m³/s LH_2 erreicht die Lache einen Radius von ca. 12m, sie ist nach 47s vollständig verdampft. Damit wurden erstmalig Rechnungen vorgestellt, welche die Ausbreitung und Verdampfung von Flüssigwasserstoff mit Mengen im großtechnischen Maßstab vorhersagen.

In Fortführung dieser analytischen und experimentellen Arbeiten ist vorgesehen, den LAuV-Rechencode mit dem POLLUT-Rechencode zur atmosphärischen Dispersion zu koppeln und im folgenden auch die Zündung der Gaswolke mit einzubeziehen. Damit wäre es dann möglich, ein Freisetzungs-Szenario für eine kryogene Flüssigkeit (Quelle, Dispersion und evtl. Explosion) mit realistischen Randbedingungen zu beschreiben.

8. Literaturverzeichnis

[ADL60] Arthur D. Little Inc., "Final Report on an Investigation of Hazards Associated with the Storage and Handling of Liquid Hydrogen", Report C-61092, Cambridge, USA, 1960

[ALP85] Alp E., "Cobra: An LNG model", Heavy Gas Workshop, Toronto, 20.-30.1.1985, Proceedings, Ed. Portelli R.V., Downsview, Concord Scientific Corp., S.76-92, 1985

[BAM94] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, "Sicherheitsrelevante Ausrüstung und Versorgung wasserstoffgetriebener Verkehrsflugzeuge", Studie für das Projekt CRYOPLANE im Auftrag der Deutschen Aerospace Airbus GmbH, Berlin, 1994

[BEH93A] Behrend E., Jaenicke B., Krafka H., Schmidtchen U., "Folgenschwere Explosion", Bericht über Ursachen und Hergang des Berstens eines Wasserstofftanks in Hanau - Teil 1, Technische Überwachung, TÜ Düsseldorf, Vol. 34, Nr. 4, S.176-179, 1993

[BEH93B] Behrend E., Jaenicke B., Krafka H., Schmidtchen U., "Folgenschwere Explosion", Bericht über Ursachen und Hergang des Berstens eines Wasserstofftanks in Hanau - Teil 2, Technische Überwachung, TÜ Düsseldorf, Vol. 34, Nr. 5, S.225-229, 1993

[BLA82] Blackmore D.R., Eyre J.A., Summers G.G., "Dispersion and Combustion Behaviour of Gas Clouds Resulting from Large Spillages of LNG and LPG on the Sea", Transactions of the Institute of Marine Engineers (TM),Vol.94, Nr.29, 1982

[BOC90] Bockris J., "Wasserstoff, Energie für alle Zeiten", Konzept einer Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft, Augustus Verlag, Augsburg, 1990

[BOE92] Böke J., Hartwig S., "Einsatz von Schäumen zur Konsequenzminderung bei Störfällen mit tiefkalten Flüssigkeiten", Tagungsbericht des IV. Symposiums Schwere Gase und Sicherheitsanalyse, Bonn, 1992

[BON94] Bongartz R., Dienhart B., Marx J., Stauch B., Verfondern K., "Selected Aspects of a Safety Analysis in a Hydrogen Energy Economy", Proc. 10th World Hydrogen Energy Conference, Cocoa Beach, Fl, USA, 1994

[BOY73] Boyle G.J., Kneebone A., "Laboratory Investigations into the Characteristics of LNG Spills on Water; Evaporation, Spreading and Vapour Dispersion", Shell Research Ltd, Thornton Research Centre, Chester, 1973

[BRA83A] Brandeis J., Kansa E.J., "Numerical Simulation of Liquefied Fuel Spills: I. Instantaneous Release into Confined Area", Int. Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol.3, P.333-345, 1983

[BRA83B] Brandeis J., Ermak D.L., "Numerical Simulation of Liquefied Fuel Spills: II. Instantaneous and Continuous LNG Spills on an Unconfined Water Surface", Int. Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol.3, P.347-361, 1983

[BRM95] Brämer A., "Experimentelle Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von flüssigem Stickstoff auf einer Wasseroberfläche", Diplomarbeit, FH Aachen, Abt. Jülich, 1995

[BRN65] Brentari E.G., Giarratano P.J., Smith R.V., "Boiling Heat Transfer for Oxygen, Nitrogen, Hydrogen and Helium", US Department of Commerce, National Bureau of Standards, Technical Note Nr.317, US Government Printing Office, Washington DC, 1965

[BRW81] Brewer G.D., Wittlin G., Vershaw E.F., Parmley E.F., Cima K., Walther E.G., "Assessment of Crash Fire Hazard of LH_2-Fueled Aircraft", Final Report NASA-CR-165525, Lewis Research Center, Cleveland Ohio, USA, 1981

[BUR70A] Burgess D.S., Murphy J.N., Zabetakis M.G., "Hazards of LNG Spillage in Marine Transportation", SRC Report Nr. S-4105, US Dept. of Interior, Bureau of Mines, 1970

[BUR70B] Burgess D.S., Murphy JN, Zabetakis M.G., "Hazards Associated with the Spillage of Liquefied Natural Gas on Water", Report Nr. 7448, US Dept. of Interior, Bureau of Mines, 1970

[BUR72A] Burgess D., Biordi J., Murphy J., "Hazards of Spillage of LNG into Water", PMSRC Report Nr. 4177, US Department of the Interior, Bureau of Mines, Pittsburgh, Pennsylvania, 1972

[BUR72B] Burgess D.S., Murphy J.N., Zabetakis M.G., "Hazards Associated with the Spillage of Liquefied Natural Gas on Water", Bureau of Mines, US Department of the Interior, Pittsburgh, Pennsylvania, 1972

[CAR81] McCarty R.D., Hord J., Roder H.M., "Selected Properties of Hydrogen", U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Center for Chemical Engineering, Boulder, Colorado, USA, 1981

[CAS60] Cassut L.H., Maddocks F.E., Sawyer W.A., "A Study of the Hazards in the Storage and Handling of Liquid Hydrogen", Advanced Cryogenic Engineering, Plenum Press, New York, Vol.5, S.55-61, 1960

[CHG82] Chang H.R., Reid R.C., "Spreading-Boiling Model for Instantaneous Spills of Liquefied Petroleum Gas (LPG) on Water", Journal of Hazardous Materials, Vol.7, S.19-35, 1982

[CHI86] Chirivella J.E., Witcofski R.D., "Experimental Results from Fast 1500-Gallon LH_2 Spills", aus: "Cryogenic Properties, Processes and Applications", American Inst. of Chem Eng., Symp. Series, Vol.82, Nr.251, 1986

[CHN92] Chan S.T., "Numerical Simulations of LNG Vapor Dispersion from a Fenced Storage Area", Journal of Hazardous Materials, Vol.30, S.195-224, 1992

[CLE83] Clewell III H.J., "A Simple Formula for Estimating Source Strengths from Spills of Toxic Liquids", USAF Report ESL-TR-83-03, 1983

[COL80] Colenbrander G.W., Puttock J.S., "Maplin Sands Experiments 1980: Interpretation and Modelling of Liquefied Gas Spills onto the Sea", International Union of Theoretical and Applied Mechanics, Proc. IUTAM Symp. on Atmospheric Dispersion of Heavy Gases, S.277-295, 1980

[COL82] Colenbrander G.W., Puttock J.S., Blackmore D.R., "Field Experiments on Dense Gas Dispersion", Journal of Hazardous Materials, Vol.6, S.13-41, 1982

[CRE89] McCready D., Foster J., "Estimating Spill Quantities and Emissions", Air and Waste Management Association A&WMA, 82nd. Annual Meeting, Anaheim, USA, Vol.4, S.1-14, 1989

[CSL59] Carslaw H.S., Jaeger J.C., "Conduction of Heat in Solids", Clarendon Press, Oxford, 1959

[DAA92] Deutsche Aerospace Airbus, "Cryoplane, Deutsch-Russisches Gemeinschafts-projekt zum Einsatz kryogener Treibstoffe in der zivilen Luftfahrt", Deutsche Aerospace Airbus EZI-75/92 - 02.12.92, Report, 1992

[DIN77] Dincer A.K., Drake E.M., Reid R.C., "Boiling of Liquid Nitrogen and Methane on Water - the Effect of Initial Water Temperature", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.20, S.176-177, 1977

[DOD83] Dodge F.T., Park J.T., Buckingham J.C., Magott R.J., "Revision and Experimental Verification of the Hazard Assessment Computer System Models for Spreading, Movement, Dissolution and Dissipation of Unsoluble Chemicals Spilled onto Water", US Coast Guard Report CG-D-35-83, 1983

[DRA75A] Drake E.M., Jeje A.A., Reid R.C., "Transient Boiling of Liquefied Cryogens on a Water Surface - I. Nitrogen, Methane, Ethane", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.18, S.1361-1375, 1975

[DRA75B] Drake E.M., Reid R.C., "How LNG Boils on Soils", Hydrocarbon Processing, S.191-194, 1975

[DUF74] Duffy A.R., Gideon D.N., Putnam A.A., "Dispersion and Radiation Experiments", American Gas Association, Project IS-3-1. LNG Safety Program, Interim Report on Phase II Work, 1974

[EIC92] Eichert H. et. al., "Gefährdungspotential bei einem verstärkten Wasserstoffeinsatz", Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, 1992

[ERM82] Ermak D.L., et.al., "Results of 40 m^3 LNG Spills onto Water", Proc. 2nd Symposium on Heavy Gases and Risk Assessment, Frankfurt, S.163-179, 1982

[EQP91] "Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot-Project", Phase II, 1991

[EWA91] "Liquid Hydrogen Fuelled Automobiles: On-Board and Stationary Cryogenic Installations", Messer Griesheim GmbH, Sachnummer 0.812.836, Ausgabe 9041/II, 1991

[FAR90] McFarlane K., Prothero A., Puttock P.T., Roberts P.T., Witlox H.W.M., "Development and Validation of Atmospheric Dispersion Models for Ideal Gases and Hydrogen-Fluoride, Part I: Technical reference manual", Shell Research Limited, Thornton Research Centre, Chester, England, 1990

[FAY73] Fay J.A., "Unusual Fire Hazard of LNG Tanker Spills", Combustion Science and Technology, Vol.7, New York, S.47-49, 1973

[FAY78] Fay J.A., "A Preliminary Analysis of the Effect of Spill Size on the Level of Hazard from LNG-Spills on Land and Water", An Approach to LNG Safety and Environment Control Research, Department of Energy, Washington DC, Report DOE/EV-0002, 1978

[FEL72] Feldbauer G.F., Heigl J.J., Mc Queen W., Whipp R.H., May W.G., "Spills of LNG on Water - Vaporization & Downwind Drift of Combustible Mixtures", Esso Research & Engineering Company, Report EE61E-72, 1972

[FIS85] Fischer M., "Safety Aspects in Hydrogen Energy Systems", International Symposium on Hydrogen Systems, Held at Beijing/China, May 7-11, S.491-506, 1985

[FLE80] Fleischer M.T., "Spills: An Evaporation/Air Dispersion Model for Chemical Spills on Land", Shell Dev. Center, West Hollow Res. Center, Houston, TX, 1980

[GEO79] Georgakis C., Congalidis J., Williams G.C., "Model for Non-Instantaneous LNG and Gasoline Spills", Fuel, Vol.58, February, S.113-120, 1979

[GIA93] Giacomazzi G., Gretz J., "Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHHPP): A Challenge to Cryogenic Technology", Cryogenics, 33, Nr. 8, S.767-771, 1993

[GID74] Gideon D.N., Putnam A.A., Bearint D.E., Duffy A.R., "Report on LNG Vapor Dispersion in Weather Inversions", American Gas Association, Project IS-3-3 Battelle, Columbus Laboratories, 1974

[HAR86] Hartwig S. (Ed.), Schnatz G., "Die Quellkonfiguration einer Schwergaswolke", aus "Schwere Gase - Modelle, Experimente und Risikoanalyse", im Auftrag des Battelle-Inst. (Frankfurt), Springer Verlag, 1986

[HAV77] Havens J.A., "Predictability of LNG Vapor Dispersion from Catastrophic Spills onto Water: An Assessment", Department of Transportation, Coast Guard, Cargo and Hazardous Materials Division, 1977

[HIC92] Hicken E.F., "Zusammenfassende Bewertung der BMFT-geförderten Wasserstoff-Forschung", Presentation at the Project´s Committee Meeting, Held at Köln, May 18-19, 1992

[HOD76] Hord J., "Is Hydrogen Safe?",NBS Technical Note 690, Boulder, CO, USA, 1976

[HOR75] Horvath A.L., "Physical Properties of Inorganic Compounds", Edward Arnold (Publishers) Limited, London, 1975

[HOU72] Hoult D.P., "Oil Spreading on the Sea", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.4, S.341-368, 1972

[HPC89] Hewlett-Packard Company, "HP3852 Data Acquisition and Control System", Technical Data Report, 1989

[HUM72] Humbert-Basset R., Montet A., " Dispersion dans l'Atmosphere d'un Nuage Gazeux form par Epandage de GNL sur le Sol", Third International Conference on Liquefied Natural Gas, Washington DC, 1972

[HUT91] Hutny W.P., Lee G.K., "Improved Radiative Heat Transfer from Hydrogen Flames", Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol.16, Nr.1, S.47-53, 1991

[ILL78] Ille G., Springer C., "The Evaporation and Dispersion of Hydrazine Propellants from Ground Spills", USAF, Civil and Environmental Development Office, CEEDO-TR-78-30, AD A059407, 1978

[JEJ74] Jeje A.A., Reid R.C., "Boiling of Liquefied Hydrocarbons on Water", Proc. 3rd Conference on Natural Gas Research and Technology, Session VI, Paper I, Dallas, USA, 1974

[JEN83] Jensen N.O., "On Cryogenic Liquid Pool Evaporation", Journal of Hazardous Materials, Nr.8, S.157-163, 1983

[KNE74] Kneebone A., Prew, L.R., "Shipboard Jettison Tests of LNG onto the Sea", Proc. 4th Int. Conference on LNG, held at Alger, June 24-27, Session V, Paper 5, 1974

[KOM80] Kommission der Europäischen Gemeinschaft, "Sicherheitsaspekte einer zukünftigen europäischen H_2-Technologie", 1980

[KOO79] Koopman R.P., Bowman B.R., Ermak D.L., "Data and Calculations of Dispersion on 5m³ LNG Spill Tests", Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-52876, 1979

[KOO80] Koopman R.P., "Experimental Plan for 40m³ Liquefied Natural Gas (LNG) Dispersion Tests", Lawrence Livermore National Laboratory, UCID-18585, Report, 1980

[KOO82] Koopman R.P., Cederwall R.T., Ermak D.L., Goldwire H.C., et.al., "Analysis of Burro Series 40m³ LNG Spill Experiments", Journal of Hazardous Materials, Vol.6, S.42-83, 1982

[KUN83] Kunkel B.A., "A Comparison of Evaporative Source Strength Models for Toxic Chemical Spills", US Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, USA, AFGL-TR-83-0307, 1983

[LIN74] Lind C.D., "Explosion Hazards Associated with Spills of Large Quantities of Hazardous Materials. Phase I", Department of the Navy, Naval Weapons Center, Report Nr. CG-D-30-75, China Lake, USA, 1974

[LOD89] Lodhi M.A., Mires R.W., "How Safe is the Storage of Liquid Hydrogen?", Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol.14, Nr.1, S.35-43, 1989

[LVS90] Løvås G., "Investigation of Risk from Ship Transport of Liquid Hydrogen on a Waterway", Diploma Thesis, Forschungszentrum Jülich, 1990

[MAN88] Mañas J.L., "BLEVEs - Their Nature and Prevention", Fire International, 8, Nr. 87, S.27-39, 1988

[MAR94] Marinescu-Pasoi L., Sturm B., "Messung der Ausbreitung einer Wasserstoff- und Propanwolke in bebautem Gelände und gasspezifische Ausbreitungsversuche", Abschlußbericht, Battelle Ingenieurtechnik GmbH, Eschborn, 1994

[MAY75] May W.G., Perumal P.V.K., "The Spreading and Evaporation of LNG on Water", American Society of Mechanical Engineers, Doc.-Nr. 74-WA/PID-15, 1975

[MOB95] Mobers D., Gernhardt D., Skiba M., Mohr M., Unger H., "Solarenergienutzung in Nordrhein-Westfalen - Beitrag Passiver Solarer Gewinne zur Deckung des Raumwärmebedarfs", Heiz., Lüft./Klima, Haustechnik, Bd. 46, Nr.2, S.72-77, 1995

[MOO86] Moorhouse J., Carpenter R.J., "Factors Affecting Vapour Evolution Rates from Liquefied Gas Spills", British Gas, Midlands Research Station, MRS E 460, Symposium on Refinement of Estimates of the Consequences of Heavy Toxic Vapour Release, Institution of Chemical Engineers, North Western Branch, UMIST, Manchester, 1986

[MUS94] Mussa S., Tromm W., "Rechnungen mit dem Computer Code IVA3 zur Fragmentation heißer Metall- und Oxidschmelzen", Institut für Angewandte Thermo- und Fluiddynamik, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Report 5273, 1994

[OPS77] Opschoor G., "Investigations into the Spreading and Evaporation of LNG Spilled on Water", Cryogenics Nov., 1977

[OPS80] Opschoor G., "The Spreading and Evaporation of LNG and Burning LNG Spills on Water", Journal of Hazardous Materials, Vol.3, S.249-266, 1980

[OTT75] Otterman B., "Analysis of Large LNG Spills on Water", Part 1: Liquid Spread and Evaporation, Cryogenics, S.455-460, 1975

[PAI86] Paine R.J., Pleim J.E., Heimhold D.W., Egan B.A., "Physical Process in the Release and Dispersion of Toxic Air Contaminants", Paper 86-76.3, 79th Annual Meeting of Air Pollution Control Association, Minneapolis, USA, 1986

[PAR80] Parnarouskis M.C., Lind C.D., Raj P.P.K., Cece J.M., "Vapour Cloud Explosion Study", VI th International Conference of Liquefied Natural Gas, Vol.II, Paper 12, 1980

[PEH94] Pehr K., "Aspects of Safety and Acceptance of LH_2 Tank Systems in Passenger Cars", Proc. 10th World Hydrogen Energy Conference, Cocoa Beach, Fl, USA, 1994

[PER94] Perdikaris G.A., "Dreidimensionale Ausbreitung von Gasen in Gebieten komplexer Topographie", Dissertation, Technische Universität München, 1994

[PIT93] Pitsch S., "Untersuchung der Verdampfung von flüssigem Stickstoff bei Kontakt mit verschiedenen auf Umgebungstemperatur befindlichen Untergründen", Diplomarbeit, FH Aachen, Abt. Jülich, 1993

[POR76] Porteous W., Reid R., "Light Hydrocarbon Vapor Explosions", Chem. Eng. Progr., 72, 1976

[PRI85] Prince A.J., "Details and Results of Spill Experiments of Cryogenic Liquids onto Land and Water", UKAEA, Safety and Reliability Directorate (SRD), UK, Report SRD-R 324, 1985

[PUL92] Pültz G., "Mischungs- und Ausbreitungsvorgänge im Nahbereich von Rauchgas-Emittenten", Dissertation, Technische Universität München, 1992

[RAJ74] Raj P.P.K., Kalelkar A.S., "Assessment Models in Support of the Hazard", Assessment Handbook, Arthur D. Little Company, 1974

[RAJ75] Raj P., Atallah S., "Thermal Radiation from LNG Spill Fires", Advances in Cryogenic Engineering, Nr.20, S.143-150, 1975

[RAJ79] Raj P.P.K., "A Criterion for Classifying Accidental Liquid Spills into Instantaneous and Continuous Types", Combustion Science Technology 19, S.251-254, 1979

[RAJ81] Raj P.P.K., "Models for Cryogenic Liquid Spill Behaviour on Land and Water", Journal of Hazardous Materials, Nr.5, S.111-130, 1981

[RCH93] Reichhardt G., "Wasserstoffexplosion im Werk der Firma Heraeus Quarzglas GmbH, Hanau", VGB Kraftwerkstechnik 73, Heft 8, S. 716-721, 1993

[REI78A] Reid R.C. Smith K.A., "Confined Boiling Rates of Liquefied Petroleum Gas on Water", Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, Report EE-77-S-02-4548, HCP/P4548-01, 1978

[REI78B] Reid R.C., Wang R., "The Boiling Rates of LNG on Typical Dike Floor Materials", Cryogenics, S.401-404, 1978

[REI78C] Reid R.C., Smith K.A., "Behaviour of LPG on Water", Hydrocarbon Processing, S.117-121, 1978

[REI80] Reid R.C., "Boiling of LNG on Typical Dike Floor Materials", Gas Research Institute, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, Report GRI-79/0026, 1980

[RUF88] Ruff M., Zumsteg F., Fanneløp T.K., "Water Content and Energy Balance for Gas Cloud Emanating from a Cryogenic Spill", Department of Mechanical Engineering, ETH Zürich, Switzerland, 1988

[SAI93] Sainson J., Gabillard M., Williams T., "Propagation of Vapor Explosions in a Stratified Geometry, Experiments with Liquid Nitrogen and Water", Gaz de France (Nantes), Gas Research Institute (Chicago, IL, USA), Conference Paper, 1993

[SKR87] Schecker H.G., Lebuser U., "Verdampfung von Flüssigkeiten aus offenen Lachen unter Windeinfluß, BMFT FB Schlußbericht, Förderungskennzeichen 01 RG 83012, 1987

[SCH94] Schmidtchen U., Marinescu L., Verfondern K., Nickel V., Sturm B., Dienhart B., "Simulation of Accidential Spills of Cryogenic Hydrogen in a Residential Area", Cryogenics (34), Proc. 15th International Cryogenic Engineering Conference, Italien, 7.-10. Juni, 1994

[SCN86] Schnatz G., Hartwig S., "Schwere Gase: Modelle, Experimente und Risikoanalyse", im Auftrag des Battelle-Instituts, BMFT, Springer Verlag, 1986

[SER68] Sergeant R.J., Robinett F.E., "An Experimental Investigation of the Atmospheric Diffusion and Ignition of Boil-off Vapours Associated with a Spillage of Liquefied Natural Gas", TRW Systems, Inc. Report Nr. 08072-7 for American Gas Association, 1968

[SHA78A] Shaw P., Briscoe F., "Evaporation from Spills of Hazardous Liquids on Land and Water", UKAEA, Safety and Reliability Directorate (SRD), Warrington, UK, Report SRD R 100, 1978

[SHA78B] Shaw P., Briscoe F., "Evaporation from Spills of Hazardous Liquids on Water", 5th International Symposium on the Transport of Dangerous Goods by Sea and Inland Waterways, Hamburg, 24.-27.4.1978, S.1-20, 1978

[SOC92] Socher M., Rieken T., "Risiken bei einem verstärkten Wasserstoffeinsatz", Büro für Technikfolgen-Abschätzung des Deutschen Bundestages, Report Nr.13, 1992

[STE78] Stein W., "The Spreading and Differential Boil-off for a Spill of Liquid Natural Gas on a Water Surface", Liquefied Gaseous Fuels Safety and Environmental Control Safety Program: A Status Report, Department of Energy, Washington, 1978

[SYC87] Sychev V.V., Vasserman A. A., Kozlov A. D., Spiridonov G. A., Tsymarny V. A., "Thermodynamic Properties of Nitrogen", Hemisphere Publishing Corporation, Springer-Verlag Berlin, 1987

[TEC88] Technica LTD., "Techniques for Assessing Industrial Hazards - A Manual", World Bank Technical Paper Number 55, Washington D.C., USA, 1988

[URA86] Urano Y., et.al., "Hazards of Burning Liquefied Hydrogen (1) Flame of Stable Burning", Journal of the Nat. Chem. Lab. for Industry, Vol.81, Nr.3, S.143-150, 1986

[VAR75] Vargaftik N.B., "Tables on the Thermodynamical Properties of Liquids and Gases", Hemisphere Publishing Corporation, 1975

[VDI77] VDI-Wärmeatlas, "Berechnungsblätter für den Wärmeübergang", Hrsg. vom Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), 1977

[VEN93] Venart J.E.S. et.al., "To BLEVE or not to BLEVE: Anatomy of a Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion", Process Safety Progress, 12, S.67-70, 1993

[WAI83] Waite P.J., Whitehouse R.J., Winn E.B., Wakeham W.A., "The Spread and Vaporisation of Cryogenic Liquids on Water", Journal of Hazardous Materials, Nr.8, S.165-184, 1983

[WEB86A] Webber D.M., Brighton P.W.M., "A Mathematical Model of a Spreading, Vaporising Liquid Pool", Heavy Gas and Risk Assessment, Battelle-Institut Frankfurt A.M., 1986

[WEB86B] Webber D.M., Brighton P.W.M., "Similarity Solutions for the Spreading of Liquid Pools", UKAEA, Safety and Reliability Directorate (SRD), Warrington, UK, Report SRD R 371, 1986

[WEB86C] Webber D.M., "Evaporation and Boiling of Liquid Pools - A Unified Treatment", UKAEA, Safety and Reliability Directorate (SRD), Warrington, UK, 1986

[WEB86D] Webber D.M., Brighton P.W.M., "Inviscid Similarity Solutions for Slumping from a Cylindrical Tank", Journal of Fluids Engineering, New York, Vol.108, 1986

[WEB87A] Webber D.M., "Heat Conduction Under a Spreading Pool", UKAEA, Safety and Reliability Directorate (SRD), Warrington, UK, Report SRD/HSE/R 421, 1987

[WEB87B] Webber D.M., Brighton P.W.M., "An Integral Model for Spreading, Vaporising Pools", UKAEA, Safety and Reliability Directorate (SRD), Warrington, UK, Report SRD/HSE/R 390, 1987

[WEB91] Webber D.M., "Source Terms", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Guildford, Vol.4, S.5-15, 1991

[WEL82] Welker J.R., Cavin W.D., "Vaporization, Dispersion and Radiant Fluxes from LPG Spills", Applied Technology Corporation, Final Technical Report, Nr. ATC-112-FR-D, US-DOE/EP-0042, 1982

[WIN89] Winter C.J., Nitsch J., "Wasserstoff als Energieträger - Technik, Systeme, Wirtschaft",Springer Verlag, 1989

[WIT83] Witcofski R.D., Chirivella J.E., "Experimental and Analytical Analysis of the Mechanism Governing the Dispersion of Flammable Clouds formed by Liquid Hydrogen Spills", Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol.9, Nr.5, S.425-435, 1983

[ZAB60] Zabetakis M.G., "Research on the Hazards Associated with the Production and Handling of Liquid Hydrogen", National Bureau of Mines, US Department of the Interior, WADD TR-60-141, 1960

[ZAB61] Zabetakis M.G., Furno A.L., Martindill G.H., "Explosion Hazards of Liquid Hydrogen", Advances in Cryogenic Engineering, Nr. 6, S.185-194, 1961

[ZAB67] Zabetakis M.G., "Safety with Cryogenic Fluids", The Int. Cryogenics Monograph Series, Heywood Bolls London, 1967

[ZHA93] Zhang X., Ghoniem A.F., "A Computational Model for the Rise and Dispersion of Wind-Blown, Buoyancy-Driven Plumes - I. Neutrally Stratified Atmosphere", Atmospheric Environment, 27A, S.2295-2311, 1993

[ZUB59] Zuber N., "Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer (Thesis)", US Atomic Energy Commission, Research Laboratory Los Angeles and Ramo-Wooldridge Corporation, University of California, Dissertation, 1959

Anhang A (Fehlerbetrachtung)

A.1. Beschreibung der mobilen Meßdatenerfassungsanlage HP 3852A

Die Hewlett-Packard Meßdatenerfassung HP 3852A ist mit 5 Relay Multiplexer-Karten (HP44708A) für je 20 Thermoelementeingänge, 20 Kanälen für Spannungsmessung (zur Massenaufzeichnung der elektronischen Waage) und integriertem $5^1/_2$-stelligem Digitalmultimeter (HP44701A) bestückt. Um eine möglichst hohe Abfragefrequenz der Thermoelementspannungen zu gewährleisten, wird nur die Zeitdifferenz zwischen Erfassungsstart und Erfassungsende abgespeichert. Für jede Thermoelementmessung wird die gleiche Zeit benötigt. Die registrierten Meßwerte werden im internen Speicher (1 Mbyte) der Meßdatenerfassung zwischengespeichert und nach Abschluß des Meßzyklus über den eingebauten HP-IB-Controller (HP44788A) auf ein - über ein IEEC 488-Schnittstelle angeschlossenes - externes 10 MB Plattenlaufwerk (HP9153C) in binärer Form abgespeichert. Zur Übermittlung werden die Daten vom Plattenlaufwerk in den internen Speicher gelesen und über IB-Controller bei der Übertragung auf PC in ein auf 7 Stellen genaues ASCII-Format umgewandelt. Vom PC können die Daten zur weiteren Auswertung auf die verschiedenen Rechenanlagen (IBM Großrechenanlage, DEC) überspielt werden.

Die Genauigkeit der Meßdatenerfassungsanlage HP 3852A läßt sich also untergliedern in :

1. Genauigkeit der Temperaturbestimmung
   Der Gesamtfehler der Temperaturbestimmung bei der Umrechnung der Thermoelement-spannnungen in Temperaturen beträgt nach Herstellerangaben [HPC89] für die Gesamt-anlage in Abhängigkeit von der Temperatur

   $$\Delta T_{0°C} = \pm 2K \,, \tag{A.1}$$

   $$\Delta T_{-200°C} = \pm 4K \,. \tag{A.2}$$

   Die Speicherung erfolgt im internen Speicher und im Plattenlaufwerk in einer 64 Bit Real-Darstellung (PL64). Durch die Umrechnung in ein auf 7 Stellen genaues ASCII-Format ergibt sich ein möglicher Fehler an der 8. Stelle, der allerdings gegenüber dem Fehler aus Gleichung A.1 bzw. A.2 vernachlässigbar ist.

2. Genauigkeit der Zeitbestimmung
   Die Genauigkeit der Zeitmessung wird in [HPC89] mit

   $$\Delta t = \pm 0{,}004\% \,, \tag{A.3}$$

   angegeben. Daraus ergibt sich bei einer Versuchsdauer von ca. 400s eine maximale absolute Abweichung von

$$\Delta t = 16ms \; . \tag{A.4}$$

Die angegebenen Abweichungen werden in Zusammenhang mit den Abweichungen in den jeweiligen Experimenten berücksichtigt.

A.2. Fehlerbetrachtung für die Verdampfungsexperimente

Bei den Verdampfungsversuchen wurden zusätzlich zur Temperaturaufzeichnung (siehe Kapitel A.1) noch elektronische Waagen zur Bestimmung der Anfangsmasse und des Massenverlustes und daraus der Verdampfungsrate benötigt. Eine kleine Waage (Meßbereich bis 12 kg) wurde nur zur Bestimmung der Anfangsmasse eingesetzt. Der Digitalausgang der größeren Waage (Meßbereich bis 120kg), die das Gesamtgewicht aus Probekörper und aufgebrachtem LN_2 bestimmte, wurde an die Meßdatenerfassungsanlage angeschlossen, die das übertragene Spannungssignal (0-10V) mit den Temperaturwerten abspeicherte.

A.2.1. Genauigkeit der Massenmessung

Die Genauigkeit in der Bestimmung der Anfangsmasse ergibt sich aus der Genauigkeit der Waage und dem Teil, der in der Zeit zwischen Messung und Aufbringen aus dem Dewargefäß verdampft:

1. Die Genauigkeit der kleineren Waage, die zur Bestimmung der Anfangsmasse benutzt wurde, beträgt nach Herstellerangaben:

$$\Delta m_1 = \pm 0{,}001kg \; . \tag{A.5}$$

2. Die Verdampfung aus dem Dewargefäß kann man unter Anwendung der in Tabelle 2.2 auf Seite 20 für LN_2 angegebenen Werte der durch Strahlung und Konvektion aus der Umgebung in die Lache abgegebene Wärme abschätzen. Die Zeit Δt ist die Zeitdifferenz zwischen Messung der LN_2-Anfangsmasse und Aufbringen auf die Oberfläche und betrug maximal 10 s. Die freie Oberfläche des Dewargefäßes ist $A_O = 0{,}0177m^2$. Daraus ergibt sich:

$$\Delta m_2 = \frac{\left(\dot{q}_{str,Atm} + \dot{q}_{konv}\right)\Delta t A_O}{\Delta h_{fg}} = -0{,}003kg \; . \tag{A.6}$$

   Mit der Verdampfungsenthalpie Δh_{fg} aus Tabelle 4.1 auf Seite 95.

Daraus ergibt sich die Genauigkeit in der Bestimmung der Anfangsmasse aus der Summe beider Fehler zu

$$\Delta m_0 = {}^{+0{,}001}_{-0{,}004}\, kg \; . \tag{A.7}$$

Die Genauigkeit der gemessenen LN_2-Masse über der Zeit ergibt sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz aus:

$$\Delta m_{LN_2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k}\left[\left(\frac{\partial m}{\partial x_i}\right)\Delta x_i\right]^2} \,, \tag{A.8}$$

wobei die Meßgröße m_{LN2} wie folgt beeinflußt ist.

$$m_{LN_2} = m_0 - \frac{\dot{q}A_O t}{\Delta h_{fg}} \,, \tag{A.9}$$

mit der Wärmestromdichte $\dot{q}$ und der Versuchsdauer *t*. *k* ist die Anzahl der Einzelbeiträge zum Gesamtfehler.

Die Abweichung der Wärmestromdichte ergibt sich durch die Beiträge der Konvektion, Strahlungswärme aus der Umgebung und der Wärmeabgabe durch Abkühlung der Umrandung. Die Beiträge durch Konvektions- und Strahlungswärme können Tabelle 2.2 auf Seite 20 entnommen werden; zur Berechnung des Beitrages des Wärmeeintrages in den LN_2 durch Änderung des Wärmeinhaltes der Berandung soll angenommen werden, der Wärmeinhalt der Berandung werde gleichmäßig über die Versuchsdauer in den LN_2 abgegeben. Die Temperaturänderung des Styropor wird vernachlässigt.

$$\dot{q}_1 = \left(mc_p\right)_{Umrandung}\frac{\Delta T}{A_O t} \,, \tag{A.10}$$

mit der Temperaturdifferenz $\Delta\ T=215K$. Die Versuchsdauer *t* wird für Bitumen mit 300s und für Beton mit 200s angesetzt. Mit der Wärmekapazität der Umrandung $c_p=0{,}5kJkg^{-1}K^{-1}$ und der Masse der Umrandung $m_{Umrandung}$, die bei der Bitumenprobe ca. 1,3kg und bei der Betonprobe 0,5kg ist, ergibt sich:

$$\dot{q}_{1,Bitumen} = 3{,}1\frac{kW}{m^2} \,, \tag{A.11}$$

$$\dot{q}_{1,Beton} = 9{,}5\frac{kW}{m^2} \,. \tag{A.12}$$

Die Genauigkeit der Oberflächenbestimmung ist bei der Bitumenprobe $\Delta\ A_{O,Bitumen}=0{,}008m^2$ und bei der Betonprobe $\Delta\ A_{O,Beton}=0{,}0006m^2$. Die Genauigkeit der Zeitmessung ist in Gleichung A.3 auf Seite 159 angegeben. Die Abweichung der Verdampfungsenthalpie soll mit 5% angenommen werden. Die Genauigkeit der Waage, auf welcher der LN_2-Massenverlust gemessen wird, beträgt ±0,1 kg im Meßbereich 0-120 kg und ±0,01 kg im Meßbereich 0-12 kg. Daraus und unter Verwendung von Gleichung A.8, A.9 folgt:

$$\Delta m_{LN_2,Bitumen} = \pm 1{,}64kg \,, \tag{A.13}$$

$$\Delta m_{LN_2,Beton} = \pm 0{,}34kg \,. \tag{A.14}$$

A.2.2. Genauigkeit der Temperaturmessung

Die Genauigkeit der Temperaturbestimmung wird zum einen durch die Genauigkeit der Messung selbst, zum anderen durch Abweichungen in der Positionierung der Thermoelemente in der Tiefe. Die Genauigkeit der Messung ist in Gleichung A.1 bzw. A.2 auf Seite 159 angegeben. Die Genauigkeit der Positionierung der Thermoelemente beträgt bei Bitumen- und Betonprobe $\Delta z = \pm 0{,}5mm$. Der Temperaturverlauf im Probekörper $T(z.t)$ kann abhängig von Ort z und Zeit t [CSL59] mit:

$$T(z,t) = T_l + \Delta T^* erf\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right), \tag{A.15}$$

näherungsweise bestimmt werden; *erf* ist die Error-Funktion, a die Wärmeleitzahl und T_l die Siedetemperatur des LN_2. Daraus läßt sich die Genauigkeit der Temperaturmessung $\Delta(T)$ durch Abweichungen in der Position der Thermoelemente abschätzen:

$$\Delta(T) = \sqrt{\frac{\rho c_p}{\lambda \pi t}} \Delta T \cdot e^{-\frac{z^2}{4at}} \Delta z \,. \tag{A.16}$$

Es ergibt sich in einer Tiefe von 5 mm bzw. 50 mm unter der Oberfläche für Bitumen:

$$\Delta(T)_{Bitumen,5mm} \approx 3K \,, \tag{A.17}$$

$$\Delta(T)_{Bitumen,50mm} \approx 0{,}6K \,, \tag{A.18}$$

und für Beton:

$$\Delta(T)_{Beton,5mm} \approx 4K \,, \tag{A.19}$$

$$\Delta(T)_{Beton,50mm} \approx 0{,}3K \,. \tag{A.20}$$

Zu der Abweichung durch die Positionierung addiert sich die Abweichung durch die Messung und es ergibt sich eine Gesamtabweichung von maximal 7 bis 8 K.

A.3. Fehlerbetrachtung für KIWI-Experimente

Die KIWI stellt einen 60°-Kreisausschnitt einer radialen Ausbreitung dar. Die Instrumentierung der KIWI-Versuchseinrichtung (Bild 3.7 auf Seite 48) besteht aus insgesamt 43 Thermoelementen, die in zwei radialen Richtungen im Abstand von je 0,5m zueinander angebracht sind. Die Thermoelemente sind an speziellen Hülsen befestigt, die bis ca. 5mm über die Wasseroberfläche reichen. Der Meßpunkt selbst liegt in etwa in Höhe der Wasseroberfläche. Über die seitliche Plexiglasscheibe wird die Kontur der Lache beobachtet und mit einer Videokamera aufgezeichnet. Um den Beginn der Freisetzung zu markieren, wird ein optisches Signal im Bildbereich der Kamera positioniert, das über einen Kontaktschalter an der Kippe bei Freisetzungsbeginn eingeschaltet wird. Der Bildbereich der Videoaufzeichnung

beträgt ca. 1m in ca. 1,5m Entfernung von der Kippe. Im Bildbereich ist eine optische Bestimmung des Lachenradius durch angelegte Lineale auf $\Delta r = \pm\, 0{,}1m$ genau möglich.

A.3.1. Genauigkeit des Lachenradius

Durch den Abstand der Thermoelemente von 0,5m untereinander und die Abfragefrequenz f=2,5 $1s^{-1}$ ergeben sich Fehler bezüglich Ausbreitungsradius und Zeitbestimmung. Der Fehler bei der Bestimmung des Ausbreitungsradius wird unterteilt in

1. Abweichung durch die Ausrichtgenauigkeit der Thermoelemente

$$\Delta r_2 = \pm\, 0{,}01m\,. \tag{A.21}$$

2. Abweichung durch die Abfragefrequenz
   Zu Beginn der Freisetzung ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit hoch und wird mit zunehmendem Radius kleiner. Dadurch ergibt sich durch die Abfragefrequenz der Thermoelemente zu Anfang der Ausbreitung ein größerer Fehler als gegen Ende. Der Fehler wird aus dem Quotient von Ausbreitungsgeschwindigkeit und Abfragefrequenz und Gleichung 2.16 auf Seite 23 ermittelt:

$$\Delta r_3 = \frac{U}{f} = \frac{C}{fR}\sqrt{\frac{\delta g V_{LN_2}}{\pi}}\,. \tag{A.22}$$

   Bei einer schlagartigen Freisetzung von V_{LN2}=*600 Liter* bzw. *60 Liter* (entspricht *100 Liter* bzw. *10 Liter* bei einem 60° Kreisausschnitt) beträgt beim betrachteten Radius $R=1m$ die Geschwindigkeit der Lache (Gleichung 2.16 auf Seite 23) $U\approx$ *0,86m/s* bzw. *0,27m/s*. Daraus resultiert ein maximal möglicher Fehler von

$$\Delta r_3 = 0{,}32m \text{ bzw. } 0{,}1m\,. \tag{A.23}$$

   Bei den kontinuierlichen Versuchen wird wegen des geringeren Lachenvolumens die Geschwindigkeit im Anfangsbereich der Lache nicht so hoch sein wie bei den schlagartigen Versuchen. Deswegen kann der geringere Wert der Abweichung von 0,1m hier als zuverlässige Fehlerabschätzung angesehen werden.

3. Abweichung durch den Abstand der Thermoelemente
   Hat die Lache den maximalen Lachenradius erreicht, ist es zwar möglich zu sagen, welches Thermoelement noch in Kontakt mit LN_2 steht, aber aufgrund des Abstandes zum nächsten Thermoelement von 0,5m kann die Lache innerhalb dieses Bereiches liegen und es ergibt sich ein maximaler Fehler der Radienmessung von

$$\Delta r_1 = +\, 0{,}5m\,. \tag{A.24}$$

   Dieser Fehler kann während der Ausbreitungsphase vernachlässigt werden, weil über die Temperaturaufzeichnung des nächsten Thermoelementes in Ausbreitungsrichtung eine

Aussage über das Verhalten der Lache zwischen beiden Thermoelementen getroffen werden kann.

Der Fehler bei Auswertung der Videoaufzeichnungen ist im Gegensatz zum Fehler bei den Thermoelementaufzeichnungen konstant. Insbesondere in den Versuchen mit schlagartiger Freisetzung ist die Lache gut zu erkennen. Der Gesamtfehler läßt sich gliedern in:

1. Fehler in der Messung des Ausbreitungsverhaltens
   - nur mit Thermoelementaufzeichnungen

     $$\Delta r_{ges} = {}^{+0,33}_{-0,01}\, m \text{ bzw. } {}^{+0,11}_{-0,01} m \,, \qquad \text{(A.25)}$$

     je nach freigesetzter Menge LN_2. Für die Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung ist der kleinere Wert zu verwenden.
   - bei Auswertung der Videoaufzeichnungen

     $$\Delta r_{ges} = \pm\, 0,1m \,, \qquad \text{(A.26)}$$

     im Bildbereich der Videoaufzeichnung.
2. Fehler in der Bestimmung des maximalen Radius.
   Weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit am Rand der Lache bei erreichtem maximalen Radius praktisch 0 ist, kann die obere Fehlerschranke mit dem Abstand der Thermoelemente und deren Ausrichtgenauigkeit gleichgesetzt werden.

   $$\Delta r_{ges} = {}^{+0,51}_{-0,01}\, m \,. \qquad \text{(A.27)}$$

A.3.2. Genauigkeit der Versuchszeit

Für die Bestimmung der Zeit sind folgende Fehlerquellen zu betrachten

1. Abweichung durch die Dauer des Meßzyklus
   Die Meßzyklen werden nacheinander ohne Unterbrechung durchlaufen. Die dafür insgesamt benötigte Zeit wird abgespeichert und mittels eines Interpolationsprogrammes für jeden Temperaturwert berechnet. Die Abweichung der integralen Zeitmessung, die auf den einzelnen Temperaturwert bezogen wird, ist vernachlässigbar gering.
2. Abweichung bei der Auswertung
   Die Messung der Lachenausbreitung erfolgt über den aufgezeichneten Temperaturverlauf der Thermoelemente (siehe Kapitel 3). Der maximale Zeitfehler entspricht dem Kehrwert der Abfragefrequenz:

   $$\Delta t_{2,1} = -\,0,4s \,. \qquad \text{(A.28)}$$

3. Abweichungen bei Auswertung der Videoaufzeichnungen
   Unter Vernachlässigung der Übertragungsgeschwindigkeit des optischen Signals bei Freisetzungsbeginn kann aus der Videoaufzeichnung der Lachenradius sowie die Kontur der Lache entsprechend der Bildfrequenz auf

$$\Delta t_3 = \frac{1}{25} s \,, \tag{A.29}$$

   genau bestimmt werden.

Dadurch ergibt sich ein maximaler Zeit-Gesamtfehler von

$$\Delta t_{ges} = {}^{+1}_{-1,4}\, s \tag{A.30}$$

nach Auswertung der Thermoelementaufzeichnungen, bzw.

$$\Delta t_{ges} = \frac{1}{25} s \tag{A.31}$$

nach Auswertung der Videoaufzeichnung.

Zur Abschätzung des Fehlers in der Massenbestimmung ist es wegen des sehr unterschiedlichen Experimentaufbaus zweckmäßig, zwischen Versuchen mit schlagartiger und kontinuierlicher Freisetzung zu unterscheiden. Ein allgemeiner Fehler in der Massenbestimmung gegenüber der Rechnung ist die Verdampfung aus der Lache durch Strahlung aus der Umgebung und Konvektion. Diesen Fehler kann man entsprechend den Angaben aus Tabelle 2.2 auf Seite 20 und der Lachenfläche A_{Lache} abschätzen zu

$$\Delta \dot{m}_v = \frac{\left(\dot{q}_{str,Atm} + \dot{q}_{konv}\right) A_{Lache}}{\Delta h_{fg}} = -A_{Lache} 18 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m^2 s} \,. \tag{A.32}$$

A.3.3. Genauigkeit der Anfangsmassenbestimmung bei den Versuchen mit schlagartiger Freisetzung

Bei der Bestimmung der Anfangsmasse müssen folgende Fehler berücksichtigt werden:

1. Aus der Umgebungsluft und über die Wand der Kippe wird dem LN_2 ständig Wärme zugeführt, die zur Verdampfung und damit zur Reduktion der Anfangsmasse führt. Kondensation und Ausfrieren von Wasserdampf aus der Umgebungsluft an der Kippenwand führt dort zur Bildung einer Eisschicht, die den Wärmeübergang in die Kippe verschlechtert. Zur Abschätzung des Wärmeeintrages aus der Umgebung in den LN_2 in der Kippe wird die Kondensation von Wasserdampf an der Kippenwand vernachlässigt und die Außentemperatur der Kippe gleich der Siedetemperatur des LN_2 angenommen. Damit läßt sich der Wärmeübergangskoeffizienten α an einer senkrechten Wand nach [VDI77] berechnen:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{z_{Kippe}} = 10{,}9 \frac{W}{m^2 K}, \tag{A.33}$$

mit:

$$Nu = 0{,}13 \sqrt[3]{Gr \cdot Pr}, \tag{A.34}$$

und Gr Pr > 10^8. Weil der Wärmeübergangskoeffizient für die waagerechte Fläche unter der Kippe niedriger ist, soll zur pessimistischen Abschätzung dort auch der Wert von Gleichung A.33 verwendet werden. Die Gesamtfläche der Kippe beträgt $A_{Kippe} \approx 1m^2$, der durchschnittliche Zeitverzug zwischen Massenbestimmung und Versuchsbeginn $\Delta t \approx 20s$, die Temperaturdifferenz $\Delta T = 215K$, so daß der Massenfehler aus dem Wärmeeintrag aus der Umgebung durch die Wand der Kippe in die kryogene Flüssigkeit

$$\Delta m_1 = \frac{\alpha A_{Kippe} \Delta T \Delta t}{\Delta h_{fg}} = -0{,}24kg, \tag{A.35}$$

beträgt.

2. Konvektion und Strahlung aus der Umgebung beeinflussen die Anfangsmasse durch Verdampfung an der offenen LN_2-Oberfläche in der Kippe der KIWI. Zur Abschätzung werden die entsprechenden Werte aus Tabelle 2.2 auf Seite 20 herangezogen. Man erhält

$$\Delta m_2 = \frac{\left(\dot{q}_{str,Atm} + \dot{q}_{konv}\right) A_O \Delta t}{\Delta h_{fg}} = -0{,}18kg. \tag{A.36}$$

3. Die Volumenbestimmung an der Kippe (Markierungsstriche) ermöglicht eine Ablesegenauigkeit auf ±1Liter. Daraus ergibt sich ein Anfangsmassenfehler von

$$\Delta m_3 = \rho_l V_l = \pm 0{,}8kg. \tag{A.37}$$

4. Durch den ständigen Transport von Wärme in den LN_2 und die damit verbundene Verdampfung werden Blasen gebildet, die zu einem Anstieg des Flüssigkeitspegels und damit zu einem systematischen Fehler bei der Inhaltsbestimmung der Kippe führen. Diesen Einfluß kann man aus der Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen, der Kippenhöhe und der über den Kippenrand einfließenden Wärme abschätzen.
   Durch Gleichsetzen der Auftriebsenergie und der kinetischen Energie erhält man die durchschnittliche Auftriebgeschwindigkeit unter Vernachlässigung von Widerstandskräften

$$\bar{c}_A = \sqrt{\frac{4}{3} d_{Blase} g \left(\frac{\rho_l}{\rho_G} - 1 \right)}. \tag{A.38}$$

   Damit läßt sich die durchschnittliche Verweilzeit des Dampfes im LN_2 berechnen. Die vorhandene Dampfmenge im LN_2 wird über den in die Kippe fließenden Wärmestrom, multipliziert mit der durchschnittlichen Verweilzeit, bestimmt:

$$V_G = \frac{z_{Kippe}\alpha\Delta T \cdot A_{Kippe}}{\bar{c}_A \rho_G \Delta h_{fg}} = 4{,}32 \cdot 10^{-4} m^3 \,. \tag{A.39}$$

Repräsentativ werden Blasen mit einem Durchmesser $d_{Blase}=1mm$, der aus Gleichung A.38 berechneten Geschwindigkeit $\bar{c}_A$, der Tiefe der Kippe $z_{Kippe}=0{,}25m$ und den in Tabelle 4.1 auf Seite 95 enthaltenen Stoffwerte von LN_2 betrachtet. So ergibt sich ein zusätzlicher Fehler in der Bestimmung der Anfangsmasse von

$$\Delta m_4 = \rho_l V_G = -0{,}35kg \,. \tag{A.40}$$

Daraus läßt sich nun der Gesamtmassenfehler als Summe der Einzelmassenfehler bestimmen

$$\Delta m = \sum_{i=1}^{4} m_i = {}^{+\,0{,}8}_{-\,1{,}57}\ kg \,. \tag{A.41}$$

Für die Versuche mit schlagartiger Freisetzung mit einer durchschnittlichen Lachenfläche von $8m^2$ (Radius 4m) und einer mittleren Versuchsdauer von 30s folgt für die Abweichung der Massenbestimmung

$$\Delta m_{ges} = \Delta m + \Delta \dot{m}_v \Delta t = {}^{+\,0{,}8}_{-\,5{,}9}\ kg \,. \tag{A.42}$$

A.3.4. Genauigkeit des Flüssigkeits-Massenstroms bei Versuchen mit kontinuierlicher Freisetzung

Der erweiterte Aufbau der Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung wurde in Kapitel 3.2.2. beschrieben. Die schematische Zeichnung ist in Bild 3.8 auf Seite 49 dargestellt. Die Freisetzungsmenge wird über den Massenverlust des 600-l-LN_2-Dewars bestimmt. Der ganze Behälter hängt frei an einer Druckmeßdose, die ein Spannungssignal (0-10V) an den D/A-Wandler gibt, dessen Analogsignal auf einem x/t-Schreiber aufgezeichnet wird.

Durch Druckentlastung an der engsten Stelle der Freisetzungsleitung vom Behälterinnendruck auf Umgebungsdruck kommt es zur spontanen Verdampfung eines Teils des LN_2. Dadurch reduziert sich die reale freigesetzte Flüssigkeitsmenge. Zur Abschätzung wird angenommen, daß die Entspannung reversibel adiabat von der Siedelinie bei $p_l \approx 0{,}4MPa$ bzw. $0{,}2MPa$ ins Naßdampfgebiet bei Umgebungsdruck (pessimistische Annahme) erfolgt und daß Änderungen der kinetischen sowie potentiellen Energie vernachlässigbar sind. Der Dampfgehalt Ψ des LN_2-Massenstroms folgt unter Verwendung von [SYC87]

$$\Psi_{0,2} = \frac{s'(0{,}2MPa) - s'(0{,}1MPa)}{s''(0{,}1MPa) - s'(0{,}1MPa)} = 0{,}066 \,, \tag{A.43}$$

$$\Psi_{0,4} = \frac{s'(0{,}4MPa) - s'(0{,}1MPa)}{s''(0{,}1MPa) - s'(0{,}1MPa)} = 0{,}136 \,. \tag{A.44}$$

Daraus läßt sich der Anteil abschätzen, der bei Druckentlastung mindestens verdampft. Dieser Anteil ist bei der Berechnung der Freisetzungsraten in Tabelle A.1 berücksichtigt.

Tabelle A.1: Ermittlung der Freisetzungsraten der Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung von flüssigem Stickstoff

Massenverlust (Dampf u. Flüssigk.)	Tankinnendruck	Dampfanteil am Massenverlust	Flüssigkeitsanteil am Massenverlust	
[kg/s]	[MPa]	[kg/s]	[kg/s]	[l/s]
0,96	$45\ 10^{-3}$	$92\ 10^{-3}$	0,808	1,01
1,36	0,13	$151\ 10^{-3}$	1,209	1,51
1,92	0,25	$239\ 10^{-3}$	1,681	2,1
2,32	0,45	$352\ 10^{-3}$	1,968	2,46

Bei der Bestimmung der Freisetzungsrate treten folgende Fehler auf:

1. Die Ablesegenauigkeit der Aufzeichnung des x/t-Schreibers beträgt $\Delta\ m=2,4kg$ bzw. $\Delta\ t=0,9s$. Bei einer freigesetzten Gesamtmasse von mindestens 60kg und einer Versuchsdauer von 60s ergibt sich der Fehler durch Ablesegenauigkeit des x/t-Schreibers zu

$$\Delta\dot{m}_1 = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{t}\right)\Delta m\right]^2 + \left[\left(\frac{m}{t^2}\right)\Delta t\right]^2} = \pm 43\cdot 10^{-3}\,\frac{kg}{s}\,. \qquad \text{(A.45)}$$

2. Zur Aufrechterhaltung des Behälterinnendruckes wird dem 600-l-LN_2-Behälter während des Versuches gasförmiger Stickstoff (GN_2) zugeführt. Das zugeführte GN_2-Volumen entspricht des während des Versuchs freigesetzten LN_2-Volumens. Die maximal freigesetzte LN_2-Menge beträgt bei einer Versuchsdauer von $\Delta\ t=60s$ und einem maximalen Volumenstrom von $\dot{V} = 3l/s$

$$V_{LN_2} = \dot{V}\Delta t = 180l\ LN_2\,. \qquad \text{(A.46)}$$

Bei dieser Freisetzungsrate betrug der Behälterinnendruck $p_i \approx 0,3MPa$. Zwecks pessimistischer Abschätzung soll die Temperatur des zugeführten GN_2 gleich der Siedetemperatur T_S des Stickstoffs sein. Aus dem Idealgas-Gesetz folgt für die zugeführte Stickstoffmasse

$$m_{GN_2} = \frac{Mp_iV_{LN_2}}{\Re T_S} \approx 2,3kg\,, \qquad \text{(A.47)}$$

gelten. Der anteilige Massenfehler $\Delta\dot{m}_2$ über die Dauer des Versuchs beträgt

$$\Delta\dot{m}_2 = \frac{m_{GN_2}}{\Delta t} = -38{,}8 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s} . \tag{A.48}$$

3. Die Abweichung der Waage beträgt nach Herstellerangaben:

$$\Delta m = \pm 1kg . \tag{A.49}$$

Neben diesen Effekten kann es während der Freisetzung zu Veränderungen des Volumenstroms kommen. Diese können verschiedene Ursachen haben:

1. Der Tankinnendruck wird von Hand geregelt. Bei einigen Versuchen war es jedoch nicht möglich, den Tankinnendruck konstant zu halten. Dies ist auch den Aufzeichnungen des x/t-Schreibers zu entnehmen.
2. Wird die Übertragungsleitung des LN_2 nicht genügend lange (oder gar nicht) vorgekühlt, verdampft ein Teil des LN_2 in der Leitung und es bildet sich eine Zweiphasenströmung in der Leitung. Dadurch verschlechtert sich der Massenstrom durch die Leitung enorm.

Änderungen im Volumenstrom sind der Aufzeichnung des x/t-Schreiber entnehmbar und können für den LAuV-Code als Eingabewerte verwendet werden (siehe Kapitel 4.1.2). Dieser Einfluß muß daher nicht weiter diskutiert werden.

Für die Versuche mit kontinuierlicher Freisetzung folgt die Abweichung für kleine Freisetzungsraten (Lachenradius bis 2m) zu

$$\Delta\dot{m}_{ges} = \Delta\dot{m} + \Delta\dot{m}_v = {}^{+43}_{-79} \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s} , \tag{A.50}$$

und für große Freisetzungsmengen (Lachenradius bis 5m) zu

$$\Delta\dot{m}_{ges} = \Delta\dot{m} + \Delta\dot{m}_v = {}^{+43}_{-278} \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s} . \tag{A.51}$$

A.4. Fehlerbetrachtung für LH_2-Experimente in Cottbus

Der Versuchsaufbau der Versuche mit kontinuierlicher LH_2-Freisetzung kann den Bildern 3.18 auf Seite 66, 3.19 auf Seite 67 und 3.20 auf Seite 68 entnommen werden. Die Versuche wurden in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin (BAM) und Battelle Ingenieurtechnik durchgeführt. In der Verantwortung der BAM lag die Bereitstellung des Versuchsgeländes, des LH_2 sowie der Zuleitung zum Freisetzungsort. Die Instrumentierung der Gasse mit Gasmäusen sowie Aufnahme der Umgebungs- und Randbedingungen wurde von Battelle durchgeführt. Die Freisetzeinrichtung mit den verschiedenen Untergründen für den LH_2 wurde von der KFA bereitgestellt. Im folgenden

wird eine Fehlerbetrachtung für den KFA-Teil der Versuchseinrichtung vorgestellt sowie das Ergebnis der Fehlerbetrachtungen von BAM und Battelle wiedergegeben.

Die Fehlerabschätzung bzgl. des KFA-Beitrages im Experiment bezieht sich auf die Lachenmessung bzw. die Freisetzungsmenge.

A.4.1. Genauigkeit des Lachenradius

Es kamen insgesamt 20 Thermoelemente zum Einsatz. Dies entspricht der Anzahl der Thermoelemente, die mit einer Multiplexer-Karte erfaßt werden können. Jede weitere Multiplexer-Karte hätte die Abfragefrequenz verringert. Zur Messung der Ausbreitung werden 18 Thermoelemente verwendet. Thermoelement 1 und 20 werden für andere Messungen benutzt. Die Messung der Lache erfolgt in zwei Richtungen senkrecht zueinander (vgl. Bild 3.18 auf Seite 66). In der ersten Richtung (Thermoelemente 2-12) beträgt der Abstand der Thermoelemente 0,1m voneinander. In der zweiten Richtung 0,2m. Der Abstand des ersten Thermoelementes von der Auslaßvorrichtung beträgt jeweils 0,1m, was einem Radius von 0,3m entspricht. Der maximale Fehler in der Lachenradienmessung ergibt sich aus der Ausrichtgenauigkeit und Abfragefrequenz sowie dem Abstand der Thermoelemente:

1. Abweichung durch die Ausrichtgenauigkeit der Thermoelemente

$$\Delta r_2 = \pm 0{,}01m\,. \tag{A.52}$$

2. Abweichung durch die Abfragefrequenz
   Zu Beginn der Freisetzung ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit hoch und wird mit zunehmendem Radius kleiner. Dadurch ergibt sich durch die Abfragefrequenz im Anfang der Ausbreitung ein etwas größerer Fehler als gegen Ende. Das Referenzvolumen V_{LH2} aus Gleichung A.53 kann man durch einfache Abschätzung einer zylindrischen Lache mit Lachenhöhe 1mm und dem experimentell beobachteten Radius von ca. 0,8m bei Aluminiumuntergrund zu $V_{LH2} \approx 2 \cdot 10^{-3}\, m^3$ berechnen. Daraus folgt

$$\Delta r_3 = \frac{U}{f} = \frac{C}{fR}\sqrt{\frac{\delta g V_{LH_2}}{\pi}} = +\,75 \cdot 10^{-3} m\,, \tag{A.53}$$

   bei einem betrachteten Radius von $R=0{,}3m$ und einer Ausbreitung auf Land ($\delta = 1$). Mit größer werdendem Radius R wird der Fehler Δr_3 kleiner.

3. Abweichung durch den Abstand der Thermoelemente
   Bei erreichtem maximalen Lachenradius ist es zwar möglich zu sagen, welches Thermoelement noch in Kontakt mit LH_2 steht, aber bedingt durch den Abstand zum nächsten Thermoelement von 0,1m bzw. 0,2m ergibt sich hier ein maximaler Fehler der Radienmessung

$$\Delta r_1 = +\,0{,}1m \text{ bzw. } +\,0{,}2m\,. \tag{A.54}$$

Dieser Fehler kann während der Ausbreitungsphase vernachlässigt werden, weil über die Temperaturaufzeichnung des nächsten Thermoelementes in Ausbreitungsrichtung eine Aussage über das Verhalten der Lache zwischen beiden Thermoelementen getroffen werden kann.

Dadurch ergibt sich der maximale Gesamtfehler der Lachenradienbestimmung während der Ausbreitungsphase zu

$$\Delta r_{ges} = {}^{+0,085}_{-0,01}\ m\ . \tag{A.55}$$

Hat die Lache ihren stationären Zustand erreicht, dominiert der Fehler durch den Abstand der Thermoelemente:

$$\Delta r_{ges} = {}^{+0,11}_{-0,01}\ m\ . \tag{A.56}$$

A.4.2. Genauigkeit der Zeitmessung

Für die Bestimmung des Zeitfehlers sind folgende Fehlerquellen zu beachten

1. Abweichung durch die Dauer des Meßzyklus
   Die Meßzyklen werden nacheinander ohne Unterbrechung durchlaufen. Die dafür insgesamt benötigte Zeit wird abgespeichert und mittels eines Interpolationsprogrammes für jeden Temperaturwert berechnet. Die Abweichung der integralen Zeitmessung auf den einzelnen Temperaturwert bezogen, ist vernachlässigbar.

2. Abweichung durch die Art der Auswertung
   Die Messung der Lachenausbreitung erfolgt mittels Auswertung der Thermoelementaufzeichnungen (siehe Kapitel 3). Der mögliche Zeitfehler entspricht der Abfragefrequenz

$$\Delta t_{2,1} = -\,0,2s\ . \tag{A.57}$$

Durch das pulsierende Verhalten der Lache kann bei Auswertung der Videoaufzeichnung nur ein Bereich angegeben werden, in dem sich die Lache befindet, und keine Genauigkeitsanalyse durchgeführt werden. Als zusätzliche Bestätigung der Thermoelementaufzeichnungen sind diese Aufzeichnungen aber sehr hilfreich.

Dadurch ergibt sich ein maximaler Zeit-Gesamtfehler von

$$\Delta t_{ges} = {}^{+1}_{-1,2}\ s \tag{A.58}$$

nach Auswertung der Thermoelementaufzeichnungen.

A.4.3. Genauigkeit der Massenstrombestimmung

Die in allen Versuchen insgesamt freigesetzte LH_2-Masse beträgt m_0=*280kg*. Zu Beginn der Versuche wird die Übertragungsleitung durch kalten Wasserstoffdampf gekühlt. Die LH_2-Gesamtmasse reduziert sich dadurch entsprechend um

$$m = m_0 - \rho_G A c_\infty \Delta t \ , \qquad \text{(A.59)}$$

mit der Dichte des gasförmigen (NTP) Wasserstoffes ρ_G, dem Leitungsquerschnitt $A = 4{,}9 \cdot 10^{-4} m^2$, der Schallgeschwindigkeit des (NTP) Wasserstoffes $c_\infty = 1294\ m/s$ und der Gesamtzeit der GH_2-Spülung Δt, die der Summe aller Einzelzeiten der Gasfreisetzung aus Tabelle A.2 entspricht. Es ergibt sich

$$m = m_0 - 20{,}45kg \approx 260kg \ . \qquad \text{(A.60)}$$

In diesem Ansatz ist die Temperatur des freigesetzten gasförmigen Wasserstoffs (GH_2) konstant über der Zeit. Durch Abkühlung der Leitung wird die Temperatur des GH_2 am Austritt jedoch kleiner und damit kann der freigesetzte Massenstrom größer werden. Die Annahme der Schallgeschwindigkeit am Austritt ist insoweit als pessimistische Annahme zu betrachten und kompensiert i.w. die Erhöhung der Freisetzungsrate durch Temperaturänderung.

Tabelle A.2: Ausgangswerte zur Berechnung des Gas- bzw. Flüssigkeitsvolumens in den LH_2-Experimenten

Versuch-Nr.	Dauer der Freisetzung		Tankinnendruck	Massenstrom
	Gas [s]	Flüssigkeit [s]	[MPa]	[g/s]
1	90	50	0,6 - 0,52	637
2	30	61	0,6 - 0,52	637
3	90	62	0,7 - 0,6	687
4	60	62	0,7 - 0,6	687
5	60	62	0,9 - 0,78	779
6	55	62	0,9 - 0,78	779

Der aus der Leitung freigesetzte Massenstrom ist von dessen Dampfgehalt abhängig. Gerade kleine Dampfgehalte wirken sich überproportional auf den Massenstrom aus. Um den

Massenstrom genau bestimmen zu können, ist die Kenntnis des Dampfgehaltes erforderlich. Weil keine entsprechenden Meßwerte dessen vorliegen und tiefgreifende Abschätzungen ohne weitere Annahmen nicht möglich sind, wird der freigesetzte LH_2-Massenstrom wie folgt bestimmt:

Zur Bestimmung der unterschiedlichen Freisetzungsraten in Abhängigkeit vom Tankinnendruck wird die Beziehung zwischen austretendem Volumenstrom und Tankinnendruck entsprechend der Bernoulli-Gleichung gelten. Um den Effekt der Zweiphasenströmung anhand der vorhandenen Daten abschätzen zu können, wird der empirisch zu bestimmende Faktor C eingeführt, in den Eingabegrößen und Stoffwerten eingehen. Aus der Summe der Produkte aus Freisetzungsraten und Versuchszeit mit

$$\rho_l V = 260kg = \rho_l \sum_{i=1}^{6} C\sqrt{\Delta\overline{p}}\Delta t_i \ , \tag{A.61}$$

läßt sich die empirische Konstante C ermitteln zu

$$C = 3{,}818 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{kg\sqrt{MPa}} \ , \tag{A.62}$$

und aus

$$\dot{m}_i = \rho_l C\sqrt{\Delta\overline{p}_i} \ , \tag{A.63}$$

die in Tabelle A.2 angegebenen Massenströme.

Weiterhin ungeklärt ist, wie groß der Dampfanteil am jeweiligen Massenstrom ist. Für die Berechnung der Lachenausbreitung ist es jedoch nötig, den Anteil der flüssigen Phase am Gesamtmassenstrom zu bestimmen. Beiträge, die den Dampfgehalt im LH_2 wesentlich beeinflussen, sind dabei durch die Druckentlastung vom Behälterdruck auf Umgebungsdruck und aus der Wärmekapazität des Rohres und der Freisetzeinrichtung zu erwarten. Nach [MAR94] hat der LH_2, sobald er sichtbar wird, die Zuleitung und Freisetzungseinrichtung bereits soweit abgekühlt, daß der Dampfanteil am freigesetzten Massenstrom als konstant angenommen werden kann.

U.a. durch Druckentlastung an der engsten Stelle der Freisetzungsleitung vom Behälterinnendruck auf Umgebungsdruck kommt es zur spontanen Verdampfung (Flash-Verdampfung) eines Teils des LH_2 und damit zu einer Zweiphasenströmung. Zur Abschätzung des Dampfanteils am Freisetzungsmassenstrom soll angenommen werden, daß die Entspannung reversibel adiabat von der Siedelinie bei $p_l \approx 0{,}7MPa$ ins Naßdampfgebiet bei Umgebungsdruck (pessimistische Annahme) erfolgt und daß Änderungen der kinetischen sowie potentiellen Energie vernachlässigbar sind. Der Dampfgehalt Ψ des LH_2-Massestroms beträgt unter Verwendung der Stoffwerte von [KOM80] mindestens:

$$\Psi = \frac{s'(0{,}7\,MPa) - s'(0{,}1\,MPa)}{s''(0{,}1\,MPa) - s'(0{,}1\,MPa)} \approx 0{,}3\,. \tag{A.64}$$

Dieser Wert ist in dem betrachteten Druckbereich als konstant angenommen. Daraus ergibt sich bei der Bestimmung der Freisetzungsraten ein Dampfanteil im austretenden Massenstrom durch Druckentlastung von *0,7* auf *0,1MPa*

$$\Delta\dot{m}_{2,1} = \Psi\,\dot{m}_1 = -191 \cdot 10^{-3}\,\frac{kg}{s}\,, \tag{A.65}$$

$$\Delta\dot{m}_{2,2} = \Psi\,\dot{m}_2 = -206 \cdot 10^{-3}\,\frac{kg}{s}\,, \tag{A.66}$$

$$\Delta\dot{m}_{2,3} = \Psi\,\dot{m}_3 = -234 \cdot 10^{-3}\,\frac{kg}{s}\,. \tag{A.67}$$

So erhält man den freigesetzten Massenstrom $\dot{m}_{LH_2}$ durch

$$\dot{m}_{LH_2} = \dot{m}_0 + \Delta\dot{m} = \dot{m}_0 + \sum \Delta\dot{m}_i\,, \tag{A.68}$$

wie in Tabelle A.3 angegeben.

Tabelle A.3: Ermittelte Freisetzungsraten von flüssigem Wasserstoff entsprechend des eingestellten Tankinnendruckes

Versuch-Nr.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
LH_2-Freisetzung [g/s]	315	315	350	350	415	415
LH_2-Freisetzung [l/s]	4,5	4,5	5	5	6	6

Die bisher durchgeführte Massenstromabschätzung ist nur bis zum Auslaß in die Auffangvorrichtung gültig. Darüber hinaus sind in der Bestimmung des Freisetzungsvolumens folgende Fehler vorhanden:

1. Es erfolgt ein Wärmeeintrag aus der Umgebung über die Wand der Auffangwanne in den LH_2. Während der Freisetzung strömt der LH_2 über die Wand, wodurch kaum warme Umgebungsluft direkt an die Wand der Wanne gelangen kann. Allerdings wird ein Teil des LH_2 durch Konvektion verdampft. Diesen Anteil kann man aus dem Betrag der Konvektion entsprechend Tabelle 2.2 auf Seite 20 und der Seitenfläche der Wanne (0,126m²) berechnen:

$$\Delta\dot{m}_3 = \frac{\dot{q}_{konv} A_{Rand}}{\Delta h_{fg}} = 0{,}2 \cdot 10^{-3}\,\frac{kg}{s}\,. \tag{A.69}$$

2. Die Verdampfung aus der offenen LH_2-Lache durch Konvektion und Strahlung aus der Umgebung läßt sich unter Zuhilfenahme der Stoffwerte von LH_2 (Tabelle 4.1 auf Seite 95), Tabelle 2.2 auf Seite 20 und der Annahme einer Lachenfläche von 3,2m² zu

$$\Delta\dot{m}_4 = \frac{\left(\dot{q}_{str,Atm} + \dot{q}_{konv}\right) A_{Lache}}{\Delta h_{fg}} = 18{,}3 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}\,, \tag{A.70}$$

abschätzen.

Dadurch ergibt sich der Fehler der Massenstrombestimmung zu

$$\Delta\dot{m}_{ges} = -20 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}\,, \tag{A.71}$$

$$\Delta\dot{V}_{ges} = \frac{\Delta\dot{m}_{ges}}{\rho_l} = \pm 0{,}025 \frac{l}{s}\,. \tag{A.72}$$