

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6018

Experimentelle Untersuchung zur Ausbreitung metallischer
Modellschmelzen bei gleichzeitiger Erstarrung

S. Kraut, U. Siegel, P. Ehrhard

Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1997

Zusammenfassung

Die Ausbreitung von Kernschmelzen auf einer horizontalen Ausbreitungsfläche des EPR stellt die Basis für deren Kühlbarkeit dar. Um sich ein Bild über die grundlegenden Ausbreitungs- und Erstarrungsvorgänge zu machen, werden Modellversuche mit Woodsmetall (MCP-58-Legierung) als Modellschmelze durchgeführt. Das Woodsmetall breitet sich auf einer horizontalen Platte aus, die auf verschiedene Temperaturen temperiert werden kann. Bei Plattentemperaturen unterhalb der Schmelztemperatur des Woodsmetalls ($T_W < 58^\circ\text{C}$) kann es zur Erstarrung der Schmelze während der Ausbreitung kommen.

In der vorliegenden Arbeit werden drei Versuchsserien mit Reynolds-Zahlen im Bereich $3,76 \leq Re \leq 39,92$ vorgestellt. Weiterhin ist die Plattentemperatur im Bereich $40^\circ\text{C} \leq T_W \leq 75^\circ\text{C}$ variiert worden. Die Prandtl-Zahl der metallischen Modellschmelze ist $Pr=0,74$. Wir finden zunächst für $T_W \geq 60^\circ\text{C}$ die rein flüssige Ausbreitung, welche die typischen Eigenschaften der trägheitsdominierten Form zeigt. Für $T_W < 60^\circ\text{C}$ nimmt die Abkühlung und das Ausfrieren der Schmelze massiv Einfluß, indem letztlich bei allen Versuchen die Schmelzausbreitung durch komplettes Erstarren gestoppt wird. Hierzu werden insbesondere detaillierte Messungen der Zeitgeschichte der Front vorgelegt. Schließlich wird eine Auswertung der Frontlänge vorgelegt, welche aufzeigt, daß im Falle der gekühlten Platte generell eine stärkere Zerklüftung der Front zu beobachten ist. Hierbei ist ein periodisches Zerklüften, gefolgt von Vergleichmäßigung, auffällig.

Experimental investigation of spreading model melts in presence of solidification

Abstract

The complete spreading of the corium melt on the spreading area of the EPR has to be viewed as a basis for coolability. To understand the basic phenomena of spreading and solidification, model experiments have been performed using Woods-metal (MCP58) as model melt. The melt is spreading on a horizontal plate, which is kept at constant temperature. Thus, for plate temperatures below the solidification temperature of the melt ($T_W \leq 60^\circ\text{C}$) substantial solidification is obtained on the plate during spreading.

Three series of experiments have been performed, covering the range of Reynolds-numbers $3,76 \leq Re \leq 39,92$. The plate temperature has been varied within each series in the range $40^\circ\text{C} \leq T_W \leq 75^\circ\text{C}$. The Prandtl-number of the melt is $Pr=0.74$. We find for $T_W \geq 60^\circ\text{C}$ pure hydrodynamic spreading without solidification, featuring the typical properties of inertia-dominated spreading. For $T_W < 60^\circ\text{C}$, in contrast, the heat losses into the plate and, thus, solidification has a profound influence, as finally in all these experiments the spreading is stopped due to complete solidification of the melt. Here we give detailed measurements on the time behaviour of the melt front. Finally, we give some quantitative measure for the front length, which demonstrates a stronger fingering of the front for cases of lower plate temperatures. Here, a periodic fingering followed by a smoothing is observed.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung.....	1
2 Beschreibung des Versuchstandes und der Versuchstechnik.....	2
2.1 Modifikationen am bestehenden Versuchsaufbau	2
2.1.1 Probleme des bestehenden Versuchsaufbaues	2
2.1.2 Änderungen am Versuchsaufbau	4
2.2 Versuchsstand	5
2.3 Fördereinrichtung	7
2.4 Meßtechnik.....	8
2.5 Versuchsdurchführung	11
2.6 Auswertungsmethode.....	14
3 Versuchsergebnisse	17
3.1 Fortschritt der Ausbreitungsfront	17
3.2 Zerklüftung der Ausbreitungsfront	26
4 Diskussion	30
5 Literaturverzeichnis.....	34
6 Anhang	35

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A_0	m^2	Bezugsfläche
$\bar{a}(t)$	m	mittlere Frontposition
$A(t)$	m^2	benetzte Fläche
A_v	m^2	Querschnittsfläche des Verdrängungskolben
b_0	m	Breite der Ausbreitungsfläche
c_1	1	Konstante
c_2	1	Konstante
c_3	1	Exponent
c_p	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Spezifische Wärmekapazität der Schmelze bei $T=75^\circ C$
h_0	m	Einströmhöhe
λ	$\frac{W}{m \cdot K}$	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient der Schmelze bei $T=75^\circ C$
l_f	m	Länge der Front
l_0	m	Plattenlänge
μ	$\frac{N \cdot s}{m^2}$	dynamische Viskosität der Schmelze bei $T=75^\circ C$
n	$\frac{1}{s}$	Motordrehzahl
n_{soll}	$\frac{1}{s}$	Solldrehzahl
ν	$\frac{m^2}{s}$	kinematische Viskosität der Schmelze bei $T=75^\circ C$

ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte der Schmelze bei $T=75^\circ\text{C}$
Pr	1	Prandtl-Zahl
Re	1	Reynolds-Zahl
s	m	Steigung der Gewindespindel
t	s	Zeit
T_B	$^\circ\text{C}$	Temperatur des Vorratsbehälters
T_0	$^\circ\text{C}$	Anfangstemperatur der Schmelze
T_s	$^\circ\text{C}$	nominale Erstarrungstemperatur
T_W	$^\circ\text{C}$	Plattentemperatur
u_0	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Einströmungsgeschwindigkeit
U_0	m	Umfang der Bezugsfläche
$u(t)$	V	Spannung
$U(t)$	m	Umfang der benetzten Fläche
\dot{V}	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Volumenstrom
\dot{V}_f	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	geförderter Volumenstrom
\dot{V}_0	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	eintretender Volumenstrom

1 Einleitung

Die Ausbreitung von erstarrenden Schmelzen ist ein in der Natur häufig vorkommendes Phänomen, das auch in der Technik eine große Rolle spielt. Hier ist einerseits die Ausbreitung von Lavaströmen und andererseits die Ausbreitung der Kernschmelze als Basis für die Kühlbarkeit zu nennen. Zukünftige Druckwasserreaktoren wie der EPR (Europäischer Druckwasserreaktor) werden bezüglich der Sicherheitskonzepte wesentlich weiter gehen als der derzeitige Standard. So müssen im Falle eines schweren Kernschmelzunfalles Maßnahmen getroffen werden, welche die Kühlbarkeit der Schmelze und die Integrität des Containments unter allen Umständen sicherstellen. Im einzelnen ist vorgesehen, die Schmelze unter dem Druckbehälter aufzufangen, danach auf einer ausreichenden Fläche trocken auszubreiten, um die ausgebreitete Schmelze passiv initiiert mit Wasser zu fluten um die Nachzerfallswärme durch Zirkulation an sekundäre Wärmeaustauscher abzuführen /1/.

Die Ausbreitung der Schmelze spielt hierbei eine Schlüsselrolle, da dieser Ablauf die Kühlbarkeit festlegt. Breitet sich die Schmelze vollständig aus, so wird die Schichthöhe genügend klein, um die Kühlbarkeit zu garantieren. Andererseits kann eine durch Erstarrung bedingte, unvollständige Ausbreitung zu großen Schichtdicken führen. Nun ist die vollständige Abfuhr der Nachzerfallswärme über die Oberfläche nicht sichergestellt und eine Aufheizung der Schmelze wird möglich. Dies bedingt die Gefahr einer Erosion der Bodenplatte.

An einem bestehenden Versuchsaufbau sollen Experimente zur Ausbreitung metallischer Modellschmelzen bei temperierter Bodenplatte durchgeführt werden. Die Temperatur der Bodenplatte wird hierbei zunächst oberhalb der Erstarrungstemperatur gehalten. In weiteren Schritten wird die Temperatur der Bodenplatte unterhalb der Erstarrungstemperatur abgesenkt, um Erstarrung zu erhalten. Als Modellschmelze wird Woodsmetall (Legierung MCP 58) verwendet.

2 Beschreibung des Versuchstandes und der Versuchstechnik

2.1 Modifikationen am bestehenden Versuchsaufbau

2.1.1 Probleme des bestehenden Versuchsaufbaues

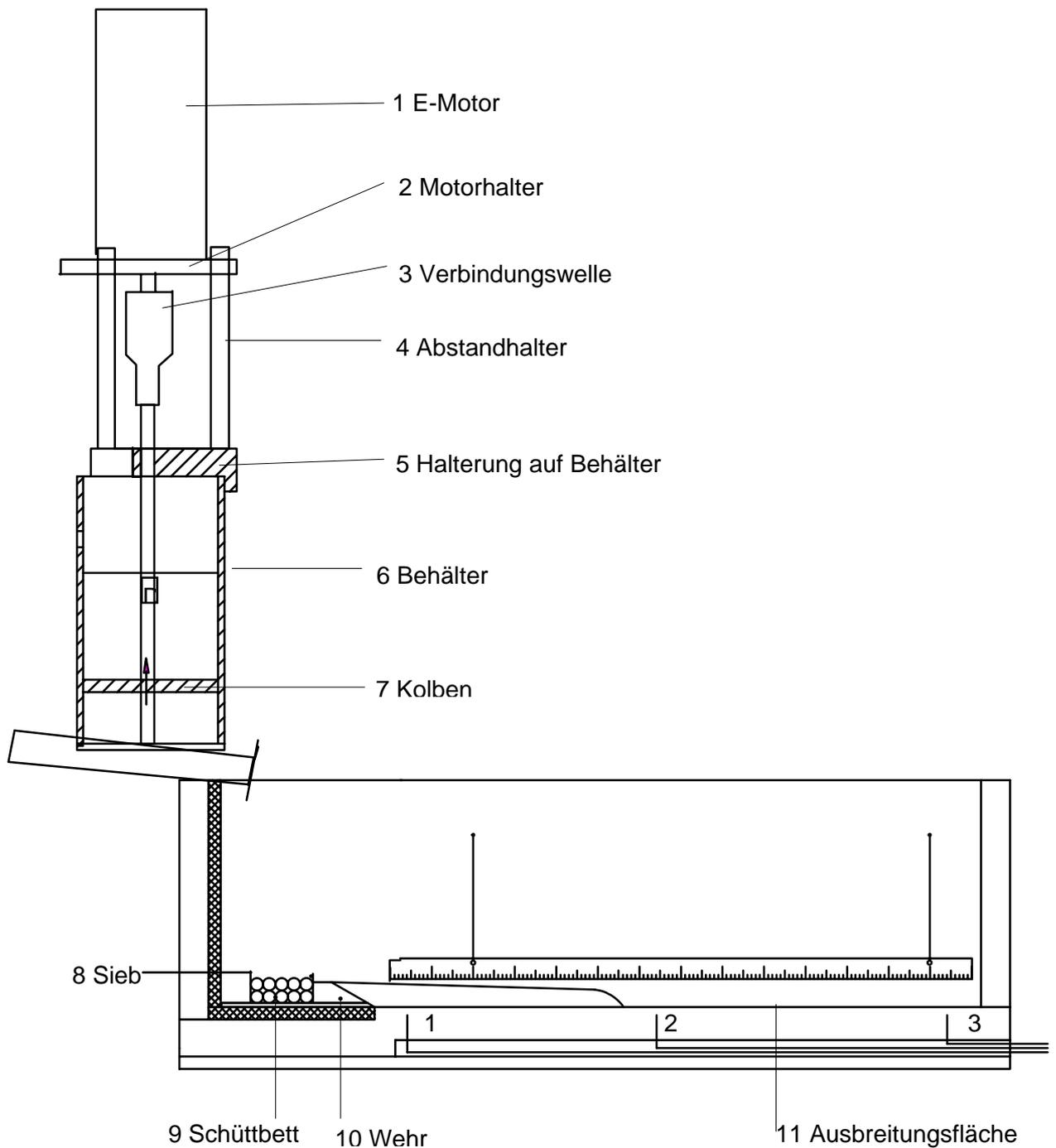


Abb. 2.1 Skizze des ursprünglichen Versuchsaufbaues /3/

Der ursprüngliche Versuchsaufbau besteht im wesentlichen aus der Fördereinrichtung (E-Motor (1), Verbindungswelle (3), Behälter (6), Kolben (7)) und dem Füllstand (Sieb (8), Schüttbett (9), Wehr (10), Ausbreitungsfläche (11)). Im Behälter befindet sich das erschmolzene Woodsmetall (MCP-58). Durch eine Aufwärtsbewegung des Kolbens wird das Woodsmetall nach oben gefördert und tritt durch die Schlitz im Behälter aus. Von dort gelangt es über ein Sieb in das Schüttbett, das zur Ausbreitungsfläche hin durch ein beheiztes Wehr abgetrennt ist. Tritt das flüssige Woodsmetall über die Wehrkante, gelangt es auf die Ausbreitungsfläche, die auf verschiedene Temperaturen $TW \leq 75^\circ\text{C}$ temperiert werden kann.

Die Probleme früherer Versuche waren zum einen die Drehzahl des Elektromotors, die nicht konstant gehalten werden konnte. Somit war die Förderung eines konstanten Volumenstromes \dot{V} nicht möglich. Weiterhin ergaben sich Abdichtungsprobleme des bewegten Kolbens. Die Gewindespindel und der Elektromotor waren zudem mit dem schweren Woodsmetall, sowie aufgrund der hohen Reibung der Kolbendichtung, überlastet. Die Modellschmelze trat nicht auf voller Breite gleichmäßig über die Wehrkante, wodurch eine gleichmäßige Einströmung nicht möglich war. Die relativ gute Benetzung des Woodsmetalls auf der Kupferplatte (Ausbreitungsfläche) führte weiterhin zu starker Fingerbildung und Unregelmäßigkeiten der Schmelzfront. Von den ursprünglich drei Thermoelementen zur Kontrolle der Plattentemperatur war nur noch eines funktionstüchtig. Die Wasserkanäle der horizontalen Kupferplatte wurden durch eine Stahlplatte abgeschlossen, wodurch es aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien zu Spannungen kam, die vermutlich die Ursache für die Unebenheit der Ausbreitungsfläche waren.

2.1.2 Änderungen am Versuchsaufbau

Die Verbindungswelle (3) zwischen Elektromotor (1) und Gewindespindel (6) ist auf Passung gefertigt und ein Kreuzgelenk am Ende der Gewindespindel entfernt worden. Der Kolben ist entfernt und ein Verdrängungskörper (7) eingebaut worden, der nun über eine Abwärtsbewegung die Schmelze aus dem Vorratsbehälter (9) verdrängt. Auf diese Weise kann das Dichtungsproblem, wie auch das Überlastungsproblem von Elektromotor und Gewindespindel gelöst werden. Mit diesen Maßnahmen ist eine gleichmäßige Motordrehzahl und somit ein konstanter Volumenstrom \dot{V} erreicht worden. Das Wehr, über das die Schmelze auf die Ausbreitungsfläche getreten ist, ist entfernt worden. Anstelle dieses Wehres ist ein Absatz auf der linken Seite der horizontalen Kupferplatte eingefräst und eine Keramik (16) zur thermischen Entkopplung eingeklebt worden. Die Ausbreitungsfläche (12) ist zunächst überfräst worden, so daß eine ebene Fläche entstanden ist. Danach ist die Fläche geläppt und hartverchromt worden. Die Hartchromschicht ergibt eine schlechtere, aber gleichmäßige Benetzung mit relativ großem Kontaktwinkel. Dies führt vor allem zu einer gleichmäßig fortschreitenden Schmelze während der Ausbreitung. Die defekten Thermolemente sind durch neue (13-15) ersetzt worden, und anstelle der Stahlplatte ist eine Kupferplatte (19) zum Einsatz gekommen, um die Kühlkanäle (18) nach außen hin abzuschließen. Diese Maßnahme vermeidet größere Spannungen und Verformungen beim Aufheizen.

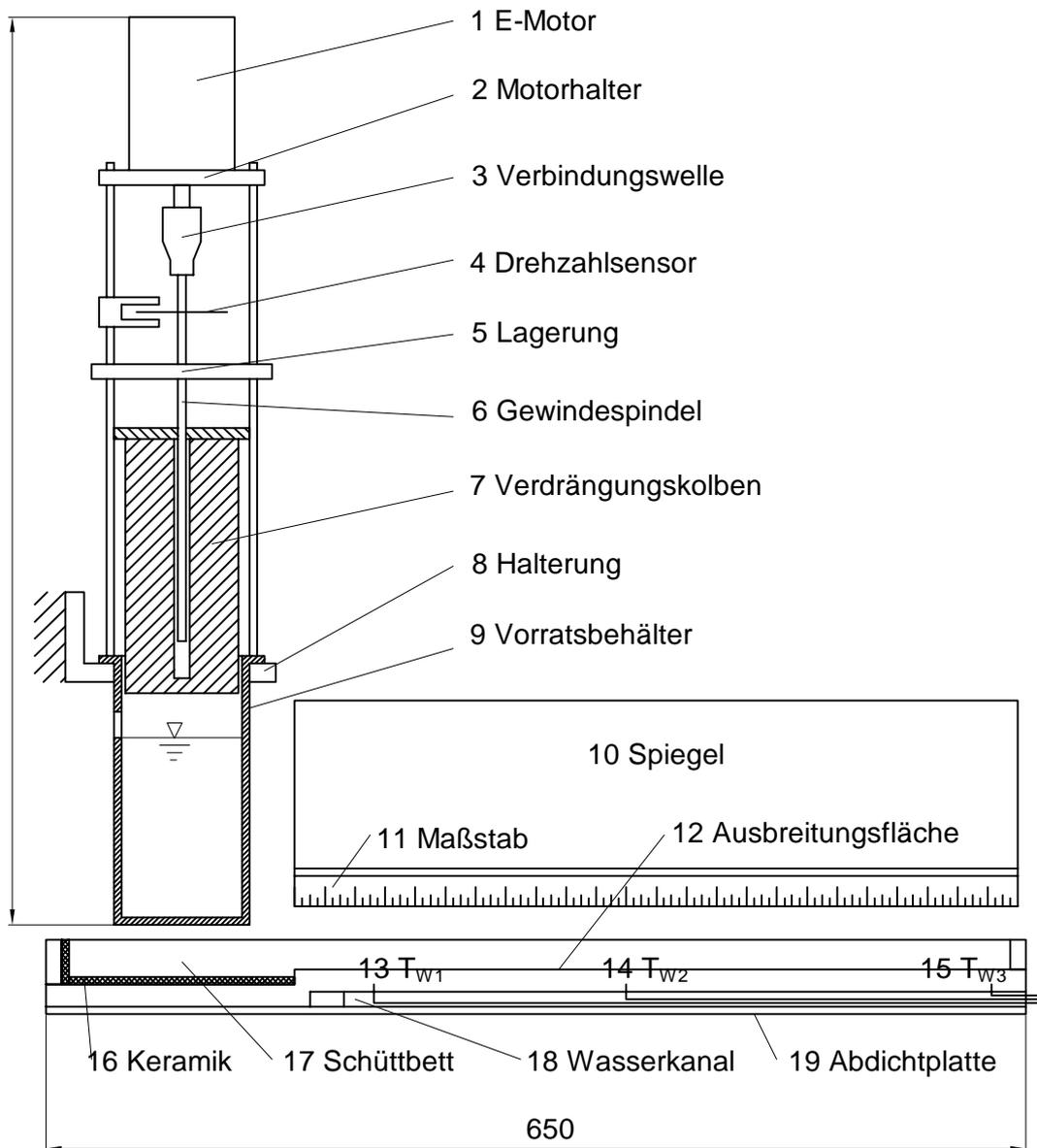


Abb. 2.2 Modifizierter Versuchsaufbau, Skizze des modifizierten Versuchsaufbaus

2.2 Versuchsstand

Der Versuchsstand besteht aus vier miteinander verschraubten Kupferplatten. Die beiden vertikalen Platten dienen als Begrenzungsflächen. Die horizontalen Platten stellen die Ausbreitungsfläche (12) dar, wobei in die obere Kupferplatte Wasserkanäle (18) zur Temperierung der Ausbreitungsfläche eingefräst sind, und die Oberfläche hartverchromt ist. Die hartverchromte Oberfläche dient als Ausbreitungsfläche mit gleichmäßigen Benetzungseigenschaften. Die untere Kupferplatte (19) dichtet die Wasserkanäle ab. Seitlich wird der Versuchsstand durch

zwei Plexiglasscheiben, die mit den vertikalen Platten verschraubt sind, abgedichtet. Die Hauptabmessungen des Versuchsstandes sind 650mm x 200mm x 55mm.

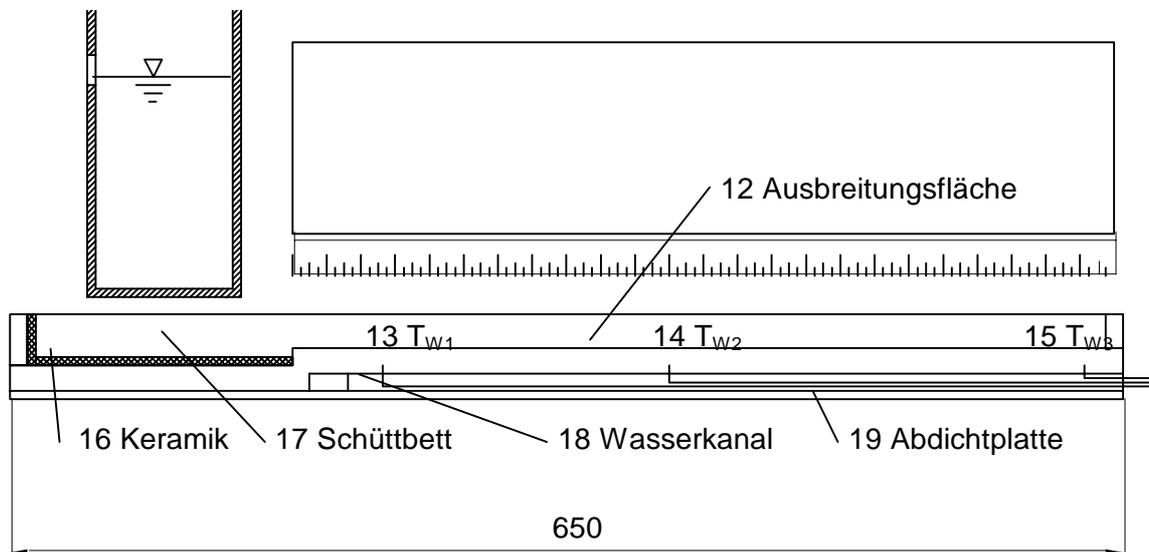


Abb. 2.3 Skizze des Versuchsstandes

Die Wasserkanäle werden mit Wasser durchspült, das über einen Thermostat, der unter dem Versuchsstand plaziert ist, auf einer gewünschten Temperatur gehalten wird. Die sehr gute Wärmeleitfähigkeit der Kupferplatte gewährleistet somit eine gleichmäßige Temperatur der Ausbreitungsfläche. Zusätzlich sind in der Ausbreitungsfläche 2 mm unterhalb der Oberfläche drei Thermoelemente (13-15) angeordnet, um die Temperaturverteilung zu kontrollieren. Diese Thermoelemente sind mit einem Eispunkt in Differenz verschaltet. Die Versuchsreihen werden mit Plattentemperaturen zwischen 40°C und 75°C durchgeführt.

Auf der linken Seite der horizontalen Kupferplatte befindet sich ein eingefräster Absatz, in den eine Keramikplatte (16) zur thermischen Entkopplung eingeklebt ist. Hierdurch wird erreicht, daß die Schmelze auf Anfangstemperatur in diesem Bereich bleibt, während die Ausbreitungsfläche (12) beispielsweise gekühlt ist.

2.3 Fördereinrichtung

Die Fördereinrichtung besteht im wesentlichen aus Vorratsbehälter (9), Verdrängungskolben (7), Gewindespindel (6), Lager (5), Drehzahlmeßeinrichtung (4) und Elektromotor (1). Der Vorratsbehälter ist beheizbar, so daß die Schmelze in ihm temperiert werden kann. Die Schmelze kann aus zwei Schlitzen, die sich im Vorratsbehälter befinden, austreten. Der Verdrängungskolben aus PVC läßt sich über die Gewindespindel axial verschieben. Er kann so in den Vorratsbehälter eintauchen und die dort befindliche Schmelze verdrängen. Dadurch ist es möglich, einen konstanten Volumenstrom \dot{V} zu fördern und auf die Ausbreitungsfläche aufzubringen. Die Gewindespindel wird von einem Elektromotor angetrieben. Das Lager stellt zusammen mit dem Lager im Elektromotor die Zweipunktlagerung des Antriebsstranges sicher.

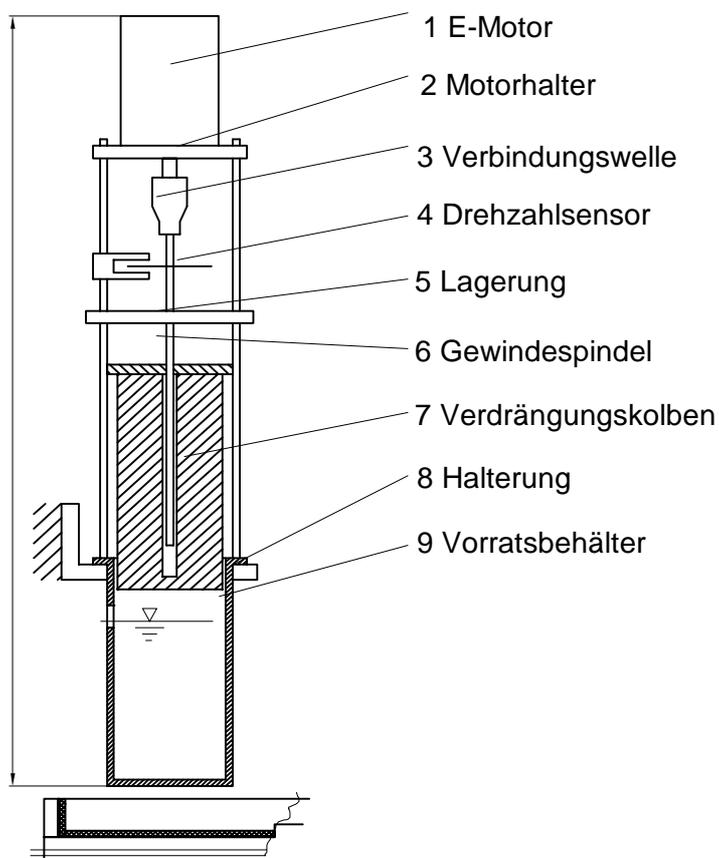


Abb. 2.4 Skizze der Fördereinrichtung

2.4 Meßtechnik

Der Versuchsstand ist an einen programmierbaren Scanner (Accurex) angeschlossen, über den die während des Versuches gemessenen Daten (Spannungen, Frequenzen, Ströme) an einen PC weitergegeben werden. Zur Messung der Temperaturdifferenzen dienen die Thermoelemente T_{W1} , T_{W2} und T_{W3} . Sie messen die Temperatur an der Oberfläche der horizontalen Platte. Die Thermoelemente sind mit Thermoelementen im Eispunkt (0°C) in Differenz verschaltet. Der Scanner erfaßt im Abstand von zwei Sekunden die Spannungswerte. Diese können nun anhand einer Tabelle oder automatisiert im PC in $^{\circ}\text{C}$ umgerechnet werden. Der Scanner erhält weiter die Spannungswerte des Thermoelements im Vorratsbehälter T_B , sowie der Drehzahl n des Elektromotors und rechnet diese intern in $^{\circ}\text{C}$ und $\frac{1}{\text{s}}$ um. Die Schwankungen der Motordrehzahl und der Plattentemperatur während des Versuches sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1 Genauigkeit der Meßwertaufnahme

	Solltemperatur der Platte	Abweichung von der Solltemperatur	Drehzahl-schwankung
Re=3,76	40°C	+ 2,5°C	$\pm 0,03 \frac{1}{\text{s}}$
	75°C	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$	$(n_{\text{soll}}=0,545 \frac{1}{\text{s}})$
Re=10,75	40°C	+ 1,75°C	$\pm 0,25 \frac{1}{\text{s}}$
	75°C	$\pm 0,25^{\circ}\text{C}$	$(n_{\text{soll}}=1,559 \frac{1}{\text{s}})$
Re=39,92	40°C	+ 3,05°C	$\pm 0,1 \frac{1}{\text{s}}$
	75°C	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$(n_{\text{soll}}=5,789 \frac{1}{\text{s}})$

Die ausführliche Berechnung der Reynolds-Zahl erfolgt in Kapitel 2.5, Versuchsdurchführung. Man sieht, daß sich die Genauigkeit der Temperaturführung in zwei Bereiche gliedern läßt. Im Bereich hoher Plattentemperatur (75°C) liegt die Genauigkeit zwischen $\pm 0,1^\circ\text{C}$ und $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Im Bereich niedriger Plattentemperaturen (40°C) liegt die Genauigkeit bei $+ 1,75^\circ\text{C}$ bzw. $+ 3,05^\circ\text{C}$. Dies läßt sich durch die größere Temperaturdifferenz zwischen der Platte und dem Woodsmetall erklären. Die Platte nimmt während des Versuches Wärme aus dem flüssigen Woodsmetall auf, welche nicht schnell genug durch den Wasserkreislauf abtransportiert werden kann. Somit steigt die Plattentemperatur deutlich um die gegebenen Werte an. Die auftretenden Drehzahlschwankungen sind klein. Nachfolgend ist der prinzipielle Aufbau der Meßtechnik skizziert.

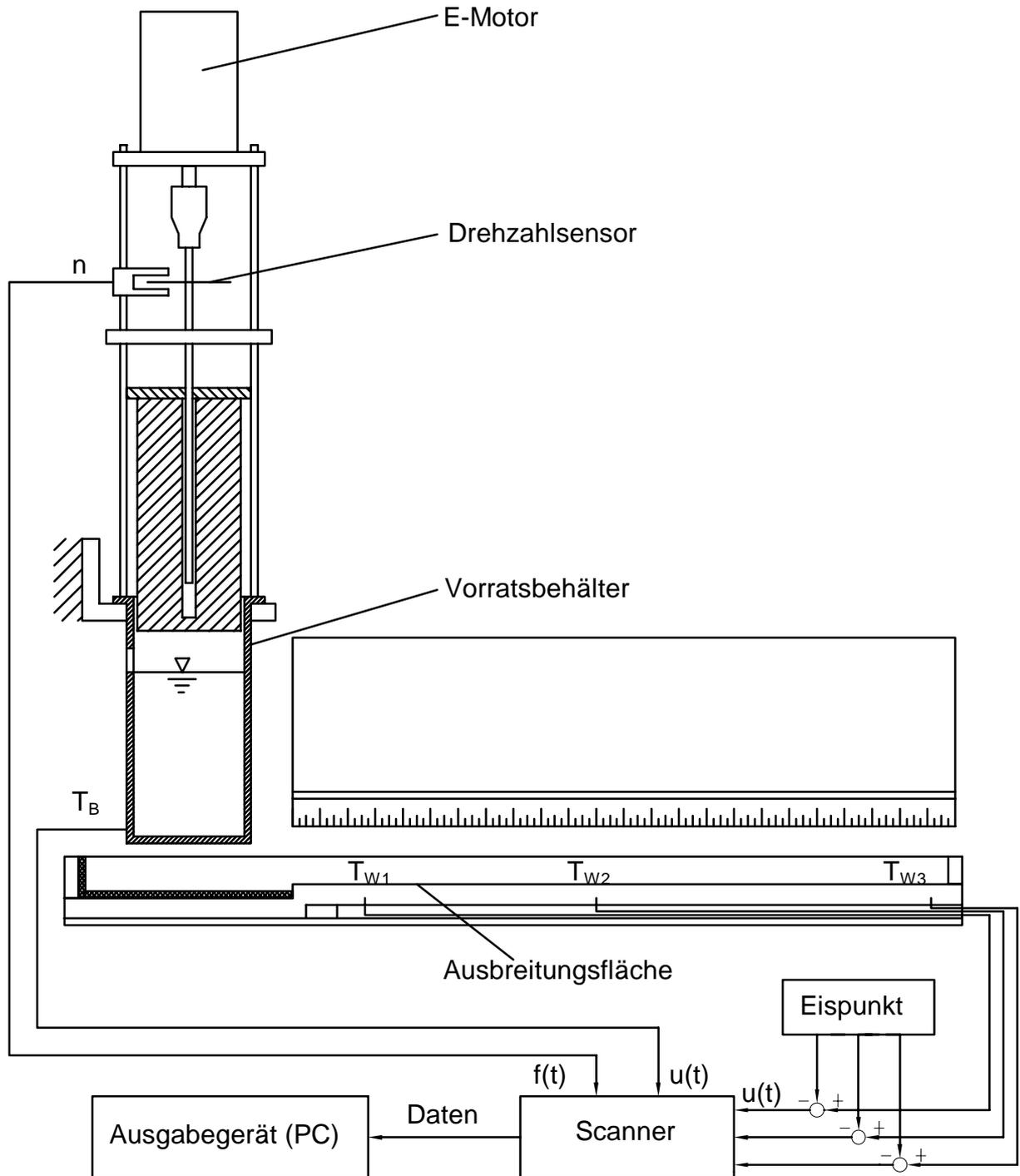


Abb. 2.5 Skizze der Meßtechnik

Um das Ausbreitungsverhalten der Modellschmelze erfassen zu können, wird die Ausbreitung der Schmelze mit einer Kleinbildkamera (Canon F1) aufgenommen. Diese Kamera ist auf einem Stativ in ca. 2 m Entfernung zum Versuchsstand aufgebaut. Parallel dazu wird die Ausbreitung mit einer Video-PC-Bilderfassung in festen Zeitschritten erfaßt. Die Auswertung bzgl. des Frontfortschrittes wird im

folgenden jedoch ausschließlich auf Basis der Bilder der Kleinbildkamera durchgeführt.

2.5 Versuchsdurchführung

Zur Durchführung eines Versuches sind umfangreiche Vorbereitungen notwendig. Das Woodsmetall wird in einem Behälter erschmolzen und auf eine Temperatur von 75°C gebracht. Parallel dazu wird der Vorratsbehälter ebenfalls auf 75°C temperiert. Der Thermostat des Wasserkreislaufes wird auf die gewünschte Plattentemperatur eingestellt. Die Ausbreitungsfläche wird gereinigt und mit einer Präzisions-Wasserwaage ausgerichtet. Hierbei wird eine Genauigkeit von $\pm 0,33$ mm pro 1 m erreicht. Sind die gewünschten Temperaturen eingeregelt, wird die Abtastung der Meßwerte und die Datenübertragung zum PC aktiviert. Der Vorratsbehälter wird nun mit dem flüssigen Woodsmetall gefüllt. Als nächstes wird die Kleinbildkamera eingestellt und die Lampen werden eingeschaltet. Nun wird der Elektromotor in Gang gesetzt, wodurch sich der Verdrängungskolben nach unten bewegt, und das flüssige Woodsmetall aus dem Vorratsbehälter austritt. Beginnt sich das Metall auf der Ausbreitungsfläche auszubreiten, beginnt mit der Kleinbildkamera die Registrierung des Ausbreitungsprozesses. Hierbei erfolgt die Kameraauslösung manuell in frei bestimmten Intervallen, während die eingblendete Stoppuhr die zeitliche Zuordnung der Bilder sicherstellt. Ist der Verdrängungskolben vollständig in den Vorratsbehälter eingetaucht, wird der Motor gestoppt. Jetzt werden die auf den PC und die Video-PC-Bilderfassung überspielten Daten gesichert und die übrigen Meßgeräte abgeschaltet. Nach Erkalten des Woodsmetalls, kann das Metall von der Ausbreitungsfläche gehobelt werden.

Innerhalb der Versuchsreihen werden die Plattentemperatur und die Reynolds-Zahl variiert.

Bestimmung der Reynolds-Zahl:

Physikalisch betrachtet ist die Reynolds-Zahl das Verhältnis aus Trägheitskräften und Reibungskräften /2/. Im vorliegenden Fall wird sie durch die Einströmung in die

Ausbreitungsfläche festgelegt. Bei gegebener Einströmungsgeschwindigkeit u_0 und Einströmhöhe h_0 wird

$$\text{Re} = \frac{u_0 \cdot h_0}{\nu} . \quad (1)$$

Die Reynolds-Zahl kann über die Einströmrates $(u_0 \cdot h_0)$ variiert werden, wobei weder u_0 noch h_0 für sich bekannt sind. Die Einströmrates $(u_0 \cdot h_0)$ ergibt zusammen mit der Breite b_0 der Ausbreitungsfläche den eintretenden Volumenstrom \dot{V} gemäß

$$\dot{V} = (u_0 \cdot h_0) \cdot b_0 . \quad (2)$$

Andererseits kann man den in die Ausbreitungsfläche eintretenden Volumenstrom \dot{V}_0 in guter Näherung mit dem geförderten Volumenstrom \dot{V}_f gleichsetzen. Dieser ergibt sich aus der Steigung s der Gewindespindel, der Drehzahl n , sowie der Querschnittsfläche A_v des Verdrängungskörpers zu

$$\dot{V}_f = s \cdot n \cdot A_v . \quad (3)$$

Aus $\dot{V}_0 \sim \dot{V}_f$ können wir somit die Förderrates $(u_0 \cdot h_0)$ gemäß

$$(u_0 \cdot h_0) \cong \frac{s \cdot n \cdot A_v}{b_0} \quad (4)$$

berechnen. Somit wird bei Kenntnis der Viskosität ν die Reynolds-Zahl berechenbar. Die Reynolds-Zahlen für die drei Versuchsserien sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Tabelle 2 Reynolds-Zahl bei unterschiedlicher Motordrehzahl

Motordrehzahl in $\frac{1}{s}$	Reynolds-Zahl
0,545	3,76
1,559	10,75
5,789	39,92

Eine Übersicht über die Versuchsdaten und Hauptabmaße soll Tabelle 3 geben.

Tabelle 3 Übersicht der Versuchsdaten und Hauptabmaße

Verdrängungskolbenfläche A_v	$4,419 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Spindeldrehzahl n	$(0,545 - 5,789) \frac{1}{s}$
Steigung der Gewindespindel s	$1,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Plattenbreite b_0	0,198 m
Plattenlänge l_0	0,65 m
Plattentemperatur T_w	$(40 - 75)^\circ \text{C}$

Die Prandtl-Zahl:

Die Prandtl-Zahl ergibt sich physikalisch aus dem Verhältnis von kinematischer Viskosität und Temperaturleitfähigkeit. Sie ist eine dimensionslose Kennzahl und nur von den Stoffeigenschaften des jeweiligen Fluids abhängig [2]. Diese Stoffeigenschaften werden während der Versuche nicht geändert, da die Modellschmelze ausschließlich aus Woodsmetall besteht, und somit auch die Prandtl-Zahl nicht variiert wird.

Die Prandtl-Zahl ist definiert zu

$$\text{Pr} = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} . \quad (5)$$

Mit den Stoffeigenschaften von MCP 58 erhalten wir den Wert $\text{Pr}=0,74$.

Diese Stoffeigenschaften sind in Tabelle 4 zusammengefaßt.

Tabelle 4 Stoffeigenschaften von MCP 58

Dichte	ρ	$9230 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Spezifische Wärmekapazität flüssig	c_p	$201 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Wärmeleitfähigkeit	λ	$10 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
Dynamische Viskosität	μ	$37,33 \cdot 10^{-3} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$
nom. Erstarrungstemperatur	T_s	58°C
Prandtl-Zahl	Pr	$0,74$

2.6 Auswertungsmethode

Zur Auswertung der Versuche werden die Photos der Kleinbildkamera verwendet. Die Photos werden mittels des Zeichenprogrammes AUTOCAD digitalisiert. Diese Methode der Auswertung ist erforderlich, da die Fronten nicht immer eben sind und deshalb die mittlere Frontposition $\bar{a}(t)$ nur sehr schwer mit dem Auge zu bestimmen ist. Die Auswertung erfolgt deshalb über die benetzte Fläche $A(t)$,

$$A(t) = \bar{a}(t) \cdot b_0 . \quad (6)$$

Hierzu wird der Umfang U der benetzten Fläche $A(t)$, sowie der Umfang der Bezugsfläche A_0 digitalisiert. Das Ergebnis wird von AUTOCAD in Zeichnungseinheiten ZE angegeben. In AUTOCAD können in der Folge die Flächen A_0 und $A(t)$, wie auch die Umfänge beider Flächen U_0 , $U(t)$ in Zeichnungseinheiten ZE direkt ermittelt werden. Die Bezugsfläche A_0 und ihr Umfang U_0 sind nun aufgrund des mitphotographierten Maßstabes sowohl in Zeichnungseinheiten, als auch in physikalischen Einheiten bekannt. Hieraus kann direkt die Kalibrierung abgeleitet werden. Wir ermitteln die mittlere Frontposition folglich nach

$$\bar{a}(t) [\text{m}] = \frac{A(t) [\text{ZE}] \cdot A_0 [\text{m}^2]}{A_0 [\text{ZE}] \cdot b_0 [\text{m}]} \quad (7)$$

Entsprechend ergibt sich die Länge der Front $l_f(t)$ gemäß

$$b_0 [\text{m}] + l_f(t) [\text{m}] = \frac{U(t) [\text{ZE}]}{U_0 [\text{ZE}]} \cdot U_0 [\text{m}] - 2 \cdot \bar{a}(t) [\text{m}]. \quad (8)$$

Die Länge der Front ist ein Maß für die Ebenheit bzw. Zerklüftung der Front. Die Front ist mit mindestens 35 Punkten digitalisiert worden, wobei der typische Fehler beim Digitalisieren von U_0 und $U(t)$ unter einem Prozent liegt.

Die Auswertung über die Video-PC-Bilderfassung erweist sich als umständlicher, und es ist weiter nicht möglich, eine höhere Genauigkeit zu erzielen. Aus diesem Grunde wird von dieser Auswertungsmethode Abstand genommen.

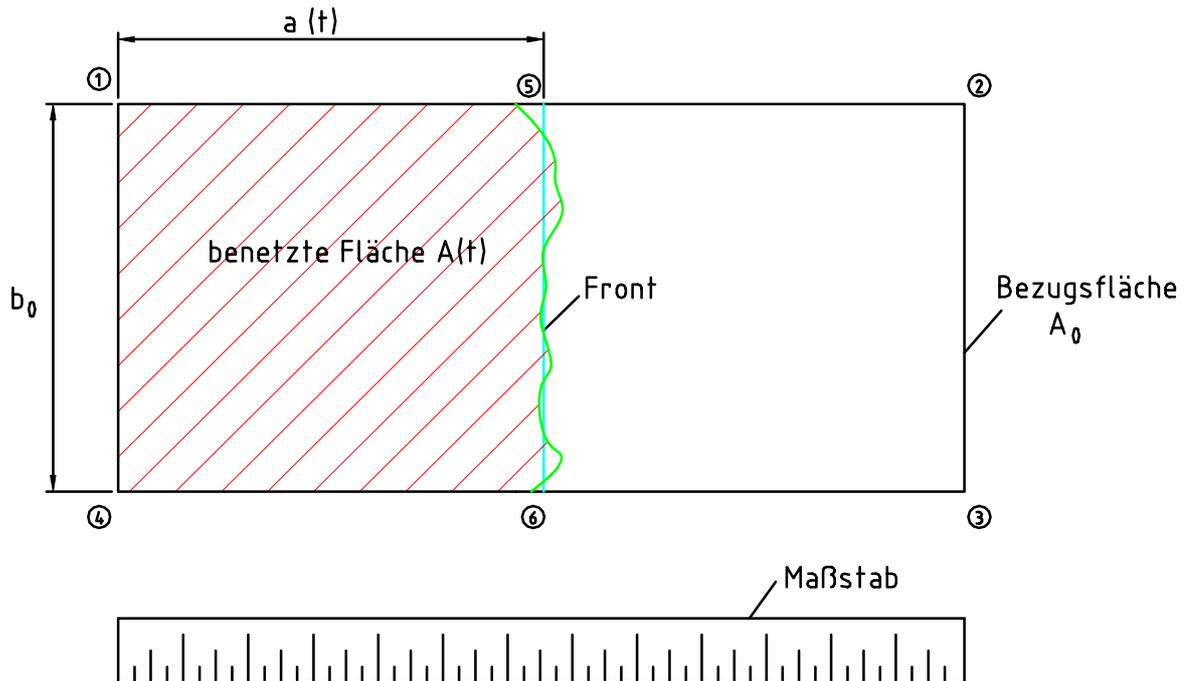


Abb. 2.6 Skizze eines Photoausschnittes

Abbildung 2.6 zeigt einen typischen Photoausschnitt. Verbindet man die Punkte ①-④, so erhält man die Bezugsfläche A_0 . Die Punkte ①, ⑤, ⑥ und ④ stellen die benetzte Fläche $A(t)$ dar.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Fortschritt der Ausbreitungsfrent

a) Reynolds-Zahl $Re=3,76$

Alle Meßreihen bestehen aus ca. 20 bis 35 Meßpunkten. Es werden Versuchsreihen mit drei verschiedenen Reynolds-Zahlen gefahren, die wir über die Drehzahl des Elektromotors variiert haben. Die Schmelzausbreitung ist in allen Versuchen eher trägheitsdominiert, da alle Reynolds-Zahlen im Bereich $Re > 1$ zu finden sind.

Die erste Versuchsreihe wird mit $Re=3,76$ durchgeführt. Abb. 3.1 zeigt die Ausbreitungsfrent als Funktion der Zeit t bei verschiedenen Plattentemperaturen T_W und für $Re=3,76$.

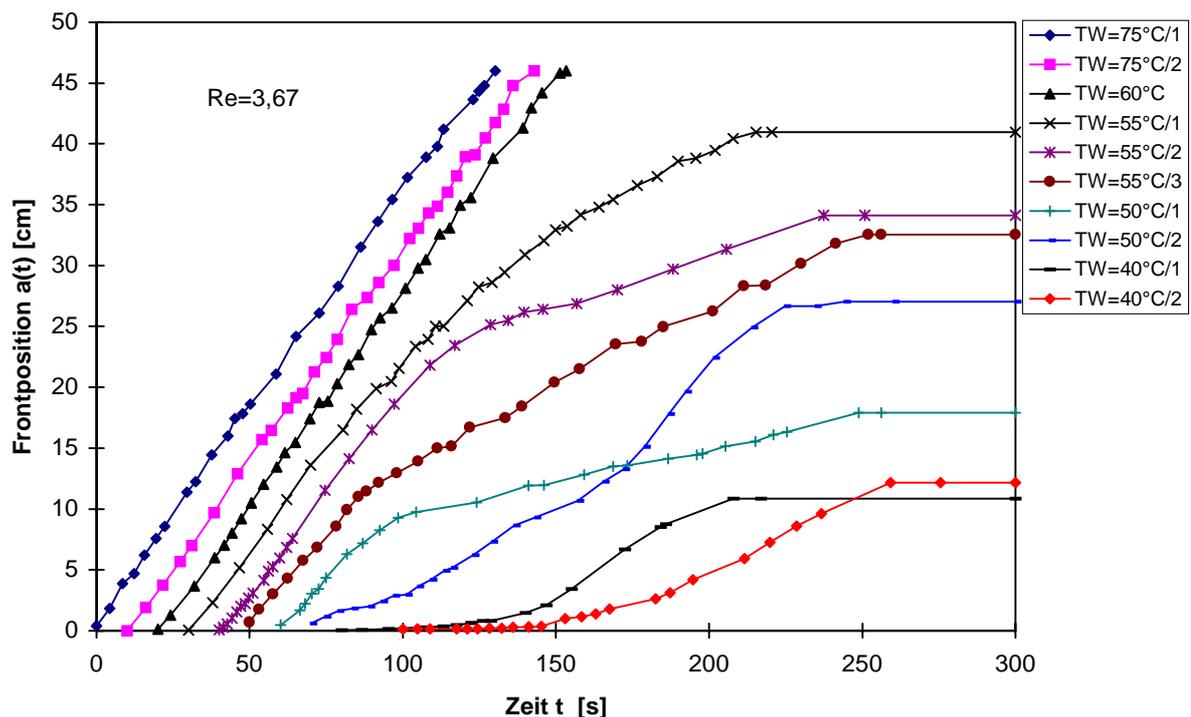


Abb. 3.1 Position der Front als Funktion der Zeit für verschiedene Plattentemperaturen T_W

Zur besseren Anschauung sind die Kurven in Abb. 3.1 auf der Zeit-Achse versetzt dargestellt. Die einzelnen Plattentemperaturen T_W sind ausgehend von $T_W=75^\circ\text{C}$ von links nach rechts fallend angeordnet. Im Bereich der Plattentemperaturen

$T_W \geq 60^\circ\text{C}$ handelt es sich um eine rein flüssige Ausbreitung. Die Schmelze breitet sich bis zum Ende der Ausbreitungsfläche aus. Die Kurven weisen eine gute Reproduzierbarkeit auf. Sie verlaufen mit vergleichbarer Steigung. Dies kann durch die Potenzfunktion vom Typ

$$\bar{a}(t) = c_1 + c_2 \cdot t^{c_3} \quad (9)$$

belegt werden. Die Konstante c_1 findet keine Beachtung, da die Kurven auf der t -Achse verschoben dargestellt sind. Wir betrachten folglich nur die Proportionalität

$$\bar{a}(t) \sim c_2 \cdot t^{c_3}. \quad (10)$$

Für die Versuche isothermer Schmelzausbreitung bei $Re=3,76$ sind folgende Funktionen ermittelt worden:

$$\bar{a}_{75^\circ\text{C}/1} \sim 0,435 \cdot t^{0,958},$$

$$\bar{a}_{75^\circ\text{C}/2} \sim 0,364 \cdot t^{0,992},$$

$$\bar{a}_{60^\circ\text{C}} \sim 0,365 \cdot t^{0,993}.$$

Die Funktionen zeigen, daß der Exponent c_3 nahezu 1 beträgt und die Funktionen deshalb Geradenfunktionen mit der Steigung c_2 darstellen. Diese Steigung liegt im Bereich $0,364 \leq c_2 \leq 0,435$.

Für Plattentemperaturen $T_W < 60^\circ\text{C}$ weisen alle Experimente ein anderes Verhalten auf. Die Kurven mit einer Plattentemperatur von $T_W=55^\circ\text{C}$ zeigen anfänglich eine ungestörte, flüssige Ausbreitung. Die Steigung in diesem Bereich ist mit der Steigung der Kurven für $T_W \geq 60^\circ\text{C}$ vergleichbar, jedoch mit einer schlechteren Reproduzierbarkeit, da die Steigung in einem größeren Bereich schwankt. Die nachfolgenden Funktionen repräsentieren den frühen Verlauf der Meßdaten.

$$\bar{a}_{55^{\circ}\text{C}/1} \sim 0,458 \cdot t^{0,937},$$

$$\bar{a}_{55^{\circ}\text{C}/2} \sim 0,318 \cdot t^{1,009},$$

$$\bar{a}_{55^{\circ}\text{C}/3} \sim 0,261 \cdot t^{1,023}.$$

Sie zeigen klar, daß zu Beginn der Ausbreitung noch keine Erstarrungseffekte auftreten, indem mit $c_3 \approx 1$ die gleiche Proportionalität wie für die rein flüssige Schmelze auftaucht. Im weiteren Verlauf verlangsamt sich die Ausbreitung, was durch das Abflachen der Kurven erkennbar ist und durch einen Knick eingeleitet wird. Die Ausbreitung der Schmelze wird offensichtlich durch Erstarrungsprozesse gebremst, bis hin zum vollständigen Ausfrieren bei Erreichen der Endposition. Die Endpositionen aus den einzelnen Experimenten streuen deutlich.

Die beiden Kurven bei einer Plattentemperatur von $T_W=50^{\circ}\text{C}$ weisen nun merklich unterschiedliche Anfangssteigung auf. Quantitative Aussagen über die funktionelle Form lassen sich nicht treffen, da die Anzahl der Datenpunkte in dieser kurzen ersten Phase der Ausbreitung nicht ausreichend ist. Es handelt sich hierbei offensichtlich um einen Übergangsbereich, denn beide Experimente verhalten sich trotz guter Temperaturkonstanz deutlich verschieden. In beiden Fällen breitet sich die Schmelze bis zum Stillstand aus, wobei die Endposition der Schmelze erneut deutlich streut. Die Endpositionen der Schmelze bei $T_W=50^{\circ}\text{C}$ liegen vor den Endpositionen der Schmelze für $T_W > 50^{\circ}\text{C}$.

Die Kurven für die Plattentemperaturen $T_W=40^{\circ}\text{C}$ verlaufen sofort zu Beginn der Schmelzausbreitung mit einer sehr flachen Steigung. Die Schmelzausbreitung ist offensichtlich über die gesamte Zeit erstarrungskontrolliert, bis hin zum völligen Ausfrieren. Die erreichten Endpositionen der Schmelzen liegen wiederum vor den Endpositionen bei höherer Plattentemperatur.

Abb. 3.2 zeigt die Endposition der Schmelze als Funktion der Plattentemperatur T_W . Wir erkennen, daß mit wachsender Plattentemperatur T_W , die Schmelze bis zur Erstarrung immer weiter vorankommt. Weiterhin ist die Streuung aus den Einzelexperimenten anhand der mehrfachen Meßdaten erkennbar.

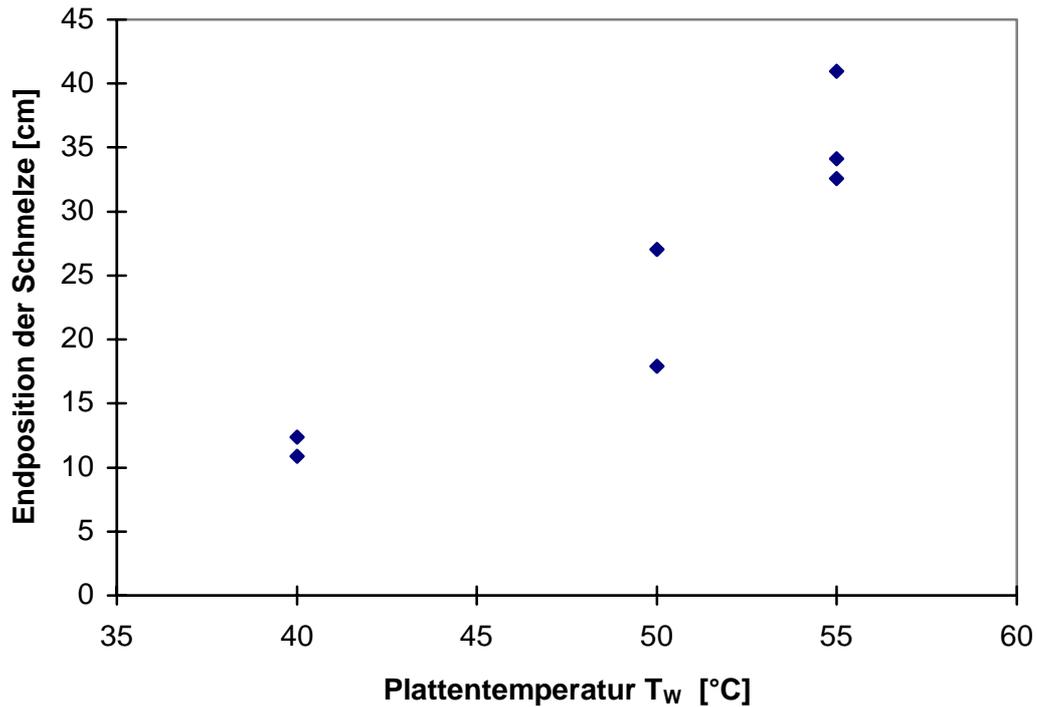


Abb. 3.2 Endposition der Schmelze als Funktion der Plattentemperatur T_w bei $Re=3,76$.

b) Reynolds-Zahl $Re=10,75$

Bei der zweiten Versuchsreihe wird die Motordrehzahl $1,559 \frac{1}{s}$ eingestellt. Dies hat eine Reynolds-Zahl von $Re=10,75$ zur Folge. Die Prandtl-Zahl bleibt unverändert, da sich die Stoffdaten nicht geändert haben. Abb. 3.3 zeigt die Ausbreitungsfront als Funktion der Zeit t bei verschiedenen Plattentemperaturen T_w für $Re=10,75$.

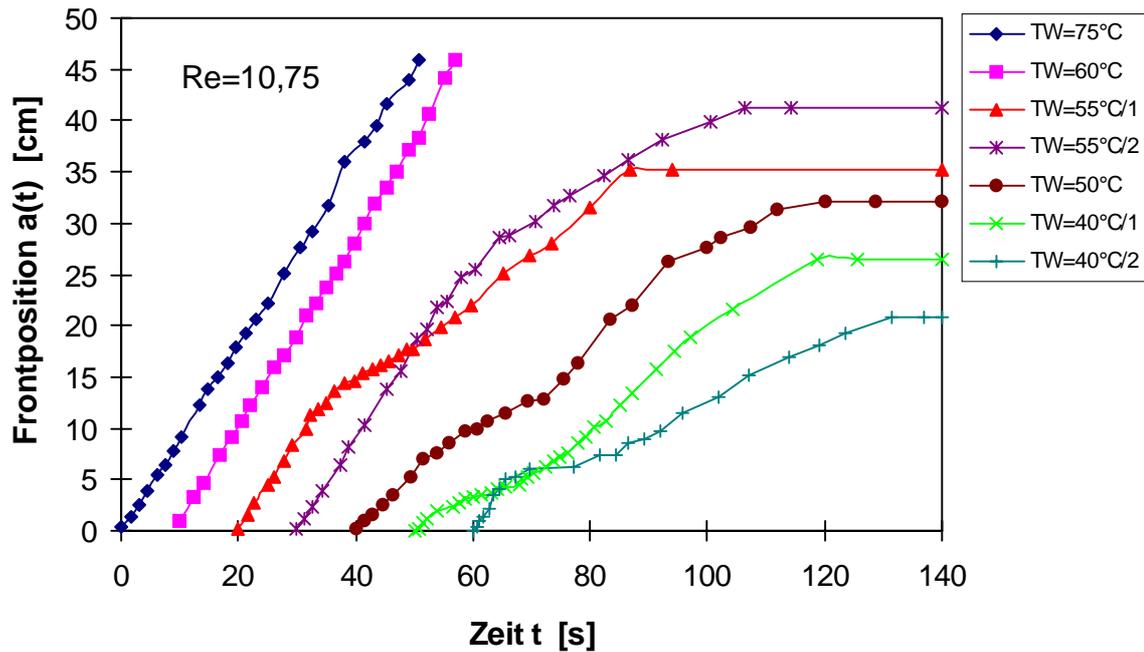


Abb. 3.3 Position der Front als Funktion der Zeit für verschiedene Plattentemperaturen T_W

In Abb. 3.3 ist wiederum erkennbar, daß die Ausbreitungsfront im isothermen Fall mit $T_W \geq 60^\circ\text{C}$ ungehindert bis zum Ende der Ausbreitungsfläche fortschreitet, d.h., es liegt eine rein flüssige Ausbreitung vor. Die Potenzfunktionen

$$\bar{a}_{75^\circ\text{C}} \sim 0,89 \cdot t^{1,006},$$

$$\bar{a}_{60^\circ\text{C}} \sim 0,732 \cdot t^{1,062}$$

zeigen erneut eine gute Übereinstimmung, indem die Exponenten in guter Näherung $c_3 \approx 1$ sind und die Geradensteigung c_2 in guter Näherung übereinstimmt.

Die Kurven bei einer Plattentemperatur von $T_W=55^\circ\text{C}$ zeigen zunächst in einer frühen Phase eine rein flüssige Ausbreitung. Diese ist in jeder Hinsicht vergleichbar mit der Ausbreitung bei $T_W \geq 60^\circ\text{C}$. Die Potenzfunktionen in dieser frühen Phase belegen dies, indem wir

$$\bar{a}_{55^\circ\text{C}/1} \sim 0,861 \cdot t^{1,0},$$

$$\bar{a}_{55^\circ\text{C}/2} \sim 0,856 \cdot t^{1,016}.$$

erhalten. Im weiteren Verlauf flachen die Kurven ab, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schmelze nimmt ab. Sie wird offensichtlich durch Erstarrung gebremst, bis hin zum völligen Ausfrieren.

Bei Plattentemperaturen $T_W \leq 50^\circ\text{C}$ ist eine Reduzierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zu verzeichnen, was anhand der deutlich kleineren Anfangssteigung der Kurven deutlich wird. Die Anfangssteigungen der Kurven bei $T_W=40^\circ\text{C}$ sind nun deutlich flacher, was darauf hinweist, daß von Anfang an Erstarrung im Spiel ist. Allerdings ist dieser Effekt deutlich schwächer als bei gleicher Plattentemperatur und $Re=3,76$. Dies ist eine Folge der größeren Einströmrates bei $Re=10,75$, welche sowohl mehr Trägheit, als auch mehr Wärme konvektiv in die Schmelzeschicht einbringt. Auch hier liegen die erreichten Endpositionen der Schmelze bei $T_W=40^\circ\text{C}$ deutlich vor den Endpositionen der Experimente mit $T_W \geq 50^\circ\text{C}$.

c) Reynolds-Zahl $Re=39,92$

In der letzten Versuchsreihe wird die Drehzahl des Elektromotors auf den maximal möglichen Wert von $5,789 \frac{1}{\text{s}}$ eingestellt. Dies ergibt eine Reynolds-Zahl von $Re=39,92$, die Prandtl-Zahl bleibt unverändert. Die Erhöhung der Reynolds-Zahl ist wiederum über eine Erhöhung des geförderten Volumenstromes \dot{V} realisiert worden, so daß generell die Ausbreitungsgeschwindigkeit ansteigen wird. Abb. 3.4 zeigt nun die Ausbreitungsfront als Funktion der Zeit t für $Re=39,92$.

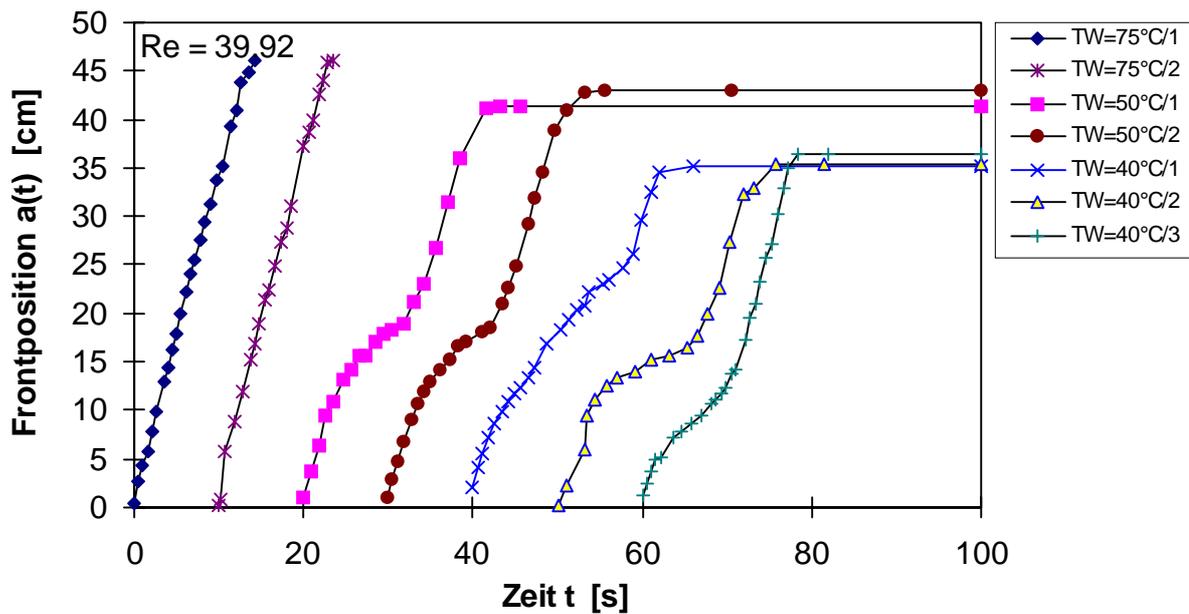


Abb. 3.4 Position der Front als Funktion der Zeit für verschiedene Plattentemperaturen T_W

Das Diagramm zeigt zunächst für die Plattentemperatur $T_W=75^\circ\text{C}$ eine hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit in Form von sehr steil verlaufenden Kurven. Die Potenzfunktionen dieser Experimente lauten im Falle der rein flüssiger Ausbreitung

$$\bar{a}_{75^\circ\text{C}/1} \sim 3,654 \cdot t^{0,967},$$

$$\bar{a}_{75^\circ\text{C}/2} \sim 3,878 \cdot t^{0,896}.$$

Der Exponent c_3 ergibt einen gemittelten Wert von $c_3=0,932$, wodurch er in guter Näherung mit dem theoretischen Wert $c_3=1$ verglichen werden kann. Die c_2 -Werte weichen nur minimal voneinander ab und verdeutlichen erneut die große Frontgeschwindigkeit.

Die Kurven gleicher Plattentemperatur für $T_W < 75^\circ\text{C}$ weisen zunächst eine exzellente Reproduzierbarkeit auf. Im weiteren werden die Kurvenverläufe von Ausbreitungsbeginn bis Ausbreitungsende abschnittsweise untersucht. Der frühe Verlauf der Kurve $T_W=40^\circ\text{C}/2$ zeigt eine Unregelmäßigkeit und die Daten reichen deshalb zur zuverlässigen Bestimmung einer Potenzfunktion nicht aus. Die Potenzfunktionen in dieser ersten Phase ergeben sich für die restlichen Kurven zu

$$\bar{a}_{50^{\circ}\text{C}/1} \sim 3,669 \cdot t^{0,795},$$

$$\bar{a}_{50^{\circ}\text{C}/2} \sim 3,338 \cdot t^{0,891},$$

$$\bar{a}_{40^{\circ}\text{C}/1} \sim 3,208 \cdot t^{0,783},$$

$$\bar{a}_{40^{\circ}\text{C}/3} \sim 2,428 \cdot t^{0,887}.$$

Der Exponent ergibt einen mittleren Wert von $c_3=0,839$. Dieser Wert weicht deutlich von $c_3=1$ ab.

In einer zweiten Phase verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit deutlich indem die Kurven in diesem Bereich flacher verlaufen. Somit scheint in dieser zweiten Phase die anfänglich fast flüssige Ausbreitung durch Erstarrungseffekte deutlich verlangsamt zu werden.

In einer dritten Phase ist ein erneuter deutlicher Anstieg der Ausbreitungsgeschwindigkeit zu erkennen. Ein solcher erneuter Anstieg der Frontgeschwindigkeit ist nur durch plötzliches Verschwinden oder Aufbrechen der erstarrten Kruste oder durch effektives Überströmen der erstarrten Bereiche möglich. Für ein Verschwinden oder Aufbrechen finden sich im Experiment jedoch keine Hinweise, indem die Plattentemperatur stets unterhalb der Erstarrungstemperatur bleibt und die Kruste augenscheinlich an der Platte anhaftet. Das Zeitverhalten kann hier durch die Potenzfunktionen

$$\bar{a}_{50^{\circ}\text{C}/1} \sim 2,769 \cdot t^{0,953},$$

$$\bar{a}_{50^{\circ}\text{C}/2} \sim 2,326 \cdot t^{1,141},$$

$$\bar{a}_{40^{\circ}\text{C}/1} \sim 1,736 \cdot t^{1,20},$$

$$\bar{a}_{40^{\circ}\text{C}/2} \sim 1,623 \cdot t^{1,276},$$

$$\bar{a}_{40^{\circ}\text{C}/3} \sim 2,89 \cdot t^{1,081}.$$

belegt werden, welche typischerweise aus 6-9 Meßpunkten berechnet sind. Der mittlere Exponent liegt bei $c_3=1,13$. Auch dieser Wert weicht deutlich von 1 ab.

In der letzten Phase geht schließlich die Ausbreitungsgeschwindigkeit gegen Null, d.h. die Ausbreitung wird gestoppt und das Woodsmetall ist auf der Platte vollständig ausgefroren. Wir wollen abschließend wiederum die erreichte Endposition der

Schmelze als Funktion der Plattentemperatur T_W diskutieren. Hierzu sind in gewohnter Weise in Abb. 3.5 aus den verschiedenen Experimenten die Endpositionen eingetragen. Wie erwartet schreitet die Ausbreitung bei höherer Plattentemperatur weiter voran. Erstaunlich ist weiterhin die gute Reproduzierbarkeit der Endposition, welche sich in der geringen Streuung der Datenpunkte zeigt. Hier ist ein deutlich kleinerer Streubereich offensichtlich, im Vergleich zu den Experimenten bei kleinerer Reynolds-Zahl. Bei festgehaltener Plattentemperatur T_W schreitet die Ausbreitung zudem deutlich weiter voran, als dies bei niedriger Reynolds-Zahl der Fall gewesen ist.

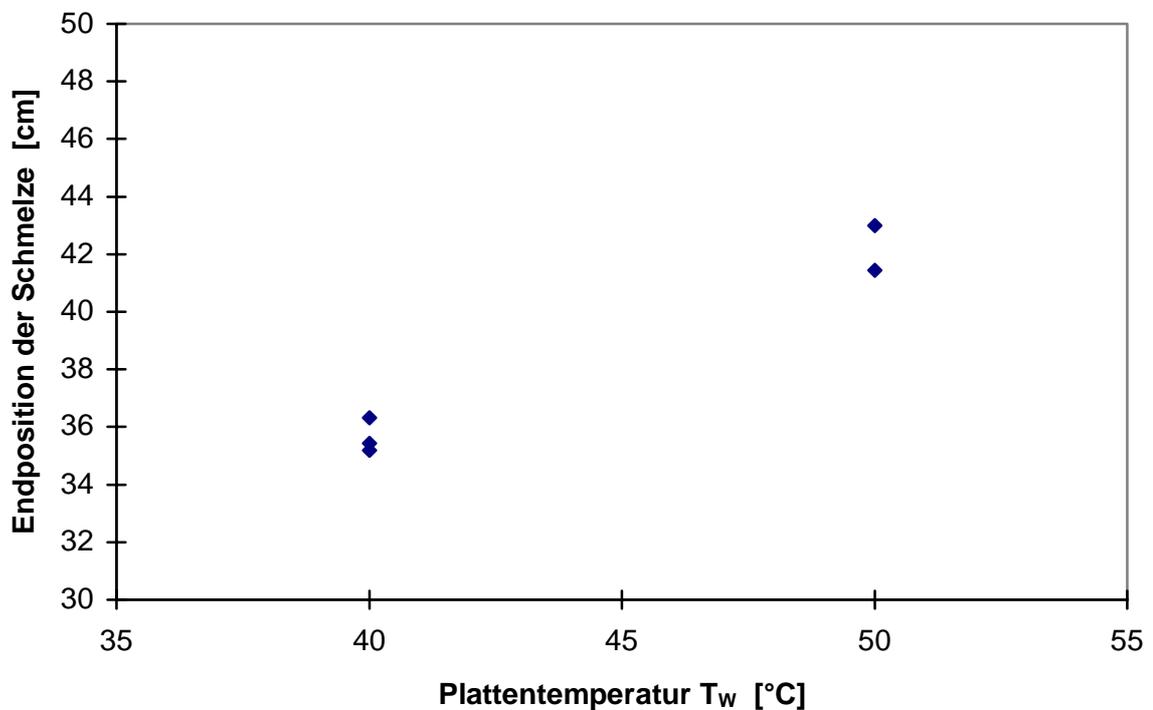


Abb. 3.5 Endposition der Schmelze als Funktion der Plattentemperatur T_W bei $Re=39,92$

3.2 Zerklüftung der Ausbreitungsfront

Während der Versuchsdurchführung hat sich gezeigt, daß die Ausbreitungsfronten unterschiedlich stark zerklüften. Diese Zerklüftungen sind hauptsächlich bei Plattentemperaturen $T_W < 60^\circ\text{C}$ aufgetreten, während bei den isothermen Versuchsreihen die Front meist eben fortschreitet. Am stärksten zerklüftet sind die Ausbreitungsfronten bei $T_W=40^\circ\text{C}$. Dies weist darauf hin, daß die Zerklüftung der Front kausal durch die Kühlung der Platte, bzw. durch das Ausfrieren zustande kommt.

Anhand der in Abschnitt 2.6 erläuterten Auswertungsmethode ist es möglich, die Zerklüftung quantitativ zu bewerten. Es wird hierzu neben der benetzten Fläche auch ihr Umfang ausgewertet. Dieser Umfang wird vom Programm zunächst in Zeichnungseinheiten ZE ausgegeben. Über die Vermessung der Bezugsfläche, kann der Zusammenhang von Zeichnungseinheiten und Längeneinheiten jedoch sofort ermittelt werden.

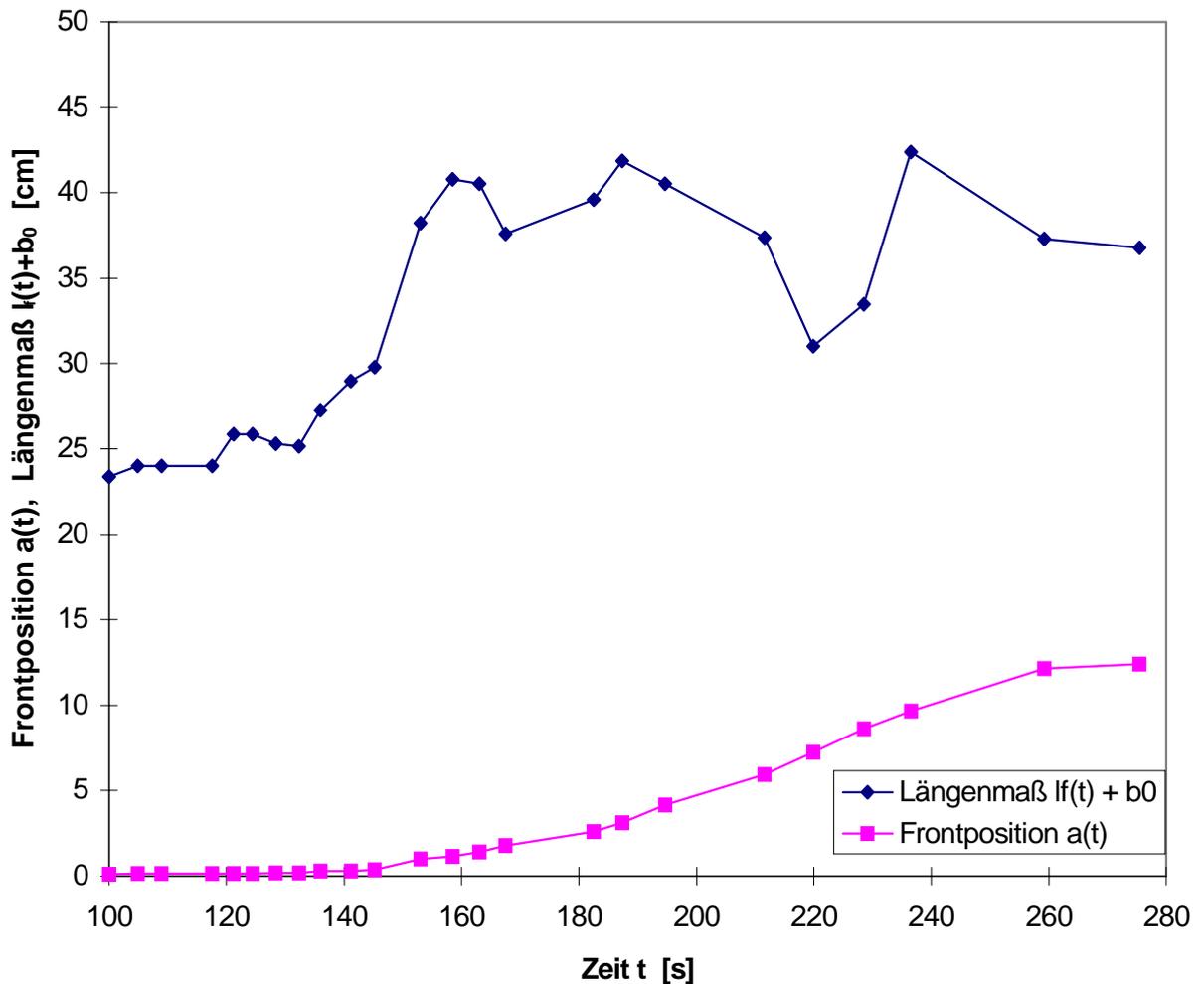


Abb. 3.6 Frontposition $\bar{a}(t)$ und Längenmaß $l_f(t) + b_0$ als Funktion der Zeit t , bei einer Plattentemperatur $T_W=40^\circ\text{C}$ und $Re=3,76$

Abb. 3.6 zeigt eine sehr stark zerklüftete Ausbreitungsfront bei einer Plattentemperatur von $T_W=40^\circ\text{C}$. Aufgetragen ist neben der Position der Front nun die Länge der Front $l(t)$ in der Form $l_f(t) + b_0$. Wir erkennen, daß zu Beginn die Länge der Front ansteigt, was daran liegt, daß die Schmelze zunächst auf ganzer Breite b_0 in das Bewertungsfenster eintreten muß. Zum Zeitpunkt $t \approx 150$ s liegt eine nahezu ebene Front vor. Im Verlauf der Ausbreitung nimmt nun $l_f(t)$ deutlich größere Werte an, was zeigt, daß eine stark zerklüftete Front vorliegt ($t \approx 160$ s). Andererseits finden wir bei $t \approx 220$ s auch wieder ein Minimum der Kurve, was auf eine Vergleichmäßigung der Front hindeutet. Hier hat die Front wieder fast ebenen Charakter. Im weiteren Verlauf nimmt die Zerklüftung erneut zu und weist bei $t \approx 240$ s wiederum ein Maximum auf, welches eine stark zerklüftete Front widerspiegelt. Somit nimmt im

Verlauf der Ausbreitung die Zerklüftung in mehreren Phasen zu, unterbrochen durch Phasen der Vergleichmäßigung.

Abb. 3.7 zeigt nun einen Fall mit $T_W=50^\circ\text{C}$, in welchem die Zerklüftung deutlich schwächer auftritt. Hier steigt die Frontlänge zunächst an, bis sich die Front bei $t\approx 95$ s nahezu eben zeigt. Das folgende Maximum bei $t\approx 125$ s ist weit weniger stark ausgeprägt, als die Maxima in Abb. 3.6. Dies zeigt, daß auch die Zerklüftung nicht so ausgeprägt ist. Zu den Zeitpunkten $t\approx 180$ s und $t\approx 225$ s erreicht die Kurve wieder Minima, bei denen die Front erneut etwa ebenen Charakter zeigt. Auch in diesem Beispiel wechseln sich folglich Phasen mit wachsender Zerklüftung und Phasen der Vergleichmäßigung periodisch ab.

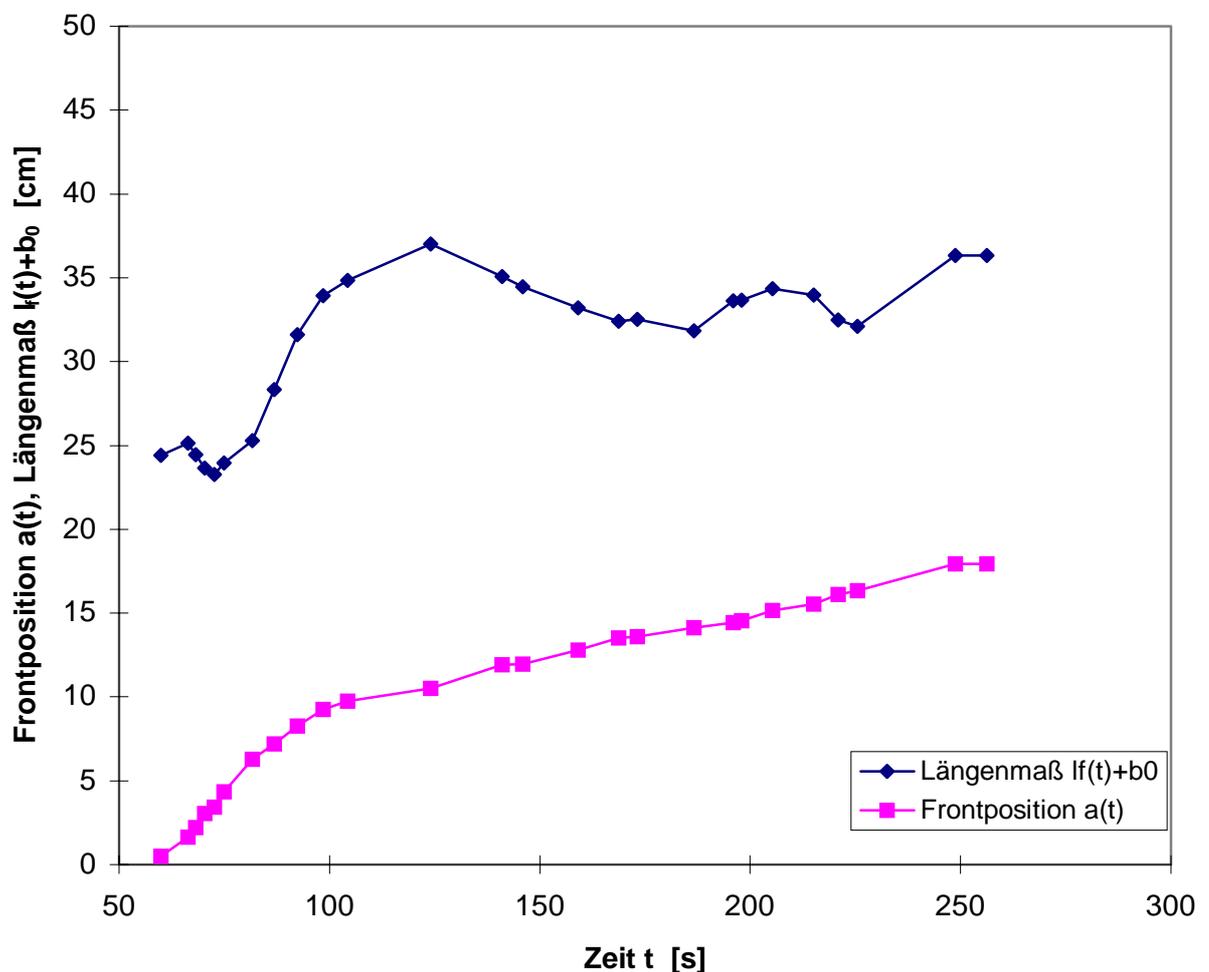


Abb. 3.7 Frontposition $\bar{a}(t)$ und Längenmaß $l_f(t) + b_0$ als Funktion der Zeit t , bei einer Plattentemperatur $T_W=50^\circ\text{C}$ und $Re=3,76$

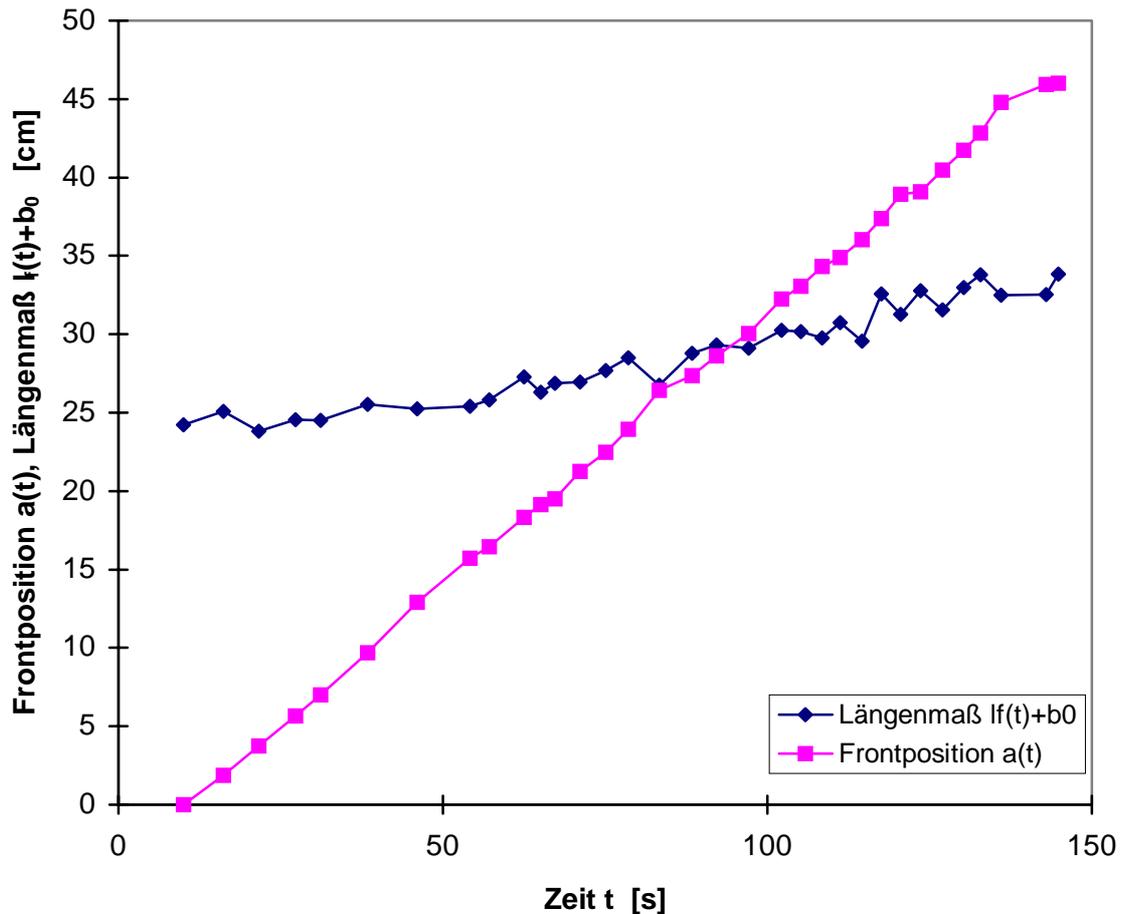


Abb. 3.8 Frontposition $\bar{a}(t)$ und Längenmaß $l_f(t) + b_0$ als Funktion der Zeit t , bei einer Plattentemperatur $T_W=75^\circ\text{C}$ und $Re=3,76$

Abb. 3.8 zeigt nun eine Schmelzausbreitung mit einer nahezu ebenen Front über den gesamten Verlauf bei $T_W=75^\circ\text{C}$. Maxima und Minima sind nur schwach ausgeprägt und im gesamten Verlauf von $\Delta t=150$ s nimmt die Zerklüftung im wesentlichen monoton, aber schwach, zu. Diese Beispiel ist wegen $T_W=75^\circ\text{C}$ erhalten für reine Fluidausbreitung. Die Erstarrung der Schmelze auf der Platte tritt somit nicht auf. Auch hieraus ergibt sich der Hinweis, daß die Zerklüftung der Front in engem Zusammenhang mit der Erstarrung steht. Für reine Fluidausbreitung erhält man näherungsweise ebene Fronten.

4 Diskussion

Wir haben Ausbreitungsversuche mit einer Modellschmelze, bei Kühlung der Ausbreitungsfläche durchgeführt. Als Modellschmelze wird Woodsmetall (MCP-58) mit einer Prandtl-Zahl von $Pr=0,74$ verwendet. Die Plattentemperatur wird im Bereich $40^{\circ}\text{C} \leq T_W \leq 75^{\circ}\text{C}$ variiert. Die Modellschmelze tritt in allen Fällen mit $T_0 \approx 75^{\circ}\text{C}$ auf die Platte. In der Folge kommt es bei niedrigen Plattentemperaturen zum Ausfrieren der Schmelze auf der Platte. Es werden drei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Reynolds-Zahl im Bereich $3,76 \leq Re \leq 39,92$ durchgeführt, die alle im trägheitsdominierten Bereich anzusiedeln sind. Während der Versuche wird neben den Betriebsgrößen und Betriebstemperaturen im wesentlichen der zeitliche Verlauf der Schmelzausbreitung optisch vermessen.

Zunächst bietet sich an, die isotherme Schmelzausbreitung mit der Theorie von *Rottmann und Simpson* /4/ zu vergleichen. Diese Theorie ist gültig im Bereich großer Reynolds-Zahlen, d.h. im trägheitsbestimmten Bereich. *Rottmann und Simpson* /4/ finden für einen konstanten Volumenstrom \dot{V} die Proportionalität $\bar{a}(t) \sim t^{1,0}$. Für die rein flüssige Ausbreitung bei Plattentemperaturen $T_W \geq 60^{\circ}\text{C}$ finden wir die gemittelten Abhängigkeiten

Tabelle 5 Zeitliche Abhängigkeiten der Frontbewegung

Re	isotherm	anfängliche Phase mit Kühlung	letzte Phase mit Kühlung
3,76	$t^{0,98}$	$t^{0,99}$	-
10,76	$t^{1,03}$	$t^{1,008}$	-
39,92	$t^{0,93}$	$t^{0,84}$	$t^{1,13}$

Damit ergeben sich die mittleren Exponenten in guter Näherung zu $c_3 \approx 1$. Lediglich die Experimente mit großer Reynolds-Zahl zeigen hiervon eine kleine Abweichung. Ein weiterer Vergleich bietet sich zu den Experimenten von *Huber* /3/ an, welcher die Ausbreitung einer oxidischen Modellschmelze (Canauba-Wachs) untersucht hat. Er findet im trägheitsbestimmten Bereich, für $Re=5,1$ $\bar{a}(t) \sim t^{0,87}$. Die Schlußfolgerung

an dieser Stelle ist wohl, daß unsere Experimente für $T_w \geq 60^\circ\text{C}$ in guter Näherung trägheitsbestimmt sind. Dies gilt für alle Reynolds-Zahlen. Die über alle Reynolds-Zahlen gemittelte Abhängigkeit ist mit $\bar{a}(t) \sim t^{0,98}$ sehr nahe am theoretisch erwarteten Wert.

Die Kühlung der Platte auf Temperaturen $T_w < 60^\circ\text{C}$ führt nun in allen Fällen zu einer deutlichen Verzögerung der Ausbreitung. Zwar verhält sich während der Anfangsphase, bei moderater Kühlung, die Front noch ähnlich wie im Falle der rein flüssigen Ausbreitung, doch verlangsamt sich mit fortschreitender Zeit die Geschwindigkeit der Front, bis es schließlich zum vollständigen Ausfrieren und damit zum Frontstillstand kommt. Diese Effekte treten bei allen Reynolds-Zahlen auf. Den Mechanismus, welcher die Geschwindigkeit der Front reduziert, können wir einmal aus einer Erhöhung der Viskosität in den abgekühlten, bodennahen Fluidschichten verstehen. Dies würde dazu führen, daß wir mit wachsender Abkühlung eher in den viskositätsbestimmten Parameterbereich laufen. Dieser Bereich zeigt nach einer theoretischen Arbeit von *Huppert /5/* die Abhängigkeit $\bar{a}(t) \sim t^{0,8}$ für einen konstanten Volumenstrom \dot{V} . Zweitens tritt sicherlich bei stärkerer Kühlung auch Ausfrieren auf der Bodenplatte ein. Dies ist der einzige Mechanismus, welcher die Ausbreitungsströmung zum Stillstand bringen kann. Viskose Kräfte spielen offensichtlich in allen Fällen eine untergeordnete Rolle. Dies wird aus den Abhängigkeiten bei $Re=3,76$ ersichtlich.

In den Experimenten bei $Re=39,92$ finden wir nach der oben beschriebenen ersten Phase eine erneute Beschleunigung der Front, bevor in der letzten Phase eine zweite Verzögerung das Ausfrieren einleitet. Dies tritt, exzellent reproduzierbar, bei allen Plattentemperaturen $T_w \leq 60^\circ\text{C}$ auf. Gehen wir davon aus, daß die erste Phase der Verlangsamung durch den Aufbau einer Kruste auf der Bodenplatte bedingt ist, so kann die Wiederbeschleunigung schlüssig nur durch ein Überströmen der behindernden Kruste mit nachfolgender, nahezu flüssiger Ausbreitung verstanden werden. So gelangt noch relativ warme Schmelze aus bodenfernen Schichten über die erstarrte Kruste direkt auf die Bodenplatte und beginnt in der Folge wiederum eine Kruste auf dem Boden zu entwickeln. Der letzte Effekt führt später zur Verzögerung der zweiten Ausbreitungswelle.

Die Reynolds-Zahl nimmt für die Fälle $T_w < 60^\circ\text{C}$ Einfluß auf die Stärke, mit welcher sich die Kühlung bzw. das Ausfrieren auswirkt. Bei festgehaltener Plattentemperatur, treten die Auswirkung am deutlichsten bei kleiner Reynolds-Zahl auf. Entsprechend

sind die Auswirkungen für große Reynolds-Zahlen eher schwach. Dies wird sehr deutlich anhand der erreichten Endpositionen der Schmelze. Generell führen größere Reynolds-Zahlen zu einem weiteren Fortschritt der Front. Diese Beobachtung ist physikalisch plausibel, weil im Falle der großen Reynolds-Zahlen, die konvektiv eingetragene Wärme deutlich größer wird und deshalb der Wärmeverlust in die Bodenplatte - in erster Näherung unabhängig von der Reynolds-Zahl - einen relativ geringen Verlust darstellt. Im übrigen ist natürlich die anfängliche Geschwindigkeit der Front in allen Fällen durch die Reynolds-Zahl bestimmt. Hier besteht näherungsweise ein linearer Zusammenhang, d.h. $\dot{a}_0 \sim Re$. Dies kann aus der anfänglichen Steigung der Ausgleichsfunktionen, sowohl für die rein flüssige, als auch für die ausfrierende Ausbreitung belegt werden.

Wir wollen schließlich den Einfluß der Prandtl-Zahl diskutieren. Im vorliegenden Fall liegt eine metallische Schmelze mit $Pr=0,74$ vor. *Huber /3/* hat hingegen seine Experimente mit einer oxidischen Schmelze bei $Pr=560$ ausgeführt. Wir stellen deshalb unsere Experimente bei $Re=3,76$ ähnlichen Experimenten von *Huber /3/* bei $Re=5,1$ gegenüber. Ganz augenscheinlich finden wir für die metallische Schmelze durchweg bei Plattentemperaturen $T_w < 60^\circ\text{C}$, eine massive Verzögerung der Ausbreitung, gefolgt von einem Stillstand der Front mit vollständigem Ausfrieren. *Huber /3/* hingegen findet bei ähnlichen T_w , Re , nur eine relativ schwache Änderung der Ausbreitungsgesetze. Bei ihm schreitet die Ausbreitung immer bis zum Ende der Fläche fort. Somit steht einem starken Effekt der Kühlung, im Falle der metallischen Schmelze, ein sehr schwacher Effekt, im Falle der oxidischen Schmelze, gegenüber. Diese Beobachtung ist gleichfalls konsistent mit den physikalischen Vorstellungen. Im Falle der metallischen Schmelze liegt eine relativ große Temperaturleitfähigkeit κ vor ($Pr < 1$), wodurch sich die kalte Temperatur der Bodenplatte in der ganzen Schmelzeschicht auswirken kann. Im Falle der oxidischen Schmelze ($Pr \gg 1$) hingegen, ist die Situation durch ein kleines κ bestimmt. Somit wirkt sich die kalte Bodenplatte nur in unmittelbarer Nähe aus - eine dünne thermische Grenzschicht entsteht auf der Bodenplatte. Die Auswirkungen einer solch dünnen abgekühlten oder erstarrten Schicht können naturgemäß nur schwach sein.

Wir haben durch Auswertung der Frontlänge weiterhin aufgezeigt, daß im Falle der stark gekühlten Platte, eine größere Zerklüftung der Front zu beobachten ist. Im Falle der rein flüssigen Ausbreitung finden wir hingegen eher gerade Fronten. Es zeigt sich weiterhin, daß die Zerklüftung in periodischer Weise oszilliert. Somit folgt

einer Phase der Zerklüftung jeweils eine Phase der Vergleichmäßigung. Dieses Verhalten könnte man als Instabilität der geraden Front interpretieren, welches durch die Kühlung der Platte gefördert wird. Hier spielen offensichtlich Benetzungseffekte und Effekte infolge der Grenzflächenspannung eine wichtige Rolle. Da solche Effekte bei großen Schichthöhen jedoch untergeordnete Bedeutung haben, ist eine genauere Untersuchung nicht vorgenommen worden.

Wollen wir einen Ausblick auf das weitere experimentelle Programm geben, so erscheint es sicherlich sinnvoll, Experimente für Reynolds-Zahlen $Re < 1$ durchzuführen, um in den viskositätskontrollierten Bereich zu gelangen. Hierzu müßte der Verdrängungskörper in seinem Durchmesser verringert werden, da eine weitere Drehzahlabenkung des Motors nicht möglich ist. Eine weitere Möglichkeit wäre hier der Einsatz eines Getriebes. Weitergehend erscheint das Vermessen der freien Grenzflächenkontur $h(x, t)$ in der Umgebung der Front sinnvoll. Dies ist im Falle der oxidischen Schmelze erfolgreich mit einem Triangulations-Meßgerät ausgeführt worden. Die Tests im Falle der metallischen Schmelze waren hingegen aufgrund der Totalreflexion an der spiegelnden Schmelze erfolglos. Hier ist nach Möglichkeiten zu suchen, die Schmelzenoberfläche zu mattieren, was eventuell durch Pudern oder Oxidieren möglich wäre. Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß die Experimente zur Entwicklung und Überprüfung von Modellen durchgeführt werden. Somit ist natürlich die theoretische Nachrechnung der Experimente anzustreben.

5 Literaturverzeichnis

- /1/ P. Ehrhard: Dimensional analysis and scenario discussion for the spreading of a corium melt (EPR). FzK-Bericht 5713, Mai 1996.
- /2/ VDI-Wärmeatlas. 6.Auflage, VDI-Verlag 1991.
- /3/ M. Huber: Bericht zum Praxissemester (FzK), 1995.
- /4/ J. Rottman and J. Simpson. Journal of Fluid Mechanics (1983), vol. 135, pp. 95-110.
- /5/ H. Huppert: The propagation of two-dimensional and axissymmetric viscous gravity over a rigid horizontal surface. Journal of Fluid Mechanics (1982), vol. 121, pp. 43-58.

6 Anhang

Abb. 6.1 EPR-Konzept zur Kühlung der Schmelze

Abb. 6.2 Versuchsstand

Abb. 6.3 Versuchsstand

Abb. 6.4 Fördereinrichtung

Abb. 6.5 Drehzahlmessung

Abb. 6.6 Schmelzausbreitung mit starker Fingerbildung bei einer Plattentemperatur von 40°C

Abb. 6.7 Typische Schmelzausbreitung

Abb. 6.8 Oberseite eines erkalteten Woodsmetall-Profils

Abb. 6.9 Unterseite eines erkalteten Woodsmetall-Profils