

Simulationsexperimente zum Ausbreitungsverhalten von Kernschmelzen: KATS-8 bis KATS-17

**B.Eppinger, G. Fieg, H. Massier,
W. Schütz, U. Stegmaier, G. Stern**

**Institut für Kern- und Energietechnik
Institut für Hochleistungsimpuls- und
Mikrowellentechnik
Institut für Reaktorsicherheit
Institut für Materialforschung
Programm Nukleare Sicherheitsforschung**

März 2001

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6589

Simulationsexperimente zum Ausbreitungsverhalten von Kernschmelzen: KATS-8 bis KATS-17

B.Eppinger, G. Fieg, H. Massier, W. Schütz, U. Stegmaier,
G. Stern*

Institut für Kern- und Energietechnik

Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik

Institut für Reaktorsicherheit

Institut für Materialforschung

Programm Nukleare Sicherheitsforschung

*Fa. Pro-Science, Ettlingen

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2001

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

ZUSAMMENFASSUNG

Für zukünftige Leichtwasserreaktoren werden spezielle Einbauten (Kernfänger) erforderlich sein, um das Containment-Versagen infolge von Erosion des Fundamentes bei einem Kernschmelzunfall zu verhindern. Die geschmolzenen Kernmassen sollen möglichst schnell in einen festen Zustand überführt werden, um die Freisetzung von radioaktivem Material zu reduzieren. Einige der vorgeschlagenen Kernfängerkonzepte beruhen auf dem Prinzip, die geschmolzenen Kernmassen auf ebenen Flächen zu verteilen und anschließend mit Wasser zu kühlen.

Es wurde deshalb eine Serie von Experimenten durchgeführt, um das Ausbreiten von Schmelzen mit hoher Temperatur auf ebenen Flächen zu untersuchen. Dabei wurde als Simulationsmaterial eine Thermitschmelze aus Aluminiumoxid und Eisen verwendet. Die Oxidschmelze wird durch Zusatz weiterer Oxide derart konditioniert, daß sie möglichst realistisch einer oxidischen Coriumschmelze gleicht. Die Ausbreitung oxidischer und metallischer Schmelzen wurde sowohl in ein- und zweidimensionaler Geometrie vorgenommen. Sie erfolgte auf inerter keramischer Schicht, auf trockenem Beton und Beton mit einer Wasserschicht von einigen Millimetern.

Diese Tests wurden durchgeführt, um Codes wie CORFLOW zu validieren, die das Ausbreiten von Hochtemperaturschmelzen auf trockene Flächen beschreiben.

ABSTRACT

Simulation experiments on the spreading Behaviour of Core Melts: KATS-8 through KATS-17

In future Light Water Reactors special devices (core catchers) might be required to prevent containment failure by basement erosion after reactor pressure vessel meltthrough during a core meltdown accident. Quick freezing of the molten core masses is desirable to reduce release of radioactivity. Several concepts of core catcher devices have been proposed based on the spreading of corium melt onto flat surfaces with subsequent water cooling.

Therefore a series of experiments to investigate high temperature melt spreading on flat surfaces has been carried out using alumina-iron thermite melts as a simulant. The oxidic thermite melt is conditioned by adding other oxides to simulate a realistic corium melt as close as possible. Spreading of oxidic and metallic melts have been performed in one- and two-dimensional geometry. Substrates were inert ceramical layer, dry concrete and concrete with a water layer of several millimeters. The influence of a shallow water layer on the surface onto the spreading behaviour has also been studied.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
2 Experimenteller Aufbau	4
2.1 Thermiterschmelze und Reaktionsbehälter	4
2.2 Ausbreitungskanäle und Flächen	8
2.3 Instrumentierung mit Thermoelementen	11
2.4 Wägezellen	11
2.5 Druckaufnehmer	12
2.6 Video- und Infrarotkameras	12
2.7 Steuerung des Experiments	12
3 Ergebnisse	13
3.1 KATS- 8	14
3.2 KATS-10	37
3.3 KATS-11	63
3.4 KATS-12	85
3.5 KATS-13	111
3.6 KATS-14	137
3.7 KATS-15	165
3.8 KATS-16	189
3.9 KATS-17	217
4 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	237
4.1 Zusammenfassung	237
4.2 Schlußfolgerungen	250
Literaturverzeichnis	251
Anhang A	254

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

1 Einführung

Leichtwasserreaktoren der nächsten Generation sollen entsprechend den Anforderungen des Atomgesetzes eine weiter erhöhte Sicherheit auch bei schwersten Unfällen besitzen. Hierzu werden zur Zeit Vorrichtungen entwickelt, die im Falle eines nicht beherrschten Kernschmelzenfalls die Schmelze außerhalb des Reaktordruckbehälters sicher auffangen und kühlen sollen, mit dem Ziel, sowohl das Durchschmelzen des Reaktorfundaments wie auch eine wesentliche Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung auszuschließen.

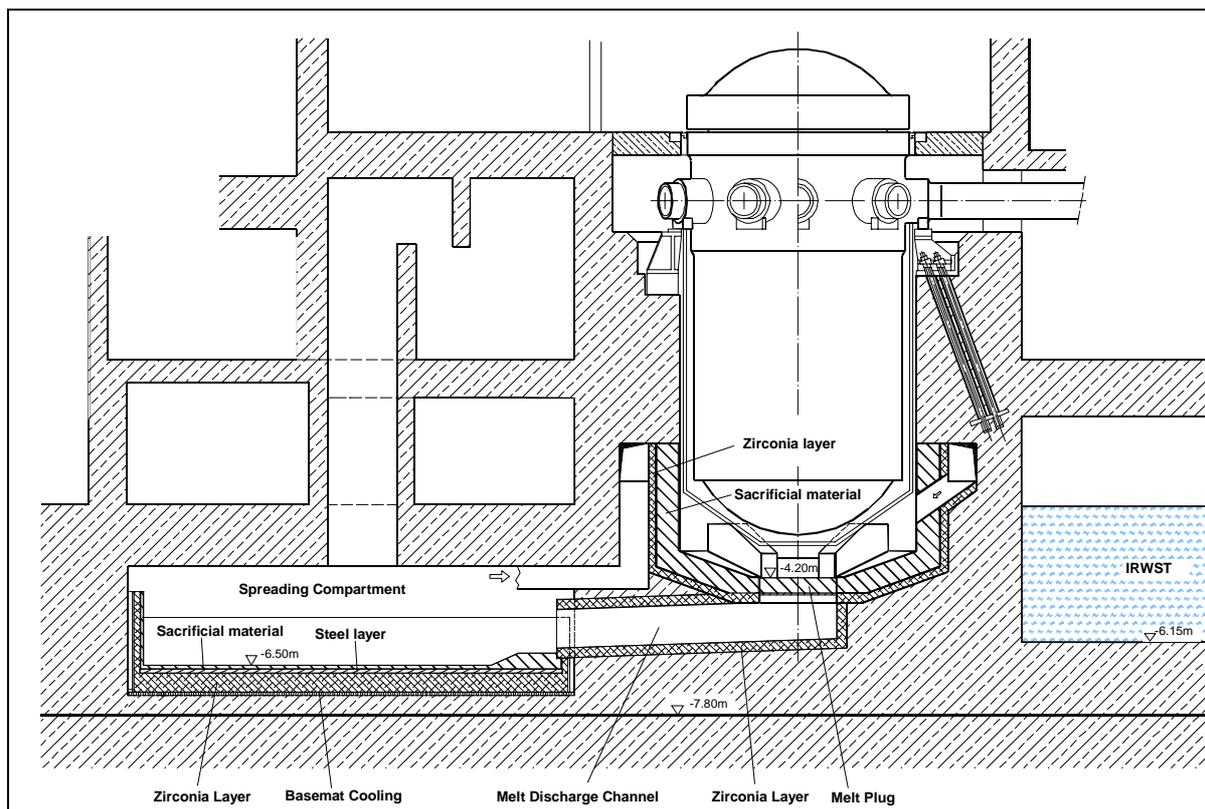


Abb.1.1: Aufbau der externen Kühleinrichtung für die Kernschmelze im EPR Reaktor

Eine Kühleinrichtung für Kernschmelzen, der sogenannte Kernfänger, ist Bestandteil des EPR-Konzepts [1], das zur Zeit in deutsch-französischer Industriekooperation als europäischer Druckwasser-Reaktor geplant wird (Abbildung 1.1). Bei Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters (RDB) wird die Schmelze zunächst in der Reaktorgrube gesammelt und für einen Zeitraum von etwa einer Stunde gehalten, um eventuell später abstürzende Restschmelzen aufzunehmen und damit unterschiedlichste Unfallabläufe sicher beherrschen zu können. Weiterhin werden durch die Wechselwirkung zwischen Corium und der Opferschicht aus Beton die Stoffeigenschaften der Schmelze derart konditioniert, daß sie, unabhängig vom vorherigen Unfallablauf, für den weiteren Ablauf als bekannt angenommen werden können. Nach Durchschmelzen der Betonopferschicht und des am Boden der Reaktorgrube befindlichen Stahltores fließt die Schmelze über einen geneigten Kanal auf eine Ausbreitungsfläche von etwa 170 m². Hier soll sich die Schmelze möglichst gleichmäßig ausbreiten und erreicht so eine Schichthöhe von etwa 30 cm. Danach wird passiv die Überflutung der Schmelze mit Wasser aus dem IRWST-Vorratsbehälter eingeleitet. Dadurch wird die Schmelze von oben gekühlt und erstarrt teilweise. Durch Inbetriebnahme einer aktiven Bodenkühlung innerhalb von 12 Stunden wird die Schmelze auch von unten stabilisiert. Die Schmelze erstarrt schließlich vollständig entsprechend der zeitlichen Abnahme der Nachwärmeleistung in der Schmelze. Das Ausbreiten einer Kernschmelze und das anschließende Kühlen durch Fluten mit Wasser ist ein generisches Problem. Mehrere Modelle unterschiedlicher Art existieren, um diese Phänomene zu beschreiben. Sie müssen durch Experimente verifiziert werden. Die Anzahl von Tests mit realem Corium wird begrenzt sein, deshalb sind Experimente mit Simulationsschmelzen unumgänglich. Die Ausbreitung von Coriumschmelzen auf Beton wurde theoretisch untersucht [2,3], [3] beschreibt weiterhin Ausbreitungstests mit metallischen Schmelzen auf Betonflächen. Moody [4] modellierte das Ausbreiten von Coriumschmelzen auf trockenen und gefluteten Flächen. Der MELTSPREAD-Code [5] be-

schreibt ebenfalls das Ausbreiten von Schmelzen auf trockenen und gefluteten Flächen. Bei Siemens wurde der Code CORFLOW [6,7] für entsprechende Untersuchungen zum EPR entwickelt, GRS entwickelte den LAVA-Code [8]. Ebenso wurde der MECO-Code [9] an der Universität Bochum für Ausbreitungsphänomene entwickelt. Auf französischer Seite stehen die beiden Codes CROCO [10] und THEMA [11] zur Verfügung. Die Ausbreitungstests KATS (Karlsruher Ausbreitungsexperimente mit Thermit-Schmelzen), wurden stets getrennt mit oxidischen und metallischen Schmelzen aus der Thermitreaktion vorgenommen. In einer Serie von früheren Tests wurde die Ausbreitung in eindimensionale Kanäle untersucht [12,13,14,15]. In diesem Bericht werden Ausbreitungsexperimente oxidischer und metallischer Schmelzen in ein- und zweidimensionaler Dimension beschrieben. Als Substrat wurden verschiedene Materialien verwendet: trockene, inerte Keramik (Cordierit) als Referenztest, trockener silikatischer Beton und Beton, auf dem sich eine Schicht Wasser von einigen Millimetern befand.

2 Experimenteller Aufbau

2.1 Thermitschmelze und Reaktionsbehälter

Abbildung 2.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der KATS-Anlage. In einem konischen Tiegel wird eine Thermitmischung von etwa 300 kg gezündet. Diese Reaktion dauert etwa 30 s an, nach einer Beruhigungsphase von ein paar Sekunden findet sodann der Abstich statt.

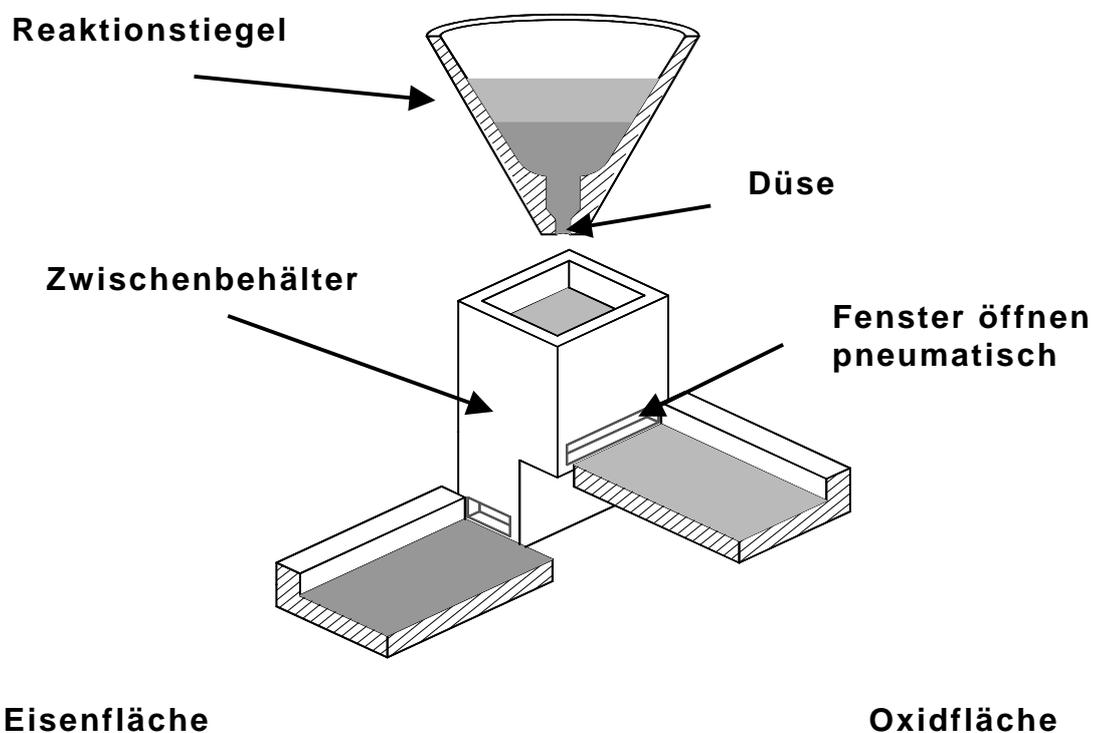


Abb. 2.1: Experimenteller Aufbau von KATS mit hohen Ausflussraten

Aufgrund der Dichteunterschiede zwischen metallischer (6800 kg/m^3) und oxidischer Schmelze (2800 kg/m^3) findet bereits im Reaktionsstiegel eine Separation der Phasen statt. Oberhalb der Austrittsdüse am Boden des Reaktionsbehälters befindet sich eine 200 mm hohe Charge von Thermit, mit einer geringeren Reaktionsgeschwindigkeit als das normal

verwendete Thermit, etwa 10 mm/s anstelle von 25-30 mm/s, Abbildung 2.2.

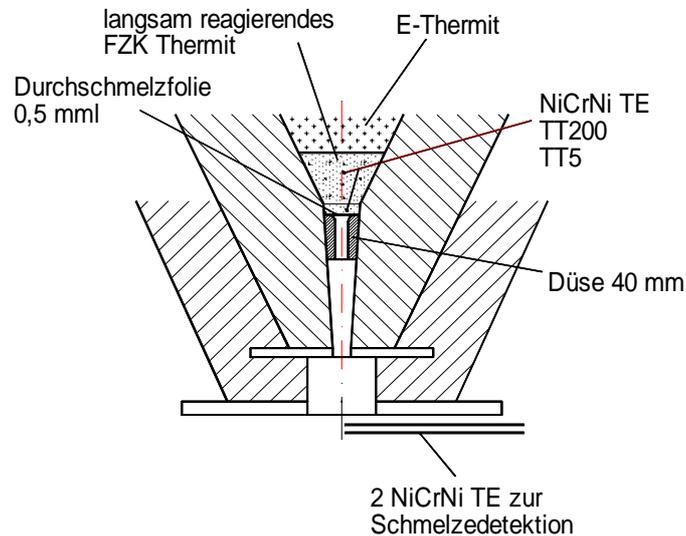


Abb. 2.2: Detailzeichnung des Reaktionsbehälters im Düsenbereich

Durch das langsame Abbrennen dieser Thermitcharge wird bewirkt, daß die Thermitreaktion im Tiegel vollständig beendet wird und die beiden Schmelzenphasen sich trennen. Die Eisenschmelze tritt zuerst aus der Düse am Boden des Tiegels aus, gefolgt von der Oxidschmelze. Aus dem Durchmesser der Düse und deren Form, sowie der jeweiligen Flüssigstandshöhe der Schmelze im Tiegel kann mit Hilfe der Formel von Torricelli [16] der transiente Ausströmvorgang im voraus berechnet werden. Dabei wird angenommen, daß keine Erosion des Düsenkörpers erfolgt, der Durchmesser also erhalten bleibt. Aus dieser Abschätzung wird die maximale Ausströmdauer für beide Schmelzen bestimmt.

Die in diesem Bericht beschriebenen Experimente unterscheiden sich in einem grundsätzlichen verschiedenen Aufbau: Bei den Tests KATS-8,-10,-11,-12 und -13 waren relativ große Ausströmraten der Schmelzen vorgesehen, bei den restlichen Tests (KATS-14,-15,-16 und -17) deutlich niedrigere. Dies wurde dadurch erreicht, daß für den ersten Fall die Schmelzen unterhalb des Reaktionstiegels zuerst in einem Zwischenbe-

hälter aufgefangen und dann, nach pneumatischem Öffnen von Fenstern, auf die Ausbreitungsflächen geleitet wurden, Abbildung 2.3. Die Ausströmraten sind neben dem Flüssigkeitsstand der Schmelzen durch die Größe der Fensteröffnungen bestimmt. Im Falle der niedrigen Ausströmraten werden diese durch den Durchmesser der Düse am Reaktionsbehälter bestimmt, er mußte dazu von 45 mm auf 20 mm reduziert werden. Die Schmelzen werden nach dem Abstich nicht, wie bisher, in einem Zwischenbehälter aufgefangen. Unterhalb der Düse befindet sich ein Umlenkmechanismus, mit dessen Hilfe der Schmelzestrahling umgelenkt werden kann. Anfänglich strömt die Eisenschmelze in einen offenen Behälter und breitet sich sofort durch das offene Fenster auf der Ausbreitungsfläche aus. Ist die Eisenschmelze erschöpft, wird der Schmelzestrahling umgelenkt, und die Oxidschmelze breitet sich auch sofort auf der Fläche für Oxid aus.

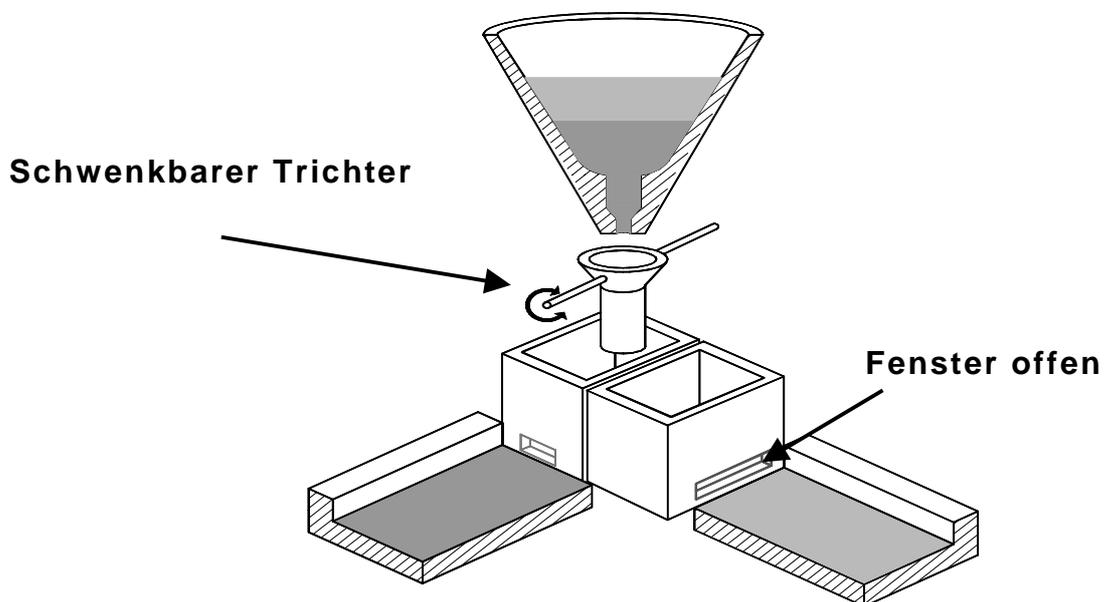


Abb. 2.3: Experimenteller Aufbau von KATS mit niedrigen Ausflussraten

Der Umlenkzeitpunkt wird mittels der Torricelli'schen Formel bestimmt. Zu diesem Wert werden zur Sicherheit zwei Sekunden zuge-

schlagen, um zu gewährleisten, daß die Eisenschmelze wirklich erschöpft ist. Darüber hinaus befindet sich im Oxidbehälter ein etwa 8 l großer Sumpfbereich unterhalb des Fensteraustritts zur Ausbreitungsfläche, der eventuell restliches Eisen auffangen kann.

Bis zum Test KATS-8 wurde 300 kg reines Thermitpulver (Typ 10 AL SSH, Elektro-Thermit, Essen) verwendet. Um den Temperaturbereich zwischen Liquidus und Solidus mehr dem realistischen Fall einer Coriumschmelze anzupassen, wurden ab KATS-9 dem Thermitpulver ein Zuschlag von 20 kg SiO_2 in Form von feinem Quarzsand beigegeben. Es wurde eine für die KATS Experimente charakteristische Zusammensetzung der oxidischen Komponente zur Bestimmung der wichtigen Stoffgrößen ausgewählt. Mit Hilfe von GEMINI-Rechnungen [17] wurden die thermodynamischen Daten für diese Oxidschmelze im Bereich zwischen Solidus und Liquidus errechnet. In Anhang A wird ein Vergleich von Ergebnissen zweier unterschiedlicher Untersuchungen beschrieben.

Experimente im 1 bis 10 kg Bereich mit Thermit wurden durchgeführt, um den Umsetzungsgrad der Reaktion und deren Reaktionsprodukte zu bestimmen. Diese Untersuchungen waren notwendig zur Auslegung der Schmelzebehälter. Mit diesen Ergebnissen und zusätzlichen Analysen mit dem Programm EquiTherm [18] konnte der Umsetzungsgrad der Thermitreaktion bestimmt werden, er liegt bei 95%. Dies bedeutet, daß etwa 5% Eisenoxide in der oxidischen Phase vorhanden sind. Durch teilweises Erodieren der keramischen Tiegelwand durch die Hochtemperaturschmelze addieren sich weitere Oxidanteile in Form geringer Zuschläge zur Oxidschmelze.

Unterhalb der Düse sind zwei Thermoelemente vom Typ K (NiCr-Ni) angebracht, die den Zeitpunkt des Abstichs der Schmelze detektieren. Mit diesen Signalen werden die weiteren Befehle im Ablauf des Experiments gesteuert (Öffnen der Fenster, Starten von Transientenrecordern, Feuern von Synchronblitzen usw.).

Bei den Tests mit hohen Ausflußraten wird die gesamte Thermiterschmelze zuerst in einem Schmelzebehälter gesammelt, Abbildung 2.1. An die-

sem sind drei Fenster in verschiedenen Höhen angebracht, die pneumatisch geöffnet werden können. Die Öffnung des obersten Fensters liegt vollständig oberhalb der Phasengrenze Metall-Oxid. Dieses Fenster wird zuerst aktiviert. Die Höhe des zweiten Fensters liegt im Bereich der Phasengrenze, es wird anschließend aktiviert, um eine Mischschmelze Oxid/Metall von der reinen Eisenschmelze zu trennen. Aus dem untersten Fenster tritt zuletzt die Eisenschmelze aus. Für die Ausflussraten sind die Fenstergrößen und die jeweiligen Flüssigkeitsstände ausschlaggebend. Bei der detaillierten Beschreibung der einzelnen Tests sind diese Ausflussraten angegeben.

Bei den letzten drei Tests Kats-15, -16 und -17 ruhte der Reaktionstiegel auf drei Wägezellen. Mit Hilfe deren Signale konnte der Massenstrom aus dem Tiegel und damit die Ausströmraten auf die Ausbreitungsflächen ermittelt werden.

2.2 Ausbreitungskanäle und Flächen

Die KATS-Ausbreitungsexperimente wurden sowohl in ein- als auch zweidimensionaler Geometrie durchgeführt. In den einzelnen Kapiteln, in welchen die verschiedenen Tests beschrieben sind, sind die Dimensionen der Kanäle bzw. Flächen sowie die Art der Substrate dokumentiert.

In allen ein- und zweidimensionalen Tests wurde peinlich auf eine ebene Ausrichtung der Kanäle bzw. Flächen geachtet. Die Unebenheiten liegen durchweg unterhalb von 0.5 mm pro laufendem Meter. Abbildung 2.4 zeigt das Photo eines eindimensionalen Kanals, Abbildung 2.5 das einer zweidimensionalen Ausbreitungsfläche. Die Ausbreitungsexperimente wurden mit unterschiedlichen Substraten durchgeführt. Als Referenzfall diente eine trockene und inerte Keramik bestehend aus 20 mm starken Cordieritplatten. Cordierit setzt sich aus 37 Gew% Al_2O_3 , 52% SiO_2 und 6.5% MgO zusammen.

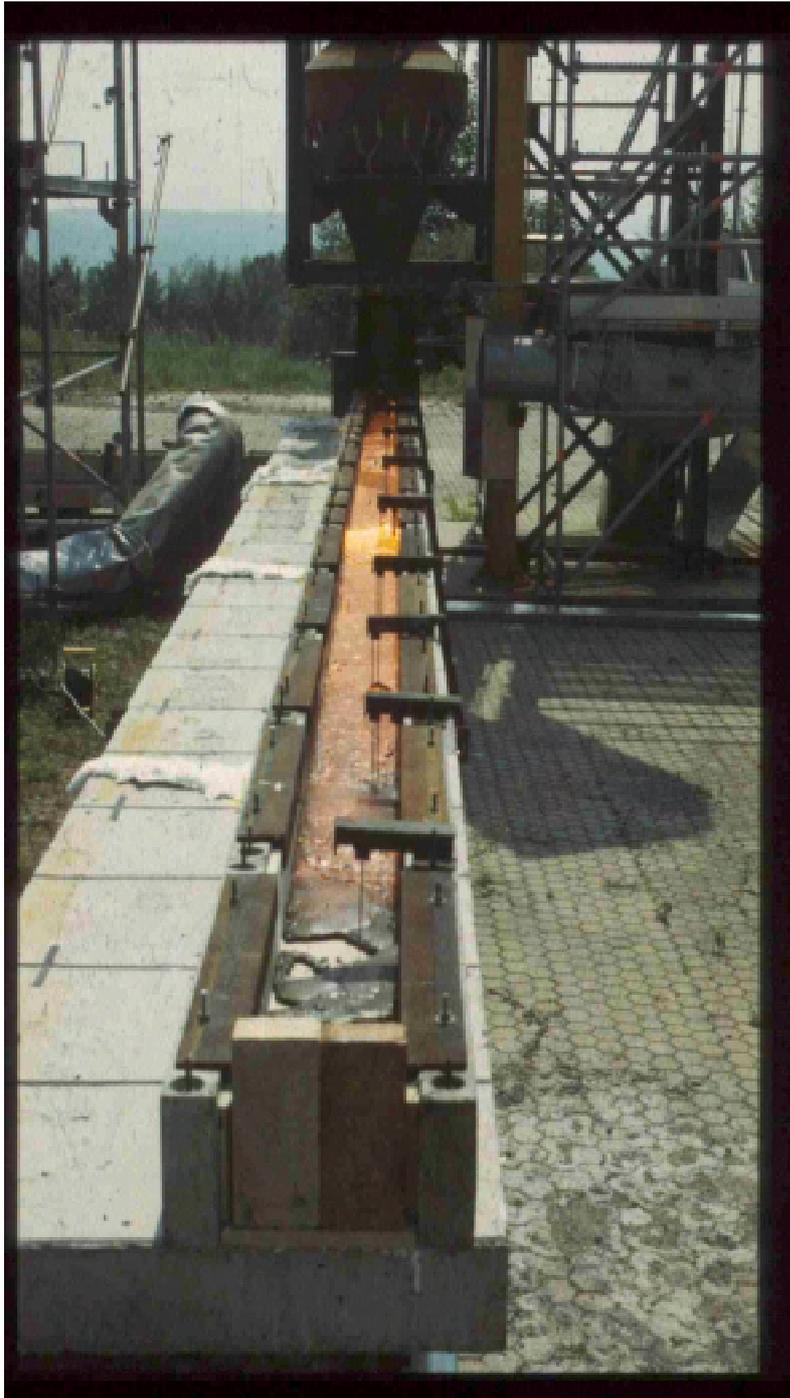


Abb. 2.4: Eindimensionaler Kanal für die Oxidschmelze in KATS-12 kurze Zeit nach Ende der Ausbreitung

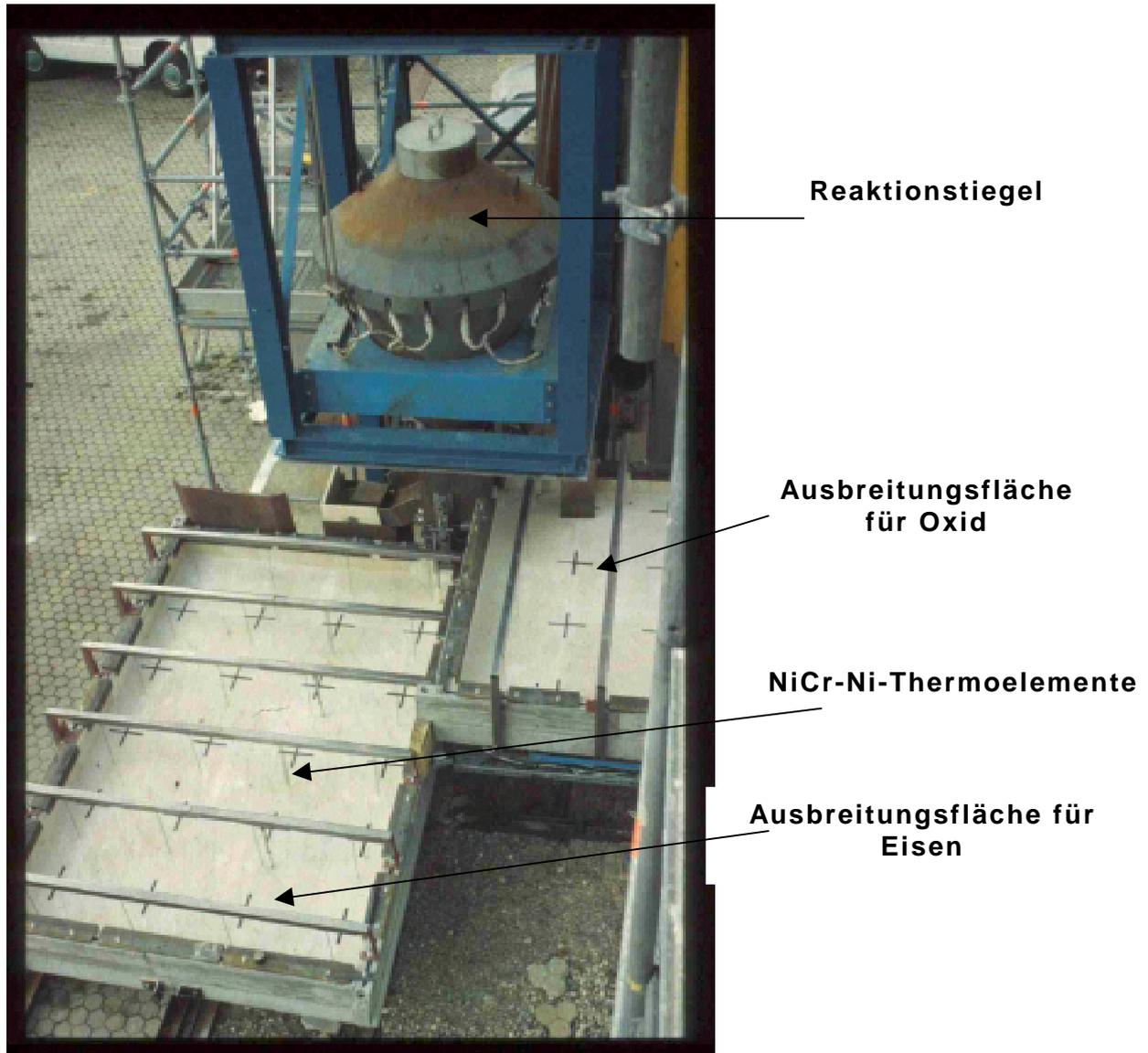


Abb. 2.5: Ausbreitungsflächen für Eisen- und Oxidschmelze in KATS-8 (Cordierit als Substrat)

2.3 Instrumentierung mit Thermoelementen

Die Ausbreitungskanäle und Flächen wurden mit zwei verschiedenen Thermoelement-Typen instrumentiert: mit Hilfe der NiCr-Ni-Thermoelemente sollte die lokale Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Zum Teil waren sie in unterschiedlichen Höhen über dem Substrat angebracht. In den beiden Abbildungen 2.4 und 2.5 sind die Montierbrücken über den Ausbreitungsflächen und teilweise die Lage der NiCr-Ni-Thermoelemente zu erkennen. Weiterhin sind Wolfram-Rhenium-Thermoelemente zur Erfassung der Schmelzentemperatur installiert. Insbesondere ein W-Re-Thermoelement am Fenstereintritt soll die anfängliche Schmelzentemperatur registrieren. Mit einer Abtastrate von 1 kHz werden die Thermoelementesignale auf Transientenrecorder gespeichert.

In den Kapiteln, die die jeweiligen Experimente beschreiben, sind die Positionen der Thermoelemente angegeben.

2.4 Wägezellen

In den Tests KATS-14 bis –17 ruhte der Reaktionstiegel auf insgesamt drei Wägezellen. Nach dem Abstich konnte somit der transiente Massenstrom ermittelt werden. Diese Daten lieferten die Volumenströme der Schmelzen auf die Ausbreitungsflächen. Die in den Tests aufgezeichneten Massenströme aus dem Reaktionstiegel werden in den einzelnen Kapiteln beschrieben.

2.5 Druckaufnehmer

Für das Experiment KATS-10, in dem die Oxid- und Eisenschmelze auf einem silikatischen Beton mit 1 mm Wasserauflage ausgebreitet wird, werden je zwei Druckaufnehmer (Typ KISTLER 7000) verwendet. Diese sollen eventuelle Schmelze/Wasser-Reaktionen detektieren. Sie sind in einer Höhe von 235 mm über dem Kanalboden seitlich an der Kanalwand in beiden Flutkanälen angebracht. Um sie gegen eventuell herausgeschleuderte Schmelze zu schützen, sind sie 100 mm von der Seitenwand zurückversetzt.

2.6 Video- und Infrarotkameras

Mehrere Videokameras wurden um den Teststand herum installiert: Eine Kamera kontrolliert den Zeitpunkt des Abstichs aus dem Reaktionstiegel, eine Kamera dient als Übersichtskamera und je zwei weitere beobachten die Schmelzenoberflächen in beiden Kanälen. Zusätzlich beobachtet eine Infrarotkamera die Oberfläche der Oxidschmelze zur Bestimmung der Oberflächentemperatur.

2.7 Steuerung des Experiments

Der Ablauf der Tests wurde mit einem zentralen PC-Rechner gesteuert. Zuerst erfolgte die Zündung des Thermits, gleichzeitig wurden Blitzlampen gefeuert, welche die zeitliche Synchronisation der Videokameras mit dem Zentralrechner herstellten. Nach der Zündung des Thermits geht der Rechner in eine Warteschleife und wartet auf das Signal der zwei Thermoelemente unterhalb der Düse, das den Beginn des Abstichs signalisiert. Alle weiteren Befehle (Start der Transientenrecorder zur Aufzeichnung der Thermoelemente, Öffnen der Schmelzefenster bzw.

Verfahren des Schmelzestrahls) erfolgen nach vorausberechneten Zeitintervallen, die mit Hilfe der Torricelli'schen Formel [16] bestimmt wurden.

3 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln 3.1 bis 3.9 werden die einzelnen Tests KATS-8 bis KATS-17 beschrieben. Dabei stellt jedes einzelne Kapitel ein vollständiges Auswertungsprotokoll des jeweiligen Tests dar. Daher wiederholen sich zwangsläufig Beschreibungen von Aufbauten, Instrumentierung usw. Jedoch ist mit dieser Darstellung jedes einzelne KATS Experiment individuell bis ins Detail beschrieben und kann unabhängig von den andern Tests zur weiteren Analyse verwendet werden. An diese Kapitel schließen sich Vergleiche der Tests untereinander und eine Zusammenfassung und Bewertung aller Ergebnisse an.

In diesem Bericht fehlt die Beschreibung des KATS-9 Tests. Dieser ist gesondert in [19] beschrieben. Das Hauptaugenmerk bei KATS-9 lag auf dem nachfolgenden Fluten der ausgebreiteten Hochtemperaturschmelze mit Wasser von oben, die Ausbreitung erfolgte nur in einen begrenzten Bereich, um genügend Schmelzenhöhe für die nachfolgende Flutung zur Verfügung zu haben.

3.1 KATS-8 “2-dim Ausbreitung mit hoher Volumenrate auf trockener Keramik (Cordierit)“

Versuchsdatum: 24.04.96

Versuchsaufbau

Abb. 3.1.1: Reaktionstiegel und Stoffeinsatz

	Thermitmischung: (10 Al SSH)	30 Beutel à 10,4 kg → 312 kg
	Langsam reagierendes Thermit (EF50):	6,0 kg
	Zuschlag: keiner	

Abb. 3.1.2: Tiegelinnenmaße

<p> $\alpha = 16,5^\circ$ $\beta = 24,6^\circ$ </p>	<p><u>Tiegelvolumen:</u></p> <p>$z = 0$ bis 220 mm</p> $V(z) = \frac{\pi}{3} \tan^2 \alpha \cdot (z + 0,1185m)^3 - 1,53 \cdot 10^{-4} m^3$ <p>$z \geq 220$ mm</p> $V(z) = \frac{\pi}{3} \tan^2 \beta \cdot (z - 1,5 \cdot 10^{-3} m)^3 + 1,12 \cdot 10^{-3} m^3$
	<p><u>Tiegelquerschnitt:</u></p> <p>$z = 0$ bis 220 mm</p> $A(z) = \pi \tan^2 \alpha \cdot (z + 0,1185m)^2$ <p>$z \geq 220$ mm</p> $A(z) = \pi \tan^2 \beta \cdot (z - 1,5 \cdot 10^{-3} m)^2$

Düsen-Ø 45 mm

Abb. 3.1.3: Trennung von Oxid und Eisen:

Separation der Phasen im Trennbehälter. Danach Öffnen des obersten Fensters für Oxidausbreitung. Entleeren der Mischschmelze aus dem zweiten Fenster im Bereich der Phasengrenze. Danach Öffnen des untersten Fensters zum Ausbreiten der Eisenschmelze.

	Oxidbehälter- (B × T):	367 × 382 mm
	Oxidfenster (H × B):	40 × 80 mm
	Höhe der Oxidschmelze	520 mm
	Oxidausbreitungsfläche (B × L):	1,80 × 2,80 m
	Substrat:	Cordierit *)
	Eisenbehälter- (B × T):	170 × 307 mm
	Eisenfenster (H × B):	40 × 80 mm
	Höhe der Eisenschmelze	403 mm
	Eisenausbreitungsfläche (B × L):	1,80 × 2,80 m
	Substrat:	Cordierit *)

*) Cordierit-Daten: (Goebel-Werke, Grossalmerode)

Zusammensetzung: Al_2O_3 37 gew%
 SiO_2 52 gew%
 MgO 6,5 gew%

Offene Porosität 23 %

Rohdichte 1900 kg/m³

Wärmeleitfähigkeit bei 1000 °C 1.4 W/mK

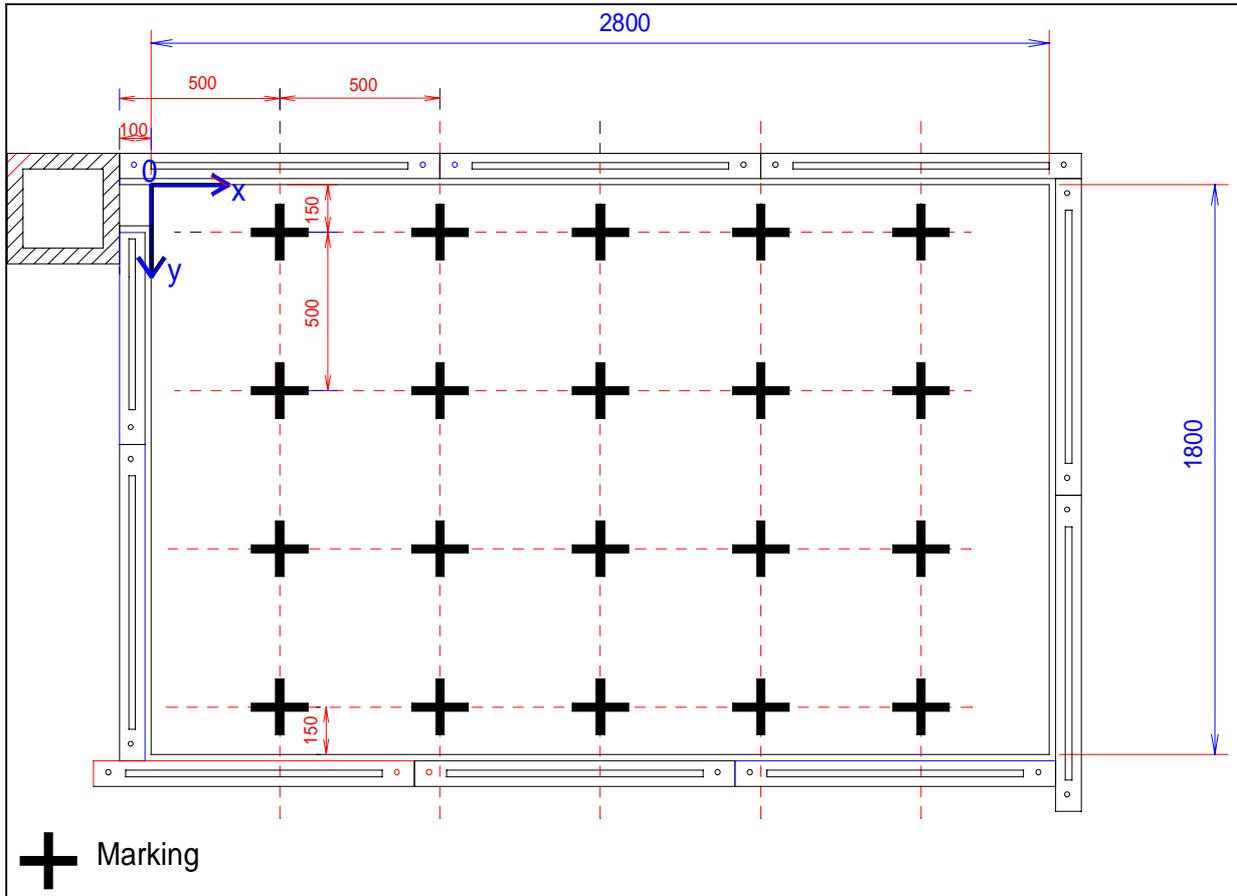


Abb. 3.1.4: Ausbreitungsfläche für Eisen und Oxid

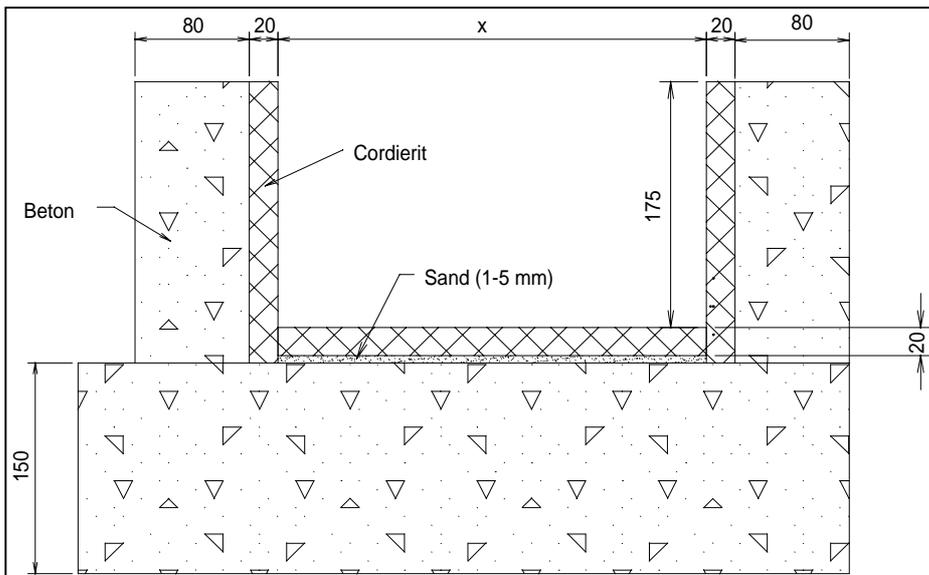


Abb. 3.1.5: Querschnitt durch die Ausbreitungsfläche

Instrumentierung

Temperaturmessung mit W-Re-Tauchthermoelementen

Die W-Re-Thermoelemente sind mit einer Schutzkappe aus 1/10 mm Stahl umgeben. Die Messstelle befindet sich 5 mm hinter dieser Kappe. Die Bezeichnung OW.xx.00 bzw. OW.xx.05 bedeutet, dass im ersten Fall die Schutzkappe den Boden berührte, im zweiten Fall 5 mm darüber lag.

Tab. 3.1.1: Temperaturmessung der Oxidschmelze

Oxid	Länge x (mm)	Breite y (mm)	Höhe über Boden (mm)
OW.00.00	230	130	5
OW.10.05	1230	630	10
OW.20.05	2230	630	10

Tab. 3.1.2: Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisen	Länge x (mm)	Breite y (mm)	Höhe über Boden (mm)
EW.00.00	230	130	5
EW.10.05	1230	630	10
EW.20.05	2230	630	10

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit IR-Video

Eine thermographische Messung der Oxidoberflächentemperatur auf der gesamten Ausbreitungsfläche wurde mit einer Infrarotkamera vorgenommen.

Schmelzedetektion in den Ausbreitungskanälen mit NiCr-Ni-Thermoelementen

Die Mantelthermoelemente (isolierte Ausführung) haben 1 mm Durchmesser und werden in einem Edelstahlröhrchen \varnothing 4×1 mm geführt. Die Thermoelemente für die Oxiddetektion ragen 2-3 mm aus dem Hüllrohr heraus, die für das Eisen schließen bündig ab.

Schmelzedetektion am Thermittiegel

Unterhalb der Düse befinden sich zwei Thermoelemente zur Detektion des Schmelzeaustritts aus dem Tiegel (TA1 und TA2). Ihr Signal (Abstich) steuert das weitere Fortschreiten des Experiments.

Tab. 3.1.3: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente und Detektionszeitpunkte der Oxidschmelze

Oxid	Länge (X) [mm]	Breite (Y) [mm]	Höhe über dem Boden [mm]	Ankunft der Schmelze (s)
O.K.1.1.05	140	100	5	0.1
O.K.1.2.05	140	590	5	-
O.K.1.3.05	140	1100	5	-
O.K.1.4.05	140	1600	5	-
O.K.2.1.05	675	100	5	0.34
O.K.2.2.05	675	590	5	3.44
O.K.2.2.25	675	590	25	-
O.K.2.2.35	675	590	35	-
O.K.2.3.05	675	1100	5	-
O.K.2.4.05	675	1600	5	-
O.K.3.1.05	1150	100	5	0.63
O.K.3.2.05	1150	590	5	1.91
O.K.3.3.05	1150	1100	5	10.5
O.K.3.4.05	1150	1600	5	20.1
O.K.4.1.05	1605	100	5	0.95
O.K.4.1.25	1605	100	25	-
O.K.4.2.05	1605	590	5	1.32
O.K.4.2.15	1605	590	15	-
O.K.4.2.25	1605	590	25	-
O.K.4.3.05	1605	1100	5	6.08
O.K.4.4.05	1605	1600	5	16.3
O.K.5.1.05	2140	100	5	1.31
O.K.5.2.05	2140	590	5	2.85
O.K.5.3.05	2140	1100	5	5.60
O.K.5.4.05	2140	1600	5	11.0
O.K.6.1.05	2675	90	5	4.60
O.K.6.2.05	2675	590	5	4.94
O.K.6.3.05	2675	1100	5	6.58
O.K.6.4.05	2675	1600	5	11.7

Tab. 3.1.4: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente und Detektionszeitpunkte der Eisenschmelze

Eisen	Länge (X) [mm]	Breite (Y) [mm]	Höhe über dem Boden [mm]	Ankunft der Schmelze (s)
E.K.1.1.05	140	100	5	0.22
E.K.1.2.05	140	590	5	-
E.K.1.3.05	140	1100	5	-
E.K.1.4.05	140	1600	5	-
E.K.2.1.05	675	100	5	0.42
E.K.2.2.05	675	590	5	2.28
E.K.2.2.25	675	590	25	-
E.K.2.2.35	675	590	35	-
E.K.2.3.05	675	1100	5	-
E.K.2.4.05	675	1600	5	-
E.K.3.1.05	1150	100	5	0.66
E.K.3.2.05	1150	590	5	0.83
E.K.3.3.05	1150	1100	5	15.9
E.K.3.4.05	1150	1600	5	-
E.K.4.1.05	1605	100	5	1.03
E.K.4.1.25	1605	100	25	-
E.K.4.2.05	1605	590	5	2.70
E.K.4.2.15	1605	590	15	-
E.K.4.2.25	1605	590	25	-
E.K.4.3.05	1605	1100	5	6.14
E.K.4.4.05	1605	1600	5	11.9
E.K.5.1.05	2140	100	5	2.32
E.K.5.2.05	2140	590	5	2.95
E.K.5.3.05	2140	1100	5	6.35
E.K.5.4.05	2140	1600	5	8.90
E.K.6.1.05	2675	100	5	4.08
E.K.6.2.05	2675	590	5	3.96
E.K.6.3.05	2675	1100	5	5.28
E.K.6.4.05	2675	1600	5	2.83

Zeitlicher Ablauf des Experiments

In der folgenden Tabelle 3.1.5 ist der zeitliche Ablauf des Experimentes aufgeführt.

Tab. 3.1.5: Zeitlicher Ablauf des KATS-8 Experimentes

Zeit (s)	Kommentar
0	Zündung des Thermits
46.	TA1/TA2-Signale: Abstich erfolgt, Thermitschmelze beginnt in den Schmelzebehälter zu fließen
66.	Abstich beendet, Schmelze vollständig im Schmelzebehälter
78.	Öffnen des obersten Fensters (Oxidschmelze) Signale für Synchronblitze Start Transientenrecorder #1 Start IR-Kamera
95.	Öffnen des zweiten Fensters (Mischschmelze)
97.	Öffnen des untersten Fensters (Eisenschmelze) Signale für Synchronblitze Start Transientenrecorder #2

Oxidausbreitung

Ausgebreitete Oxidmasse

Die ausgebreitete Oxidmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 165 kg. Als höchste Anfangstemperatur wurde vom W-Re-Thermoelement OW.01, das nahe dem Oxidfenster positioniert war, ein Wert von 2100 °C erreicht. Bei dieser Temperatur kann eine Dichte von ~2800 kg/m³ zugrunde gelegt werden. Damit ergibt sich ein auf der Fläche ausgebreitetes Oxidvolumen von 0.059 m³.

Volumenrate Oxid

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie wird aus dem Schmelzefüllstand und der Fenstergröße rechnerisch nach [16] ermittelt.

Nach dieser Rechnung ermittelt man einen anfänglichen Volumenstrom von 7.2 l/s. Die Austrittsdauer beträgt $t_e=16.4$ s. Während dieser Zeit geht der Volumenstrom linear auf Null zurück.

Oxidschmelzenausbreitung

Die Oxidschmelze hat sich zunächst der Einströmrichtung folgend entlang der langen Seite der Ausbreitungsfläche ausgebreitet, Abbildung 3.1.6. Es bildete sich ein Grenzwinkel von etwa 35 Grad aus. Außerhalb dieses Winkels ist anfänglich keine Schmelze anzufinden. Nachdem die Schmelze die hintere Wand erreichte (nach etwa 5 s), erfolgte die Ausbreitung in lateraler Richtung. Das Ende der Ausbreitung koinzidierte praktisch mit dem Ende des Einströmens aus dem Fenster (16 s). Es fand danach ein weiteres, allerdings nur geringes Ausbreiten der Schmelze bis etwa 30 s statt, bedingt durch das Aufbrechen von Krusten an der vordersten Schmelzenfront, Abbildung 3.1.7. Die zweidimensionale Darstellung der zeitlichen Ausbreitung wurde aus den Videoaufzeichnungen und den NiCr-Ni-Thermoelementsignalen gewonnen. Aus der Videoaufzeichnung können aus den Umrissen der sich ausbreitenden Schmelze die bedeckten Flächen berechnet werden, sie sind zeitabhängig in Tabelle 3.1.6 und Abbildung 3.1.8 dargestellt.

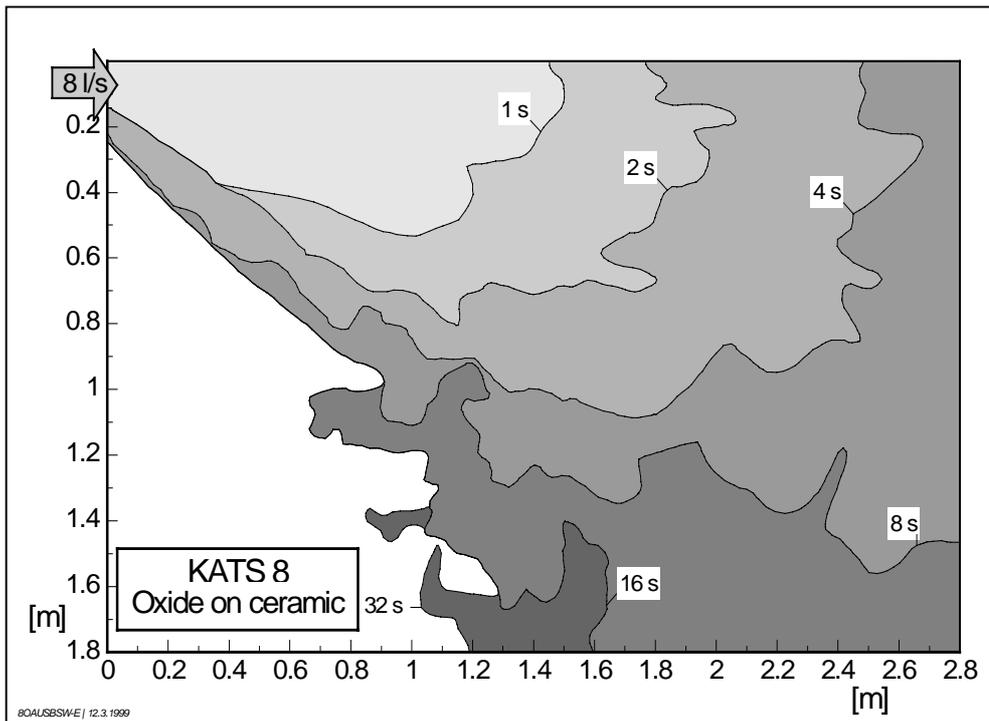


Abb. 3.1.6: Zeitliches Ausbreiten der Oxidschmelze auf der Keramikfläche



Abb. 3.1.7: Ausgebreitete Oxidschmelze in KATS-8 kurz nach Ende der Ausbreitung

Tab. 3.1.6: Bedeckte Fläche der sich ausbreitenden Schmelze zu verschiedenen Zeiten

Zeit ab Beginn der Ausbreitung [s]	Bedeckte Fläche [m²]
0	0
0.5	0.33
1	0.53
2	1.03
3	1.56
4	1.99
5	2.44
6	2.62
8	2.92
10	3.23
12	3.53
14	3.68
16	3.78
24	3.88
30	3.93

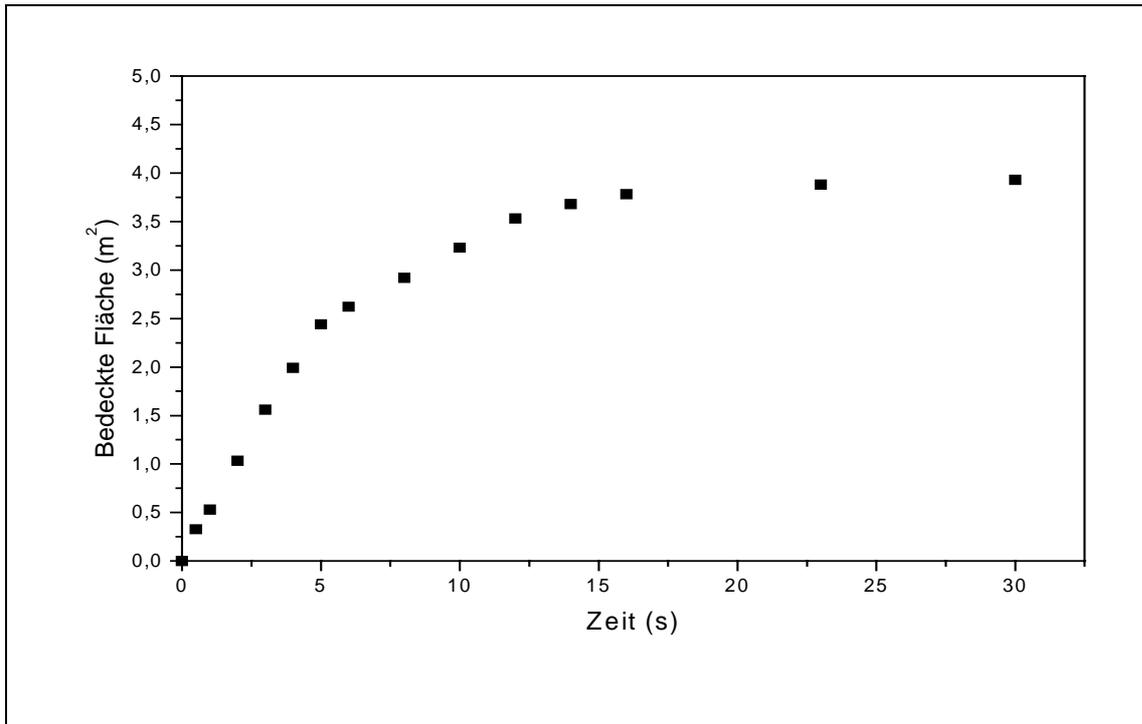


Abb. 3.1.8: Bedeckte Fläche der sich ausbreitenden Schmelze zu verschiedenen Zeiten

Temperaturmessung Oxid

Tab. 3.1.7: Temperaturmessung mit W-Re-Thermoelementen

Oxid	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums, bezogen auf Beginn der Ausbreitung	Bemerkungen
OW.00.00	2100°C	2.3 s	
OW.10.05	2051°C	6.1 s	
OW.20.05	1840°C	9.0 s	< Liquidustemperatur

Die gemessenen Temperaturkurven sind in Abbildung 3.1.9 graphisch dargestellt. Für die Nachrechnungen und weiteren Auswertungen kann

von einer Anfangstemperatur zu Beginn der Schmelzenausbreitung von 2100°C ausgegangen werden.

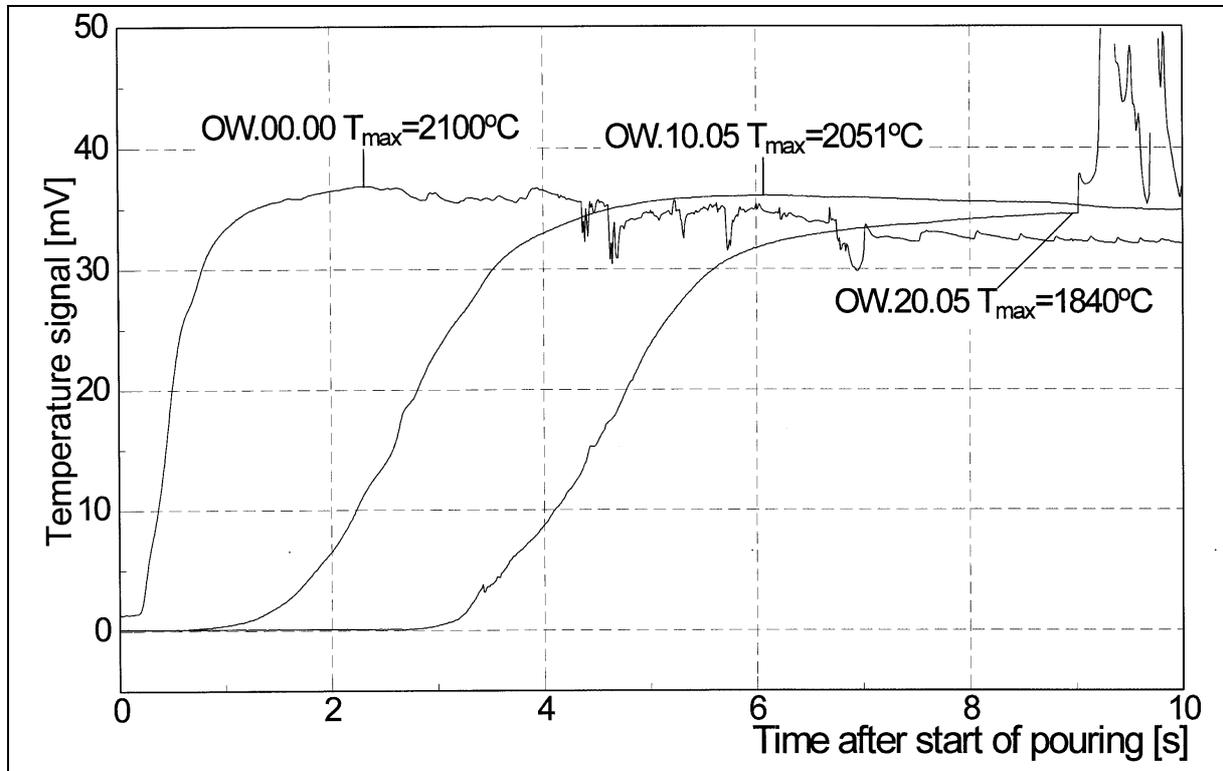


Abb. 3.1.9: Aufzeichnung der W-Re-Thermoelemente

Temperaturmessung mit Infrarot-Videokamera

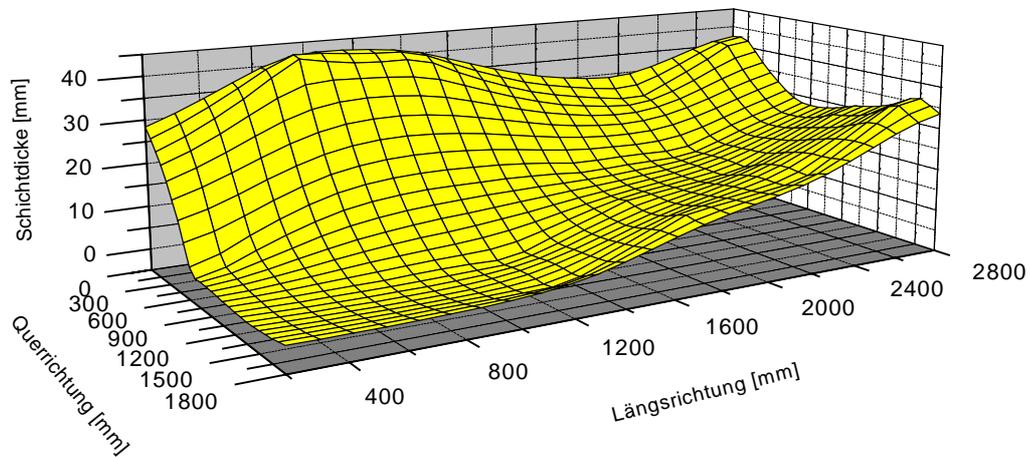
Die von den W-Re-Thermoelementen gemessenen Temperaturen werden von der Infrarotvideoaufnahme bestätigt.

Höhenverteilung der Oxidschmelze

In Tabelle 3.1.8 ist die lokale Höhenverteilung der Oxidschmelze tabellarisch und in Abbildung 3.1.10 graphisch dargestellt.

Tab. 3.1.8: Höhenverteilung der Oxidschmelze

<u>x-Position (mm)</u>	<u>y-Position (mm)</u>	<u>Höhe (mm)</u>
230	130	25
230	630	0
230	1130	0
230	1630	0
730	130	44
730	630	13
730	1130	0
730	1630	0
1230	130	41
1230	630	15
1230	1130	0
1230	1630	0
1730	130	29
1730	630	13
1730	1130	10
1730	1630	12
2230	130	24
2230	630	13
2230	1130	13
2230	1630	15
2730	130	38
2730	630	22
2730	1130	25
2730	1630	32

KATS-8: Höhenverteilung der Oxidschmelze**Abb. 3.1.10:** Höhenverteilung der Oxidschmelze**Erosion des Substrats**

Nur in einem engen Bereich direkt vor dem Oxidfenster trat eine Erosion des Substrats (Cordierit) auf, das Maximum der Erosionstiefe lag bei 10 mm, die mittlere Tiefe bei etwa 5 mm.

Analyse von Proben**Tab. 3.1.9:** Analysenergebnisse von Proben (Gew%)

X (mm)	Y (mm)	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	MgO	SiO ₂
700	90	88.27	0.54	3.74	5.55	1.75
2200	90	89.24	0.54	3.80	5.52	0.75
1700	1600	89.07	0.56	3.84	5.52	0.67

Die Anteile MgO und SiO₂ in Tabelle 3.1.9 stammen von Abschmelzungen der Tiegelauskleidung und des Schmelzebehälters. Ohne diese Anteile läge der Anteil an Al₂O₃ bei 95% und der von FeO bei 4%. Daraus läßt sich schlußfolgern, daß der Formelumsatz der Thermitreaktion bei KATS-8 bei etwa 95% lag.

Eisenausbreitung

Ausgebreitete Masse

Die auf der Fläche ausgebreitete Eisenmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 158 kg. Bei einer Dichte von 6800 kg/m^3 ergibt sich ein Anfangsvolumen von 0.0232 m^3 .

Volumenrate

Die zeitliche Volumenrate wird aus der Schmelzenhöhe im Schmelzenbehälter, dessen Innendimensionen und der Fenstergröße mit Hilfe des Torricelli-Gesetzes berechnet [16].

Die Anfangsrate war 7 l/s , danach lag ein linearer Abfall von insgesamt 6.9 s statt, bis die Schmelze erschöpft war.

Eisenschmelzenausbreitung

Die Eisenschmelze hat sich zunächst der Einlaufrichtung folgend entlang mit einer anfänglichen Geschwindigkeit von etwa 2.5 m/s ausgebreitet. Schon bereits am Ort des ersten W-Re-Thermoelements (erste Position, gekennzeichnet als schwarzer Punkt, bei Kontur 0.2 s , Abbildung 3.1.11) ist zu erkennen, wie die Ausbreitung der Eisenschmelze durch das Thermoelement beeinflusst wurde. Am Ort des zweiten W-Re-Thermoelements findet bei etwa 1 s sogar eine Trennung der Ausbreitungsfront statt, ein dünner Finger von Eisenschmelze dringt in der Diagonalrichtung bis an die Rückwand vor und trifft diese nach 3 s (siehe Abbildung 3.1.11).

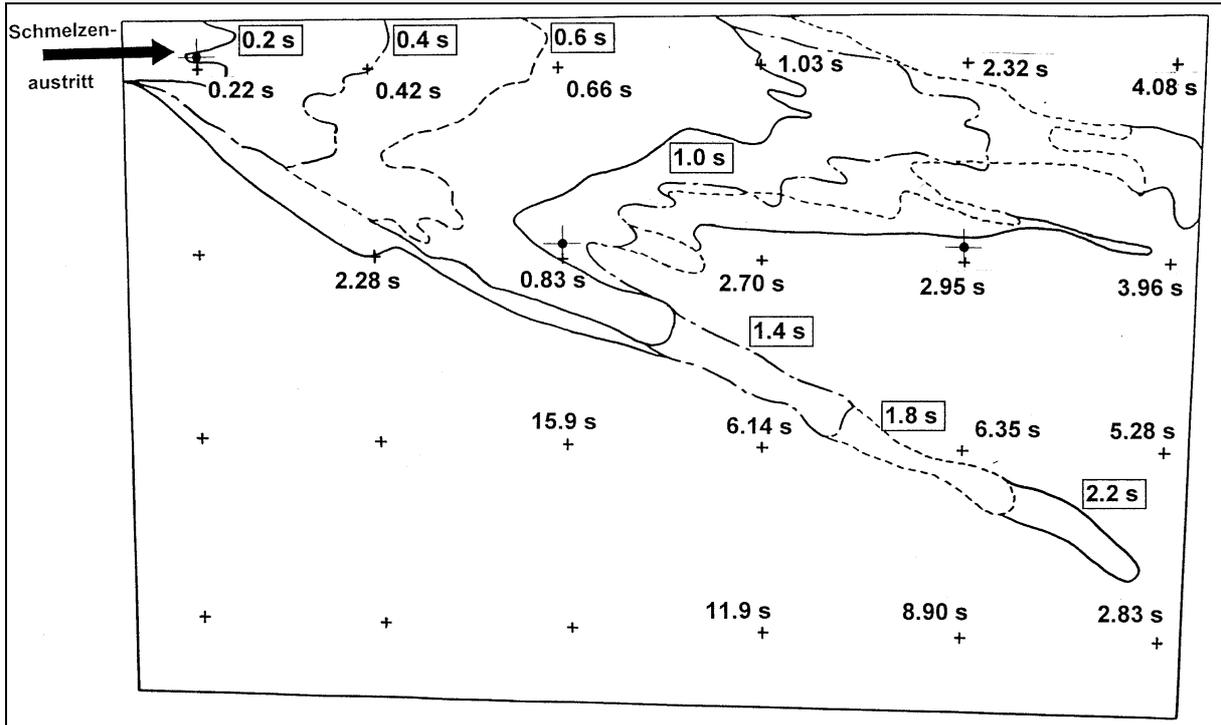


Abb. 3.1.11: Transiente Ausbreitung der Eisenschmelze im Zeitintervall 0 bis 2.2 s

Der Großteil der Eisenschmelze breitet sich ungehindert in der ursprünglichen Richtung aus und erreicht die Rückwand bei etwa 4 s. Danach erfolgt eine laterale Ausbreitung quer zur ursprünglichen Ausbreitungsrichtung, 25 s nach Beginn der Ausbreitung ist die Front der Eisenschmelze am weitesten vorgedrungen, siehe Abbildung 3.1.12 für den Zeitbereich 3-25 s).

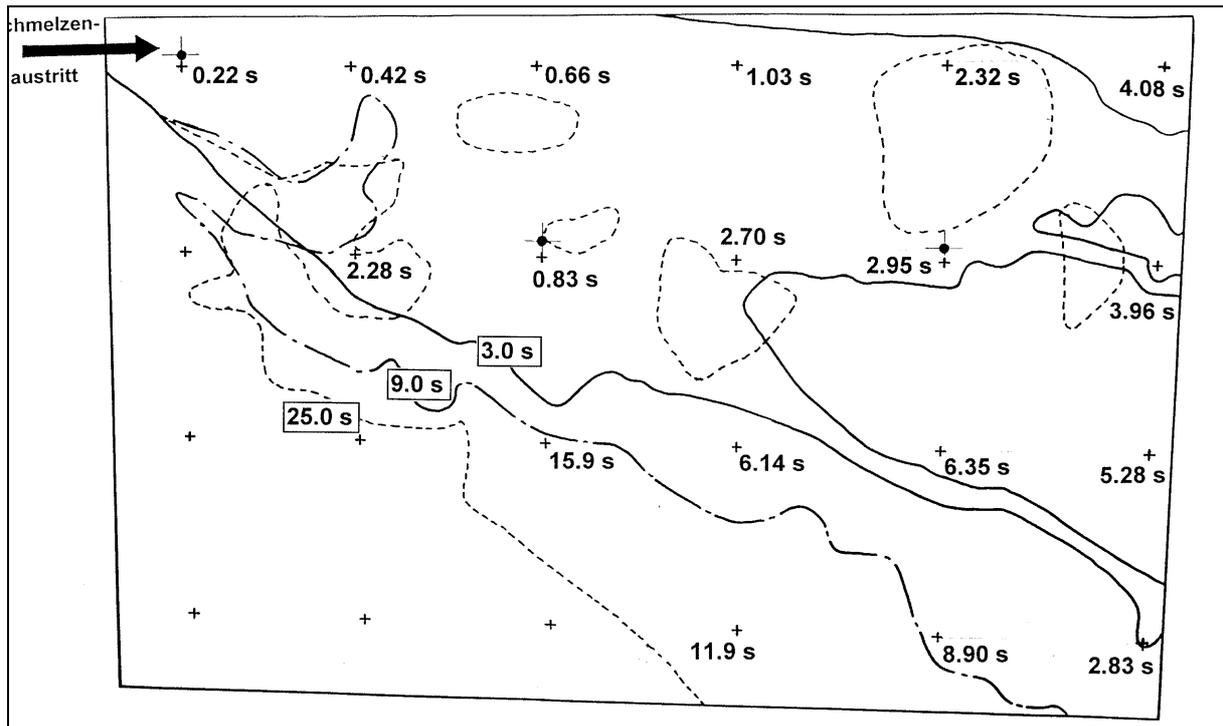


Abb. 3.1.12: Transiente Ausbreitung der Eisenschmelze im Zeitintervall 3 bis 25 s

Die Verteilung der Eisenschmelze nach Beendigung der Ausbreitung ist in den Abbildungen 3.1.13 und 3.1.14 zu ersehen. Deutlich sieht man Lücken innerhalb des anfänglich homogen geschlossenen Eisenregulus, die sich infolge der hohen Oberflächenspannung des Eisens bildeten. Im vorderen Bereich des Eintrittsfensters war kein Eisen zu finden, es hat sich durch die Trägheit weg vom Fenster bewegt und strömte infolge der Oberflächenspannung nach der Immobilisierung nicht zurück. Die Ankunftszeiten der Eisenschmelze an den Positionen der einzelnen NiCr-Ni-Thermoelementen sind in den beiden Abbildungen 3.1.11 und 3.1.12 der Schmelzeausbreitung mit angegeben.

Die Abbildungen 3.1.11 und 3.1.12 wurden direkt vom Bildschirm übernommen, daher die Verzerrung der beiden Bilder.

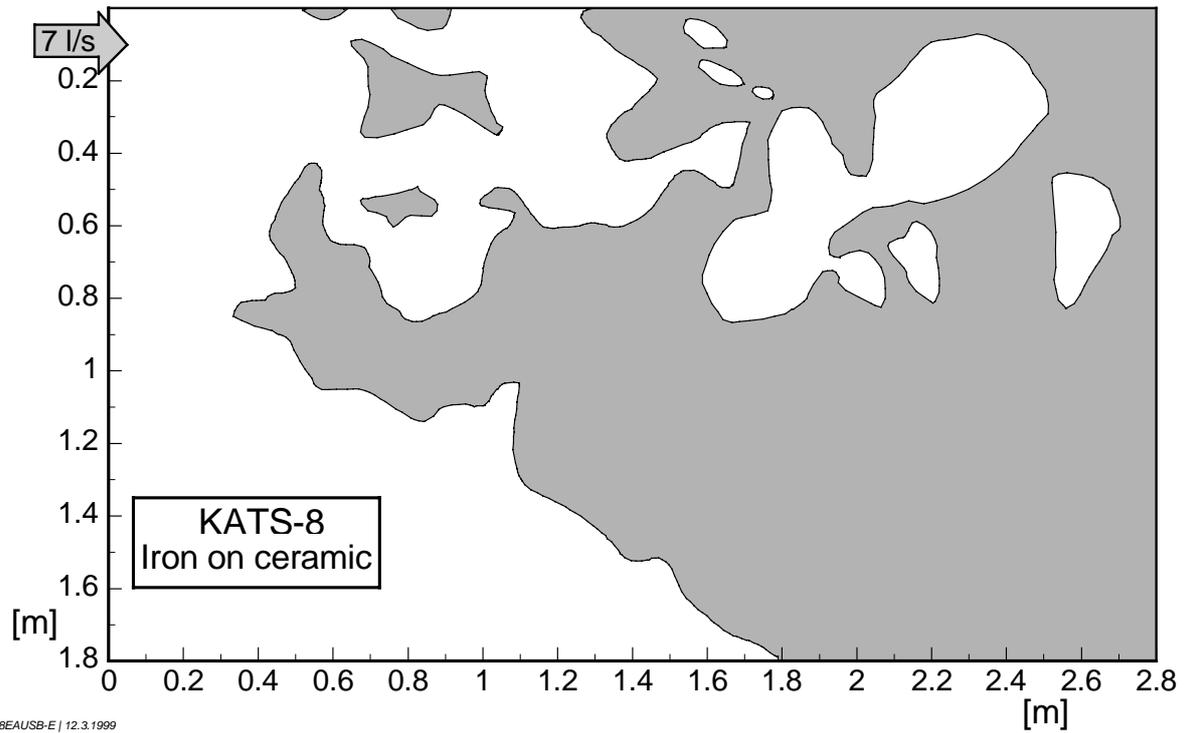


Abb. 3.1.13: Endgültige Ausbreitung der Eisenschmelze

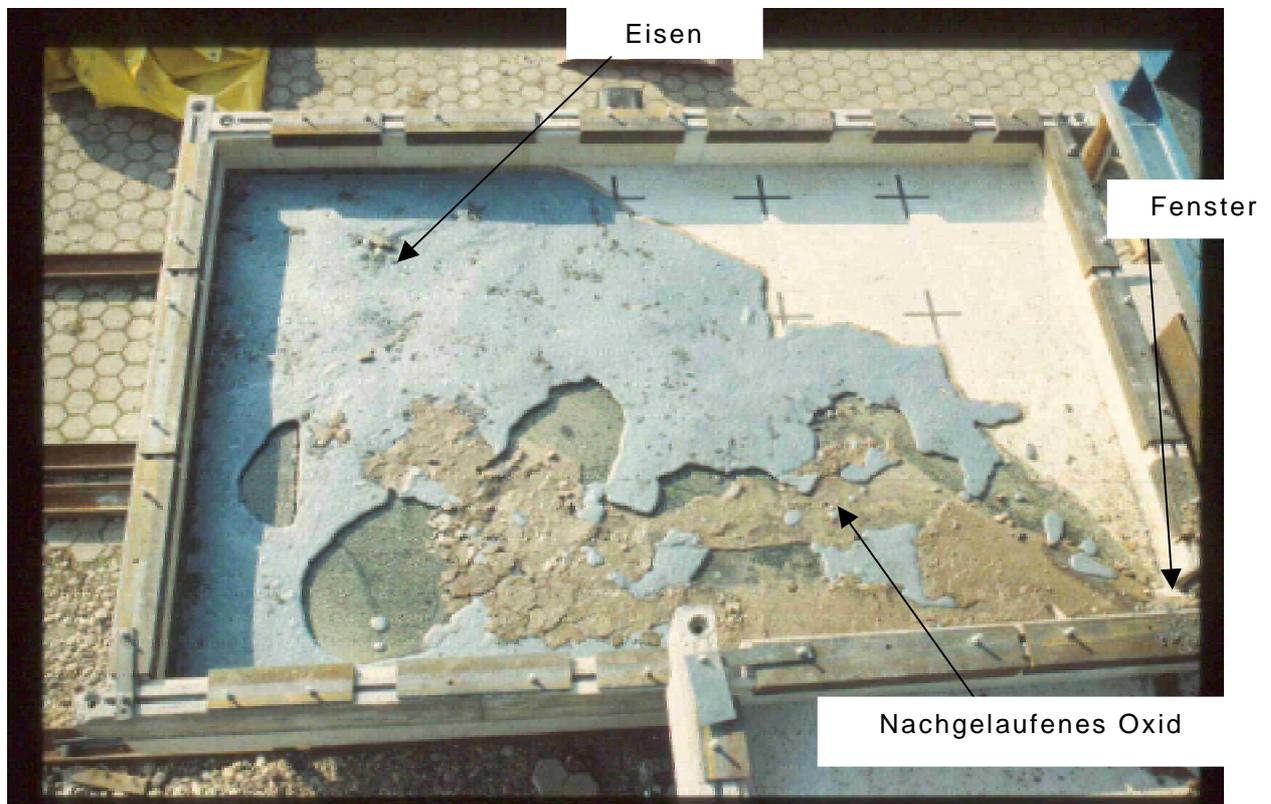


Abb. 3.1.14: Photo der endgültigen Ausbreitung der Eisenschmelze

Eine geringe Menge Oxid ist nach Ende der Eisenausbreitung ausgetreten. Die Trennung von Eisen- und Oxidschmelze war bei diesem Test nicht vollständig gelungen. Der Einfluß der Oxidschmelze auf das Ausbreiten des Eisens ist jedoch zu vernachlässigen. Die gesamte Eisenschmelze war im Augenblick der Immobilisierung noch schmelzflüssig, sie zieht sich bei Abkühlung durch Vergrößerung der Oberflächenspannung zurück.

Aus der Videoaufzeichnung können aus den Umrissen der sich ausbreitenden Schmelze die bedeckten Flächen berechnet werden, sie sind zeitabhängig in Tabelle 3.1.10 und Abbildung 3.1.15 dargestellt.

Tab. 3.1.10: Bedeckte Fläche der sich ausbreitenden Eisenschmelze zu verschiedenen Zeiten

Zeit ab Beginn der Ausbreitung [s]	Bedeckte Fläche [m²]
0	0
0.5	0.25
1	0.71
2	1.18
3	1.92
4	2.32
5	2.61
7	3.02
9	3.20
11	3.30
15	3.36
25	3.38

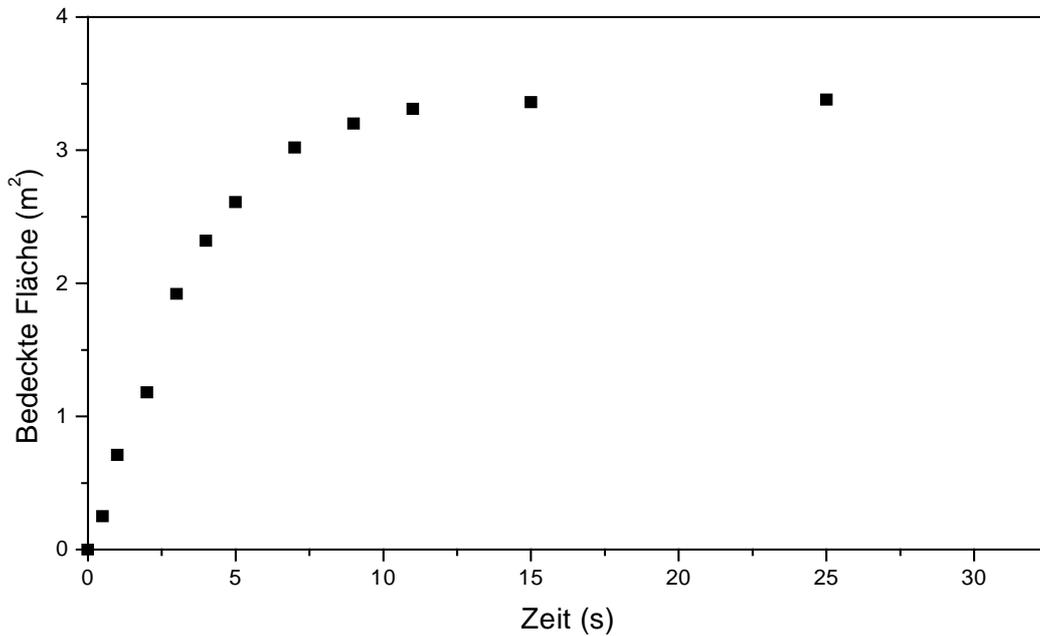


Abb. 3.1.15: Bedeckte Fläche der sich ausbreitenden Eischmelze zu verschiedenen Zeiten

Temperaturmessung im Eisenkanal

Tab. 3.1.11: Temperaturmessung mit W-Re-Thermoelementen

Eisen	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bezogen auf Beginn der Ausbreitung)	Bemerkungen
EW.00.00	-	-	TE zerstört
EW.10.05	-	-	TE zerstört
EW.20.05	1935	7.5 s	

Das W-Re-Thermoelement E.W.1, das nahe beim Eisenfenster positioniert war, hat kurz nach Ankunft der Eischmelze (0.2 s) versagt, die asymptotische Temperatur wurde nicht erreicht, Abbildung 3.1.16. Das

zweite W-Re-Thermoelement versagte ebenso, der Zeitpunkt des Temperaturanstiegs (0.8 s) stimmt jedoch mit den Videodaten und den Aufzeichnungen der NiCr-Ni-Thermoelementen überein. Nur das dritte Thermoelement, das vom Fenster am entferntesten lag, versagte nicht und registrierte eine Temperatur von 1935 °C. Dieser Wert stimmt mit den aus der Thermitreaktion geschätzten Werten und den Temperaturen der Oxidschmelze überein. Die Eisenschmelze wurde längere Zeit als die Oxidschmelze im Schmelzebehälter gehalten, und der Meßpunkt des dritten Thermoelements lag weit entfernt vom Austrittsfenster. Die Anfangstemperatur der Eisenschmelze wird somit bei etwa 2000 ± 50 °C liegen.

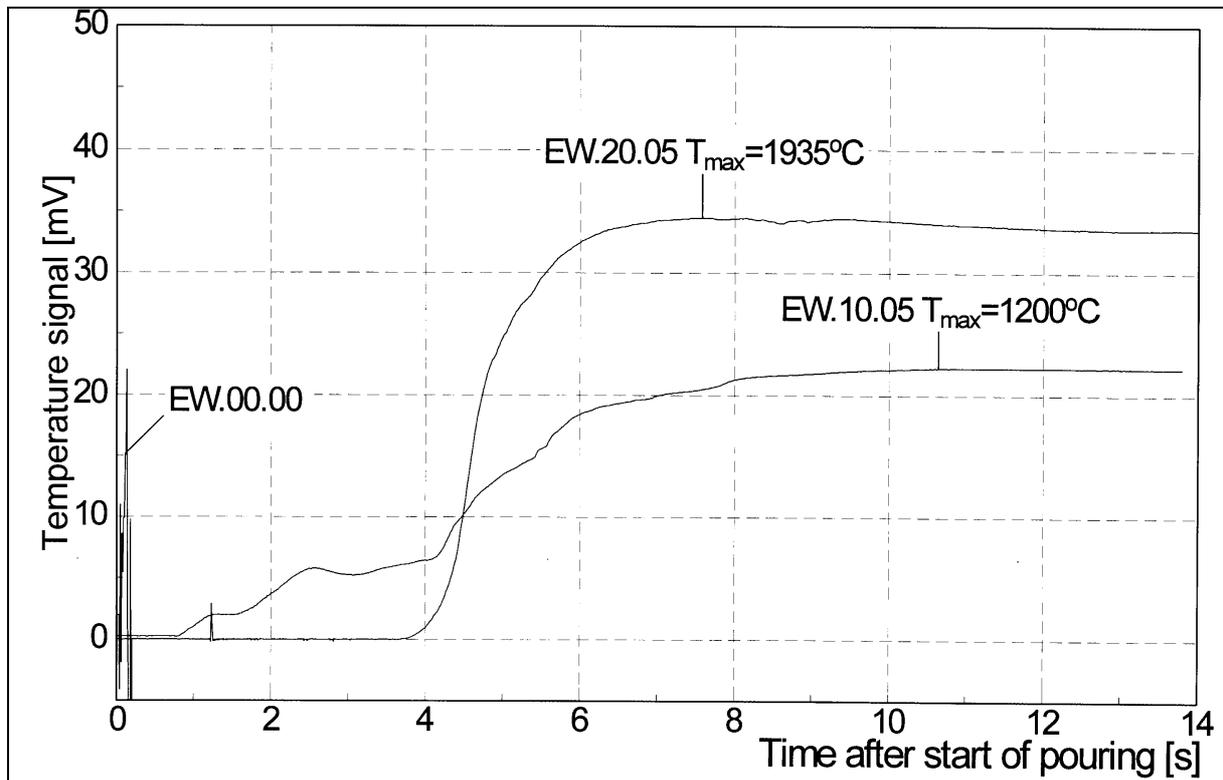


Abb. 3.1.16: Aufzeichnung der W-Re-Thermoelemente

Höhenverteilung der Eisenschmelze

Die Höhenverteilung der Eisenschicht wurde an insgesamt 21 Positionen bestimmt. An acht Positionen waren Hohlräume im Regulus zu erkennen. Diese hatten sich aufgrund des Ausgasens der Cordieritplatten gebildet. Werden diese Lufteinschlüsse mit berücksichtigt, so ergibt sich eine mittlere Höhe von 10.02 mm. Nach Abzug dieser Hohlräume beträgt die mittlere Höhe des erstarrten Regulus von 8.5 ± 0.5 mm. Im Augenblick, als die Ausbreitung der Eisenschmelze endete, lag die Temperatur noch nahe 2000 °C. Aus der Dichtedifferenz errechnet sich die ursprüngliche Schmelzenhöhe aufgrund der geringeren Dichte im flüssigen Zustand auf 9.9 ± 0.5 mm.

Zum Zeitpunkt der Immobilisierung der Eisenschmelze wirken auf sie nur noch zwei Kräfte, die Schwerkraft und die Oberflächenspannung, die sich die Balance halten. Aus der Kräftebilanz errechnet man aus der Laplace'schen Formel die Schmelzenhöhe zu:

$$h = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \cdot g}} = 9.3 \text{ mm}$$

(mit der Oberflächenspannung $\sigma = 1.45$ N/m für flüssiges Eisen), in guter Übereinstimmung mit dem experimentellen Wert.

Erosion des Substrats

Ebenso wie bei der Ausbreitung der Oxidschmelze trat Erosion des Substrats am Eintritt der Schmelze nahe des Fensters auf, dort lag die Geschwindigkeit bei 2.5 m/s. Die Erosionstiefe liegt bei 10 mm, im restlichen Bereich der von der Eisenschmelze bedeckten Fläche war keine Erosion zu erkennen.

Analyse von Proben aus dem Eisenkanal

Es wurden keine Proben aus dem Eisenkanal entnommen.

3.2 KATS-10 “1-dim Ausbreitung mit hoher Volumenrate (schneller Schmelzenauslaß) auf mit Epoxy behandeltem silikatischem Beton mit 1 mm Wasserauflage“

Versuchsdatum: 20.2.97

Versuchsaufbau

Abb. 3.2.1: Reaktionstiegel und Stoffeinsatz

	Thermitmischung: (10 Al SSH)	29 Beutel a 10,4 kg → 301,6 kg
	Langsam reagierendes Thermit (EF50):	6,24 kg
	Zuschlag: Quarzsand	20 kg

Abb. 3.2.2: Trennbehälter

	Trennbehälter- Oxid (B × T):	367 × 382 mm
	Trennbehälter- Oxid nach Erosion	145500 mm ²
	Oxidfenster (H × B):	50 × 140 mm
	Oxidfüllstand:	440 mm
	Oxidausbreitungsfläche (B × L):	0,25 × 12 m
	Substrat:	Beton mit Epoxy-Anstrich
	Zugabe:	1 mm Wasser
	Trennbehälter- Eisen (B × T):	170 × 303 mm
	Trennbehälter- Eisen nach Erosion	51800 mm ²
	Eisenfenster (H × B):	50 × 80 mm
	Eisenfüllstand:	400 mm
	Eisenausbreitungsfläche (B × L):	0,15 × 12 m
	Substrat:	Beton mit Epoxy-Anstrich
	Zugabe:	1 mm Wasser

Abb. 3.2.3: Ausflußgeometrie

	Oxid	Eisen
	$a = 110 \text{ mm}$	$a = 100 \text{ mm}$
	$h = 90 \text{ mm}$	$h = 90 \text{ mm}$
	Oxidfenster innen (H × B): $50 \times 140 \text{ mm}$	Eisenfenster innen (H × B): $50 \times 80 \text{ mm}$
	Oxidfenster außen (H × B): $70 \times 160 \text{ mm}$	Eisenfenster außen (H × B): $70 \times 100 \text{ mm}$

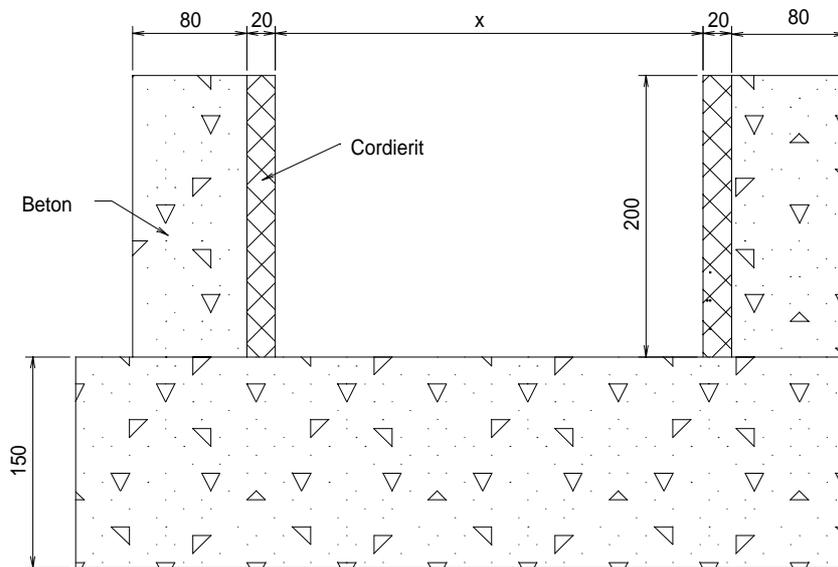


Abb. 3.2.4: Kanalquerschnitt

Instrumentierung

Temperaturmessung mit W-Re-Tauchthermoelementen

Die W-Re-Thermoelemente sind mit einer Schutzkappe aus 1/10 mm Stahl umgeben. Die Messstelle befindet sich 5 mm hinter dieser Kappe. Die Bezeichnung O.W.xx.05 bedeutet, dass der Boden der Schutzkappe 5 mm über der Ausbreitungsfläche lag, d. h. die Messstelle 10 mm darüber.

Tab. 3.2.1: Temperaturmessung der Oxidschmelze

Oxid	Längenposition	Abstand zur Kanalwand	Höhe über Boden
O.W.05.05	0,5 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.35.05	3,5 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.65.05	6,5 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.80.05	8,0 m	~ 30 mm	10 mm

Tab. 3.2.2: Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisen	Längenposition	Abstand zur Kanalwand	Höhe über Boden
E.W.05.05	0,5 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.35.05	3,5 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.65.05	6,5 m	~ 30 mm	10 mm

Schmelzedetektion in den Ausbreitungskanälen mit NiCr-Ni-Thermoelementen

Der Abstand zur Kanalwand beträgt für alle Thermoelemente 70 bis 90 mm.

Die Mantelthermoelemente haben \varnothing 1 mm (in TI-Ausführung) und werden in einem Edelstahlröhrchen \varnothing 4x1 mm geführt. Die Thermoelemente für den Oxidkanal ragen 2-3 mm aus dem Hüllrohr heraus, die für den Eisenkanal schließen bündig ab.

Tab. 3.2.3: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal

Oxid	Länge	Höhe über Boden
O.K.05.05	0,5 m	5 mm
O.K.05.25	0,5 m	25 mm
O.K.05.35	0,5 m	35 mm
O.K.20.05	2,0 m	5 mm
O.K.20.25	2,0 m	25 mm
O.K.20.35	2,0 m	35 mm
O.K.35.05	3,5 m	5 mm
O.K.50.05	5,0 m	5 mm
O.K.50.25	5,0 m	25 mm
O.K.65.05	6,5 m	5 mm
O.K.65.15	6,5 m	15 mm
O.K.65.25	6,5 m	25 mm
O.K.80.05	8,0 m	5 mm
O.K.80.15	8,0 m	15 mm
O.K.80.25	8,0 m	25 mm
O.K.90.05	9,0 m	5 mm
O.K.90.15	9,0 m	15 mm
O.K.100.05	10,0 m	5 mm
O.K.100.15	10,0 m	15 mm
O.K.110.05	11,0 m	5 mm
O.K.110.15	11,0 m	15 mm

Tab. 3.2.4: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Eisenkanal

Eisen	Längenposition	Höhe über Boden
E.K.05.05	0,5 m	5 mm
E.K.05.25	0,5 m	25 mm
E.K.05.35	0,5 m	35 mm
E.K.20.05	2,0 m	5 mm
E.K.20.25	2,0 m	25 mm
E.K.20.35	2,0 m	35 mm
E.K.35.05	3,5 m	5 mm
E.K.50.05	5,0 m	5 mm
E.K.50.25	5,0 m	25 mm
E.K.65.05	6,5 m	5 mm
E.K.65.15	6,5 m	15 mm
E.K.65.25	6,5 m	25 mm
E.K.80.05	8,0 m	5 mm
E.K.80.15	8,0 m	15 mm
E.K.80.25	8,0 m	25 mm
E.K.90.05	9,0 m	5 mm
E.K.90.15	9,0 m	15 mm
E.K.100.05	10,0 m	5 mm
E.K.100.15	10,0 m	15 mm
E.K.110.05	11,0 m	5 mm
E.K.110.15	11,0 m	15 mm

Schmelzedetektion am Thermittiegel

Im Reaktionstiegel sind im unteren Bereich zwei Thermoelemente installiert, 200 mm über der Verschlußfolie (TT200) und 5 mm über dieser (TT05).

Unterhalb der Düse befinden sich zwei Thermoelemente zur Detektion des Abstichs der Schmelze aus dem Tiegel (TA1 und TA2).

Druckmessung mit Kistler Druckaufnehmern Typ 7000

Die Druckaufnehmer sind in einer Höhe von 235 mm über dem Kanalboden auf der Kanalwand (ca. 20 mm zurückgesetzt) installiert. Sie sollen eventuelle Schmelze/Wasser-Reaktionen detektieren.

Tab 3.2.5: Position der Druckaufnehmer im Oxidkanal

Oxid	Längenposition
O.P.10.00	1,0 m
O.P.40.00	4,0 m
O.P.70.00	7,0 m

Tab 3.2.6: Position der Druckaufnehmer im Eisenkanal

Eisen	Längenposition
E.P.10.00	1,0 m
E.P.40.00	4,0 m
E.P.70.00	7,0 m

Zeitlicher Ablauf des Experiments

Zündung vom PC

- Thermitreaktion erreicht TT200
- Start der Signalaufzeichnung für TT200, TT05, TA1 und TA2 und OK.05.05 (1 kHz; 65,5 s).

TA1 und /oder TA2 detektieren ca. 30 s nach Zündung den Schmelzeabstich. Die Schmelze läuft in den Trennbehälter.

- Start einer Zeitverzögerung von 25 s

- Oxidfenster öffnet sich
- Blitze am Oxidkanal zünden
- Aufzeichnung der Signale des Oxidkanals startet (5 kHz; 51,2 s)
- Start einer Zeitverzögerung von 20 s.

- Mischfenster öffnet sich
- Start einer Verzögerung von 6 s

- Eisenfenster öffnet sich
- Blitze am Eisenkanal zünden
- Aufzeichnung der Signale des Eisenkanals startet (5 kHz; 51,2 s).

Oxidausbreitung

Ausgebreitete Oxidmasse

Die ausgebreitete Oxidmasse wurde nach dem Experiment nicht gewogen. Der Schmelzestand im oberen Teil des Trennbehälters vor dem Öffnen des Oxidfensters wurde bei der Nachuntersuchung mit etwa 440 mm über der Unterkante des Oxidfensters festgestellt. Das Oxidvolumen betrug unter Berücksichtigung von Abschmelzungen an den Wänden 0.064 m³.

Die Temperatur der Schmelze im Trennbehälter wurde nicht gemessen. Die früheste Temperaturmessung stammt vom Thermoelement OW.35.05, da OW.05.05 wahrscheinlich aufgrund der schwachen Schmelze-Wasser-Wechselwirkung ausgefallen war. Das Thermoelement OW.35.05 hat 4,6 s nach Fensteröffnung eine Temperatur von 2040 °C erreicht.

Aus der Eisen- und Oxidschmelze, die aus dem Mischfenster abgeflossen ist, kann man, da das Volumen gut bekannt ist, auf die Eisen- und Oxiddichte schließen. Man ermittelt auf diese Weise eine Oxiddichte von 2800 kg/m³. Somit ergibt sich aus dem Volumen von 0.064 m³ eine Masse von 179 kg für die Oxidausbreitung.

Volumenrate Oxid

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie wird aus dem Schmelzefüllstand und der Fenstergröße rechnerisch ermittelt.

Ausfließen aus einem prismatischen Gefäß nach der Formel von Torricelli [16]:

$$\text{Geschwindigkeit } v = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad ; \quad \text{Volumenrate } \dot{V} = \mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

mit φ = Kontraktionszahl = 0,97 und μ = Ausflußzahl = 0,6.

A_a = Fensterquerschnitt (= 50 × 140 mm²)

h = Füllstand (= 440 mm)

$$\text{Entleerungszeit: } t_e = \frac{2 \cdot A_b \cdot \sqrt{h}}{\mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2g}}$$

mit A_b = Behälterquerschnitt nach Erosion (= 145.500 mm²).

Nach dieser Rechnung ermittelt man eine anfängliche Austrittsgeschwindigkeit des Oxides von $v=2,85$ m/s, einen anfänglichen Volumenstrom von $\dot{V}=12,4$ l/s bzw. einen Massenstrom von $\dot{m}=34,7$ kg/s. Die Austrittsdauer beträgt $t_e=10,4$ s. Während dieser Zeit gehen Geschwindigkeit und Volumenstrom linear auf Null zurück.

Oxidmelzenausbreitung

Kurz nach dem Öffnen des Oxidfensters (~0,45 s) kommt es zu einer leichten Schmelze-Wasser-Wechselwirkung, bei der schätzungsweise 1-2 kg Schmelze hochgeschleudert und aus dem Kanal geworfen werden. Eine Beschädigung der Komponenten des Versuchsaufbaus (wie etwa die Kanäle oder der Schmelzetrennbehälter) tritt nicht auf. Lediglich das W-Re-Thermoelement OW.05.05 wird beschädigt.

Die Ausbreitung der Schmelze, die zu diesem Zeitpunkt etwa einen Meter fortgeschritten ist, scheint für kurze Zeit anzuhalten, setzt sich dann aber sehr schnell wieder fort, Abbildung 3.2.6. Es ist eine sehr schnelle Ausbreitung, die sich fast ungebremst bis zum Ende des Kanals fortsetzt, und dieses nach nur 6 s erreicht. Etwa 1 m hinter der Schmelzenfront bewegt sich dabei eine Flammen- und Rauchfront mit. Diese rührt vom Abbrand des Epoxy-Lackanstrichs her. Aus der Videoaufzeichnung wird etwa 7 s nach Fensteröffnung auf der erkaltenden ausgebreiteten Schmelze eine zweite Schmelzenfront sichtbar, Abbildung 3.2.6, die sich langsam über die erste Schicht schiebt. (Aufgrund der Blendeneinstellung der Kameras wird diese zweite Front erst recht spät sichtbar; die Aufnahme ist leicht überstrahlt.) Diese zweite Front bleibt nach insgesamt 13 s bei 6,6 m stehen.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Die folgende Tabelle gibt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten wieder. Bei den Meßpositionen „2 m“ und „3.5 m“ kam es zu stufenweisen Anstiegen der Spannung (evtl. durch Schmelzespritzer infolge der Wechselwirkung mit dem Wasser). Diese Zeitpunkte sind in Klammern gesetzt.

Alle Thermoelemente wurden von der oben genannten ersten Schmelzefront zerstört. Die zweite Schmelzefront, welche den Hauptanteil der Masse transportierte, konnte somit von den NiCr-Ni-Thermoelementen nicht erfaßt werden.

Tab 3.2.7: Detektionszeitpunkte der NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal in [s]

Länge (m) \ Höhe (mm)	0.5	2	3.5	5	6.5	8	9	10	11
35	0.314	1.010 (0.477)							
25	0.384	0.954 (0.473)		2.355	3.015	3.822			
15					3.005	3.782	4.333	4.894	5.606
5	0.403	0.945 (0.750) (0.457)	1.680 (1.547) (0.630)	2.348	2.982	3.785	4.294	4.895	5.518

In der Tabelle 3.2.7 ist der Nullpunkt der Zeitpunkt des Oxidfensteröffnens.

Es gibt nur sehr geringe zeitliche Unterschiede zwischen den Thermoelementen auf unterschiedlichen Höhenpositionen. Die erste Schmelzefront muß sich demnach bis mindestens 2 m mit einer Höhe von minde-

stens 35 mm ausgebreitet haben, bis min. 8 m mit einer Höhe von min. 25 mm und bis zum Kanalende mit min. 15 mm Höhe.

Zur Darstellung der Ausbreitung in einem Weg-Zeit-Diagramm werden im weiteren Verlauf die Detektionszeitpunkte der Thermoelemente in 5 mm Höhe herangezogen, siehe Abbildung 3.2.6.

Oxidschmelzenausbreitung aus Videoaufnahme

Die Videoaufzeichnung wird über Blitze synchronisiert, die zeitgleich mit dem Öffnen der Fenster gezündet werden. Aus der Videoaufzeichnung erhält man das zeitliche Ausbreiten der Schmelze im Kanal, Tabelle 3.2.8 und Abbildung 3.2.6. Die zweite, langsamere Schmelzefront konnte infolge Überstrahlung durch die erste erst ab 7 s detektiert werden, Tabelle 3.2.9.

Tab. 3.2.8: Ausbreitung der ersten Oxid-Schmelzefront durch Videoauswertung

Zeit (s)	Weg (m)						
-	-	1.6	3.55	3.2	7.05	4.8	9.96
-	-	1.7	3.77	3.3	7.22	4.9	10.12
-	-	1.8	4.01	3.4	7.42	5	10.28
-	-	1.9	4.22	3.5	7.6	5.1	10.44
0.2	0.23	2	4.44	3.6	7.8	5.2	10.56
0.3	0.53	2.1	4.64	3.7	7.99	5.3	10.7
0.36	0.75	2.2	4.87	3.8	8.19	5.4	10.85
0.7	1.21	2.3	5.08	3.9	8.38	5.5	11.02
0.8	1.59	2.4	5.3	4	8.56	5.6	11.14
0.9	1.92	2.5	5.54	4.1	8.73	5.7	11.31
1	2.22	2.6	5.78	4.2	8.89	5.8	11.45
1.1	2.48	2.7	6.01	4.3	9.06	5.9	11.59
1.2	2.77	2.8	6.21	4.4	9.25	6	11.74
1.3	2.97	2.9	6.43	4.5	9.42	6.1	11.87
1.4	3.15	3	6.64	4.6	9.59	6.2	11.96
1.5	3.34	3.1	6.82	4.7	9.76	6.24	12

Tab 3.2.9: Ausbreitung der zweiten Oxid-Schmelzefront durch Videoauswertung:

Zeit (s)	Weg (m)
7	5.79
8	5.98
9	6.15
10	6.33
11	6.47
12	6.56
13	6.6
14	6.6

Temperaturmessung im Oxidkanal

In Tabelle 3.2.10 und in der Abbildung 3.2.5 sind die Temperaturmessungen im Oxidkanal aufgeführt.

Tab. 3.2.10: Temperaturmessungen im Oxidkanal

Oxid	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bzgl. Fensteröffnen)	Bemerkungen
O.W.05.05	Ausgefallen		
O.W.35.05	2040°C	~ 4,7 s	
O.W.65.05	1800°C	~ 6,7 s	
O.W.80.05	1650°C	~ 10 s	Keine geschlossene Schmelzschicht, Temperatur unglaublich

Da die Meßstelle bei 0,5 m ausgefallen ist, kann als Anfangstemperatur nur von den 2040 °C ausgegangen werden, die bei 3,5 m gemessen wurden.

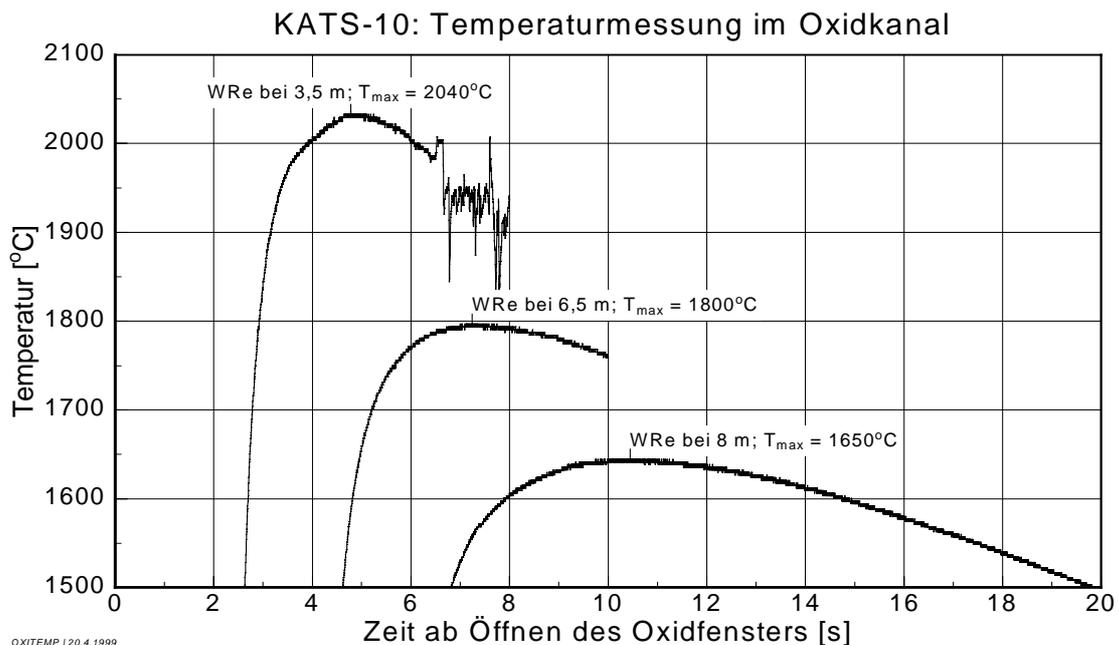


Abb. 3.2.5: Temperaturmessungen im Oxidkanal

Gesamtdarstellung der Oxidausbreitung

In Abbildung 3.2.6 ist der Weg-Zeit-Verlauf der Oxidausbreitung anhand der Videoauswertung und der Thermoelemente dargestellt. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben, jedoch ohne Bezug zur y-Achse des Diagramms. Es soll nur ein Eindruck von der zeitlichen Reaktion dieser Meßinstrumente auf den Schmelzenkontakt vermittelt werden.

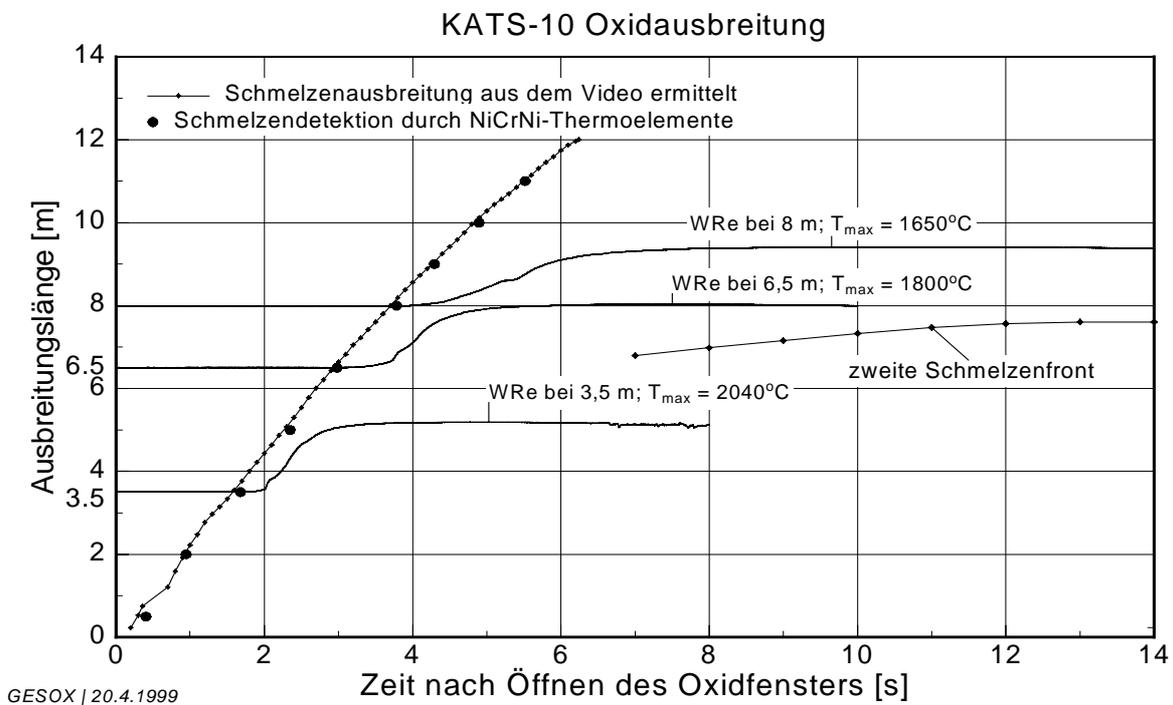


Abb. 3.2.6: Weg-Zeit-Verlauf der Oxidausbreitung

Druckmessung im Oxidkanal

In Abbildung 3.2.7 sind die Druckmessungen im Oxidkanal aufgeführt. Druckereignisse wurden nur von OP.10 und OP.40 registriert.

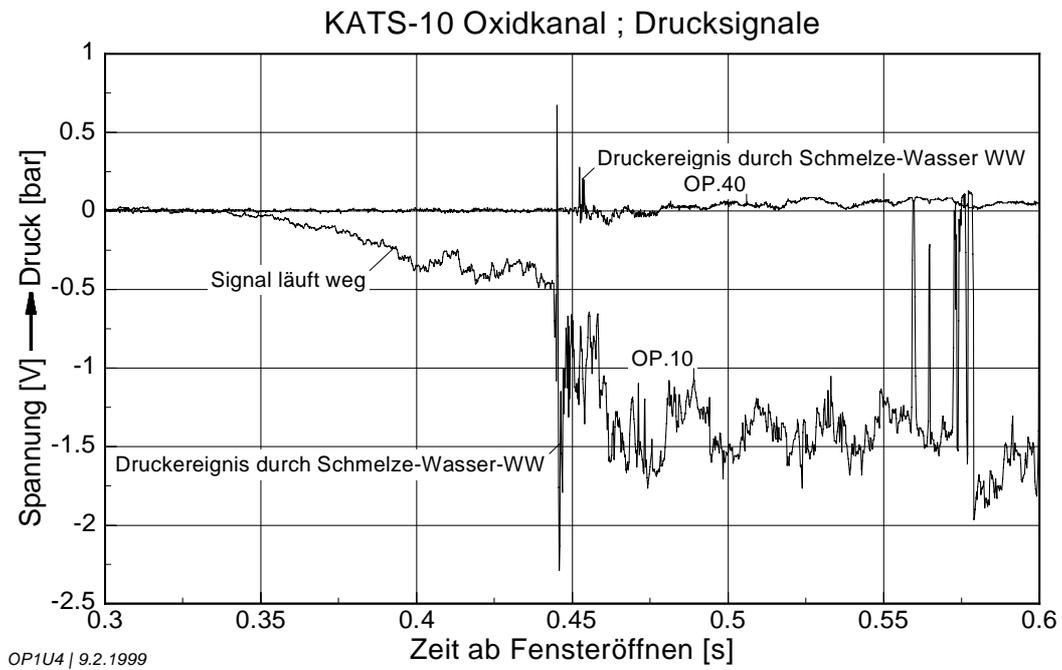


Abb. 3.2.7: Druckmessungen im Oxidkanal

Schmelzeverteilung im Oxidkanal

Nach dem Versuch wurde die Schmelzeverteilung entlang des Oxidkanals ermittelt, Tabelle 3.2.11 und Abbildung 3.2.8. Die Werte sind über die jeweiligen Teilbereiche und die Kanalbreite gemittelt.

Tab. 3.2.11: Verteilung der Oxidschmelze im Kanal

Kanallänge [m]	Höhe der Oxidschicht [mm]	Kanallänge [m]	Höhe der Oxidschicht [mm]
0	70	6	50
0.5	70	6.5	50
1	65	6.7	15
1.5	70	7	~ 10
2	60	8	~ 10
2.5	60	9	~ 10
3	60	10	10
3.5	55	10.5	10
4	50	11	25
4.5	55	11.5	40
5	50	12	45
5.5	50		

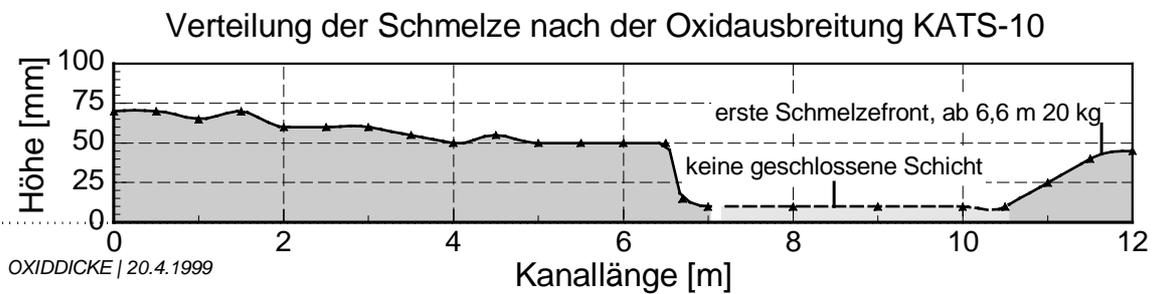


Abb. 3.2.8: Verteilung der Oxidschmelze nach der Ausbreitung

Erosion im Oxidkanal

In Tabelle 3.2.12 ist die Erosion im Oxidkanal aufgeführt. Im vorderen Viertel ist die Betonerosion mit im Mittel 10-15 mm Tiefe beträchtlich, zum Ende des Kanals hin nimmt diese ab.

Tab. 3.2.12: Erosion im Oxidkanal

Kanallänge	0 – 3 m	3 m – 6,5 m (Ende der dicken Schicht)	6,5 m – 12 m
Beschreibung der Erosion / Erosionstiefe	Punktuell recht unterschiedliche Erosionstiefe von 5 bis 20 mm; im Mittel 10 – 15 mm	Leichtere Erosion, homogener als im vorangegangenen Abschnitt; 5 – 10 mm	Praktisch keine Erosion, der Anstrich ist weitgehend weggebrannt.

Analyse von Proben aus dem Oxidkanal

Die Ergebnisse der in Tabelle 3.2.13 beschriebenen Analysen von Oxidproben sind in Gewichtsprozent angegeben.

Die Proben aus dem Mischbehälter geben am ehesten die ursprüngliche Oxidzusammensetzung vor der Ausbreitung wieder. Die Proben aus dem Kanal an den Stellen 1 m und 5 m sind durch die Betonerosion mit SiO_2 angereichert. Auf die Probe, die bei 11 m genommen wurde, trifft dies nicht zu. Dies ist ein Hinweis darauf, daß die Ausbreitung der ersten schnellen Front ohne wesentliche Wechselwirkung mit dem Beton vorstatten ging.

Tab. 3.2.13: Analysen von Oxidproben (Zahlenwerte in gew%)

Analyse Nr.	179/97	180/97	341/97	Ø aus 179/97 180/97 341/97	181/97	182/97	183/97
Herkunft	Mischbehälter				Oxidkanal		
					1 m	5 m	11 m
Al ₂ O ₃	78,7	77,0	76,2	77,3	69,6	69,1	75,2
FeO	6,7	7,1	7,5	7,1	7,9	8,1	8,6
SiO ₂	7,8	8,4	9,3	8,5	14,3	13,9	7,2
MgO	3,0	3,2	3,0	3,1	3,2	3,2	3,4
Sonst.	1,6	1,8	1,8	1,7	2,8	3,1	1,5
Summe	97,8	97,5	97,8	97,7	97,8	97,4	95,9

Eisenausbreitung

Ausgebreitete Eisenmasse

Die ausgebreitete Eisenmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 130,6 kg.

Es kann mit einer Eisendichte von 6300 kg/m^3 gerechnet werden. (Auswertung des Mischvolumens am Schmelzetrennbehälter.)

Volumenrate Eisen

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie wird aus dem Schmelzefüllstand ($h=400 \text{ mm}$) und der Fenstergröße rechnerisch ermittelt. (Ausfließen aus einem prismatischen Gefäß [16])

Nach dieser Rechnung ermittelt man eine anfängliche Austrittsgeschwindigkeit des Eisens von $v=2,72 \text{ m/s}$, einen anfänglichen Volumenstrom von $\dot{V}=6,7 \text{ l/s}$ bzw. einen Massenstrom von $\dot{m}=42,2 \text{ kg/s}$. Die Austrittsdauer beträgt $t_e=6,2 \text{ s}$. Während dieser Zeit gehen Geschwindigkeit und Volumenstrom linear auf Null zurück.

Eisenschmelzenausbreitung

Es wurde keine Schmelze-Wasser-Wechselwirkung detektiert. Die Ausbreitung ist wie beim Oxid sehr schnell.

Ab 7,5 m bis etwa 9 m war die Eisenschicht nicht mehr in geschlossener Form. Dies kann auf Lachenbildung aufgrund der Oberflächenspannung zurückgeführt werden. Zum Kanalende ist das Eisen etwas aufgestaut, da das Kanalende mit einer Wand verschlossen war.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente im Eisenkanal

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Die folgende Tabelle 3.2.14 gibt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten wieder.

Tab. 3.2.14: Detektionszeitpunkte der NiCr-Ni-Thermoelemente im Eisenkanal in [s].

Länge (m) \ Höhe (mm)	0.5	2	3.5	5	6.5	8	9	10	11
35	0.480	0.962							
25	0.417	0.941		2.192	2.861	3.644			
15					2.855	3.612	4.157	4.718	5.345
5	0.417	0.945	1.564	2.157	2.846	3.600	4.150	4.754	5.350

Der Nullpunkt in der Tabelle ist der Zeitpunkt des Eisenfensteröffnens. Es gibt nur sehr geringe zeitliche Unterschiede zwischen den Thermoelementen auf unterschiedlichen Höhenpositionen. Die Eisenschmelze hat sich bis mindestens 2 m mit einer Höhe von mindestens 35 mm ausgebreitet, bis min. 8 m mit einer Höhe von min. 25 mm und bis zum Kanalende mit min. 15 mm Höhe.

Zur Darstellung der Ausbreitung in einem Weg-Zeit-Diagramm werden im weiteren Verlauf die Detektionszeitpunkte der Thermoelemente auf 5 mm Position herangezogen.

Eisenschmelzenausbreitung aus Videoaufnahmen

Die Videoaufzeichnung wird über Blitze synchronisiert, die zeitgleich mit dem Öffnen der Fenster gezündet werden. In Tabelle 3.2.15 ist die Eisenschmelzenfront dargestellt.

Tab. 3.2.15: Ausbreitung der Eisenschmelzefront

Zeit (s)	Weg (m)						
-	-	1.3	3.24	2.6	6.24	4.4	9.56
0.2	0.25	1.4	3.49	2.7	6.44	4.6	10.02
0.3	0.61	1.5	3.72	2.8	6.61	4.7	10.19
0.4	0.92	1.6	4	2.9	6.79	4.8	10.35
0.5	1.26	1.7	4.25	3	6.98	4.9	10.52
0.6	1.54	1.8	4.46	3.3	7.64	5	10.7
0.7	1.81	1.9	4.7	3.4	7.82	5.1	10.82
0.8	2.05	2	4.9	3.5	8.03	5.2	11
0.9	2.28	2.24	5.49	3.6	8.25	5.3	11.15
1	2.56	2.3	5.62	3.8	8.61	5.4	11.31
1.1	2.78	2.4	5.83	3.9	8.78	5.5	11.46
1.2	2.99	2.5	6.02	4	8.96	5.6	11.59

Anmerkung:

Das Kanalende bei 12 m war auf dem Videofilm nicht mehr zu sehen. Die Eisenschmelze hat das Kanalende erreicht.

Temperaturmessung im Eisenkanal

In Tabelle 3.2.16 und Abbildung 3.2.9 sind die Temperaturmessungen im Eisenkanal dargestellt.

Tab. 3.2.16: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Eisen	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bzgl. Fensteröffnen)	Bemerkungen
E.W.05.05	----		Maximum nicht erreicht
E.W.35.05	1950°C	~ 3,7 s	
E.W.65.05	1845°C	~ 4,4 s	

Da die Meßstelle bei 0,5 m ausgefallen ist, kann als Anfangstemperatur nur von den 1950 °C ausgegangen werden, die bei 3,5 m gemessen wurden.

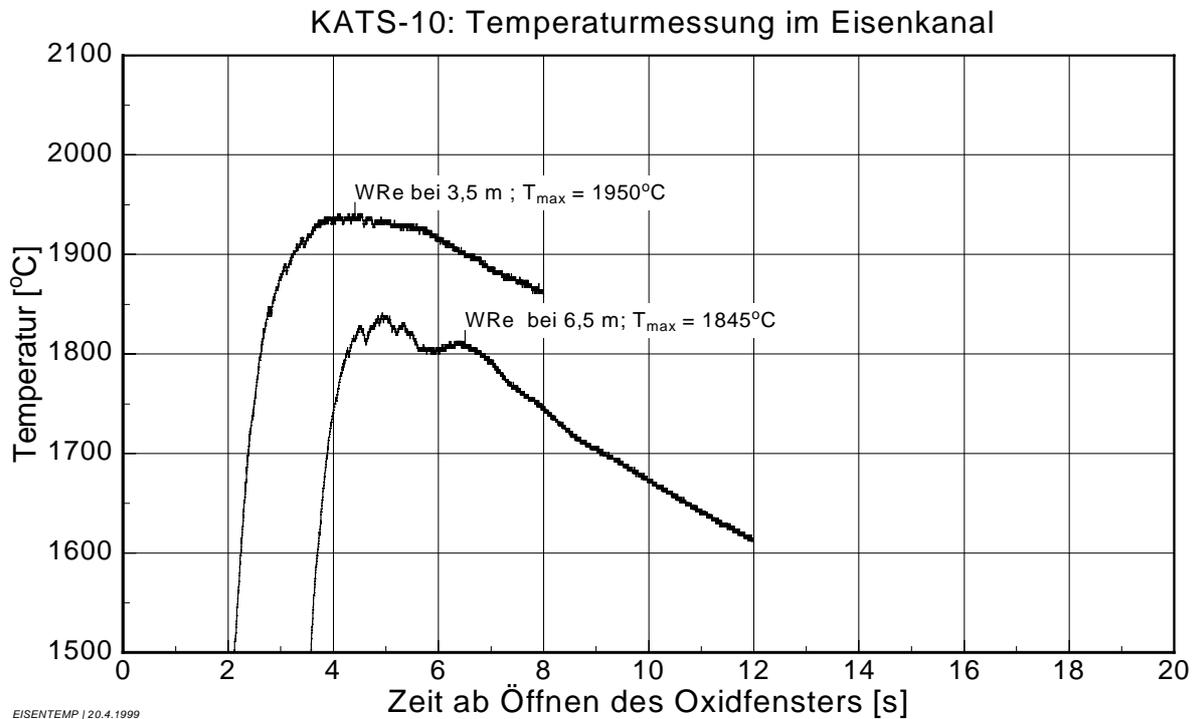


Abb. 3.2.9: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Gesamtdarstellung der Eisenausbreitung

Im folgenden Diagramm 3.2.10 ist der Weg-Zeit-Verlauf der Eisenausbreitung anhand der Videoauswertung und der Thermoelemente dargestellt. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind ebenfalls in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben, jedoch ohne Bezug zur y-Achse des Diagramms. Es soll nur ein Eindruck von der zeitlichen Reaktion dieser Meßinstrumente auf den Schmelzenkontakt vermittelt werden.

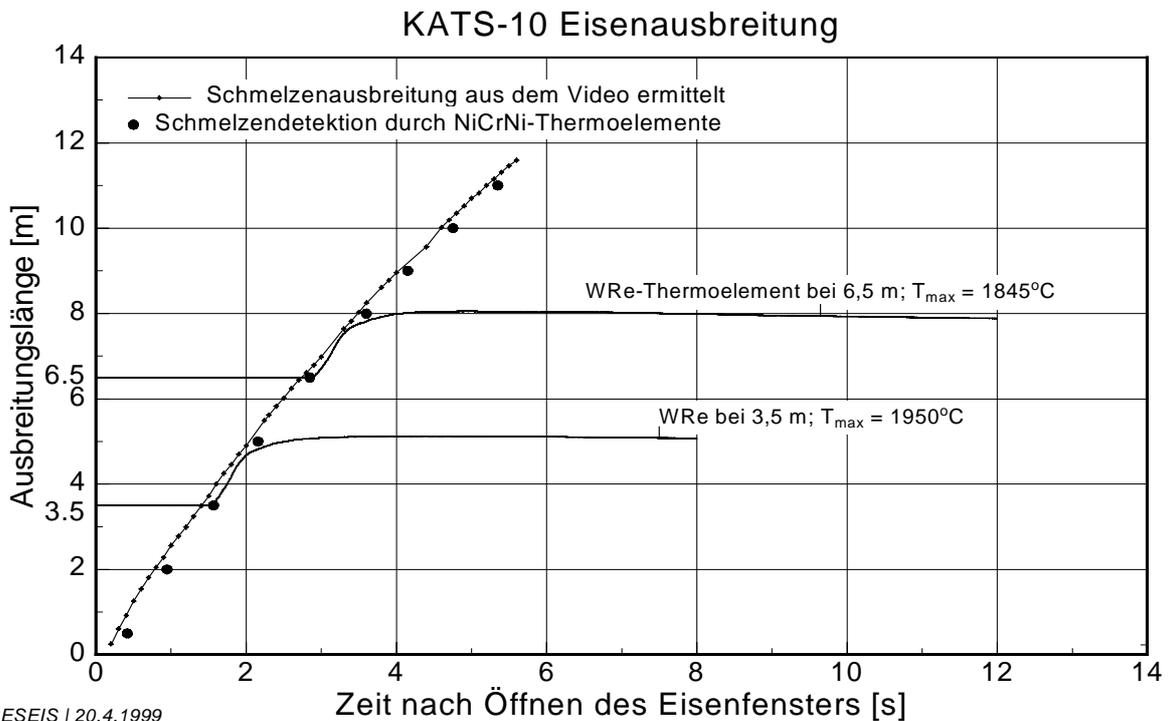


Abb. 3.2.10: Weg-Zeit-Verlauf der Eisenausbreitung

Druckmessung im Eisenkanal

Es wurden keine Druckereignisse registriert.

Schmelzeverteilung im Eisenkanal

In Abbildung 3.2.11 und Tabelle 3.2.17 ist die Verteilung der Eisenschmelze nach dem Versuch dargestellt.

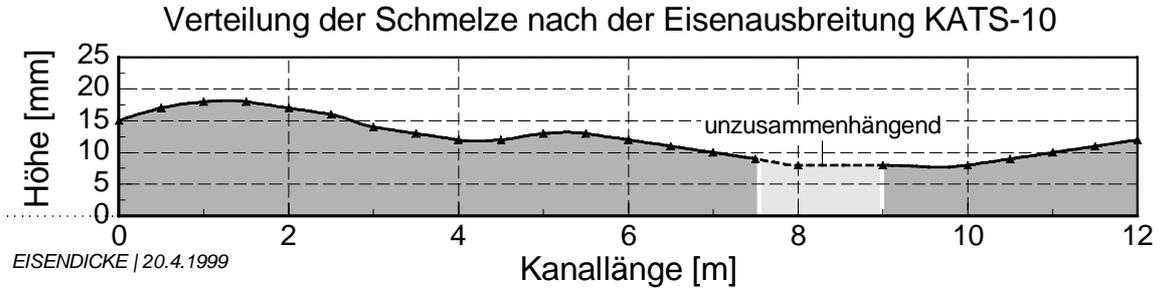


Abb. 3.2.11: Verteilung der Eisenschmelze nach der Ausbreitung

Tab. 3.2.17: Verteilung der Eisenschmelze nach der Ausbreitung

Kanallänge [m]	Höhe der Eisenschicht [mm]	Kanallänge [m]	Höhe der Eisenschicht [mm]
0	15	5.5	13
0.5	17	6	12
1	18	6.5	11
1.5	18	7	10
2	17	7.5	9
2.5	16	8	~ 8
3	14	9	~ 8
3.5	13	10	8
4	12	10.5	9
4.5	12	11	10
5	13	11.5	11
		12	12

Erosion im Eisenkanal

Es wurden keine Daten über die Erosion im Eisenkanal gesammelt.

Analyse von Proben aus dem Eisenkanal

Es wurden Proben des auf dem Eisen befindlichen Oxides genommen, um dessen Herkunft zu klären, Tabelle 3.2.18.

Tab. 3.2.18: Analyse von Oxidproben aus dem Eisenkanal

Analysen-Nr.	184/97	185/97
Herkunft	Eisenrinne	
	0.3 m	5 m
Al ₂ O ₃	54,2 %	9,7 %
FeO	7,4 %	4,4 %
SiO ₂	29,3 %	70,9 %
MgO	2,3 %	1,2 %
CaO	4,0 %	10,7 %
Sonst.	1,8 %	3,1 %
Summe	99,0 %	100 %

Die Oxidproben, die am Anfang des Eisenkanals genommen wurden, enthalten außer erodiertem Beton auch noch Oxid aus der Thermitreaktion (Al₂O₃), das nach Beendigung der Eisenausbreitung durch das Eisenfenster ausgelaufen ist.

3.3 KATS-11 “1-dim Ausbreitung mit hoher Volumenrate (schneller Schmelzenauslaß) auf mit Epoxy behandeltem silikatischem Beton, trocken“

Versuchsdatum: 23.4.97

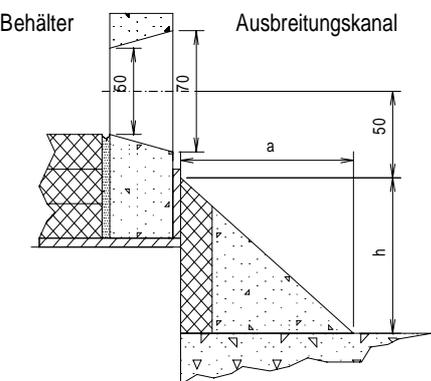
Versuchsaufbau

Abb. 3.3.1: Reaktionstiegel und Stoffeinsatz		
	Thermitmischung: (10 Al SSH)	30 Beutel à 10,4 kg → 312 kg
	Langsam reagierendes Thermit (EF50):	6,24 kg
	Zuschlag: Quarzsand	20 kg

Abb. 3.3.2: Trennbehälter

	Trennbehälter- Oxid (B × T):	367 × 382 mm
	Trennbehälter- Oxid nach Erosion	140700 mm ²
	Oxidfenster (H × B):	50 × 140 mm
	Oxidfüllstand:	465mm
	Oxidausbreitungsfläche (B × L):	0,25 × 12 m
	Substrat:	Beton mit Epoxy- Anstrich
	Trennbehälter- Eisen (B × T):	170 × 303 mm
	Trennbehälter- Eisen nach Erosion	52400 mm ²
	Eisenfenster (H × B):	50 × 80 mm
	Eisenfüllstand:	400 mm
	Eisenausbreitungsfläche (B × L):	0,15 × 15 m
	Substrat:	Beton mit Epoxy- Anstrich

Abb. 3.3.3: Ausflußgeometrie

	Oxid	Eisen
	$a = 110 \text{ mm}$	$a = 100 \text{ mm}$
	$h = 90 \text{ mm}$	$h = 90 \text{ mm}$
	Oxidfenster innen (H × B): 50 × 140 mm	Eisenfenster innen (H × B): 50 × 80 mm
	Oxidfenster außen (H × B): 70 × 160 mm	Eisenfenster außen (H × B): 70 × 100 mm

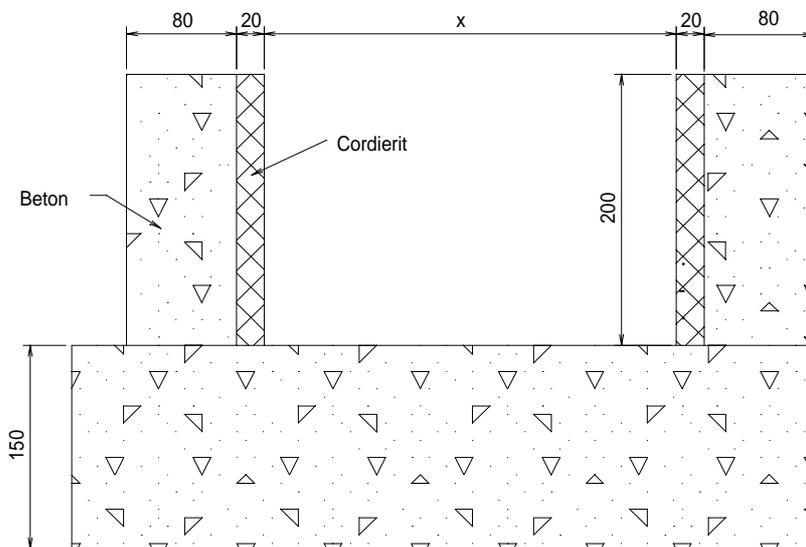


Abb. 3.3.4: Kanalquerschnitt

Instrumentierung

Temperaturmessung mit W-Re-Tauchthermoelementen

Die W-Re-Thermoelemente sind mit einer Schutzkappe aus 1/10 mm Stahl umgeben. Die Messstelle befindet sich 5 mm hinter dieser Kappe. Die Bezeichnung O.W.xx.05 bedeutet, dass der Boden der Schutzkappe 5 mm über der Ausbreitungsfläche lag, d. h. die Messstelle 10 mm darüber.

Tab. 3.3.1 Temperaturmessung der Oxidschmelze

Oxid	Länge	Abstand zur Kanalwand	Höhe über Boden
O.W.05.05	0,5 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.35.05	3,5 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.65.05	6,5 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.90.05	9,0 m	~ 30 mm	10 mm

Tab. 3.3.2 Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisen	Länge	Abstand zur Kanalwand	Höhe über Boden
E.W.05.05	0,5 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.35.05	3,5 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.65.05	6,5 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.100.05	10,0 m	~ 30 mm	10 mm

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit IR-Video

Eine thermographische Messung der Oxidoberflächentemperatur wurde mit einer Infrarotkamera vorgenommen.

Schmelzedetektion in den Ausbreitungskanälen mit NiCr-Ni-Thermoelementen

Der Abstand zur Kanalwand beträgt für alle Thermoelemente 70 bis 90 mm. Die Mantelthermoelemente haben \varnothing 1 mm in TI-Ausführung und werden in einem Edelstahlröhrchen \varnothing 4×1 mm geführt. Die Thermoelemente für den Oxidkanal ragen 2-3 mm aus dem Hüllrohr heraus, die für den Eisenkanal schließen bündig ab.

Tab. 3.3.3: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal

Oxid	Längen-Position	Höhe über Boden
O.K.05.05	0,5 m	5 mm
O.K.05.25	0,5 m	25 mm
O.K.05.35	0,5 m	35 mm
O.K.20.05	2,0 m	5 mm
O.K.20.25	2,0 m	25 mm
O.K.20.35	2,0 m	35 mm
O.K.35.05	3,5 m	5 mm
O.K.50.05	5,0 m	5 mm
O.K.50.25	5,0 m	25 mm
O.K.65.05	6,5 m	5 mm
O.K.65.15	6,5 m	15 mm
O.K.65.25	6,5 m	25 mm
O.K.80.05	8,0 m	5 mm
O.K.80.15	8,0 m	15 mm
O.K.80.35	8,0 m	35 mm
O.K.90.05	9,0 m	5 mm
O.K.90.15	9,0 m	15 mm
O.K.100.05	10,0 m	5 mm
O.K.100.15	10,0 m	15 mm
O.K.110.05	11,0 m	5 mm
O.K.110.15	11,0 m	15 mm

Tab. 3.3.4: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Eisenkanal

Eisen	Längen- Position	Höhe über Boden
E.K.05.05	0,5 m	5 mm
E.K.05.25	0,5 m	25 mm
E.K.05.35	0,5 m	35 mm
E.K.20.05	2,0 m	5 mm
E.K.20.25	2,0 m	25 mm
E.K.20.35	2,0 m	35 mm
E.K.35.05	3,5 m	5 mm
E.K.50.05	5,0 m	5 mm
E.K.50.25	5,0 m	25 mm
E.K.65.05	6,5 m	5 mm
E.K.65.15	6,5 m	15 mm
E.K.65.25	6,5 m	25 mm
E.K.80.05	8,0 m	5 mm
E.K.80.15	8,0 m	15 mm
E.K.80.35	8,0 m	35 mm
E.K.90.05	9,0 m	5 mm
E.K.90.25	9,0 m	25 mm
E.K.100.05	10,0 m	5 mm
E.K.100.15	10,0 m	15 mm
E.K.110.05	11,0 m	5 mm
E.K.110.25	11,0 m	25 mm
E.K.120.05	12,0 m	5 mm
E.K.120.15	12,0 m	15 mm
E.K.130.05	13,0 m	5 mm
E.K.130.25	13,0 m	25 mm
E.K.140.05	14,0 m	5 mm
E.K.140.25	14,0 m	25 mm

Schmelzedetektion am Thermittiegel

Im Tiegel sind zwei Thermoelemente installiert: 200 mm über der Verschlußfolie (TT200) und 5 mm über dieser (TT05).

Unterhalb der Düse befinden sich zwei Thermoelemente zur Detektion des Schmelzeaustritts aus dem Tiegel (TA1 und TA2).

Zeitlicher Ablauf des Experiments

Zündung vom PC

- Thermitreaktion erreicht TT200
- Start der Signalaufzeichnung für TT200, TT05, TA1 und TA2 und OK.05.05 (1 kHz; 65,5 s).

TA1 und /oder TA2 detektieren ca. 30 s nach Zündung den Schmelzeabstich. Die Schmelze läuft in den Trennbehälter.

- Start einer Zeitverzögerung von 25 s

- Oxidfenster öffnet sich
- Blitze am Oxidkanal zünden
- Aufzeichnung der Signale des Oxidkanals startet (5 kHz; 51,2 s)
- Aufzeichnung der Infrarotkamera vom Oxidkanal startet
- Start einer Zeitverzögerung von 20 s.

- Mischfenster öffnet sich
- Start einer Verzögerung von 6 s

- Eisenfenster öffnet sich
- Blitze am Eisenkanal zünden
- Aufzeichnung der Signale des Eisenkanals startet (5 kHz; 51,2 s).

Oxidausbreitung

Ausgebreitete Oxidmasse

Die ausgebreitete Oxidmasse wurde nach dem Experiment nicht gewogen. Der Schmelzestand im oberen Teil des Trennbehälters vor dem Öffnen des Oxidfensters wurde bei der Nachuntersuchung mit etwa 465 mm oberhalb der Unterkante des Oxidfensters festgestellt. Das Oxidvolumen betrug unter Berücksichtigung von Abschmelzungen an den Wänden 0.0654 m³.

Die Temperatur der Schmelze im Trennbehälter wurde nicht gemessen. Die früheste Temperaturmessung stammt vom Thermoelement O.W.05.05, es hat 2,4 s nach Fensteröffnung eine Temperatur von 2065 °C erreicht. Bei dieser Temperatur hat eine typische KATS-Schmelze eine Dichte von ~2800 kg/m³. (Dies stimmt mit der indirekten Dichtebestimmung über das Mischfenstervolumen recht gut überein.). Somit ergibt sich eine Masse von 183 kg für die Oxidausbreitung.

Volumenrate Oxid

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie wird aus dem Schmelzefüllstand und der Fenstergröße rechnerisch ermittelt.

Ausfließen aus einem prismatischen Gefäß [16]:

Geschwindigkeit $v = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$; Volumenrate $\dot{V} = \mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$

mit φ =Kontraktionszahl = 0,97 und μ = Ausflußzahl = 0,6.

A_a = Fensterquerschnitt (= 50 × 140 mm²)

h = Füllstand (= 465 mm)

Entleerungszeit: $t_e = \frac{2 \cdot A_b \cdot \sqrt{h}}{\mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2g}}$

mit A_b = Behälterquerschnitt nach Erosion (= 140.700 mm²).

Nach dieser Rechnung ermittelt man eine anfängliche Austrittsgeschwindigkeit des Oxides von $v=2,93$ m/s, einen anfänglichen Volumenstrom von $\dot{V}=12,7$ l/s bzw. einen Massenstrom von $\dot{m}=35,6$ kg/s. Die Austrittsdauer beträgt $t_e=10,3$ s. Während dieser Zeit gehen Geschwindigkeit und Volumenstrom linear auf Null zurück.

Oxidmelzenausbreitung

Es ist eine sehr schnelle Ausbreitung, die nach 5,9 s bei 9,5 m stehenbleibt. Etwa 1m hinter der Schmelzenfront bewegt sich dabei eine Flammen- und Rauchfront mit. Diese rührt vom Abbrand des Epoxy-Lackanstrichs her. Aus der Videoaufzeichnung wird etwa 7,4 s nach Fensteröffnung auf dem erkaltenden ausgebreiteten Schmelzmaterial eine zweite Schmelzenfront sichtbar, Abbildung 3.3.6, die sich langsam über die erste Schicht schiebt. (Aufgrund der Blendeneinstellung der Kameras wird diese zweite Front erst recht spät sichtbar; die Aufnahme ist leicht überstrahlt.) Diese zweite Front bleibt nach insgesamt 14 s bei 6,9 m stehen.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Die folgende Tabelle gibt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten wieder. Alle Thermoelemente wurden von der oben genannten ersten Schmelzefront zerstört. Die zweite Schmelzefront, welche den Hauptanteil der Masse transportierte, konnte somit von den NiCr-Ni-Thermoelementen nicht erfasst werden.

Tab. 3.3.5: Detektionszeitpunkte der Thermoelemente im Oxidkanal in [s] (Nullpunkt ist der Zeitpunkt des Oxidfensteröffnens).

Länge (m) Höhe (mm)	0.5	2	3.5	5	6.5	8	9	10	11
35	0.268	0.647				*)			
25	0.251	0.650		1.600	2.175				
15					2.175	**)	**)	*)	*)
5	0.185	0.670	1.056	1.586	2.266	3.000	**)	*)	*)

*) kein Kontakt mit Schmelze **) Thermoelement defekt

Es gibt nur sehr geringe zeitliche Unterschiede zwischen den Thermoelementen auf unterschiedlichen Höhenpositionen. Zum Teil haben die höheren Positionen, die ja auch seitlich versetzt sitzen, zuerst angesprochen. Die erste Schmelzenfront muß sich demnach bis mindestens 2 m mit einer Höhe von mindestens 35 mm ausgebreitet haben und bis min. 6,5 m mit einer Höhe von min. 25 mm.

Zur Darstellung der Ausbreitung in einem Weg-Zeit-Diagramm werden im weiteren Verlauf die Detektionszeitpunkte der Thermoelemente auf 5 mm Position herangezogen.

Oxidschmelzenausbreitung aus Videoaufnahme

Die Videoaufzeichnung wird über Blitze synchronisiert, die zeitgleich mit dem Öffnen der Fenster gezündet werden.

Tab. 3.3.6: Ausbreitung der ersten Oxid-Schmelzefront

Zeit (s)	Weg (m)	Zeit (s)	Weg (m)	Zeit (s)	Weg (m)
0.3	1	1.2	4	2.32	7
0.44	1.5	1.36	4.5	2.62	7.5
0.58	2	1.52	5	2.94	8
0.74	2.5	1.7	5.5	3.26	8.5
0.9	3	1.88	6	3.66	9
1.04	3.5	2.08	6.5	5.84	9.5

Tab. 3.3.7: Ausbreitung der zweiten Oxid-Schmelzefront

Zeit (s)	Weg (m)
7.4	6
8.5	6.25
9.76	6.5
11.44	6.75
14	6.9

Temperaturmessung im Oxidkanal

In Tabelle 3.3.8 und in der Abbildung 3.3.5 sind die Temperaturmessungen im Oxidkanal aufgeführt.

Tab. 3.3.8: Temperaturmessungen im Oxidkanal

	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bez. auf Fensteröffnen)
O.W.05.05	2065°C	2,4 s
O.W.35.05	1980°C	3,9 s
O.W.65.05	1555°C	14,5 s
O.W.90.05	1620°C	19,1 s

Als Anfangstemperatur für die Nachrechnung der Oxid Ausbreitung wurden 2065 °C gemessen.

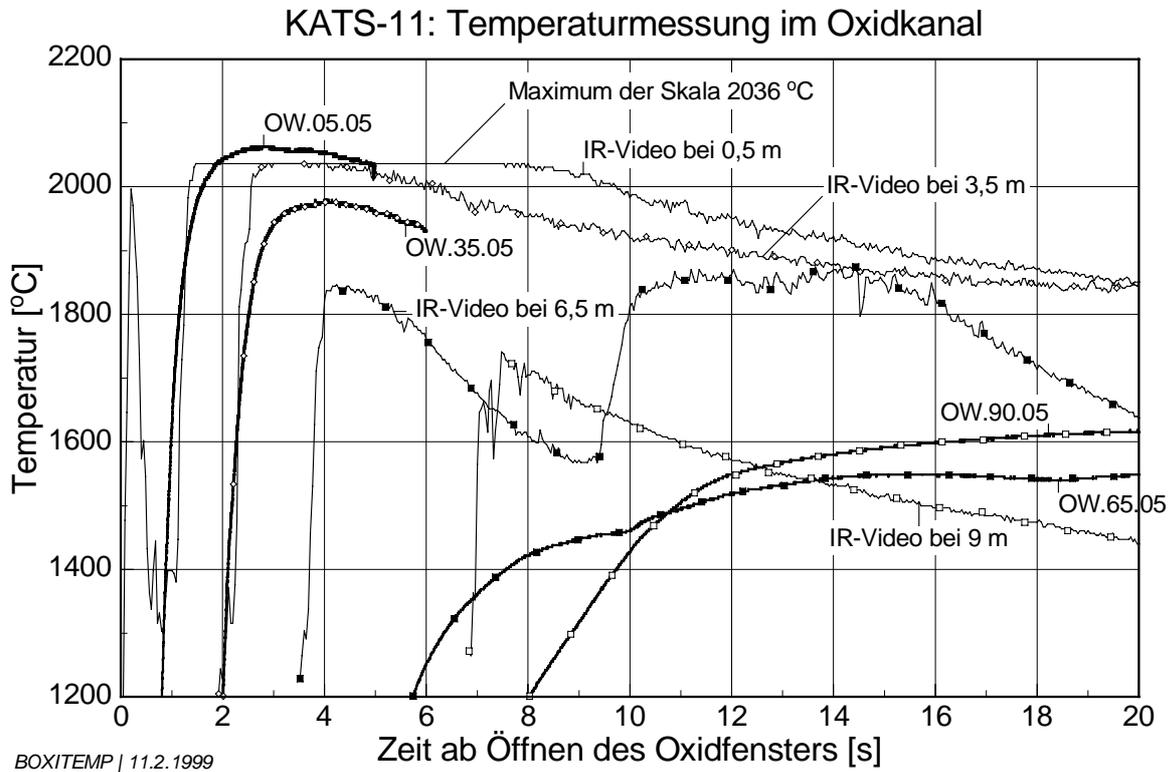


Abb. 3.3.5: Temperaturmessung im Oxidkanal

Temperaturmessung mit Infrarot-Videokamera

Das Maximum der Skala lag bei 2036 °C und wurde im Bereich des Schmelzeinlaufs am Fenster über eine große Fläche erreicht.

Die Abbildung 3.3.5 stellt die Temperaturkurven der W/Re-Thermoelemente den entsprechenden Temperaturverläufen aus der Infrarot-Videoaufnahme gegenüber.

Gesamtdarstellung der Oxid Ausbreitung

In der Abbildung 3.3.6 ist der Weg-Zeit-Verlauf der Oxid Ausbreitung anhand der Videoauswertung und der Thermoelemente dargestellt. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben, jedoch ohne Bezug zur y-Achse des Diagramms. Es soll nur ein Eindruck von der zeitlichen Reaktion dieser Meßinstrumente auf den Schmelzenkontakt vermittelt werden.

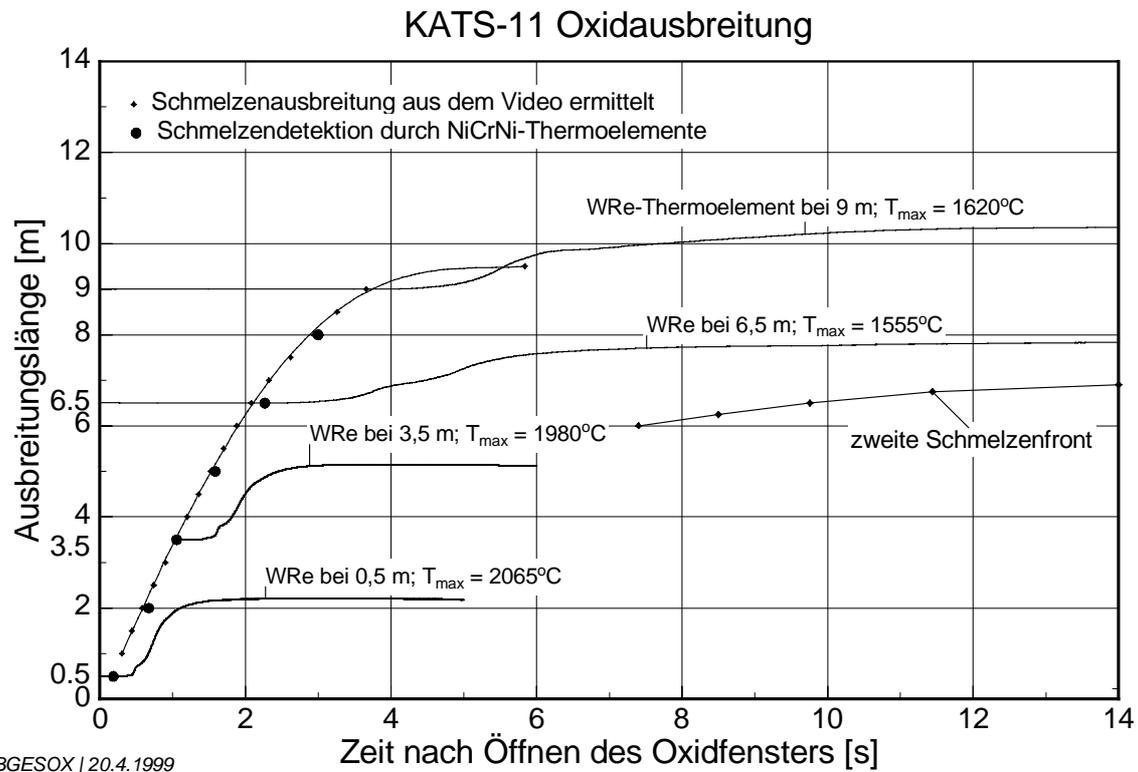


Abb. 3.3.6: Weg-Zeit-Verlauf der Oxid Ausbreitung

Schmelzeverteilung im Oxidkanal

Nach dem Versuch wurde die Schmelzeverteilung entlang des Oxidkanals ermittelt, Tabelle 3.3.9 und Abbildung 3.3.7. Die Werte sind über die jeweiligen Teilbereiche und die Kanalbreite gemittelt.

Tab. 3.3.9: Verteilung der Oxidschmelze im Kanal

Kanallänge [m]	Höhe der Oxidschicht [mm]	Kanallänge [m]	Höhe der Oxidschicht [mm]
0	60	5.5	50
0.5	60	6	55
1.5	65	6.5	55
2	70	6.7	50
2.5	65	7	8
3	65	8	10
3.5	65	8.5	15
4	60	9	25
4.5	60	9.5	25
5	55	9.7	0

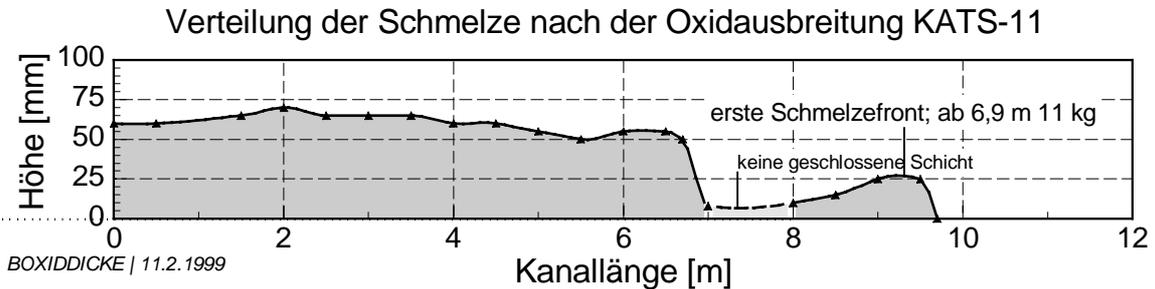


Abb. 3.3.7: Verteilung der Oxidschmelze nach der Ausbreitung

Erosion im Oxidkanal

In Tabelle 3.3.10 ist die Erosion des Substrats im Oxidkanal aufgeführt. Wie in KATS-10 ist auch hier die Betonerosion im vorderen Kanalbereich mit 10-20 mm Höhe beträchtlich.

Tab. 3.3.10: Betonerosion im Oxidkanal

Kanallänge	0 – 1 m	1 m – 3 m	3 m – 7 m	7 m – 9,5 m
Beschreibung der Erosion	Großflächige und tiefe Erosion	Sehr homogene Erosion	Homogen	Praktisch keine Erosion, vereinzelt abgeplatzte Stellen. Bis 9 m Farbe vollständig verbrannt.
Erosionstiefe (mm)	15-25	10-20	5-10	0

Analyse von Proben aus dem Oxidkanal

Die Ergebnisse der in Tabelle 3.3.11 beschriebenen Analysen von Oxidproben sind in Gewichtsprozenten angegeben.

Tab. 3.3.11: Analysen von Oxidproben

Analyse Nr.	342/97	343/97	Mittelwert aus 342/97 und 343/97	344/97	345/97	346/97
Herkunft	Mischbehälter			Oxidkanal		
				1 m	5 m	9 m
Al ₂ O ₃	79,0 %	79,3 %	79,2 %	73,6 %	72,8 %	77,0 %
FeO	6,2 %	6,4 %	6,3 %	7,3 %	7,1 %	7,1 %
SiO ₂	7,0 %	7,0 %	7,0 %	10,0 %	10,5 %	6,6 %
MgO	5,5 %	5,5 %	5,5 %	5,7 %	5,3 %	5,6 %
Sonst.	1,8 %	1,5 %	1,4 %	1,9 %	2,3 %	1,9 %
Summe	99,5 %	99,7 %	99,4 %	98,5 %	98,0 %	98,2 %

Die Proben aus dem Mischbehälter geben am ehesten die ursprüngliche Oxidzusammensetzung vor der Ausbreitung wieder. Die Proben aus dem Kanal an den Stellen 1 m und 5 m sind durch die Betonerosion leicht mit SiO_2 angereichert. Auf die Probe, die bei 9 m genommen wurde, trifft dies nicht zu. Dies ist ein Hinweis darauf, daß die Ausbreitung der ersten schnellen Front ohne wesentliche Wechselwirkung mit dem Beton vonstatten ging.

Eisenausbreitung

Ausgebreitete Eisenmasse

Die ausgebreitete Eisenmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 132 kg. Es kann mit einer Eisendichte von 6300 kg/m^3 gerechnet werden. (Auswertung des Mischvolumens am Schmelzetrennbehälter)

Volumenrate Eisen

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie wird aus dem Schmelzefüllstand ($h=400 \text{ mm}$) und der Fenstergröße rechnerisch ermittelt. (Ausfließen aus einem prismatischen Gefäß, siehe KATS-11 Oxid)

Nach dieser Rechnung ermittelt man eine anfängliche Austrittsgeschwindigkeit des Eisens von $v=2,72 \text{ m/s}$, einen anfänglichen Volumenstrom von $\dot{V}=6,7 \text{ l/s}$ bzw. einen Massenstrom von $\dot{m}=42,2 \text{ kg/s}$. Die Austrittsdauer beträgt $t_e=6,2 \text{ s}$. Während dieser Zeit gehen Geschwindigkeit und Volumenstrom linear auf Null zurück.

Eisenschmelzenausbreitung

Es ist eine sehr schnelle Ausbreitung, Abbildung 3.3.8. Ab 8 m bis etwa 14 m liegt keine geschlossene Eisenschicht mehr vor (Lachenbildung aufgrund der Oberflächenspannung). Zum Kanalende hin ist die Eisenschmelze aufgestaut, da das Kanalende mit einer Wand verschlossen war. Das Kanalende wurde nach nur 6,6 s erreicht.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente im Eisenkanal

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Die folgende Tabelle 3.3.12 gibt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten wieder.

Die mit Grau untergelegten Felder bedeuten, daß an diesen Positionen die Thermoelemente (laut Nachuntersuchung) keinen direkten Kontakt mit dem Eisen hatten und demnach nur auf Strahlung reagiert haben können. Daraus ergibt sich, daß sich die Eisenschmelze bis mindestens 6,5 m aber nicht bis 9 m mit einer Höhe von mindestens 25 mm ausgebreitet hat, ab 9 m blieb die Schmelze unter einer Höhe von 25 mm, spätestens ab 12 m unterhalb von 15 mm.

Zur Darstellung der Ausbreitung in einem Weg-Zeit-Diagramm werden im weiteren Verlauf die Detektionszeitpunkte der Thermoelemente auf 5 mm Position herangezogen.

Tab. 3.3.12: Detektionszeitpunkte der Thermoelemente im Eisenkanal in [s]. (Nullpunkt ist der Zeitpunkt des Eisenfensteröffnens).

Länge (m) \ Höhe (mm)	0.5	2	3.5	5	6.5	8
35	0.372	0.750				2.892
25	0.365	0.800		1.800	2.362	
15					2.244	2.812
5	0.354	0.789	1.191	1.701	2.239	2.743

Länge (m) \ Höhe (mm)	9	10	11	12	13	14
35						
25	3.362		4.386		5.379	6.104
15		3.821		4.820		
5	3.200	3.579	4.118	4.715	5.378	6.059

Eisenschmelzenausbreitung aus Videoaufnahme

Die Videoaufzeichnung wird über Blitze synchronisiert, die zeitgleich mit dem Öffnen der Fenster gezündet werden

Tab. 3.3.13: Ausbreitung der Eisenschmelzefront

Zeit (s)	Wege (m)	Zeit (s)	Weg (m)	Zeit (s)	Weg (m)	Zeit (s)	Weg (m)
-	-	1.32	4	2.8	8	4.7	12
0.26	0.5	1.5	4.5	3.02	8.5	4.96	12.5
0.38	1	1.68	5	3.24	9	5.26	13
0.52	1.5	1.86	5.5	3.46	9.5	5.56	13.5
0.66	2	2.04	6	3.72	10	5.88	14
0.8	2.5	2.2	6.5	3.95	10.5	6.22	14.5
0.98	3	2.38	7	4.2	11	6.58	15
1.16	3.5	2.58	7.5	4.44	11.5		

Temperaturmessung im Eisenkanal

In Tabelle 3.3.14 sind die Temperaturmessungen im Eisenkanal dargestellt.

Tab. 3.3.14: Temperaturmessungen im Eisenkanal

	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums	Bemerkungen
E.W.05.05	----		Maximum nicht erreicht
E.W.35.05	1885°C	~ 4,1 s	
E.W.65.05	----		Maximum nicht erreicht
E.W.100.05	1445°C	~ 6,5 s	

Da die Meßstelle bei 0,5 m ausgefallen ist, kann als Anfangstemperatur nur von den 1885°C ausgegangen werden, die bei 3,5 m gemessen wurden.

Gesamtdarstellung der Eisenausbreitung

In Abbildung 3.3.8 ist der Weg-Zeit-Verlauf der Eisenausbreitung anhand der Videoauswertung und der Thermoelemente dargestellt. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben, jedoch ohne Bezug zur y-Achse des Diagramms. Es soll nur ein Eindruck von der zeitlichen Reaktion dieser Meßinstrumente auf den Schmelzenkontakt vermittelt werden.

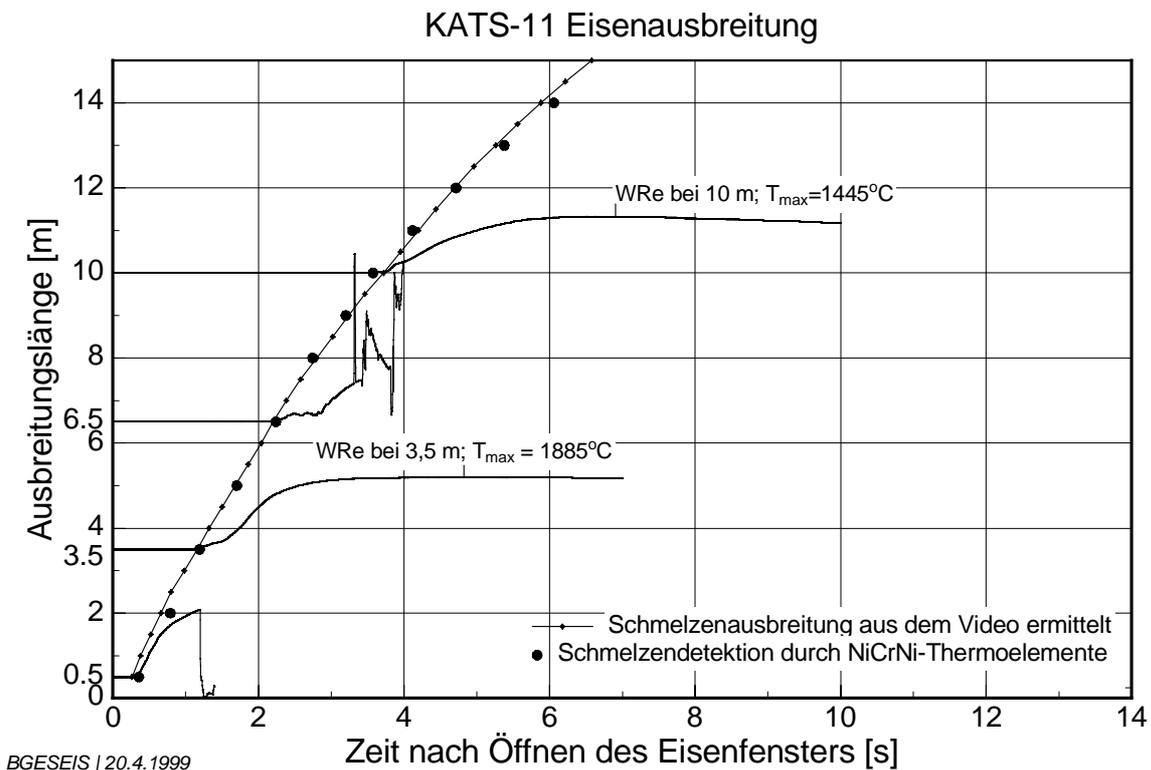


Abb. 3.3.8: Weg-Zeit-Verlauf der Eisenausbreitung

Schmelzeverteilung im Eisenkanal

In Abbildung 3.3.9 und Tabelle 3.3.15 sind die Verteilung der Eisenschmelze nach dem Versuch dargestellt.

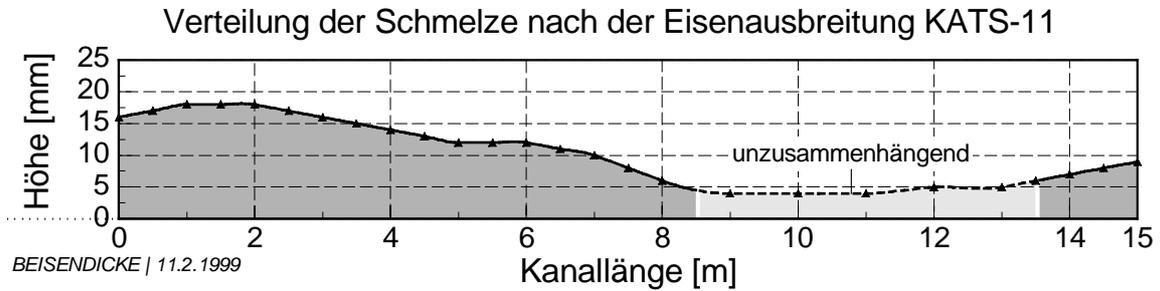


Abb. 3.3.9: Verteilung der Eisenschmelze nach der Ausbreitung

Tab. 3.3.15: Verteilung der Eisenschmelze nach der Ausbreitung

Kanallänge [m]	Höhe der Eisenschicht [mm]	Kanallänge [m]	Höhe der Eisenschicht [mm]
0	16	6.5	11
0.5	17	7	10
1	18	7.5	8
1.5	18	8	6
2	18	9	~ 4 *)
2.5	17	10	~ 4 *)
3	16	11	~ 4 *)
3.5	15	12	~ 5 *)
4	14	13	~ 5 *)
4.5	13	13.5	~ 6 *)
5	12	14	7
5.5	12	14.5	8
6	12	15	9

*) nur vereinzelte Lachenbildung, nicht zusammenhängend

Erosion im Eisenkanal

Es wurden keine Daten über die Erosion im Eisenkanal gesammelt.

Analyse von Proben aus dem Eisenkanal

Es wurden Proben des auf dem Eisen befindlichen Oxides genommen, um dessen Herkunft zu klären.

Tab. 3.3.16: Analysen von Oxidproben aus dem Eisenkanal (Gew%)

Analysen-Nr.	347/97	348/97
Herkunft	Eisenrinne 0,5 m	Eisenrinne 3 m
Al ₂ O ₃	44,9 %	9,0 %
FeO	4,9 %	3,3 %
SiO ₂	37,5 %	69,0 %
MgO	3,3 %	1,1 %
CaO	6,2 %	13,9 %
Sonst.	1,6 %	2,3 %
Summe	98,4 %	98,6 %

Die Oxidproben, die am Anfang des Eisenkanals genommen wurden, enthalten außer erodiertem Beton auch noch Oxid aus der Thermitreaktion (Al₂O₃), das nach Beendigung der Eisenausbreitung durch das Eisenfenster ausgelaufen ist.

3.4 KATS-12 "1-dim Ausbreitung mit hoher Volumenrate (schneller Schmelzenauslaß) auf Cordierit, trocken"

Versuchsdatum: 24.7.97

Versuchsaufbau

Abb. 3.4.1: Reaktionstiegel und Stoffeinsatz

	Thermitmischung: (10 Al SSH)	30 Beutel à 10,4 kg → 312 kg
	Langsam reagierendes Thermit (EF50):	6,24 kg
	Zuschlag: Quarzsand	20 kg

Abb. 3.4.2: Trennbehälter

	Trennbehälter- Oxid (B × T):	367 × 382 mm
	Trennbehälter- Oxid nach Erosion	141350 mm ²
	Oxidfenster (H × B):	50 × 140 mm
	Oxidfüllstand:	470 mm
	Oxidausbreitungsfläche (B × L):	0,25 × 12 m
	Substrat:	Cordierit
	Trennbehälter- Eisen (B × T):	170 × 302 mm
	Trennbehälter- Eisen nach Erosion	53600 mm ²
	Eisenfenster (H × B):	50 × 80 mm
	Eisenfüllstand:	400 mm
	Eisenausbreitungsfläche (B × L):	0,15 × 15 m
	Substrat:	Cordierit

Abb. 3.4.3: Ausflußgeometrie

	Oxid	Eisen
	$a = 110 \text{ mm}$	$a = 100 \text{ mm}$
	$h = 70 \text{ mm}$	$h = 70 \text{ mm}$
	Oxidfenster innen (H × B): $50 \times 140 \text{ mm}$	Eisenfenster innen (H × B): $50 \times 80 \text{ mm}$
	Oxidfenster außen (H × B): $70 \times 160 \text{ mm}$	Eisenfenster außen (H × B): $70 \times 100 \text{ mm}$

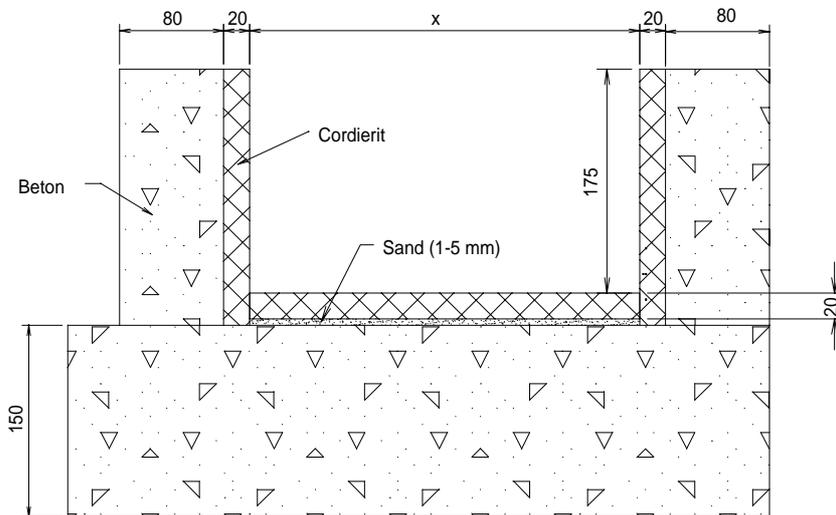


Abb. 3.4.4: Kanalquerschnitt

Instrumentierung

Temperaturmessung mit W-Re-Tauchthermoelementen

Die W-Re-Thermoelemente sind mit einer Schutzkappe aus 1/10 mm Stahl umgeben. Die Messstelle befindet sich 5 mm hinter dieser Kappe. Die Bezeichnung O.W.xx.05 bedeutet, dass der Boden der Schutzkappe 5 mm über der Ausbreitungsfläche lag, d. h. die Messstelle 10 mm darüber.

Tab. 3.4.1: Temperaturmessung der Oxidschmelze

Oxid	Längenposition	Abstand zur Kanalwand	Höhe über Boden
O.W.05.05	0,5 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.10.05	1,0 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.35.05	3,5 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.65.05	6,5 m	~ 30 mm	10 mm / Stahlkappe seitlich entfernt

Tab. 3.4.2: Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisen	Längenposition	Abstand zur Kanalwand	Höhe über Boden
E.W.05.05	0,5 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.10.05	1,0 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.35.05	3,5 m	~ 30 mm	10 mm

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit IR-Video

Wie in KATS-11 wurde auch hier eine thermographische Temperaturmessung der Oxidoberflächen vorgenommen.

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit Pyrometer

Das Zweistrahlpyrometer wurde auf die Längenposition bei 3 m gerichtet.

Schmelzedetektion in den Ausbreitungskanälen mit NiCr-Ni-Thermoelementen

Der Abstand zur Kanalwand beträgt für alle Thermoelemente 70 bis 90 mm. Die Mantelthermoelemente haben \varnothing 1 mm in TI-Ausführung und werden in einem Edelstahlröhrchen \varnothing 4×1 mm geführt. Die Thermoelemente für den Oxidkanal ragen 2-3 mm aus dem Hüllrohr heraus, die für den Eisenkanal schließen bündig ab.

Tab. 3.4.3: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal

Oxid	Länge	Höhe über Boden
O.K.05.05	0,5 m	5 mm
O.K.05.35	0,5 m	35 mm
O.K.05.45	0,5 m	45 mm
O.K.05.55	0,5 m	55 mm
O.K.10.05	1,0 m	5 mm
O.K.10.55	1,0 m	55 mm
O.K.20.05	2,0 m	5 mm
O.K.20.35	2,0 m	35 mm
O.K.20.45	2,0 m	45 mm
O.K.20.55	2,0 m	55 mm
O.K.35.05	3,5 m	5 mm
O.K.35.35	3,5 m	35 mm
O.K.35.55	3,5 m	55 mm
O.K.50.05	5,0 m	5 mm
O.K.50.25	5,0 m	25 mm
O.K.50.45	5,0 m	45 mm
O.K.65.05	6,5 m	5 mm
O.K.65.35	6,5 m	35 mm
O.K.65.45	6,5 m	45 mm
O.K.80.05	8,0 m	5 mm
O.K.80.15	8,0 m	15 mm
O.K.80.35	8,0 m	35 mm
O.K.90.05	9,0 m	5 mm
O.K.90.25	9,0 m	25 mm
O.K.100.05	10,0 m	5 mm
O.K.100.15	10,0 m	15 mm
O.K.110.05	11,0 m	5 mm

Tab. 3.4.4: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Eisenkanal

Eisen	Länge	Höhe über Boden
E.K.05.05	0,5 m	5 mm
E.K.05.35	0,5 m	35 mm
E.K.05.45	0,5 m	45 mm
E.K.10.45	1,0 m	45 mm
E.K.20.05	2,0 m	5 mm
E.K.20.25	2,0 m	25 mm
E.K.20.35	2,0 m	35 mm
E.K.20.45	2,0 m	45 mm
E.K.35.05	3,5 m	5 mm
E.K.35.45	3,5 m	45 mm
E.K.50.05	5,0 m	5 mm
E.K.50.25	5,0 m	25 mm
E.K.65.05	6,5 m	5 mm
E.K.65.15	6,5 m	15 mm
E.K.65.35	6,5 m	35 mm
E.K.80.05	8,0 m	5 mm
E.K.80.15	8,0 m	15 mm
E.K.80.35	8,0 m	35 mm
E.K.100.05	10,0 m	5 mm
E.K.100.15	10,0 m	15 mm
E.K.110.05	11,0 m	5 mm
E.K.110.25	11,0 m	25 mm
E.K.120.05	12,0 m	5 mm
E.K.120.15	12,0 m	15 mm
E.K.130.05	13,0 m	5 mm
E.K.130.25	13,0 m	25 mm
E.K.140.05	14,0 m	5 mm

Schmelzedetektion am Thermittiegel

Im Tiegel ist ein Thermoelement installiert: 200 mm über der Verschlussfolie (TT200).

Unterhalb der Düse befinden sich zwei Thermoelemente zur Detektion des Schmelzeaustritts aus dem Tiegel (TA1 und TA2).

Zeitlicher Ablauf des Experiments

Zündung vom PC

- TA1 und /oder TA2 detektieren ca. 42 s nach Zündung den Schmelzeabstich. Die Schmelze läuft in den Trennbehälter.
- Start einer Zeitverzögerung von 30 s

- Aufzeichnung aller Signale startet (1 kHz; 256 s; 60 s Pretime)
- Aufzeichnung der Infrarotkamera vom Oxidkanal startet
- Oxidfenster öffnet sich
- Blitze am Oxidkanal zünden
- Start einer Zeitverzögerung von 20 s.

- Mischfenster öffnet sich
- Start einer Verzögerung von 6 s
- Eisenfenster öffnet sich
- Blitze am Eisenkanal zünden

Oxidausbreitung

Ausgebreitete Oxidmasse

Die ausgebreitete Oxidmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 186 kg. Die Temperatur der Schmelze im Trennbehälter wurde nicht gemessen. Die früheste Temperaturmessung stammt vom Thermoelement OW.05.05, es hat 2,4 s nach Fensteröffnung eine Temperatur von 2030 °C erreicht. Bei dieser Temperatur hat eine typische KATS-Schmelze eine Dichte von ~2800 kg/m³. (Dies stimmt mit der indirekten Dichtebestimmung über das Mischfenstervolumen recht gut überein.)

Das Oxidvolumen betrug demnach 0.0664 m³. Aus den Nachuntersuchungen des Schmelzetrennbehälters wurde ein Oxidfüllstand von 470 mm festgestellt.

Volumenrate Oxid

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie wird aus dem Schmelzefüllstand und der Fenstergröße rechnerisch ermittelt.

Ausfließen aus einem prismatischen Gefäß [16]:

$$\text{Geschwindigkeit } v = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad ; \quad \text{Volumenrate } \dot{V} = \mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

mit φ =Kontraktionszahl = 0,97 und μ = Ausflußzahl = 0,6.

A_a = Fensterquerschnitt (= 50 × 140 mm²)

h = Füllstand (= 470 mm)

$$\text{Entleerungszeit: } t_e = \frac{2 \cdot A_b \cdot \sqrt{h}}{\mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2g}}$$

mit A_b = Behälterquerschnitt nach Erosion ($\approx 141.350 \text{ mm}^2$).

Nach dieser Rechnung ermittelt man eine anfängliche Austrittsgeschwindigkeit des Oxides von $v=2,95 \text{ m/s}$, einen anfänglichen Volumenstrom von $\dot{V}=12,7 \text{ l/s}$ bzw. einen Massenstrom von $\dot{m}=35,6 \text{ kg/s}$. Die

Austrittsdauer beträgt $t_e=10,4$ s. Während dieser Zeit gehen Geschwindigkeit und Volumenstrom linear auf Null zurück.

Oxidschmelzenausbreitung

Die Oxidschmelze breitet sich gleichmäßig in 18,5 s über knapp 11 m aus, Abbildung 3.4.7. Danach fließt die Schmelze nur noch sehr langsam weiter und kann nicht mehr die ganze Kanalbreite ausfüllen. Die Schmelze kriecht in Form einzelner Finger weiter, die sich z.T. auch wieder vereinigen. Der endgültige Stop ist erst nach 40 s bei ca. 11,7 m erreicht.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Die folgende Tabelle 3.4.5 gibt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten wieder.

Die Thermoelemente auf der „5 mm“-Position zeichnen sich durch einen steilen Spannungsanstieg bis zum Versagen des Thermoelementes aus. Die Thermoelemente auf höheren Meßpositionen zeigen in ihrem Spannungsverlauf oftmals mehrere Stufen, wobei der erste Spannungsanstieg meist zeitgleich mit der Reaktion der „5 mm“ Thermoelemente erfolgt und daher als Effekt der Strahlungswärme zu werten ist. Die folgende Tabelle gibt nur die Zeitpunkte wieder, die als wahrscheinliche Schmelzekontaktzeitpunkte identifiziert wurden.

Tab. 3.4.5: Detektionszeitpunkte der Thermoelemente im Oxidkanal in [s] (Nullpunkt ist der Zeitpunkt des Oxidfensteröffnens).

Länge (m) \ Höhe (mm)	0.5	1	2	3.5	5	6.5	8	9	10	11
55	0.22 5	0.45	*)	4,0						
45	0.22 5		1.7		4.9	6.9				
35	0.22 5		1.6	2.4		6.2	8.6			
25					4.1			10.8		
15							8,2		12.9	
5	0.22 0	0.35	0.94	2.08	3.54	5.39	7.62	9.73	12.4 5	*)

*) keine Schmelzedetektion

Zur Darstellung der Ausbreitung in einem Weg-Zeit-Diagramm werden im weiteren Verlauf die Detektionszeitpunkte der Thermoelemente auf 5 mm Position herangezogen.

Oxidschmelzenausbreitung aus Videoaufnahme

Die Videoaufzeichnung wird über Blitze, die zeitgleich mit dem Öffnen der Fenster gezündet werden, synchronisiert.

Tab. 3.4.6: Ausbreitung der Oxidschmelzefront

Zeit (s)	Wege (m)	Zeit (s)	Weg (m)	Zeit (s)	Weg (m)	Zeit (s)	Weg (m)
0	0	2.4	4	7.58	8	18.5	10.86
0.14	0.5	2.84	4.5	8.72	8.5	Keine geschlossene Front mehr; die Front zerfingert sich.	
0.28	1	3.4	5	9.68	9		
0.44	1.5	4.08	5.5	10.82	9.5		
0.78	2	4.72	6	12.32	10	20.18	10.95
1.1	2.5	5.3	6.5	13.8	10.5	23	11.25
1.54	3	6.14	7	15.04	10.65	30	11.5
1.92	3.5	6.86	7.5	17	10.75	40	11.7

Temperaturmessung im Oxidkanal

In Tabelle 3.4.7 und in den beiden Abbildungen 3.4.5 und 3.4.6 sind die W-Re-Temperaturmessungen im Oxidkanal aufgeführt.

Tab. 3.4.7: W-Re-Thermoelemente im Oxidkanal

Oxid	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bezogen auf Fensteröffnen)	Bemerkungen
O.W.05.05	2030°C	2,4 s	
O.W.10.05	2010°C	2,5 s	
O.W.35.05	1990°C	6 s	
O.W.65.05	--		Ausgefallen

Das Thermoelement bei 0,5 m hat eine Temperatur von 2030 °C gemessen.

Temperaturmessung mit Infrarot-Videokamera

Das Maximum der Skala lag bei 2036 °C, es wurde nur an vereinzelt Punkten erreicht.

Die Abbildungen 3.4.5 und 3.4.6 stellen die Temperaturkurven der W-Re-Thermoelemente den entsprechenden Temperaturverläufen aus der Infrarot-Videoaufnahme gegenüber.

Temperaturmessung mit Pyrometer

Die Temperaturkurve, die vom Pyrometer gemessen wurde, ist ebenfalls in Abbildung 3.4.6 zum Vergleich mit der Infrarotmessung dargestellt.

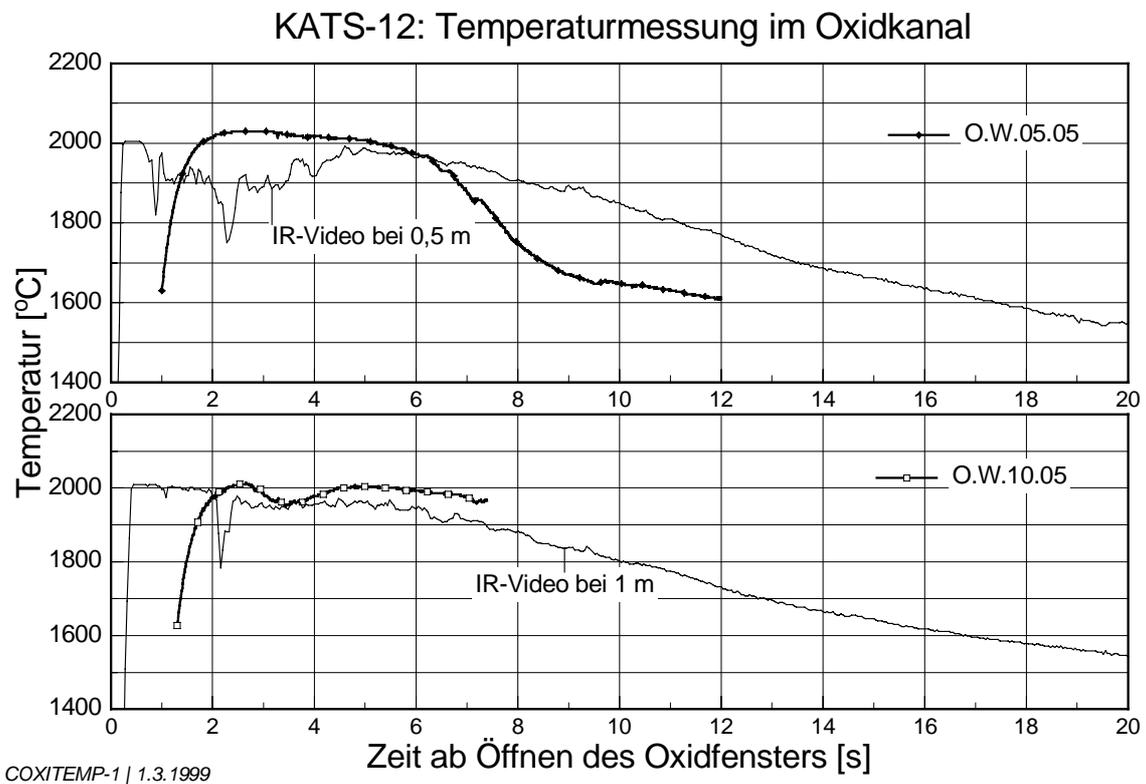


Abb. 3.4.5: Temperaturmessungen im Oxidkanal

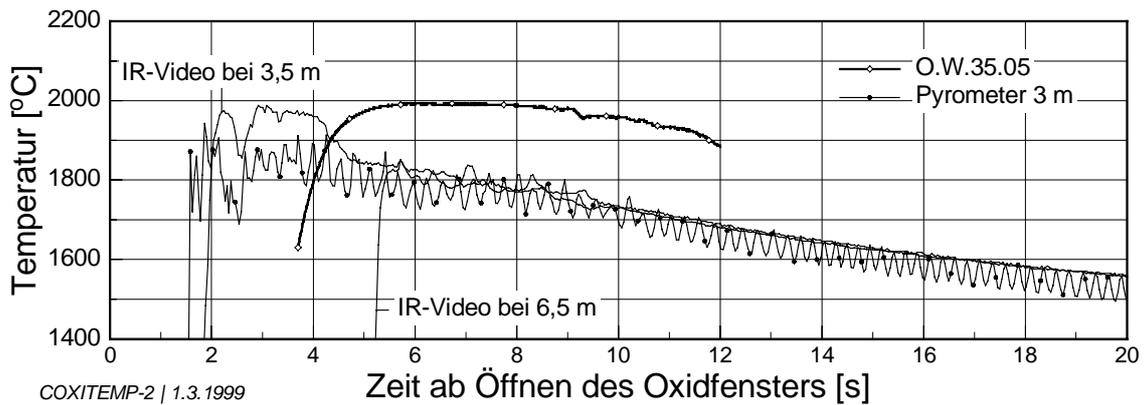


Abb. 3.4.6: Temperaturmessungen im Oxidkanal

Gesamtdarstellung der Oxid Ausbreitung

In Abbildung 3.4.7 ist der Weg-Zeit-Verlauf der Oxid ausbreitung anhand der Videoauswertung und der Thermoelemente dargestellt. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben, jedoch ohne Bezug zur y-Achse des Diagramms. Es soll nur ein Eindruck von der zeitlichen Reaktion dieser Meßinstrumente auf den Schmelzenkontakt vermittelt werden.

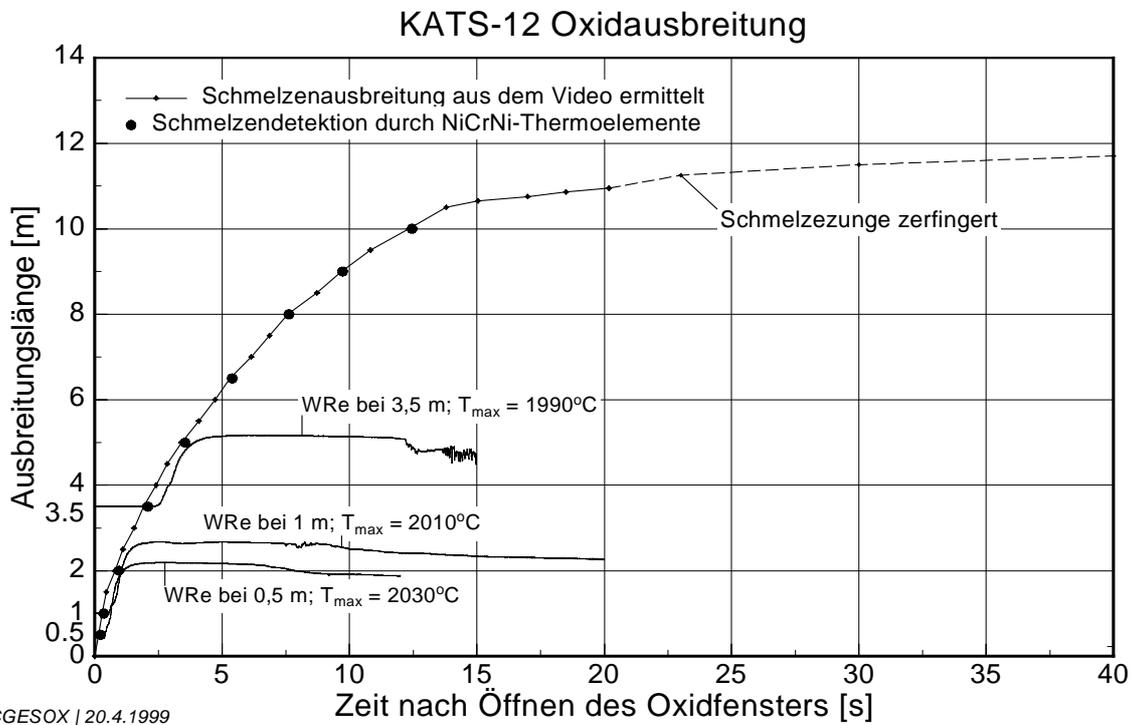


Abb. 3.4.7: Weg-Zeit-Verlauf der Oxid ausbreitung

Schmelzeverteilung im Oxidkanal

Nach dem Versuch wurde folgende Schmelzeverteilung entlang des Oxidkanals ermittelt. Für die Darstellung in Abbildung 3.4.9 wurde die Oxiddicke in der Mitte des Kanals gewählt.

Tab. 3.4.8: Verteilung der Oxidschmelze im Kanal

Länge [m]	Höhe der Oxidschicht [mm]				
	Links außen	50 mm vom linken Rand	Mitte	50 mm vom rechten Rand	Rechts außen
0	17	18	19	17	15
0.5	17	18	19	17	15
1	16	19	20	18	15
1.5	16	19	23	20	15
2	18	23	26	23	19
2.5	25	27	29	26	25
3	28	30	33	30	28
4	31	31	31	32	34
4.5	33	30	30	32	32
5	32	32	33	33	33
5.5	30	30	30	30	30
6	32	32	30	33	33
7	28	28	27	31	31
7.5	29	29	29	29	29
8	30	30	33	32	32
8.5	33	33	33	33	33
9	30	30	32	31	31
9.5	30	30	30	30	30
10	18	18	23	24	24
10.5	30	30	29	30	30
11	Nicht mehr über die ganze Kanalbreite, Dicke 12 mm				
11–11.7	9 – 11 mm				



Abb. 3.4.8: Photographie der Oxidschmelze nach beendeter Ausbreitung

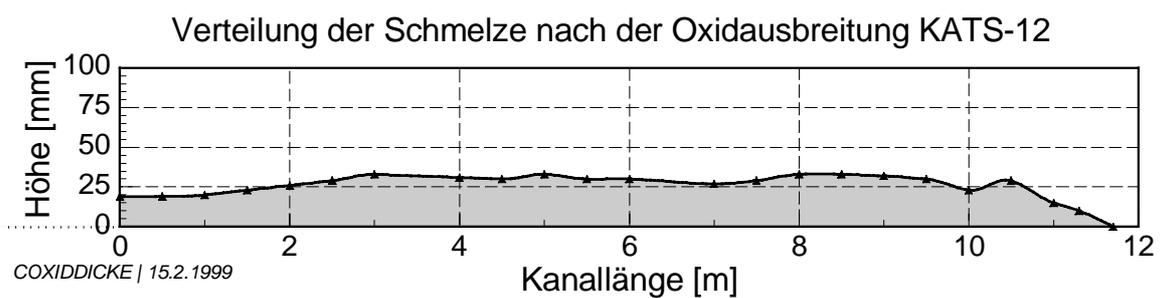
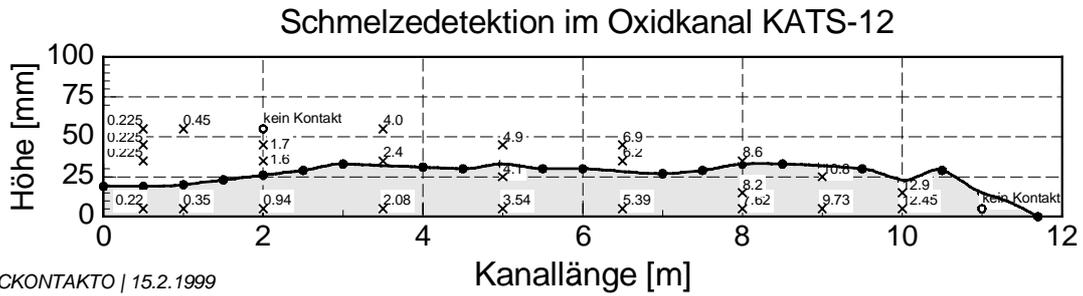


Abb. 3.4.9: Verteilung der Oxidschmelze nach der Ausbreitung

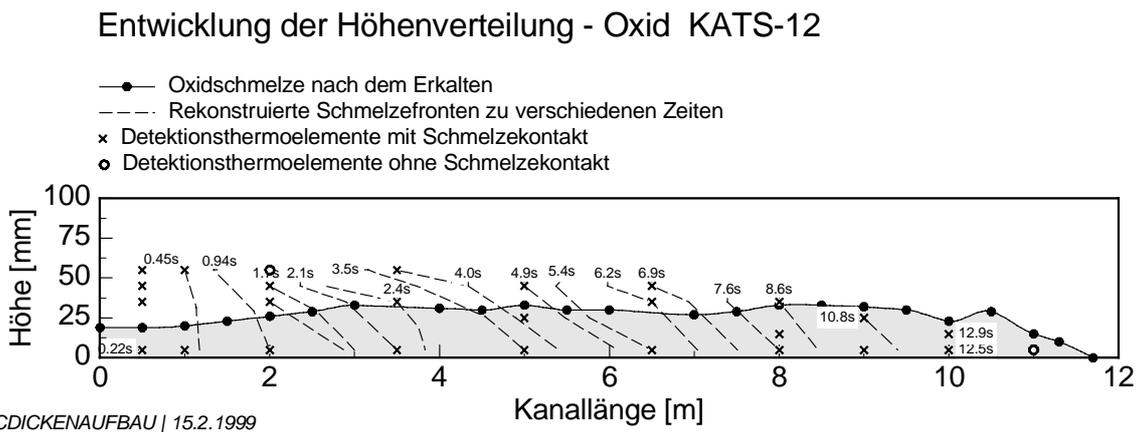
In Abbildung 3.4.10 sind zusätzlich die Detektionszeitpunkte an den mit Kreuzen markierten Stellen verzeichnet.



CKONTAKTO | 15.2.1999

Abb. 3.4.10: Verteilung der Oxidschmelze nach der Ausbreitung

Wenn man zwischen den einzelnen Meßstellen linear interpoliert, lassen sich die möglichen „Schmelzenfronten“ und der Höhenaufbau zu verschiedenen Zeiten rekonstruieren, Abbildung 3.4.11.



CDICKENAUFBAU | 15.2.1999

Abb. 3.4.11: Zeitliche Entwicklung der Höhenverteilung des Oxids

Erosion im Oxidkanal

Das Cordierit ist bis 2,5 m über die ganze Kanalbreite erodiert (1–3 mm), bis 4 m ist die Erosion kaum noch sichtbar und danach hat keine Erosion mehr stattgefunden.

Analyse von Proben aus dem Oxidkanal

Die Zusammensetzung der Oxidschmelze im Mischbehälter ist die der ursprünglichen, in den Kanal einlaufenden Schmelze, am nächsten. Die

Ergebnisse der in der Tabelle 3.4.9 beschriebenen Analyse der Oxidprobe ist in Gewichtsprozenten angegeben. Für die Probe sind Werte in zwei Spalten aufgeführt, wobei die erste Spalte die Ergebnisse der Analysen darstellt; bei der zweiten Spalte wurde der Gesamtanteil auf 100% extrapoliert, indem die unter „Sonstige“ aufgeführten Anteile weggelassen wurden.

Tab. 3.4.9: Analysen von Oxidproben

Analysen-Nr.	404/98	
Herkunft	Mischbehälter	
Al ₂ O ₃	75,4 %	79,0 %
FeO	7,1 %	7,4 %
SiO ₂	8,2 %	8,6 %
MgO	4,8 %	5,0 %
Sonst.	1,7 %	--
Summe	97,2 %	100 %

Mit dem Gemini-Code [17] wurde auf der Basis der Oxidzusammensetzung der rechten Spalte in Tabelle 3.4.9 der temperaturabhängige Feststoffgehalt zwischen Solidus- und Liquidustemperatur berechnet, siehe Tabelle 3.4.10.

Tab. 3.4.10: Ergebnis der GEMINI-Rechnungen

Temp. (°C)	Feststoffanteil in Gew.-%
1600	100
1650	67.8
1700	46
1750	25.6
1800	13.2
1850	0

Die Liquidustemperatur liegt nach dieser Rechnung zwischen 1850 und 1800 °C.

Porosität

Aus der Höhenverteilung der ausgebreiteten Schmelze ermittelt man ein Volumen von 78,7 dm³. Im Kapitel "Ausgebreitete Oxidmasse" wurde ein Schmelzenvolumen zur Ausbreitung von 66,4 dm³ ermittelt bei 2030 °C und 2800 kg/m³. Gemessen an der reinen Feststoffdichte bei Raumtemperatur ohne Poren von etwa 3900 kg/m³ weist die ausgebreitete Schmelze somit eine totale Porosität von 39.5 % auf.

Im Rahmen einer Diplomarbeit [23] wurden Porositätsmessungen mit Hilfe eines Helium-Pyknometers durchgeführt. Zur Bestimmung der offenen und geschlossenen Porositäten wird auch die theoretische Feststoffdichte der vorliegenden Probe benötigt. Sie beträgt bei der Zusammensetzung der Oxidprobe 3900 kg/m³. Mit diesem Wert und den gemessenen Volumina (einmal der Körper inklusive aller offenen und geschlossenen Poren, einmal nur mit den geschlossenen Poren (He-Pyknometer)) errechnet man eine gesamte Porosität von 38.4%, die offene beträgt 32.3% und die geschlossene 6.1%. Der Wert aus der Pyknometermessung stimmt recht gut mit dem obigen global bestimmten überein. Die Probe wurde im Kanal bei 2 m entnommen und ist repräsentativ für einen großen Bereich der ausgebreiteten Schmelze.

Eisenausbreitung

Ausgebreitete Eisenmasse

Die ausgebreitete Eisenmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 135 kg. Es kann mit einer Eisendichte von 6300 kg/m^3 gerechnet werden (Auswertung des Mischvolumens am Schmelzetrennbehälter).

Volumenrate Eisen

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie wird aus dem Schmelzefüllstand ($h=400 \text{ mm}$) und der Fenstergröße rechnerisch ermittelt (Ausfließen aus einem prismatischen Gefäß, [16]).

Nach dieser Rechnung ermittelt man eine anfängliche Austrittsgeschwindigkeit des Eisens von $v=2,72 \text{ m/s}$, einen anfänglichen Volumenstrom von $\dot{V}=6,7 \text{ l/s}$ bzw. einen Massenstrom von $\dot{m}=42,2 \text{ kg/s}$. Die Austrittsdauer beträgt $t_e=6,4 \text{ s}$. Während dieser Zeit gehen Geschwindigkeit und Volumenstrom linear auf Null zurück.

Eisenschmelzenausbreitung

Die Eisenschmelze breitet sich zügig ohne Stops und in einer Front in $27,5 \text{ s}$ auf $11,35 \text{ m}$ aus, Abbildung 3.4.13.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Die folgende Tabelle 3.4.11 gibt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten wieder.

Die Thermoelemente auf der „5 mm“-Position, ausgenommen jenes bei $3,5 \text{ m}$, zeichnen sich durch einen steilen Spannungsanstieg bis zum Versagen des Thermoelementes aus. Die Thermoelemente auf höheren Meßpositionen zeigen in ihrem Spannungsverlauf oftmals mehrere Stufen, wobei der erste Spannungsanstieg meist zeitgleich mit der Reaktion der „5mm“ Thermoelemente erfolgt und daher als Effekt der Strah-

lungswärme zu werten ist. Die folgende Tabelle gibt nur die Zeitpunkte wieder, die als wahrscheinliche Schmelzekontaktzeitpunkte identifiziert wurden.

Tab. 3.4.11: Detektionszeitpunkte der Thermoelemente im Eisenkanal in [s] (Nullpunkt ist der Zeitpunkt des Eisenfensteröffnens).

Länge (m) Höhe (mm)	0.5	1	2	3.5	5	6.5	8	9	10	11
45	2.6	2.0	1.8	1.9						
35	0.9		2.2			8.5	(9.6)			
25			0.8 1.43		4.5					(22.2)
15						6.86	9.75		15.67	
5	0.31		0.93	1.46	3.73	6.38	9.60		15.56	22.20

()= Die geklammerten Werte bedeuten, daß die Thermoelemente (laut Nachuntersuchung) keinen direkten Kontakt mit dem Eisen hatten und demnach nur auf Strahlung reagiert haben können. Daraus ergibt sich, daß sich die Eisenschmelze bis mindestens 6,5 m aber nicht bis 8 m mit einer Höhe von mindestens 35 mm ausgebreitet hat, ab 8 m wurde nur noch eine Höhe von mindestens 15 mm erreicht.

Zur Darstellung der Ausbreitung in einem Weg-Zeit-Diagramm werden im weiteren Verlauf die Detektionszeitpunkte der Thermoelemente auf 5 mm Position herangezogen.

Tab. 3.4.12: Ausbreitung der Eisenschmelzefront

Zeit (s)	Weg (m)						
0	0	1.88	3.5	7.22	7	17.72	10.5
0.2	0.5	2.42	4	8.3	7.5	20	10.9
0.34	1	2.98	4.5	9.42	8	22.5	11.1
0.48	1.5	3.58	5	10.68	8.5	25	11.3
0.72	2	4.34	5.5	12.06	9	27.5	11.35
1.12	2.5	5.34	6	13.52	9.5		
1.48	3	6.24	6.5	15.48	10		

Temperaturmessung im Eisenkanal

Tab. 3.4.13: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Eisen	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums	Bemerkungen
E.W.05.05	----		Nicht verwertbar
E.W.10.05	1870°C	~ 2.8 s	
E.W.35.05	1900°C	~ 4.3 s	

Es kann mit einer Anfangstemperatur von 1900 °C gerechnet werden.

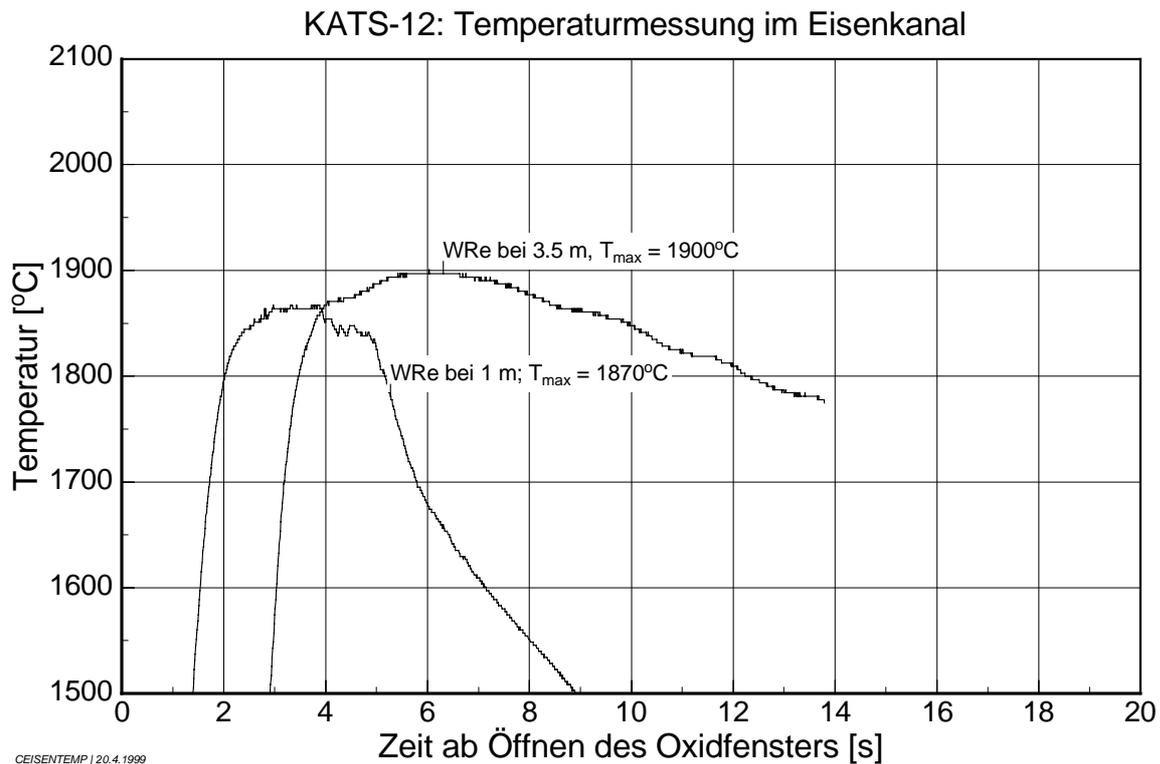


Abb. 3.4.12: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Gesamtdarstellung der Eisenausbreitung

In Abbildung 3.4.13, ist der Weg-Zeit-Verlauf der Eisenausbreitung anhand der Videoauswertung und der Thermoelemente dargestellt. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben, jedoch ohne Bezug zur y-Achse des Diagramms. Es soll nur ein Eindruck von der zeitlichen Reaktion dieser Meßinstrumente auf den Schmelzenkontakt vermittelt werden.

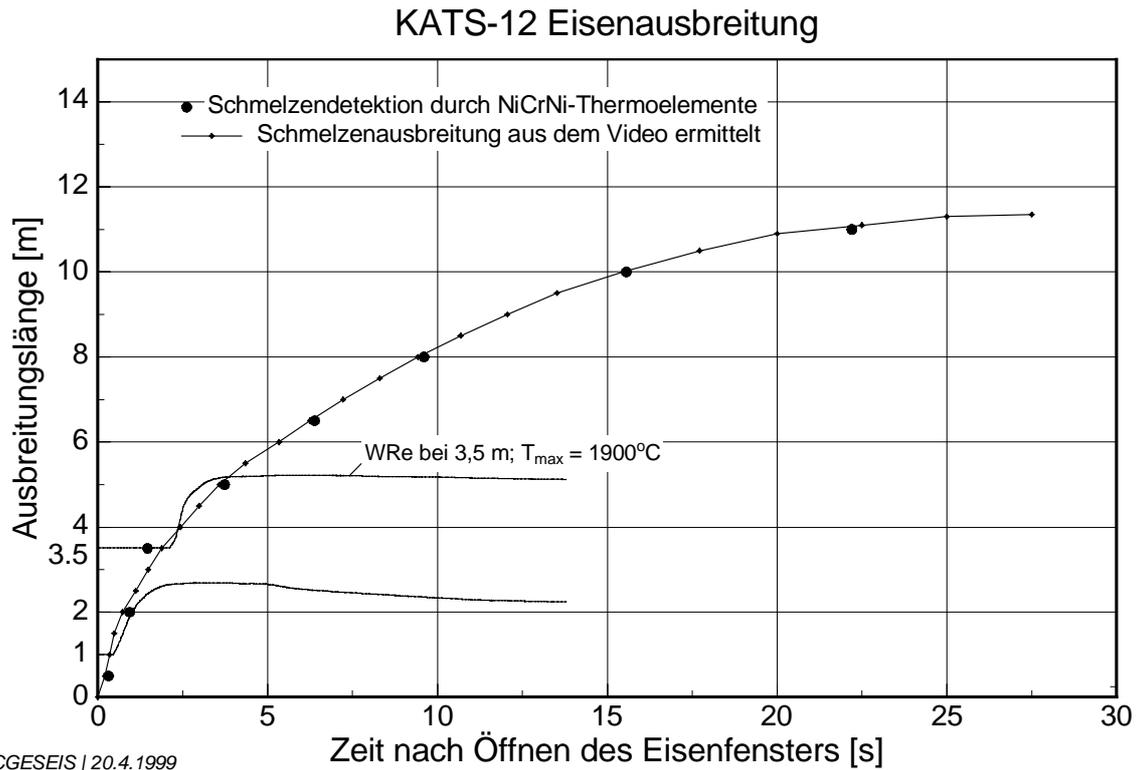


Abb. 3.4.13: Weg-Zeit-Verlauf der Eisenausbreitung

Schmelzeverteilung im Eisenkanal

Der gesamte Eisenregulus wurde meterweise zerschnitten und gewogen. Das erste Stück ist um den Einlaufbereich mit der Schräge, auf der kein Eisen verblieb, verkürzt. Das letzte Stück reicht von der „10 m“-Marke bis zum Ende der Ausbreitung. Die Schmelze hat sich auf den letzten 40 cm nicht mehr über die ganze Kanalbreite ausgebreitet. Die bedeckte Fläche wurde graphisch ermittelt. Aus Masse und Dichte kann das Volumen berechnet werden, das, dividiert durch die Fläche, die durchschnittliche Höhe des Eisenstückes ergibt.

Die in der Tabelle 3.4.14 angeführte Dichte 1 von 6,3 kg/l bezieht sich auf die Eisendichte, die man bei der Nachuntersuchung des Schmelztrennbehälters und vor allem der Mischzone im Behälter ermittelt. Diese Dichte ist aber für die Schmelze während der Ausbreitung sicher zu gering. Deshalb ist die Rechnung mit einer zweiten Dichte von 6,7 kg/l wiederholt. Diese entspricht der Dichte von flüssigem Eisen bei 1900

°C. Diese Temperatur wurde vom W-Re-Thermoelement bei 3,5 m Kanallänge gemessen.

Die Eisenzunge breitete sich der Videoaufnahme zufolge bis 11,35 m aus. In der Tabelle 3.4.14 jedoch, die die Ergebnisse der Nachuntersuchung wiedergibt, ist das Ende der Eisenausbreitung mit 11,12 m angegeben. Dieser Unterschied entsteht durch das Schrumpfen des Eisenregulus beim Abkühlen.

Tab. 3.4.14: Verteilung der Eisenschmelze nach der Ausbreitung

Abschnitt [m]	Fläche [m ²]	Masse [kg]	Dichte 1 [kg/dm ³]	Ber. Höhe1 [mm]	Dichte 2 [kg/l]	Ber. Höhe2 [mm]
0.12 bis 1	0.132	16.1	6.3	19.4	6.7	18.2
1 bis 2	0.15	17.4	6.3	18.4	6.7	17.3
2 bis 3	0.15	13.4	6.3	14.2	6.7	13.3
3 bis 4	0.15	11.8	6.3	12.5	6.7	11.7
4 bis 5	0.15	13.9	6.3	14.7	6.7	13.8
5 bis 6	0.15	12	6.3	12.7	6.7	11.9
6 bis 7	0.15	10.2	6.3	10.8	6.7	10.1
7 bis 8	0.15	8.3	6.3	8.8	6.7	8.3
8 bis 9	0.15	9.9	6.3	10.5	6.7	9.9
9 bis 10	0.15	11.4	6.3	12.1	6.7	11.3
10 bis 11.12	0.142	10.5	6.3	11.7	6.7	11

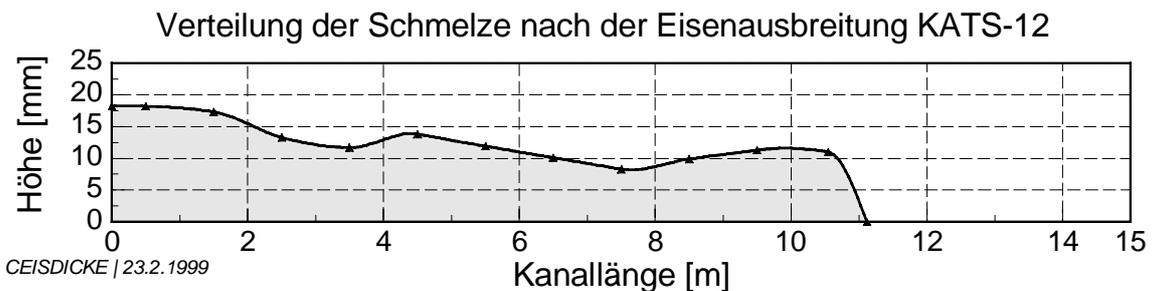


Abb. 3.4.14: Verteilung der Eisenschmelze

Ursprüngliche max. Ausbreitung

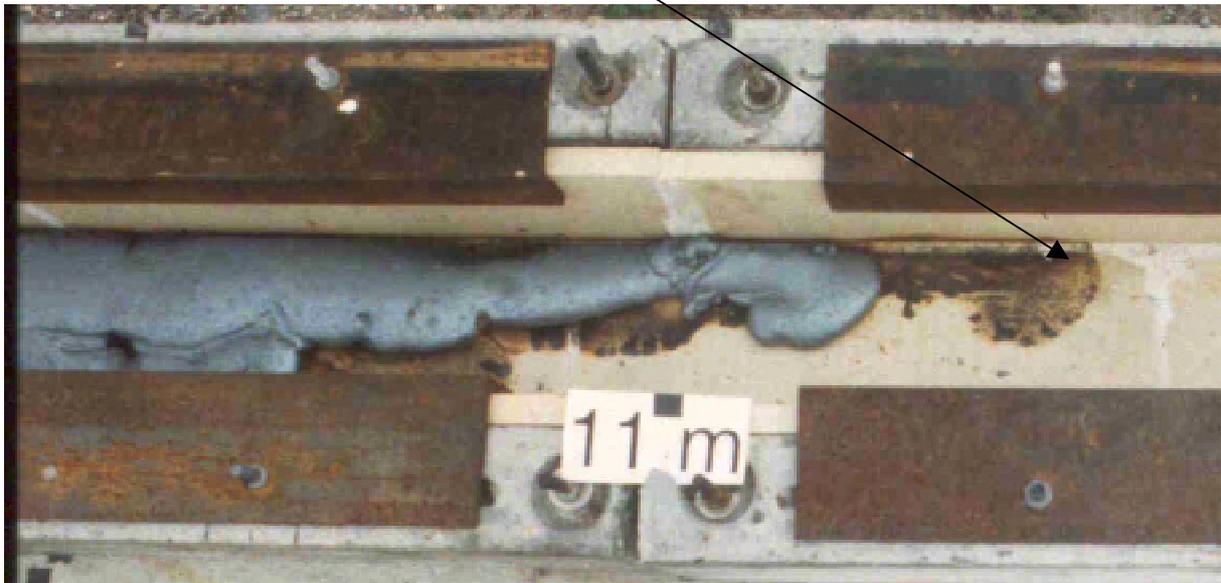


Abb. 3.4.15: Photographie des Endstücks der Eisenzunge

An der Verfärbung der Cordieritplatten ist die Position der Eisenzunge kurz nach der Ausbreitung noch zu erkennen.

Erosion im Eisenkanal

Es wurden keine Daten über die Erosion im Eisenkanal gesammelt.

Analyse von Proben aus dem Eisenkanal

Es wurden keine Proben genommen.

3.5 KATS-13 “1-dim Ausbreitung mit hoher Volumenrate (schneller Schmelzenauslaß) auf trockenem ungestrichenem Beton“

Versuchsdatum: 23.10.97

Versuchsaufbau

Abb. 3.5.1: Reaktionstiegel und Stoffeinsatz		
	Thermitmischung: (10 Al SSH)	30 Beutel a 10,4 kg → 312 kg
	Langsam reagierendes Thermit (EF50):	6,18 kg
	Zuschlag: Quarzsand	20 kg

Abb. 3.5.2: Trennbehälter

	Trennbehälter- Oxid (B × T):	367 × 382 mm
	Trennbehälter- Oxid nach Erosion	141600 mm ²
	Oxidfenster (H × B):	50 × 140 mm
	Oxidfüllstand:	466 mm
	Oxidausbreitungsfläche (B × L):	0,25 × 12 m
	Substrat:	Beton
	Trennbehälter- Eisen (B × T):	170 × 302 mm
	Trennbehälter- Eisen nach Erosion	53000 mm ²
	Eisenfenster (H × B):	50 × 80 mm
	Eisenfüllstand:	400 mm
	Eisenausbreitungsfläche (B × L):	0,15 × 15 m
	Substrat:	Beton

Abb. 3.5.3: Ausflußgeometrie

	Oxid	Eisen
	$A = 110 \text{ mm}$	$a = 100 \text{ mm}$
	$h = 90 \text{ mm}$	$h = 90 \text{ mm}$
	Oxidfenster innen (H × B): $50 \times 140 \text{ mm}$	Eisenfenster innen (H × B): $50 \times 80 \text{ mm}$
	Oxidfenster außen (H × B): $70 \times 160 \text{ mm}$	Eisenfenster außen (H × B): $70 \times 100 \text{ mm}$

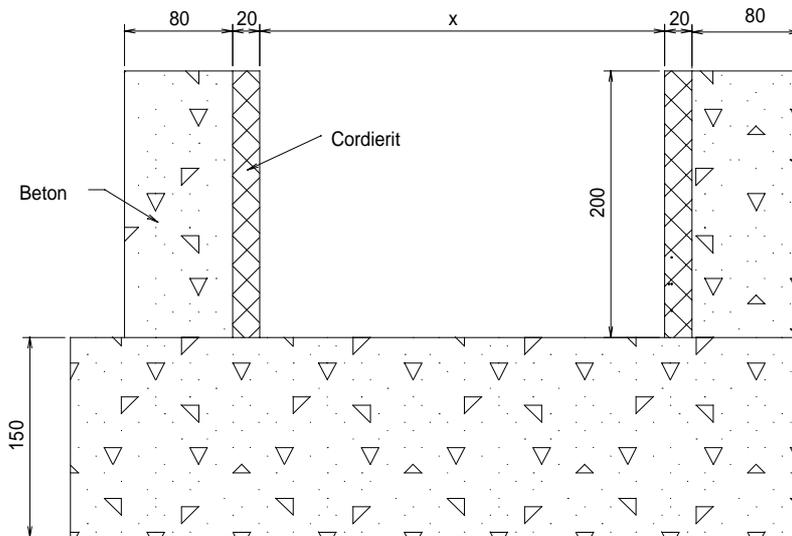


Abb. 3.5.4: Kanalquerschnitt

Instrumentierung

Temperaturmessung mit W-Re-Tauchthermoelementen

Die W-Re-Thermoelemente sind mit einer Schutzkappe aus 1/10 mm Stahl umgeben. Die Messstelle befindet sich 5 mm hinter dieser Kappe. Die Bezeichnung O.W.xx.05 bedeutet, dass der Boden der Schutzkappe 5 mm über der Ausbreitungsfläche lag, d. h. die Messstelle 10 mm darüber.

Tab. 3.5.1: Temperaturmessung der Oxidschmelze

Oxid	Längenposition	Abstand zur Kanalwand	Höhe über Boden
O.W.05.05	0,5 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.10.05	1,0 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.35.05	3,5 m	~ 30 mm	10 mm
O.W.65.05	6,5 m	~ 30 mm	10 mm / Stahlkappe seitlich entfernt

Tab. 3.5.2: Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisen	Längenposition	Abstand zur Kanalwand	Höhe über Boden
E.W.05.05	0,5 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.10.05	1,0 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.35.05	3,5 m	~ 30 mm	10 mm

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit IR-Video

Die Oberflächentemperatur der Oxidschmelze wurde mit einer IR-Kamera thermographisch bestimmt.

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit Pyrometer

Das Zweistrahlpyrometer wurde auf die Längenposition bei 3.5 m gerichtet, kurz vor dem W/Re-Thermoelement O.W.35.05.

Schmelzedetektion in den Ausbreitungskanälen mit NiCr-Ni-Thermoelementen

Der Abstand zur Kanalwand beträgt für alle Thermoelemente 70 bis 90 mm. Die Mantelthermoelemente haben \varnothing 1 mm in TI-Ausführung und werden in einem Edelstahlröhrchen \varnothing 4×1 mm geführt. Die Thermoelemente für den Oxidkanal ragen 2-3 mm aus dem Hüllrohr heraus, die für den Eisenkanal schließen bündig ab.

Tab. 3.5.3: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal

Oxid	Länge	Höhe über Boden
O.K.05.05	0,5 m	5 mm
O.K.10.05	1,0 m	5 mm
O.K.10.45	1,0 m	45 mm
O.K.10.55	1,0 m	55 mm
O.K.20.05	2,0 m	5 mm
O.K.20.35	2,0 m	35 mm
O.K.20.55	2,0 m	55 mm
O.K.20.65	2,0 m	65 mm
O.K.35.05	3,5 m	5 mm
O.K.35.35	3,5 m	35 mm
O.K.35.55	3,5 m	55 mm
O.K.50.05	5,0 m	5 mm
O.K.50.25	5,0 m	25 mm
O.K.50.45	5,0 m	45 mm
O.K.65.05	6,5 m	5 mm
O.K.65.35	6,5 m	35 mm
O.K.65.55	6,5 m	55 mm
O.K.80.05	8,0 m	5 mm
O.K.80.15	8,0 m	15 mm
O.K.80.35	8,0 m	35 mm
O.K.90.05	9,0 m	5 mm
O.K.90.25	9,0 m	25 mm
O.K.100.05	10,0 m	5 mm
O.K.100.15	10,0 m	15 mm
O.K.110.05	11,0 m	5 mm

Tab. 3.5.4: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Eisenkanal

Eisen	Länge	Höhe über Boden
E.K.05.05	0,5 m	5 mm
E.K.05.35	0,5 m	35 mm
E.K.05.45	0,5 m	45 mm
E.K.10.45	1,0 m	45 mm
E.K.20.05	2,0 m	5 mm
E.K.20.25	2,0 m	25 mm
E.K.20.35	2,0 m	35 mm
E.K.20.45	2,0 m	45 mm
E.K.35.05	3,5 m	5 mm
E.K.35.45	3,5 m	45 mm
E.K.50.05	5,0 m	5 mm
E.K.50.25	5,0 m	25 mm
E.K.65.05	6,5 m	5 mm
E.K.65.15	6,5 m	15 mm
E.K.65.35	6,5 m	35 mm
E.K.80.05	8,0 m	5 mm
E.K.80.15	8,0 m	15 mm
E.K.80.35	8,0 m	35 mm
E.K.100.05	10,0 m	5 mm
E.K.100.15	10,0 m	15 mm
E.K.110.05	11,0 m	5 mm
E.K.110.25	11,0 m	25 mm
E.K.120.05	12,0 m	5 mm
E.K.120.15	12,0 m	15 mm
E.K.130.05	13,0 m	5 mm
E.K.130.25	13,0 m	25 mm
E.K.140.05	14,0 m	5 mm

Schmelzedetektion am Thermittiegel

Im Tiegel ist ein Thermoelement installiert: 200 mm über der Verschlussfolie (TT200). Unterhalb der Düse befinden sich zwei Thermoelemente zur Detektion des Schmelzeaustritts aus dem Tiegel (TA1 und TA2).

Zeitlicher Ablauf des Experiments

Zündung vom PC

- TA1 und/oder TA2 detektieren ca. 40 s nach Zündung den Schmelzeabstich. Die Schmelze läuft in den Trennbehälter.
- Start einer Zeitverzögerung von 30 s

- Aufzeichnung der Signale für Oxidkanal, TT200, TA1 und TA2 startet (1 kHz; 256 s; 80 s Pretime)
- Oxidfenster öffnet sich
- Blitze am Oxidkanal zünden
- Start einer Zeitverzögerung von 20 s.

- Mischfenster öffnet sich
- Start einer Verzögerung von 6 s

- Aufzeichnung der Signale für Eisenkanal startet (1 kHz; 256 s; 0 s Pretime)
- Eisenfenster öffnet sich
- Blitze am Eisenkanal zünden

Oxidausbreitung

Ausgebreitete Masse

Die ausgebreitete Oxidmasse wurde nach dem Experiment nicht gewogen. Der Schmelzestand im oberen Teil des Trennbehälters wurde bei der Nachuntersuchung mit etwa 466 mm festgestellt. Das Oxidvolumen betrug unter Berücksichtigung von Abschmelzungen an den Wänden 66 dm³.

Die Temperatur der Schmelze im Trennbehälter wurde nicht gemessen. Die früheste W-Re-Temperaturmessung stammt vom Thermoelement O.W.05.05, Abbildung 3.5.5 a, es hat 2,6 s nach Fensteröffnung eine Temperatur von 2055 °C erreicht. Bei dieser Temperatur hat eine typische KATS-Schmelze eine Dichte von ~2800 kg/m³. Dies stimmt mit der indirekten Dichtebestimmung über das Mischfenstervolumen recht gut überein. Somit ergibt sich eine Masse von 185 kg für die Oxidausbreitung.

Volumenrate

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie wird aus dem Schmelzefüllstand und der Fenstergröße rechnerisch ermittelt.

Ausfließen aus einem prismatischen Gefäß [16]:

$$\text{Geschwindigkeit } v = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad ; \quad \text{Volumenrate } \dot{V} = \mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

mit φ =Kontraktionszahl = 0,97 und μ = Ausflußzahl = 0,6.

A_a = Fensterquerschnitt (= 50 × 140 mm²)

h = Füllstand (= 466 mm)

$$\text{Entleerungszeit: } t_e = \frac{2 \cdot A_b \cdot \sqrt{h}}{\mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2g}}$$

mit A_b = Behälterquerschnitt nach Erosion (\approx 141.600 mm²).

Nach dieser Rechnung ermittelt man eine anfängliche Austrittsgeschwindigkeit des Oxides von $v=2,93$ m/s, einen anfänglichen Volumenstrom von $\dot{V}=12,7$ l/s bzw. einen Massenstrom von $\dot{m}=35,6$ kg/s. Die Austrittsdauer beträgt $t_e=10,4$ s. Während dieser Zeit gehen Geschwindigkeit und Volumenstrom linear auf Null zurück.

Oxidschmelzenausbreitung

Die Oxidschmelze breitet sich mit nur einer geschlossenen Front sehr schnell in nur 2 s auf über 4 m aus. Danach fließt die Schmelze viel langsamer und in leichten Schüben und erreicht nach gut 14 s die Endlänge von 7,5 m. Die Schmelzenzunge zerfingert sich nicht wie dies bei KATS-12 zu beobachten war, sondern der Schmelzekörper endet relativ abrupt und baut von einer Dicke > 40 mm innerhalb 20 cm auf null ab.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Die folgende Tabelle 3.5.5 gibt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten wieder.

Die Thermoelemente auf der „5 mm“-Position, ausgenommen jenes bei 2 m, zeichnen sich durch einen steilen Spannungsanstieg bis zum Versagen des Thermoelementes aus. Die Thermoelemente auf höheren Meßpositionen zeigen in ihrem Spannungsverlauf oftmals mehrere Stufen, wobei der erste Spannungsanstieg meist zeitgleich mit der Reaktion der „5mm“ Thermoelemente erfolgt und daher als Effekt der Strahlungswärme zu werten ist. Die folgende Tabelle gibt nur die Zeitpunkte wieder, die als wahrscheinliche Schmelzekontaktzeitpunkte identifiziert wurden.

Tab. 3.5.5: Detektionszeitpunkte der Thermoelemente im Oxidkanal in [s] (Nullpunkt ist der Zeitpunkt des Oxidfensteröffnens).

Länge (m) Höhe (mm)	0.5	1	2	3.5	5	6.5	8	9	10	11
5			1.4							
55		0.46 8	1.38	2.38		8.39				
45		0.47 8			4.69					
35			1.32	2.24		7.66	()			
25					4.18			()		
15							()		()	
5	0.30	0.47	0.62 (0.92)	1.44	3.95	6.8	()	()	()	()

()= Die geklammerten Werte bedeuten, daß die Thermoelemente (laut Nachuntersuchung) keinen direkten Kontakt mit dem Eisen hatten und demnach nur auf Strahlung reagiert haben können.

Zur Darstellung der Ausbreitung in einem Weg-Zeit-Diagramm werden im weiteren Verlauf die Detektionszeitpunkte der Thermoelemente auf 5 mm Position herangezogen.

Oxidschmelzenausbreitung aus Infrarot-Videoaufnahme

Die Videoaufzeichnung der Infrarotkamera startet gleichzeitig mit dem Befehl zum Öffnen des Oxidfensters und somit auch gleichzeitig mit der Aufzeichnung der Thermoelementensignale aus dem Oxidkanal, siehe Tabelle 3.5.6.

Tab. 3.5.6: Ausbreitung der Oxidschmelzefront nach Videoaufzeichnung

Zeit (s)	Weg (m)						
0	0	1	2.9	4.8	5.6	8.8	6.92
0.12	0.34	1.2	3.2	5.2	5.8	10.4	7.07
0.24	0.67	1.6	3.65	5.6	6	10.8	7.12
0.36	1	2	4.2	6	6.2	11.2	7.17
0.4	1.2	2.4	4.4	6.4	6.36	11.6	7.22
0.52	1.6	2.8	4.5	6.8	6.55	12	7.27
0.64	1.9	3.2	4.65	7.2	6.67	12.4	7.35
0.76	2.24	3.6	4.8	7.6	6.7	12.8	7.45
0.8	2.3	4	5.1	8	6.76	13.2	7.48
0.88	2.5	4.4	5.4	8.4	6.84	14.4	7.54

Temperaturmessung im Oxidkanal

In Tabelle 3.5.7 und in den Abbildungen 3.5.5 a und 3.5.5 b sind die Temperaturmessungen im Oxidkanal aufgeführt.

Tab. 3.5.7: Temperaturmessungen im Oxidkanal

Oxid	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bezogen auf Fensteröffnen)	Bemerkungen
O.W.05.05	2055°C	2,6 s	
O.W.10.05	2040°C	?	TE kurzzeitig ausgefallen
O.W.35.05	1960°C	5 s	
O.W.65.05	1810°C	20 s	

Anfangstemperatur der Oxidschmelze: 2055 °C

Temperaturmessung mit Infrarot-Videokamera

Das Maximum der Skala lag bei 2128 °C, es wurde nur an vereinzelt Punkten erreicht. Das folgende Diagramm stellt die Temperaturkurven der W-Re-Thermoelemente den entsprechenden Temperaturverläufen aus der Infrarot-Videoaufnahme gegenüber.

Temperaturmessung mit Pyrometer

Die Temperaturkurve, die vom Pyrometer gemessen wurde, ist ebenfalls im folgenden Diagramm zum Vergleich mit der Infrarotmessung dargestellt.

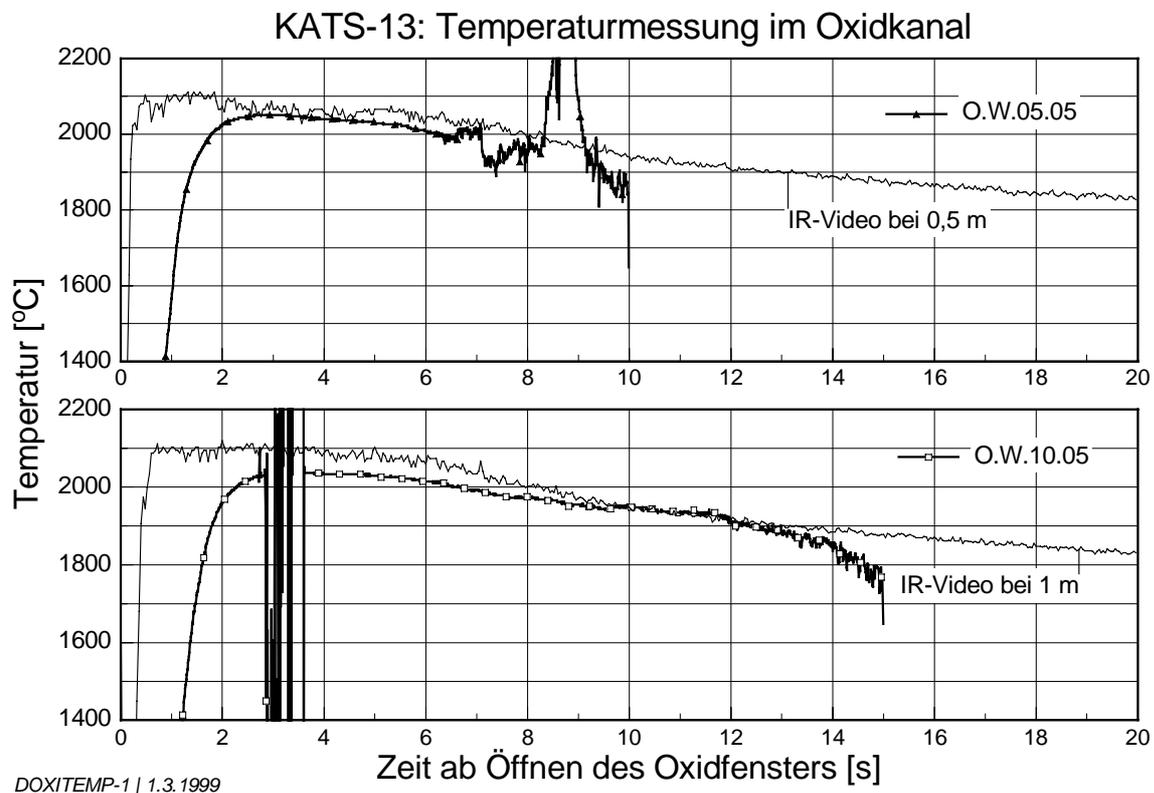
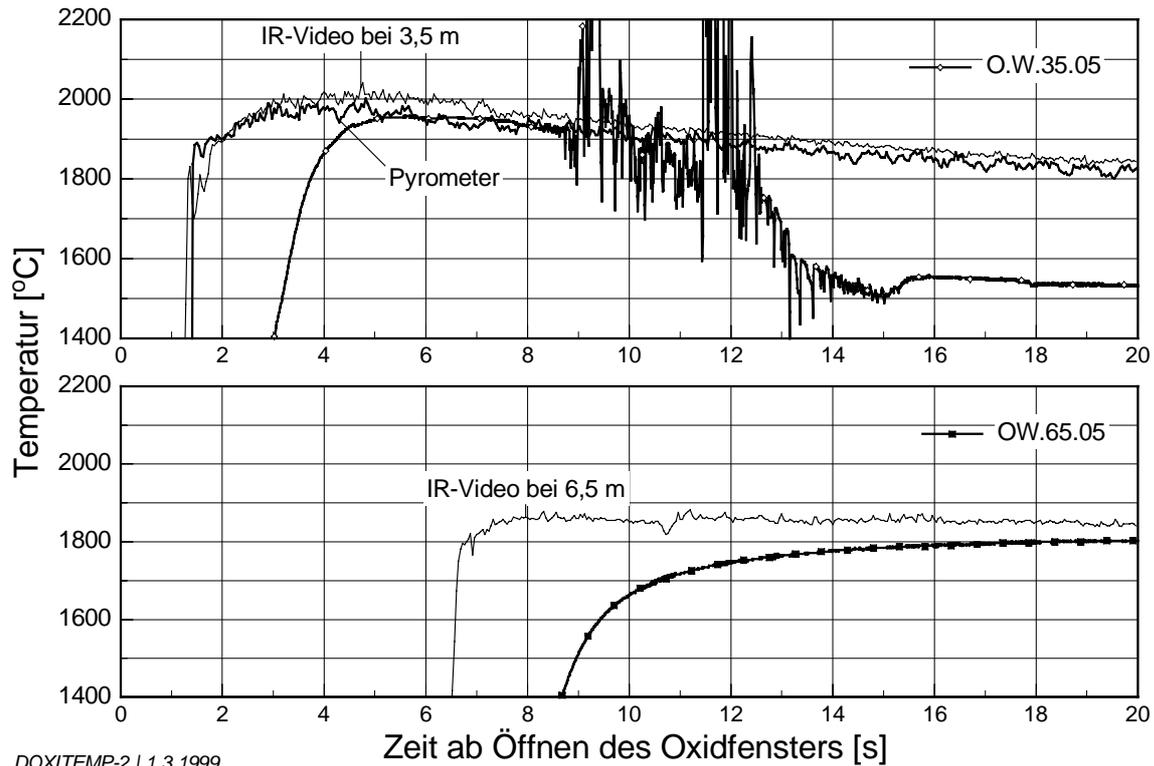


Abb. 3.5.5 a: Temperaturmessungen im Oxidkanal bis 1 m



DOXITEMP-2 | 1.3.1999

Abb. 3.5.5 b: Temperaturmessungen im Oxidkanal ab 1 m

Gesamtdarstellung der OxidAusbreitung

In Abbildung 3.5.6 ist der Weg-Zeit-Verlauf der OxidAusbreitung anhand der Videoauswertung und der Thermoelemente dargestellt. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben, jedoch ohne Bezug zur y-Achse des Diagramms. Es soll nur ein Eindruck von der zeitlichen Reaktion dieser Meßinstrumente auf den Schmelzenkontakt vermittelt werden.

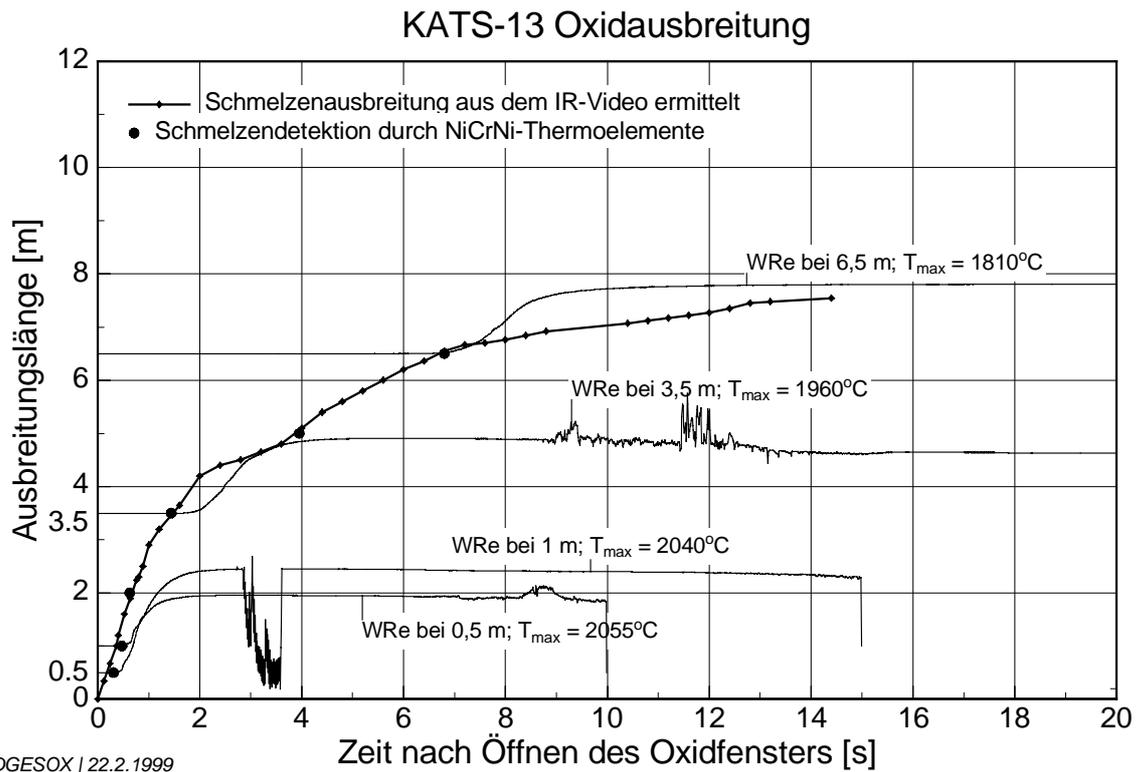


Abb. 3.5.6: Weg-Zeit-Verlauf der Oxidausbreitung

Schmelzeverteilung im Oxidkanal

Nach dem Versuch wurde folgende Schmelzeverteilung entlang des Oxidkanals ermittelt, s. Tabelle 3.5.8 und Abbildung 3.5.7 bzw. Abbildung 3.5.8.

Tab. 3.5.8: Verteilung der Oxidschmelze im Kanal

Länge [m]	Gemessene Spitzen der Oxidschicht [mm]	Geschätztes Talniveau der Oxidschicht [mm]	Gemittelte Oxidschichtdicke [mm]
0	-----	-----	(50)
0.5	50 – 55	45	50
1.5	Bis 60	45	55
2.5	Bis 60	40	50
3.5	Bis 55	50	55
4.5	Bis 55	45	50
5.5	70 – 75	45	60
6.5	60 – 65	50	60
7	-----	40	50
7.3	-----	33	38
7.4	-----	15	15
7.54	-----	-----	0

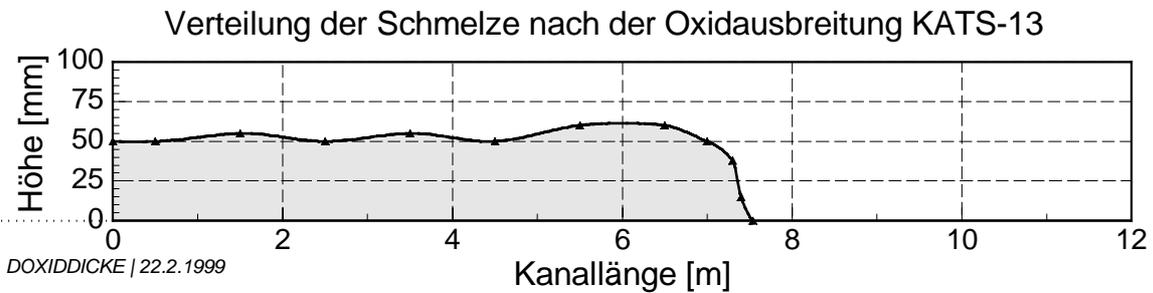
**Abb. 3.5.7:** Verteilung der Oxidschmelze nach der Ausbreitung



Abb. 3.5.8: Photographie des Endstückes der ausgebreiteten Oxidschmelze

Erosion im Oxidkanal

In Tabelle 3.5.9 ist die Erosion im Oxidkanal aufgeführt.

Tab. 3.5.9: Erosion im Oxidkanal

Kanallänge	0 – 5 m	5 m – 6,3 m	6,3 m – 7 m
Beschreibung der Erosion und Erosionstiefe	Im Mittel 10mm, mit Kanallänge abnehmend	Leichtere Erosion, nur so weit, daß die Steine im Beton freigelegt sind; Im Bereich 2 cm von der Wand keine Erosion	Kaum noch Erosion, Steine schauen wenig durch; nicht erodierter Randbereich auf 3- 5 cm breit gewachsen.

Analyse von Proben aus dem Oxidkanal

Die Zusammensetzung der Oxidschmelze im Mischbehälter ist die der ursprünglichen, in den Kanal einlaufenden Schmelze, am nächsten. Die Ergebnisse der in der Tabelle 3.5.10 beschriebenen Analyse der Oxidprobe ist in Gewichtsprozenten angegeben. Für die Probe sind Werte in zwei Spalten aufgeführt, wobei die erste Spalte die Ergebnisse der Analysen darstellt; bei der zweiten Spalte wurde der Gesamtanteil auf 100 % extrapoliert, indem die unter „Sonstige“ aufgeführten Anteile weggelassen wurden.

Tab. 3.5.10: Analysen von Oxidproben

Analysen-Nr.	405/98	
	Mischbehälter	
Al ₂ O ₃	78.0 %	79.8 %
FeO	6.9 %	7.0 %
SiO ₂	9.0 %	9.2 %
MgO	3.9 %	4.0 %
Sonst.	1.6 %	--
Summe	99.4 %	100 %

Porosität

Aus der Dickenverteilung der ausgebreiteten Schmelze ermittelt man ein Volumen von 98,9 dm³. Im Kapitel "Ausgebreitete Oxidmasse" wurde ein Schmelzevolumen zur Ausbreitung von 66 dm³ ermittelt bei 2030 °C und 2800 kg/m³. Gemessen an einer reinen Feststoffdichte bei Raumtemperatur ohne Poren von etwa 3800 kg/m³ weist die ausgebreitete Schmelze eine totale Porosität von 51 % auf.

Im Rahmen einer Diplomarbeit [23] wurden Porositätsmessungen mit Hilfe eines Helium-Pyknometers durchgeführt. Zur Bestimmung der offenen und geschlossenen Porositäten wird auch die theoretische Feststoffdichte der vorliegenden Probe benötigt. Sie beträgt bei der Zusam-

mensetzung der Oxidprobe etwa 3800 kg/m^3 . Mit diesem Wert und den gemessenen Volumina (einmal der Körper inklusive aller offenen und geschlossenen Poren, einmal nur mit den geschlossenen Poren (He-Pyknometer)) errechnet man eine gesamte Porosität von 50.1%, die offene beträgt 47.7% und die geschlossene 2.4%. Der Wert aus der Pyknometermessung stimmt recht gut mit dem obigen global bestimmten überein. Die Probe wurde im Kanal bei 0.6 m entnommen und ist repräsentativ für einen großen Bereich der ausgebreiteten Schmelze. Der Grund für die höhere totale Porosität von über 50% gegenüber dem Wert in Test KATS-12 liegt in den unterschiedlichen Substraten: Beton wie hier in KATS-13 gast sehr stark aus während und auch nach der Ausbreitung, was zu höheren Porositäten führt.

Eisenausbreitung

Ausgebreitete Eisenmasse

Die ausgebreitete Eisenmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 133,5 kg. Es kann mit einer Eisendichte von 6300 kg/m^3 gerechnet werden.

Volumenrate Eisen

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie wird aus dem Schmelzefüllstand ($h=400 \text{ mm}$) und der Fenstergröße rechnerisch ermittelt (Ausfließen aus einem prismatischen Gefäß [16]). Nach dieser Rechnung ermittelt man eine anfängliche Austrittsgeschwindigkeit des Eisens von $v=2,72 \text{ m/s}$, einen anfänglichen Volumenstrom von $\dot{V}=6,72 \text{ l/s}$ bzw. einen Massenstrom von $\dot{m}=42,3 \text{ kg/s}$. Die Austrittsdauer beträgt $t_e=6,3 \text{ s}$. Während dieser Zeit gehen Geschwindigkeit und Volumenstrom linear auf Null zurück.

Detektion der Eisenschmelzenausbreitung durch die NiCr-Ni-Thermoelemente

Auf eine Beschreibung der Auswertung der Signale der Detektionsthermoelemente und deren einzelne Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet. Die folgende Tabelle 3.5.11 gibt nur die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten wieder.

Tab. 3.5.11: Detektionszeitpunkte der Thermoelemente im Eisenkanal in [s] (Nullpunkt ist der Zeitpunkt des Eisenfensteröffnens)

Länge (m) Höhe (mm)	0.5	1	2	3.5	5	6.5	8	9	10	11
45	1.65	1.08	1.86	1.59						
5	0.41		1.32			11.8	(6.31)			
25			1.39		3.16					()
15						4.15	(6.31)		()	
5	0.35		0.74	1.40	2.50	3.78	6.43		()	()

()= Die geklammerten Werte bedeuten, daß die Thermoelemente (laut Nachuntersuchung) keinen direkten Kontakt mit dem Eisen hatten und demnach nur auf Strahlung reagiert haben können.

Zur Darstellung der Ausbreitung in einem Weg-Zeit-Diagramm werden im weiteren Verlauf die Detektionszeitpunkte der Thermoelemente auf 5 mm Position herangezogen.

Detektion der Eisenschmelzeausbreitung aus Videoaufnahme

Die Videoaufzeichnung wird über Blitze, die zeitgleich mit dem Öffnen der Fenster gezündet werden, synchronisiert.

Tab. 3.5.12: Ausbreitung der Eisenschmelzefront

Zeit (s)	Weg (m)						
0	0	1.1	3.5	2.8	5.8	6.0	8.05
0.2	0.9	1.2	3.73	3.0	6.05	6.5	8.2
0.3	1.2	1.3	3.9	3.2	6.3	7.0	8.35
0.4	1.52	1.4	4.1	3.4	6.5	7.5	8.5
0.5	1.9	1.5	4.3	3.6	6.7		
0.6	2.2	1.7	4.5	3.8	6.86		
0.7	2.55	2.0	4.85	4.0	7.0		
0.8	2.75	2.2	5.05	4.5	7.25		
0.9	3.0	2.4	5.25	5.0	7.55		
1.0	3.3	2.6	5.5	5.5	7.8		

Temperaturmessung im Eisenkanal

In Tabelle 3.5.13 und in Abbildung 3.5.9 sind die Temperaturmessungen im Eisenkanal dargestellt.

Tab. 3.5.13: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Eisen	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums	Bemerkungen
E.W.05.05	Geschätzt 1940 – 1950°C	> 2 s	Kurz vor Erreichen des Maximums ausgefallen
E.W.10.05	1930°C	~ 2.9 s	
E.W.35.05	1845°C	~ 5 s	

Es kann von einer Anfangstemperatur des Eisens von 1950°C ausgegangen werden.

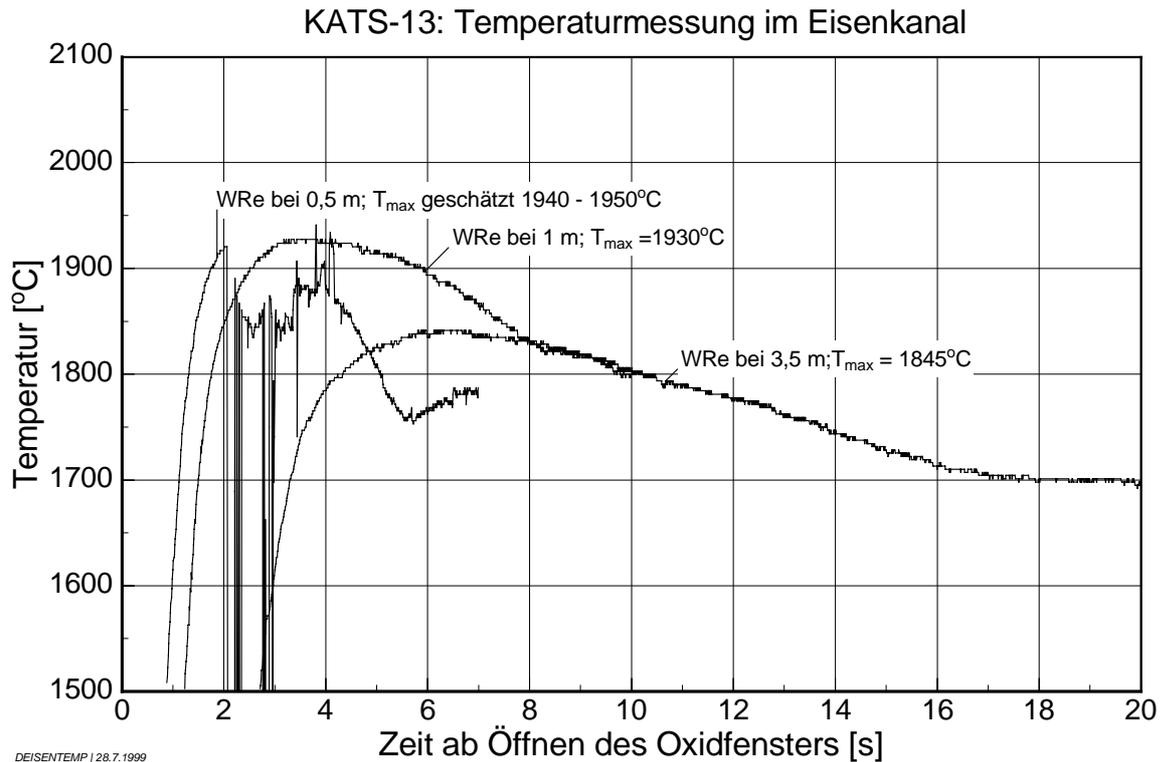


Abb. 3.5.9: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Gesamtdarstellung der Eisenausbreitung

Im folgenden Diagramm, Abbildung 3.5.10, ist der Weg-Zeit-Verlauf der Eisenausbreitung anhand der Videoauswertung und der Thermoelemente dargestellt. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben, jedoch ohne Bezug zur y-Achse des Diagramms. Es soll nur ein Eindruck von der zeitlichen Reaktion dieser Meßinstrumente auf den Schmelzenkontakt vermittelt werden.

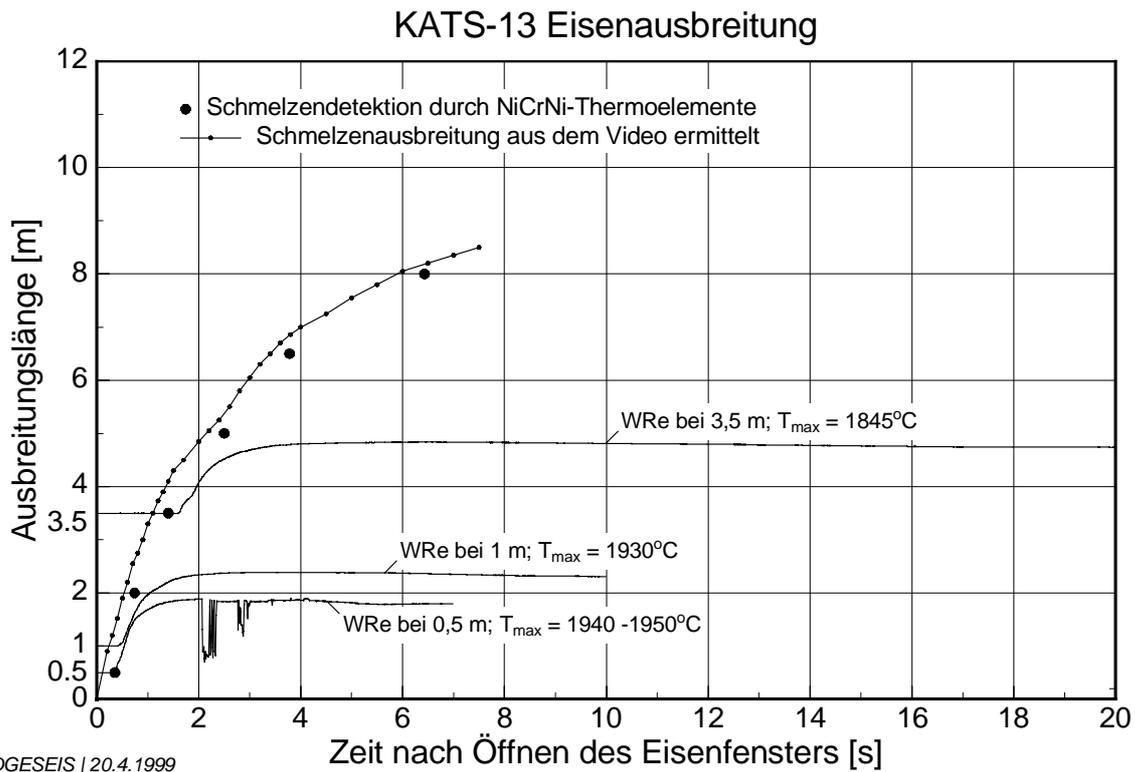


Abb. 3.5.10: Weg-Zeit-Verlauf der Eisenausbreitung

Schmelzeverteilung im Eisenkanal

Der gesamte Eisenregulus wurde meterweise zerschnitten und gewogen. Das erste Stück ist um den Einlaufbereich mit der Schräge, auf der kein Eisen verblieb, verkürzt. Das letzte Stück reicht von der „8m“-Marke bis zum Ende der Ausbreitung. Die Schmelze hat sich auf den letzten 90 cm nicht mehr über die ganze Kanalbreite ausgebreitet. Die bedeckte Fläche wurde graphisch ermittelt. Aus Masse und Dichte kann das Volumen berechnet werden, das, dividiert durch die Fläche, die durchschnittliche Höhe des Eisenstückes ergibt.

Die in der Tabelle 3.5.14 angeführte Dichte 1 von 6,3 kg/l bezieht sich auf die Eisendichte, die man bei der Nachuntersuchung des Schmelztrennbehälters und vor allem der Mischzone im Behälter ermittelt. Diese Dichte ist aber für die Schmelze während der Ausbreitung sicher zu gering. Deshalb wird die Rechnung mit einer zweiten Dichte von 6,66 kg/l wiederholt. Diese entspricht der Dichte von flüssigem Eisen bei 1950

°C. Diese Temperatur wurde vom W-Re-Thermoelement bei 0,5 m Kanallänge gemessen.

Die Eisenzunge breitete sich der Videoaufnahme zufolge bis 8,5 m aus, Abbildung 3.5.11. In der Tabelle 3.5.14 jedoch, die die Ergebnisse der Nachuntersuchung wiedergibt, ist das Ende der Eisenausbreitung mit 8,38 m angegeben. Dieser Unterschied entsteht durch das Schrumpfen des Eisenregulus beim Abkühlen.

Tab. 3.5.14: Verteilung der Eisenschmelze nach der Ausbreitung

Abschnitt [m]	Fläche [m ²]	Masse [kg]	Dichte 1 [kg/dm ³]	Berechn. Höhe1 [mm]	Dichte 2 [kg/l]	Berechn. Höhe2 [mm]
0.125 bis 1	0.131	14.9	6.3	18.1	6.66	17.1
1 bis 2	0.15	20	6.3	21.2	6.66	20.0
2 bis 3	0.15	20.4	6.3	21.6	6.66	20.4
3 bis 4	0.15	18	6.3	19.1	6.66	18.0
4 bis 5	0.15	15.9	6.3	16.8	6.66	15.9
5 bis 6	0.15	19.7	6.3	20.8	6.66	19.7
6 bis 7	0.15	14.8	6.3	15.7	6.66	14.8
7 bis 8	0.122	8.9	6.3	11.6	6.66	11.0
8 bis 8.38	0.026	0.9	6.3	5.5	6.66	5.2

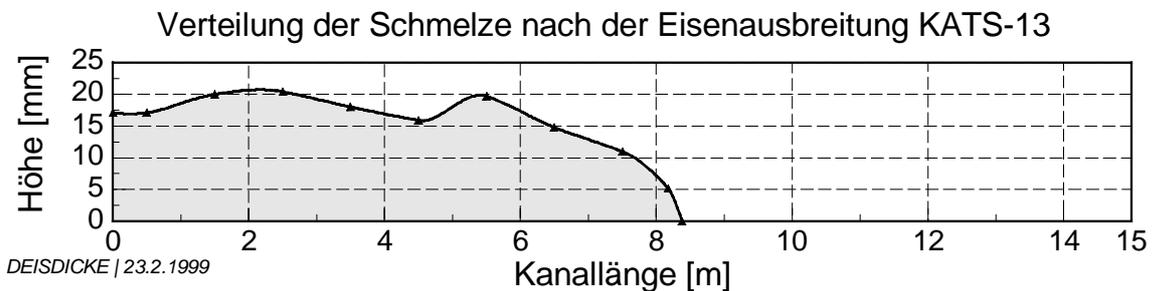


Abb. 3.5.11: Verteilung der Eisenschmelze nach der Ausbreitung

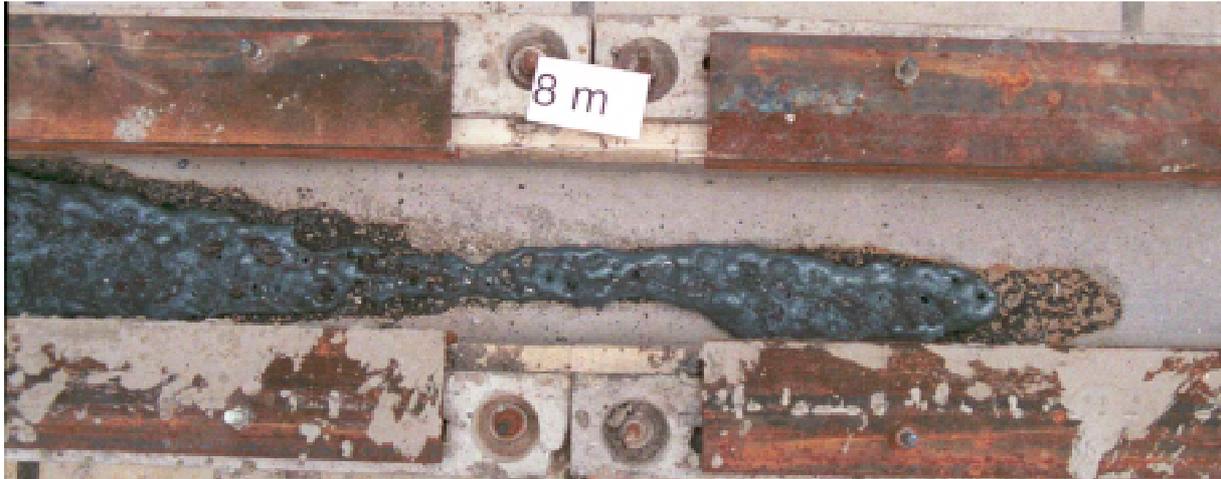


Abb. 3.5.12: Photographie des Endstücks der Eisenschmelze

Erosion im Eisenkanal

Es wurden keine Daten über die Erosion im Eisenkanal gesammelt.

Analyse von Proben aus dem Eisenkanal

Es wurden keine Proben genommen.

3.6 KATS-14 “1-dim Ausbreitung mit niedriger Volumenrate auf Cordierit, trocken“

Versuchsdatum: 26.3.98

Versuchsaufbau

Abb. 3.6.1: Reaktionstiegel und Stoffeinsatz

	Thermitmischung: (10 Al SSH)	30 Beutel a 10,4 kg → 312 kg
	Langsam reagierendes Thermit (EF50):	6,0 kg
	Zuschlag: Quarzsand	20 kg
	Tiegelausschalung: Stahl	3,5 kg
	(Empty row)	

Abb. 3.6.2: Tiegelinnenmaße

<p>$\alpha = 16,5^\circ$ $\beta = 24,6^\circ$</p>	<p><u>Tiegelvolumen:</u> $z = 0$ bis 220 mm</p> $V(z) = \frac{\pi}{3} \tan^2 \alpha \cdot (z + 0,1185m)^3 - 1,53 \cdot 10^{-4} m^3$ <p>$z \geq 220$ mm</p> $V(z) = \frac{\pi}{3} \tan^2 \beta \cdot (z - 1,5 \cdot 10^{-3} m)^3 + 1,12 \cdot 10^{-3} m^3$
	<p><u>Tiegelquerschnitt:</u> $z = 0$ bis 220 mm</p> $A(z) = \pi \tan^2 \alpha \cdot (z + 0,1185m)^2$ <p>$z \geq 220$ mm</p> $A(z) = \pi \tan^2 \beta \cdot (z - 1,5 \cdot 10^{-3} m)^2$

Düsen-Ø 20 mm (die Düse unter dem Tiegel ist das durchflußbegrenzende Bauteil)

Abb. 3.6.3: Trennung von Oxid und Eisen

	Oxidbehälter- (B × T):	300 × 300 mm
	Oxidfenster (H × B):	40 × 240 mm
	Sumpfvolumen	8,7 dm ³
	Oxidausbreitungsfläche (B × L):	0,25 × 12 m
	Substrat:	Cordierit
	Eisenbehälter- (B × T):	200 × 180 mm
	Eisenfenster (H × B):	30 × 140 mm
	Sumpfvolumen	0,6 dm ³
	Eisenausbreitungsfläche (B × L):	0,15 × 12 m
	Substrat:	Cordierit

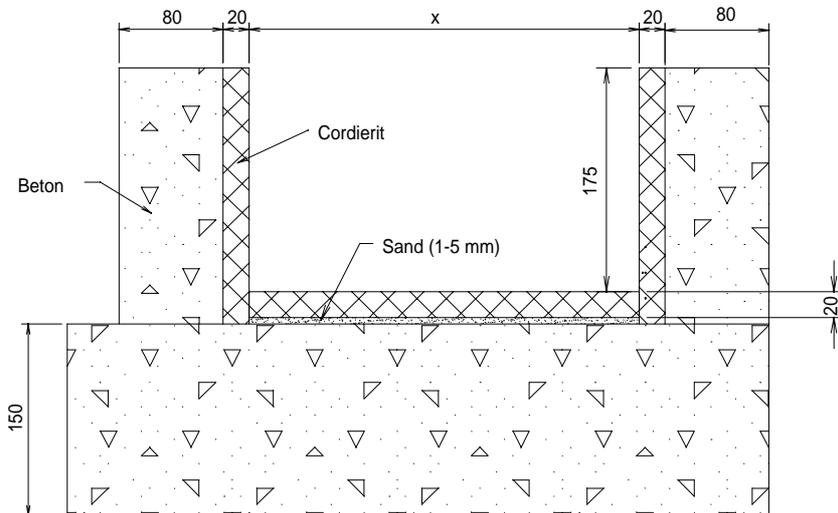
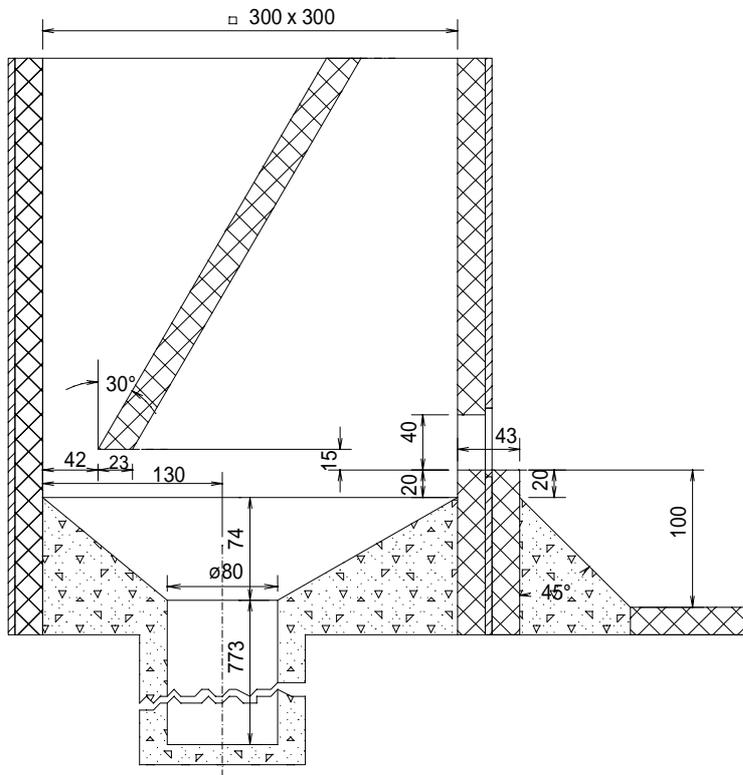


Abb. 3.6.4: Kanalquerschnitt

Abb. 3.6.5: Oxidbehälter



Oxidbehälter- (B × T):

300 × 300 mm

Oxidfenster (H × B):

40 × 240 mm

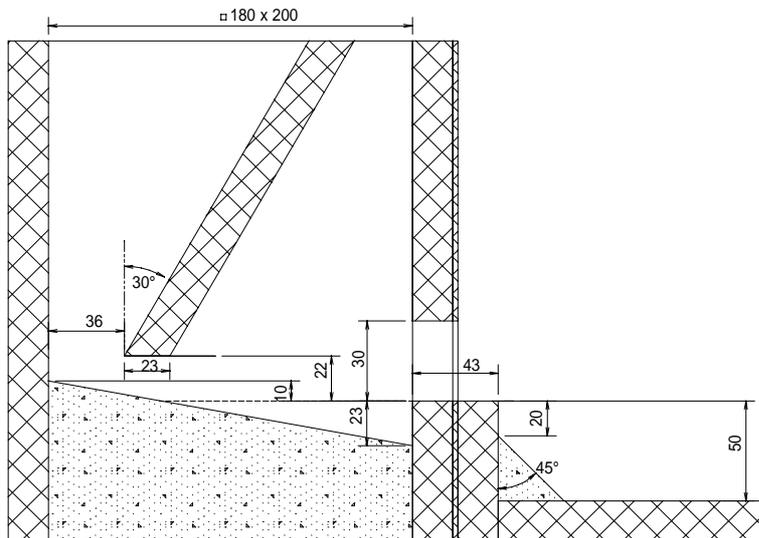
Sumpfvolumen:
(bis Unterkante Fenster)

8,7 Liter

Oxidausbreitungsfläche

(B × L): 0,25 × 12 m

Abb. 3.6.6: Eisenbehälter



Eisenbehälter- (B × T):

200 × 180 mm

Eisenfenster (H × B):

30 × 140 mm

Sumpfvolumen:
(bis Unterkante Fenster)

0,6 Liter

Eisenausbreitungsfläche

(B × L): 0,15 × 12 m

Instrumentierung

Temperaturmessung mit W-Re-Tauchthermoelementen

Die W-Re-Thermoelemente sind mit einer Schutzkappe aus 1/10 mm Stahl umgeben. Die Messstelle befindet sich 5 mm hinter dieser Kappe. Die Bezeichnung O.W.xx.05 bedeutet, dass der Boden der Schutzkappe 5 mm über der Ausbreitungsfläche lag, d. h. die Messstelle 10 mm darüber.

Tab. 3.6.1: Temperaturmessung der Oxidschmelze

Oxid	Längenposition	Abstand zur Kanalwand (linker Rand)	Höhe über Boden
O.W.00.05	0 m (Fenster)	~ 125 mm	10 mm
O.W.10.05	1,0 m	~ 100 mm	10 mm / Stahlkappe seitlich entfernt
O.W.30.05	3,0 m	~ 100 mm	10 mm / Stahlkappe seitlich entfernt
O.W.50.05	5,0 m	~ 100 mm	10 mm / Stahlkappe seitlich entfernt

Tab. 3.6.2: Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisen	Längenposition	Abstand zur Kanalwand (linker Rand)	Höhe über Boden
E.W.00.05	0 m	~ 75 mm	10 mm
E.W.10.05	1,0 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.40.05	4,0 m	~ 30 mm	10 mm
E.W.70.05	7,0 m	~ 30 mm	10 mm

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit IR-Video

Die Oberflächentemperatur der Oxidschmelze wurde mit einer IR-Kamera thermographisch bestimmt.

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit Zweifarbenpyrometer

Das Zweistrahlpyrometer wurde auf die Längenposition bei 3 m gerichtet.

Schmelzedetektion in den Ausbreitungskanälen mit NiCr-Ni-Thermoelementen

Die Mantelthermoelemente haben \varnothing 1 mm in TI-Ausführung und werden in einem Edelstahlröhrchen \varnothing 4×1 mm geführt. Die Thermoelemente für den Oxidkanal ragen 2-3 mm aus dem Hüllrohr heraus, die für den Eisenkanal schließen bündig ab.

Tab. 3.6.3: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal

Oxid	Längenposition	Abstand vom linken Rand in Fließrichtung	Höhe über dem Boden
O.K.10.05	1 m	160 mm	~ 8 mm
O.K.20.05	2 m	90 mm	~ 8 mm
O.K.30.05	3 m	160 mm	~ 8 mm
O.K.40.05	4 m	90 mm	~ 8 mm
O.K.50.05	5 m	160 mm	~ 8 mm
O.K.60.05	6 m	90 mm	~ 8 mm
O.K.70.05	7 m	160 mm	~ 8 mm
O.K.80.05	8 m	90 mm	~ 8 mm
O.K.90.05	9 m	160 mm	~ 8 mm
O.K.100.05	10 m	90 mm	~ 8 mm
O.K.110.05	11 m	160 mm	~ 8 mm

Tab. 3.6.4: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Eisenkanal

Eisen	Längenposition	Abstand vom linken Rand in Fließrichtung	Höhe über dem Boden
E.K.10.05	1 m	80 mm	~ 5 mm
E.K.20.05	2 m	80 mm	~ 5 mm
E.K.30.05	3 m	80 mm	~ 5 mm
E.K.40.05	4 m	80 mm	~ 5 mm
E.K.50.05	5 m	80 mm	~ 5 mm
E.K.60.05	6 m	80 mm	~ 5 mm
E.K.70.05	7 m	80 mm	~ 5 mm
E.K.80.05	8 m	80 mm	~ 5 mm
E.K.90.05	9 m	80 mm	~ 5 mm
E.K.100.05	10 m	80 mm	~ 5 mm
E.K.110.05	11 m	80 mm	~ 5 mm

Schmelzedetektion am Thermittiegel

Unterhalb der Düse befinden sich zwei Thermoelemente zur Detektion des Schmelzeaustritts aus dem Tiegel (TA1 und TA2).

Zeitlicher Ablauf des Experiments

Zündung vom PC

- TA1 und /oder TA2 detektieren ca. 40 s nach Zündung den Schmelzeabstich
- Start der Aufzeichnung der Signale (1 kHz; 256 s; 5 s Pretime)
- Blitze für den Eisenkanal zünden
- Die Schmelze läuft durch das schwenkbare Rohr zuerst in den Eisenbehälter und ohne weitere Rückhaltung durch das offene Eisenfenster direkt in den Eisenkanal.
- Start einer Zeitverzögerung von 22 s

- Das Rohr wird umgeschwenkt
- Blitze am Oxidkanal zünden
- Aufzeichnung der Infrarotkamera und des Pyrometers startet
- Die Schmelze läuft in den Oxidbehälter, füllt das Sumpfvolumen und tritt dann durch das offene Oxidfenster in den Oxidkanal ein (ca. 3,1 s verzögert)

Oxidausbreitung

Ausgebreitete Oxidmasse

Die ausgebreitete Oxidmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 175,8 kg. Das W-Re-Thermoelement, das direkt im Oxidfenster positioniert war, ist vor Erreichen der Maximalspannung ausgefallen. Es läßt sich keine Schätzung aus der Kurve ableiten. Die früheste Temperaturmessung stammt daher von der IR-Videokamera, mit der eine maximale Temperatur der Oxidschmelze im Einlauf in den Kanal von 1970 °C gemessen wurde. Bei dieser Temperatur hat eine typische KATS-Schmelze eine Dichte von ~2800 kg/m³.

Volumenrate Oxid

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie kann jedoch rechnerisch abgeschätzt werden:

Man kennt die gesamte ausgebreitete Masse von 175,8 kg, was ein Volumen von 0,061 m³ ergibt.

Das Ausfließen in den Ausbreitungskanal beginnt, nachdem der Sumpf im Oxidbehälter gefüllt wurde. Vereinfacht kann man daher die Volumenrate, die sich für das Ausfließen der letzten 0,061 m³ aus dem Reaktionstiegel ergibt, mit der Volumenrate beim Austreten in den Ausbreitungskanal gleichsetzen.

Aus der Infrarot-Videoaufnahme kann der Beginn der eigentlichen Ausbreitung mit 3,1 s nach Befehl zum Umschwenken des Rohres bzw. Start der Infrarotaufnahme bestimmt werden. Die Austrittsdauer betrug etwa 37 s. Dies konnte ebenfalls aus den Videoaufnahmen erkannt werden. Vereinfacht erhält man eine durchschnittliche Volumenrate von $0,061 \text{ m}^3/37\text{s} = 1,65 \text{ l/s}$.

Die Düse hatte vor dem Experiment einen lichten Durchmesser von 20 mm. Nach dem Experiment wurde (inklusive anhängender Kruste) ein Durchmesser von 25 mm gemessen. Es wird vermutet, daß die Erosion hauptsächlich während des Austritts der Eisenschmelze passierte. Ver-

einfacht wird daher mit einem konstanten Düsendurchmesser für den Oxidaustritt gerechnet, der mit 27,5 mm zu einem Ergebnis führt, welches mit der beobachteten Austrittsdauer von 37 s am besten übereinstimmt.

Ausfließen aus einem Behälter unter Schwerkraft [16]:

Wenn der Behälter wie in diesem Falle mit nur einer Flüssigkeit gefüllt ist, gilt für die Ausfließgeschwindigkeit annähernd: $w_a = \sqrt{2 \cdot g \cdot z}$

Das Absenken des Flüssigkeitsspiegels kann vereinfacht mit folgender Formel beschrieben werden:

$$\frac{dt}{dz} = \frac{1}{\mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot \frac{-A_z}{\sqrt{z}}$$

A_a = Öffnungsquerschnitt

z = Höhe des Flüssigkeitsspiegels

$A_z = f(z)$ = Behälterquerschnitt in Abhängigkeit der Höhe z

μ = Ausflußzahl = 0,95.

Aus der Integration dieser Formel erhält man den zeitlichen Verlauf der Spiegelabsenkung vom maximalen Füllstand bis Null.

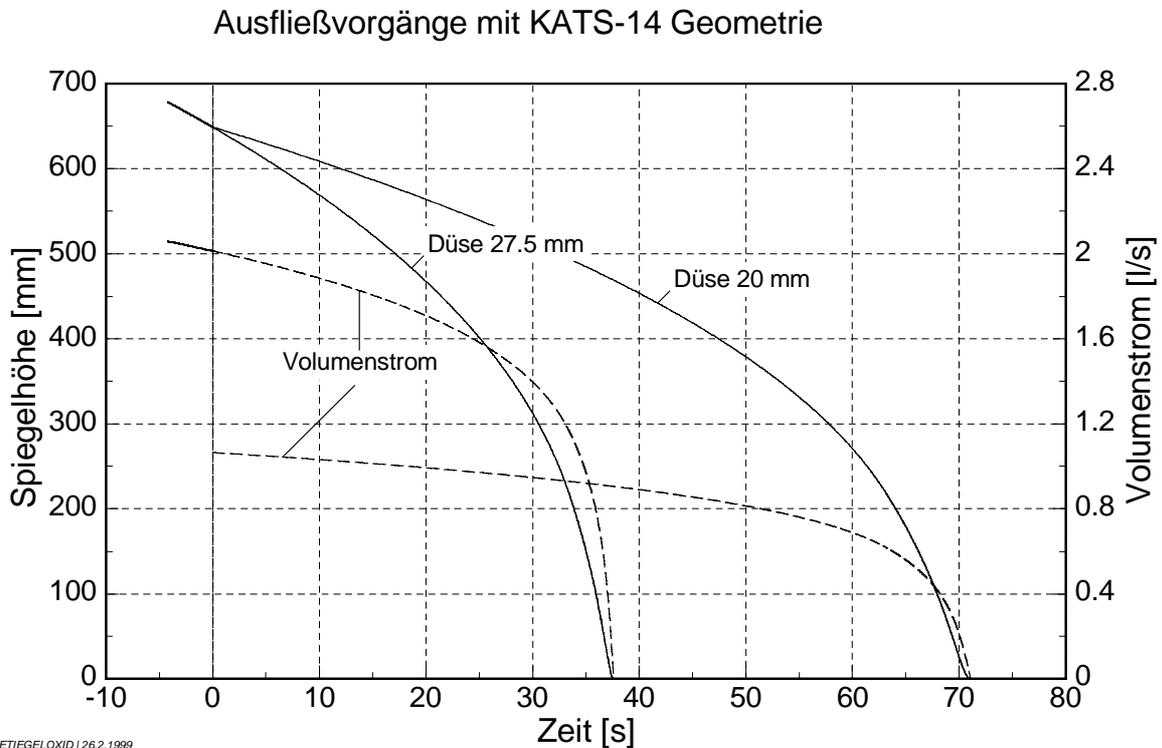
Die Volumenrate wird nach folgender Formel errechnet:

$$\text{Volumenrate} \quad \dot{V} = \mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot z}$$

Nach dieser Rechnung ermittelt man eine anfängliche Volumenrate des Oxides von $\dot{V} = 2$ l/s bzw. einen Massenstrom von $\dot{m} = 5,8$ kg/s. Die Auströmdauer ist zu $t_e = 37,6$ s berechnet worden. Während dieser Zeit geht der Volumenstrom in einer Wurzelfunktion auf Null zurück.

In Abbildung 3.6.7 sind zum Vergleich die mit einem ursprünglichen Düsendurchmesser von 20 mm errechneten Kurven für Spiegelabsenkung und Volumenrate abgebildet.

Für den Durchmesser 27,5 mm ist zusätzlich das Füllen des Oxidsumpfes (Sumpfvolumen 8.7 l) im negativen Teil der Zeitachse dargestellt. Dieser Füllvorgang dauert nach Rechnung 4,2 s. Wie bereits weiter oben erwähnt, wurde jedoch bereits nach 3,1 s das Austreten der Schmelze auf die Ausbreitungsfläche beobachtet. Als Grund für diese Differenz kann angenommen werden, dass der obere Bereich des Sumpfvolumens, Abbildung 3.6.6, durch den Schmelzestrahл nicht völlig aufgefüllt wird, sondern die Schmelze aufgrund ihrer Trägheit das Austrittsfenster erreicht.



ETIEGELOXID | 26.2.1999

Abb. 3.6.7: Berechnete Volumenströme für zwei verschiedene Düsenöffnungen

Oxidschmelzenausbreitung

Die Oxidschmelze breitet sich langsam und in kleinen Schüben in 40 s über 6,5 m aus, Abbildung 3.6.9. Der Aufbau der Schmelzendicke von ~60 mm bis 3,5 m und ~40 mm bis 6,4 m geschieht dabei erst allmählich, indem die schnell entstehende Oberflächenkruste von der nachströmenden Schmelze angehoben wird oder von einer neuen Schicht überflossen wird.

Ab etwa 6,5 m wird nicht mehr die gesamte Kanalbreite von der Schmelze ausgefüllt und die Schichtdicke beträgt nur noch 20 – 30 mm. Die Zunge endet bei etwa 7,2 m nach 58 s. Die Enddicke der Zunge beträgt wie auch bei KATS-12 typische 10 – 12 mm.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente im Oxidkanal

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Die folgende Tabelle 3.6.5 gibt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten wieder.

Der Bezugszeitpunkt Null ist dabei der Beginn der Ausbreitung, der nach den Videoaufzeichnungen auf 3,1 s nach dem Umschwenken des Umlenkrohres bestimmt wurde, bzw. 25,1 s nach dem Abstich.

Tab. 3.6.5: Detektionszeitpunkte der Thermoelemente im Oxidkanal.

Länge (m) Höhe mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	3.5 s	7.7 s	13.8 s	23.6 s	30.6 s	37.9 s	53.0 s	()	()	()	()

Oxidschmelzenausbreitung aus Infrarot-Videoaufnahme

Die Videoaufzeichnung der Infrarotkamera startet gleichzeitig mit dem Befehl zum Umschwenken des Umlenkrohres. Die in der folgenden Tabelle 3.6.6 dargestellten Wertepaare beziehen sich allerdings auf den Beginn der Ausbreitung 3,1 s nach dem Beginn der Aufzeichnung.

Tab. 3.6.6: Ausbreitung der Oxidschmelzefront

Zeit (s)	Weg (m)						
0.0	0.00	12.0	2.75	24.0	4.26	40.8	6.45
1.2	0.45	13.2	2.97	25.2	4.39	43.2	6.54
2.4	1.03	14.4	3.16	26.4	4.65	45.6	6.75
3.6	1.26	15.6	3.30	27.6	4.77	48.0	6.90
4.8	1.45	16.8	3.44	28.8	4.96	50.4	6.99
6.0	1.77	18.0	3.59	30.0	5.10	52.8	7.05
7.2	2.06	19.2	3.64	32.4	5.26	55.2	7.13
8.4	2.30	20.4	3.84	34.8	5.78	57.6	7.16
9.6	2.43	21.6	3.99	36.0	6.00		
10.8	2.69	22.8	4.13	38.4	6.28		

Temperaturmessung im Oxidkanal

In Tabelle 3.6.7 und in Abbildung 3.6.8 sind die Temperaturmessungen im Oxidkanal aufgeführt.

Tab. 3.6.7: Temperaturmessungen im Oxidkanal

Oxid	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bezogen auf Beginn der Ausbreitung)	Bemerkungen
O.W.00.05	----		ausgefallen
O.W.10.05	1870°C	16 s	
O.W.30.05	1830°C	23 s	
O.W.50.05	1840°C	44 s	

Das erste Thermoelement im Ausbreitungskanal ist ausgefallen. Das nächste (O.W.10.05) hat erst ca. 13 s nachdem es von der Schmelze erreicht wurde seine Maximalspannung erreicht. Dies ist eine sehr lange Zeitspanne und bringt Unsicherheit in die Temperaturmessung. Es erscheint daher ratsam sich auf die Infrarotmessung als zweite Meßmethode zu stützen, zumal diese Messung an einer Stelle von einem Pyrometer überprüft und bestätigt wird.

Temperaturmessung mit Infrarot-Videokamera

Das Maximum der Skala lag sehr hoch bei 2354 °C und wurde daher nicht erreicht. Die maximale Temperatur, die direkt am Einlauf der Schmelze in den Kanal gemessen wurde, beträgt ca. 1970 °C.

Das folgende Diagramm stellt die Temperaturkurven der W-Re-Thermoelemente den entsprechenden Temperaturverläufen aus der Infrarot-Videoaufnahme gegenüber.

Temperaturmessung mit Pyrometer

Die Temperaturkurve, die vom Pyrometer gemessen wurde, ist ebenfalls im folgenden Diagramm zum Vergleich mit der Infrarotmessung dargestellt. Die Infrarot- und Pyrometermessung stimmen sehr gut überein.

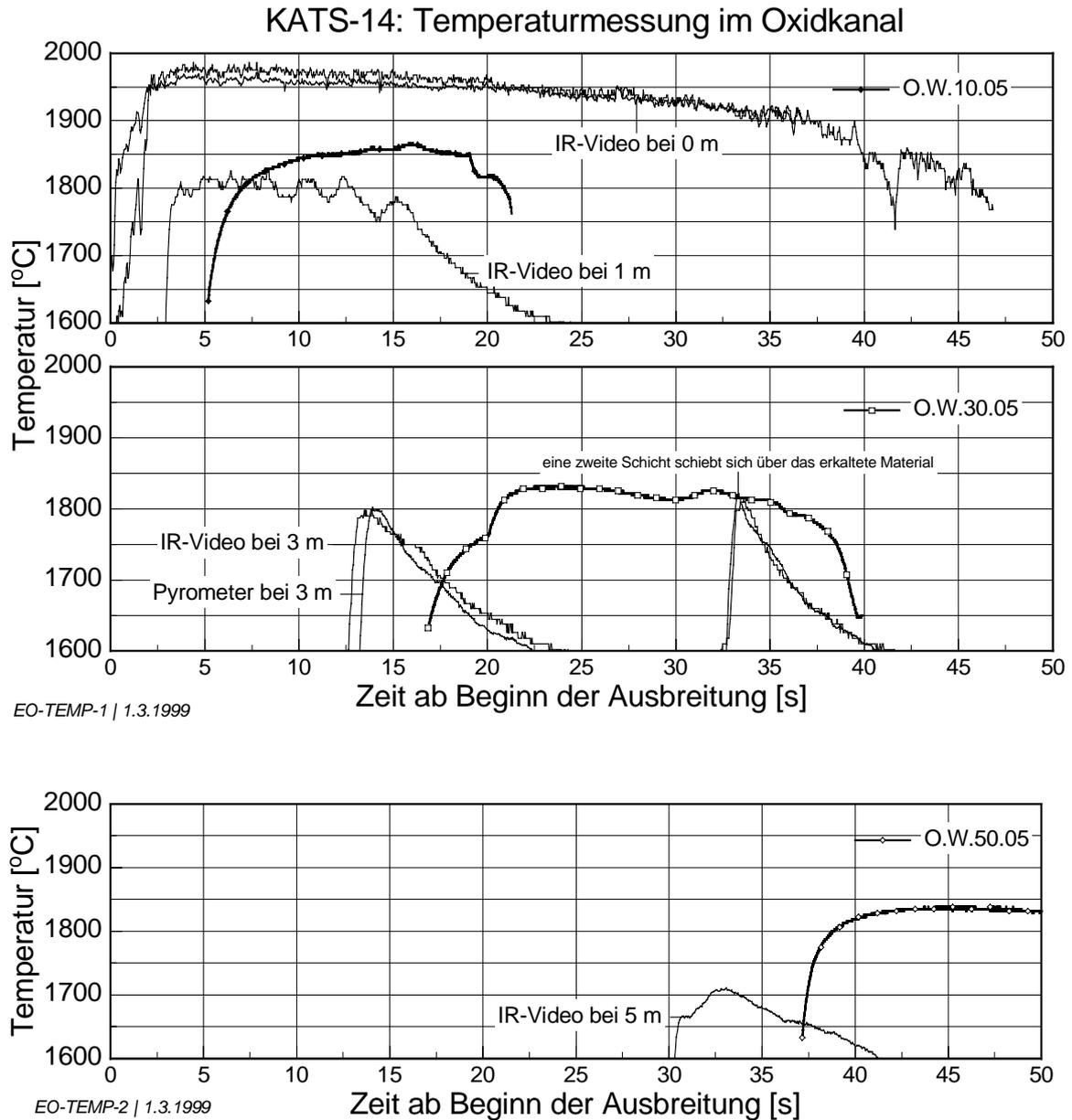


Abb. 3.6.8: Temperaturmessung im Oxidkanal

Gesamtdarstellung der Oxid Ausbreitung

Im folgenden Diagramm, Abbildung 3.6.9, ist der Weg-Zeit-Verlauf der Oxid Ausbreitung anhand der Videoauswertung und der Thermoelemente dargestellt. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben, jedoch ohne Bezug zur y-Achse des Diagramms. Es soll nur ein Eindruck von der zeitlichen Reaktion dieser Meßinstrumente auf den Schmelzenkontakt vermittelt werden.

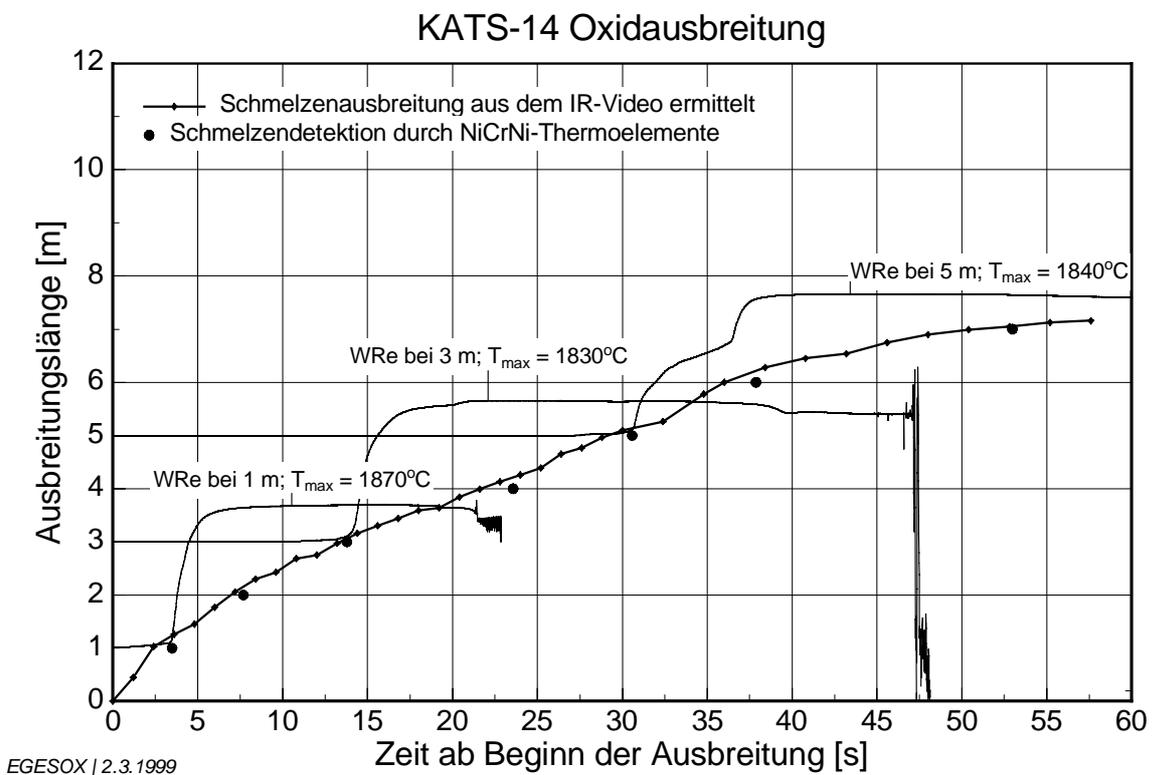


Abb. 3.6.9: Weg-Zeit-Verlauf der Oxid Ausbreitung

Schmelzeverteilung im Oxidkanal

Die Oxidschichtdicken in mm, gemessen in der Kanalmitte und jeweils 6 cm vom rechten und linken Rand in Fließrichtung sind in Tabelle 3.6.8 dargestellt.

Tab. 3.6.8: Verteilung der Oxidschmelze im Kanal. Werte in Millimetern

Position [m]	Links	Mitte	Rechts	Mittelwert für Höhen- profil- Diagramm
0,5	59	60	58	59
1,0	52	59	55	56
2,0	57	62	59	60
2,6	60	58	60	59
2,9	57	57	56	57
3,3	67	80	83	78
4,0	39	40	40	40
4,5	38	39	37	38
5,0	35	35	35	35
5,5	40	41	37	40
6,1	45	47	35	43
6,4	45	50	40	46
6,5	Oxidschicht nicht mehr geschlos- sen: ~27			27
6,6	Oxidschicht nicht mehr geschlos- sen: ~20			20
7 – 7,16	12 bis 10			11
Ab 7,16	0			0



Abb. 3.6.10: Photographie des letzten Ausbreitungsmeters der Oxidschmelze

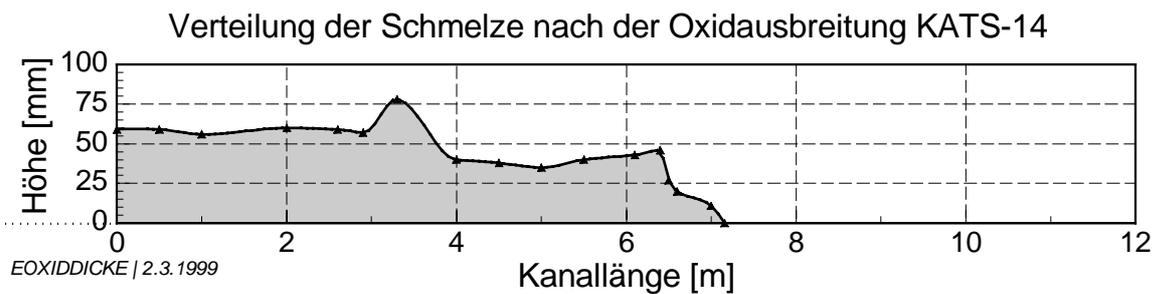


Abb. 3.6.11: Verteilung der Oxidschmelze nach der Ausbreitung

Auf der Videoaufzeichnung von „Oxid 3“ und „Oxid 4“ kann man den Dickenaufbau der Schmelze während der Ausbreitung anhand der in der Schmelze „versinkenden“ Thermolemente beobachten. Das folgende Diagramm 3.6.12 zeigt das Ergebnis einer quantitativen Auswertung dieser Aufnahmen und somit die ungefähren Schmelzedicken an bestimmten Punkten zu verschiedenen Zeiten.

Entwicklung der Höhenverteilung - Oxid KATS-14

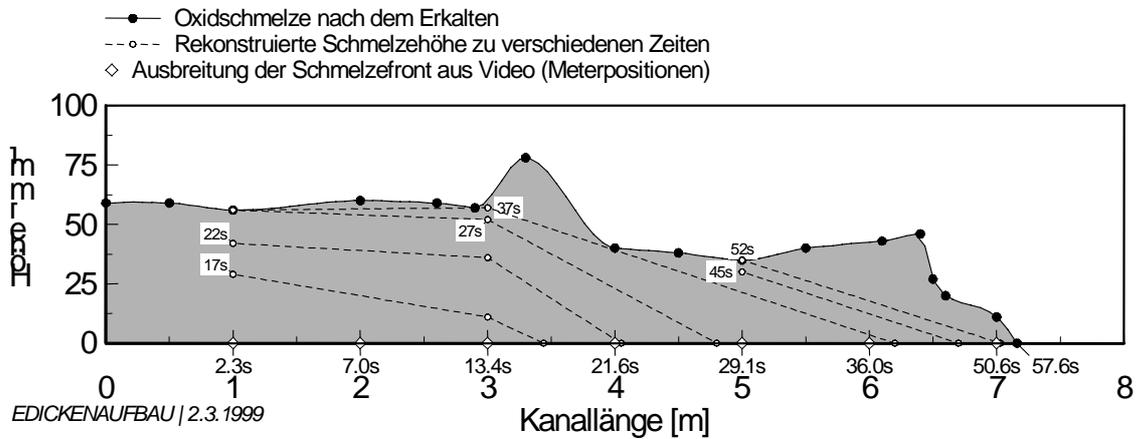


Abb. 3.6.12: Entwicklung der Höhenverteilung der Oxidkruste

Erosion im Oxidkanal

Die Erosion im Oxidkanal war vernachlässigbar gering.

Analyse von Proben aus dem Oxidkanal

Die Ergebnisse der in Tabelle 3.6.9 beschriebenen Analysen von Oxidproben sind in Gewichtsprozenten angegeben. Für jede einzelne Probe sind Werte in zwei Spalten aufgeführt, wobei die erste Spalte die Ergebnisse der Analysen darstellt; bei der zweiten Spalte wurde der Gesamtanteil auf 100% extrapoliert, indem die unter „Sonstige“ aufgeführten Anteile weggelassen wurden.

Tab. 3.6.9: Analysen von Oxidproben (Werte in Gew%)

Analyse-Nr.	406/98		407/98		408/98		Mittelwert aus 406/98 407/98 408/98
	Rinne 0,8 m		Rinne 2,5 m		Rinne 6,5 m		
Al ₂ O ₃	79.6 %	81.6 %	80.5 %	81.6 %	80.1 %	81.5 %	81.6 %
FeO	10.6 %	10.9 %	10.6 %	10.8 %	10.6 %	10.8 %	10.8 %
SiO ₂	7.4 %	7.5 %	7.4 %	7.5 %	7.5 %	7.6 %	7.5 %
MgO	--	--	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %
Sonst.	1.3 %	--	1.3 %	--	1.3 %	--	
Summe	98.9 %	100 %	99.9 %	100 %	99.6 %	100 %	100 %

Mit dem Gemini-Code [17] wurde auf der Basis der Oxidzusammensetzung der rechten Spalte in Tabelle 3.6.9 der temperaturabhängige Feststoffgehalt zwischen Solidus- und Liquidustemperatur berechnet, Tabelle 3.6.10.

Tab. 3.6.10: Berechneter Feststoffanteil in der Oxidschmelze zwischen Solidus und Liquidus

Temp. (°C)	Feststoffanteil in Gew.-%
1600	100
1650	68.1
1700	60.9
1750	53
1800	44.8
1850	32.9
1900	13.6
1950	0

Die Liquidustemperatur liegt nach dieser Rechnung zwischen 1950 und 1900°C.

Eisenausbreitung

Ausgebreitete Eisenmasse

Die ausgebreitete Eisenmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie beträgt 153,8 kg. Das W-Re-Thermoelement, das direkt im Oxidfenster positioniert war, hat 2,5 s nach Schmelzekontakt eine Maximalspannung entsprechend einer Temperatur von 2170 °C erreicht. Bei dieser Temperatur hat eine reine Eisenschmelze eine Dichte von 6470 kg/m³. Aus den vorangegangenen Experimenten hat man jedoch einen Erfahrungswert von 6300 kg/m³ gewonnen, der auch eventuelle Gasanteile berücksichtigt. Daher soll im folgenden auch dieser Wert zugrunde gelegt werden. Somit ergibt sich ein Volumen der ausgebreiteten Eisenschmelze von 0,0244 m³.

Volumenrate

Die Volumen- oder Massenrate wurde nicht gemessen. Sie kann jedoch rechnerisch abgeschätzt werden. Dazu müssen z.T. einige Annahmen gemacht werden. Man kennt die gesamte ausgebreitete Masse von 153,8 kg bei einer vermuteten Dichte von 6300 kg/m³, was ein Volumen von 0,0244 m³ ergibt. Im Eisenbehälter verblieben 0,8 kg Eisen und im dafür vorgesehenen Sumpf des Oxidbehälters wurden 0,3 kg Eisen aufgefangen. Die gesamte Eisenmasse im Tiegel vor Beginn des Abstichs betrug demnach 154,9 kg ein Volumen von 0,0246 m³.

Die entstehende Oxidmenge aus der Thermitreaktion und der Quarzsandzugabe betrug (unter Vernachlässigung der verdampfenden Anteile) 186,6 kg. Zusammen mit den Abschmelzungen aus dem Tiegel wird eine gesamte Masse von 195 kg für die weitere Berechnung angesetzt.

Für das Oxid wird eine Dichte von 2800 kg/m³ geschätzt, somit ergibt sich ein Volumen von 0,0696 m³.

Aus der Videoaufnahme ist kein wesentlicher zeitlicher Unterschied zwischen dem Abstich und dem Beginn der Ausbreitung zu erkennen, da das Sumpfvolumen sehr klein und flach ist.

Die Düse hatte vor dem Experiment einen lichten Durchmesser von 20 mm. Nach dem Experiment wurde (inklusive anhängender Kruste) ein Durchmesser von 25 mm gemessen. Es wird vermutet, daß die Erosion hauptsächlich während des Austritts der Eisenschmelze passierte und sich die Düse auf einen lichten Querschnitt von 27,5 mm aufweitete. Diese Erosion der Düse wird mit einer annähernd quadratischen Aufweitung modelliert.

Ausfließen aus einem Behälter unter Schwerkraft [16]:

Im Gegensatz zum Ausfließen des Oxides aus dem Tiegel, muß im Falle des Eisens berücksichtigt werden, daß zwei Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Dichten den zum Ausfließen nötigen hydrostatischen Druck aufbringen. Für die Ausfließgeschwindigkeit w_a ergibt sich daher annähernd:

$$\frac{\rho_{\text{Eisen}}}{2} w_a^2 = \rho_{\text{Eisen}} \cdot g \cdot z_{\text{Eisen}} + \rho_{\text{Oxid}} \cdot g \cdot (z_{\text{Oxid}} - z_{\text{Eisen}})$$

$$w_a = \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{Oxid}}}{\rho_{\text{Eisen}}} z_{\text{Oxid}} + \left(1 - \frac{\rho_{\text{Oxid}}}{\rho_{\text{Eisen}}}\right) z_{\text{Eisen}}}$$

Das Absenken des Flüssigkeitsspiegels kann vereinfacht mit folgender Formel beschrieben werden:

$$\frac{dt}{dz_{\text{Eisen}}} = \frac{1}{\mu \cdot A_a \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot \frac{-A_z(z_{\text{Eisen}})}{\sqrt{\frac{\rho_{\text{Oxid}}}{\rho_{\text{Eisen}}} z_{\text{Oxid}} + \left(1 - \frac{\rho_{\text{Oxid}}}{\rho_{\text{Eisen}}}\right) z_{\text{Eisen}}}}$$

A_a = Öffnungsquerschnitt = f ($d_{\text{Düse}}$)

z = Höhe des Flüssigkeitsspiegels

$A_z = f(z)$ = Behälterquerschnitt in Abhängigkeit der Höhe z

μ = Ausflußzahl = 0,95.

In dieser Gleichung kann z_{Oxid} auch als Funktion von z_{Eisen} ausgedrückt werden, da das Oxidvolumen konstant bleibt. Aus der Integration dieser Formel erhält man dann den zeitlichen Verlauf der Eisenspiegelabsenkung vom maximalen Füllstand bis Null, und daraus den entsprechenden Verlauf des Oxidspiegels. Mit beiden läßt sich dann wieder die Ausfließgeschwindigkeit über der Zeit ermitteln. Die Volumenrate wird nach folgender Formel errechnet.

Volumenrate $\dot{V} = \mu \cdot A_a \cdot w_a$

Nach der Rechnung ermittelt man eine anfängliche Volumenrate des Eisens von $\dot{V}=1$ l/s bzw. einen Massenstrom von $\dot{m}=6,3$ kg/s. Die Auströmdauer ist zu $t_e=20,1$ s berechnet worden. Während dieser Zeit steigert sich der Volumenstrom auf $\dot{V}=1,4$ l/s, Abbildung 3.6.13.

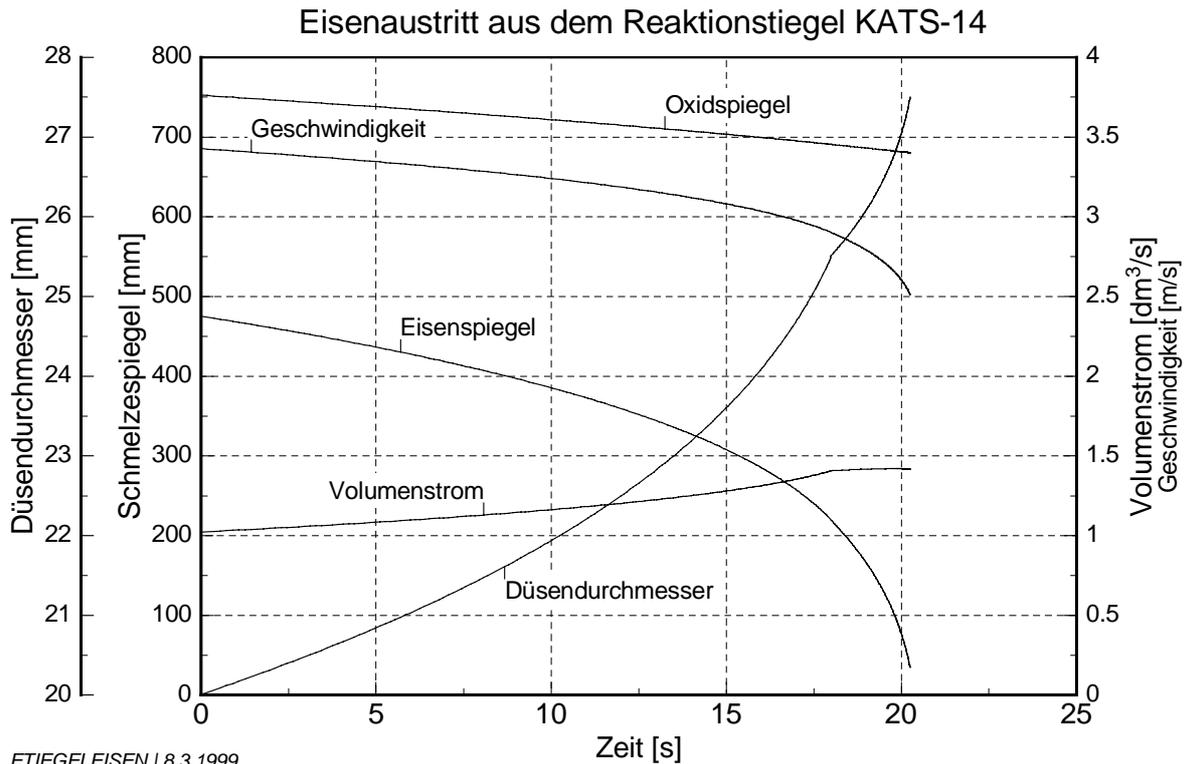


Abb. 3.6.13: Ausfließen der Eisenschmelze aus dem Tiegel bei wachsendem Düsendurchmesser

Detektion der Eisenschmelzenausbreitung durch die NiCr-Ni-Thermoelemente

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Die folgende Tabelle 3.6.11 gibt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten wieder.

Tab. 3.6.11: Detektionszeitpunkte (s) der Thermoelemente im Eisenkanal (Zeitnullpunkt ist der Abstich der Schmelze).

Länge (m) \ Höhe (mm)	Höhe (mm)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	2.4	4.7	7.6	10.7	14.1	18.3	22.9	27.8	33.7	()	()

Detektion der Eisenschmelzenausbreitung aus der Videoaufnahme

Die Videoaufzeichnung ist über die Blitzlampen mit der Datenaufzeichnung synchronisiert.

Tab. 3.6.12: Ausbreitung der Schmelzefront

Zeit (s)	Weg (m)						
0	0	12	4.62	24	7.36	34	9.11
4	1.89	14	5.11	26	7.80	36	9.38
5	2.33	16	5.69	27	8.0	38	9.51
6	2.66	18	6.07	29	8.40	40	9.62
8	3.32	20	6.56	31	8.76		
10	4.0	22	6.96	33	9.04		

Das Ende der Ausbreitung war bei 9,62 m erreicht. Bei der Nachuntersuchung wurde eine Endlänge von 9,4 m gemessen. Der Unterschied rührt aus der Schrumpfung des gesamten Eisenregulus beim Abkühlen her.

Temperaturmessung im Eisenkanal

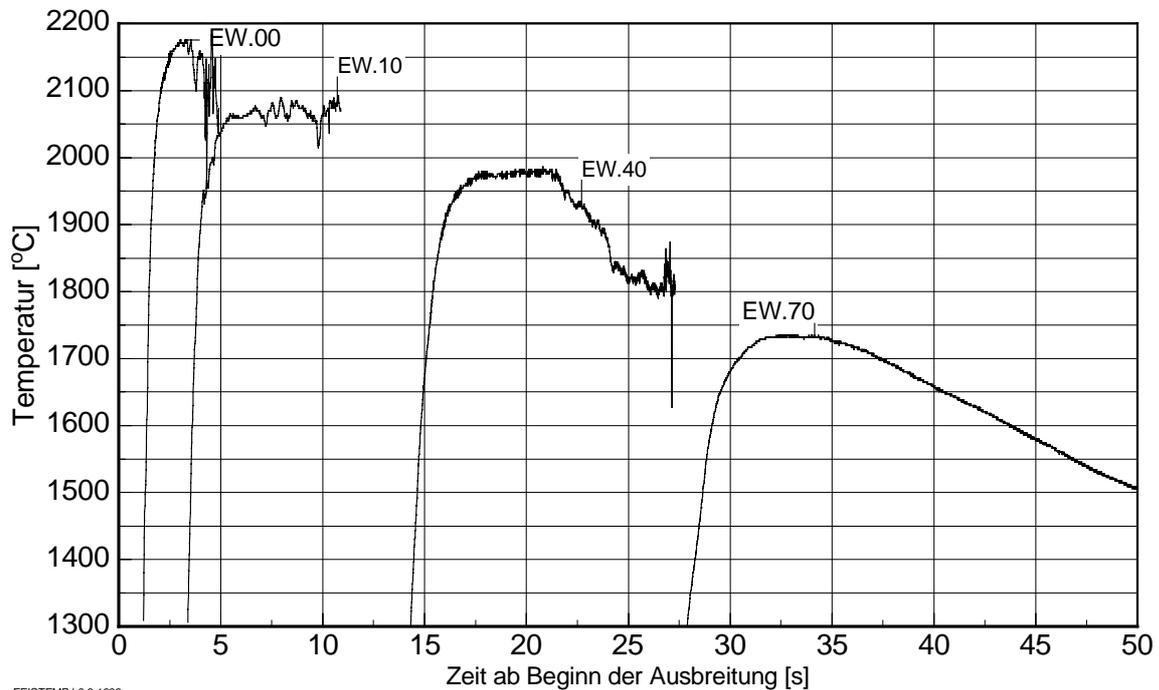
In Tabelle 3.6.13 und in Abbildung 3.6.14 sind die Temperaturmessungen im Eisenkanal dargestellt.

Tab. 3.6.13: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Eisen	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bezogen auf Beginn der Ausbreitung)	Bemerkungen
E.W.00.05	2170°C	2.5 s	
E.W.10.05	2090°C	5.5 s	
E.W.40.05	1985°C	17.5s	
E.W.70.05	1735°C	32 s	

Anfangstemperatur der sich ausbreitenden Eisenschmelze: 2170 °C.

KATS-14: Temperaturmessung der Eisenschmelze mit W/Re

**Abb. 3.6.14:** Temperaturmessungen im Eisenkanal

Gesamtdarstellung der Eisenausbreitung

Im folgenden Diagramm, Abbildung 3.6.15, ist der Weg-Zeit-Verlauf der Oxid ausbreitung anhand der Videoauswertung und der Thermoelemente dargestellt. Die Signale der W-Re-Thermoelemente sind in ihrem zeitlichen Verlauf wiedergegeben, jedoch ohne Bezug zur y-Achse des Diagramms. Es soll nur ein Eindruck von der zeitlichen Reaktion dieser Meßinstrumente auf den Schmelzenkontakt vermittelt werden.

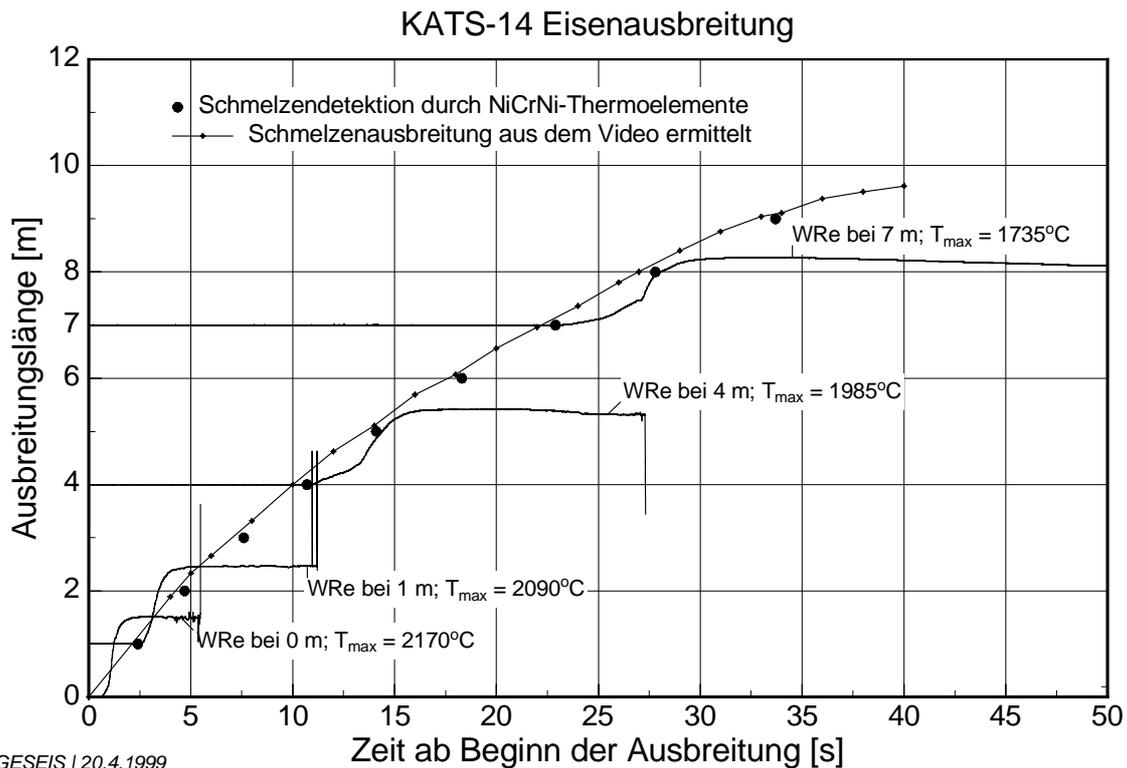


Abb. 3.6.15: Weg-Zeit-Verlauf der Eisenausbreitung

Schmelzeverteilung im Eisenkanal

Der gesamte Eisenregulus wurde meterweise zerschnitten und gewogen. Das erste Stück ist um den Einlaufbereich mit der Schräge, auf der kein Eisen verblieb, verkürzt. Das letzte Stück reicht von der „9 m“-Marke bis zum Ende der Ausbreitung bei etwa 9,4 m. Die bedeckte Fläche wurde graphisch ermittelt, da zum Ende der Eisenzunge hin nicht mehr der gesamte Kanalquerschnitt bedeckt wird. Aus Masse und Dichte kann das Volumen berechnet werden, das, dividiert durch die Fläche, die durchschnittliche Höhe des Eisenstückes ergibt.

Die in der Tabelle 3.6.14 angeführte Dichte 1 von 6460 kg/m^3 bezieht sich auf die vom Thermoelement E.W.00.05 gemessene Temperatur von 2170°C , die Dichte 2 von 6850 kg/m^3 paßt zur Temperatur 1735°C , welche von der Meßstelle E.W.70.05 ermittelt wird. Die hieraus ermittelten Daten sind in dem unten stehenden Diagramm, Abbildung 3.6.17, dargestellt.

Die Eisenzunge breitete sich der Videoaufnahme zufolge bis 9,6 m aus. In der nachfolgenden Tabelle jedoch, die die Ergebnisse der Nachuntersuchung wiedergibt, ist das Ende der Eisenausbreitung mit 9,4 m angegeben. Dieser Unterschied entsteht durch das Schrumpfen des Eisenregulus beim Abkühlen.

Tab. 3.6.14: Verteilung der Eisenschmelze nach der Ausbreitung

Abschnitt [m]	Fläche [m ²]	Masse [kg]	Dichte 1 [kg/dm ³]	Ber. Höhe1 [mm]	Dichte 2 [kg/dm ³]	Ber. Höhe2 [mm]
0.125 bis 1	0.131	11.8	6.46	13.9	6.85	13.1
1 bis 2	0.15	18.3	6.46	18.9	6.85	17.8
2 bis 3	0.15	17.8	6.46	18.4	6.85	17.3
3 bis 4	0.15	19.2	6.46	19.8	6.85	18.7
4 bis 5	0.15	26.1	6.46	26.9	6.85	25.4
5 bis 6	0.15	18.7	6.46	19.3	6.85	18.2
6 bis 7	0.15	12.4	6.46	12.8	6.85	12.1
7 bis 8	0.15	11.2	6.46	11.6	6.85	10.9
8 bis 9	0.15	13.7	6.46	14.1	6.85	13.3
9 bis 9.4	0.06	4.6	6.46	11.9	6.85	11.2



Abb. 3.6.16: Photographie des Eisenstückes von 9 bis 9,4 m

Erosion im Eisenkanal

Tab. 3.6.15: Erosionstiefen längs des Eisenkanals

Abschnitt [m]	Erosionstiefe [mm]
0.125 bis 1	6
1 bis 2	6
2 bis 3	4 – 5
3 bis 4	3
4 bis 5	2
5 bis 6	1
6 bis 7	1
7 bis 8	<1
8 bis 9	0
9 bis 9.4	0

Im folgenden Diagramm ist zum einen die Erosionstiefe der Cordieritplatten wiedergegeben (wobei die Nulllinie die ursprüngliche Oberfläche der Platten wiedergibt) und zum anderen die nach oben stehender Tabelle ermittelte rechnerische Eisendicke in dem erodierten Untergrund dargestellt.

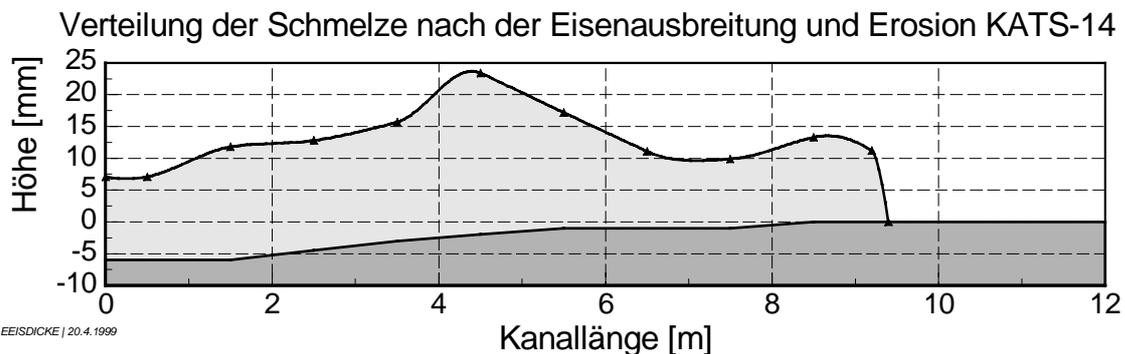


Abb. 3.6.17: Verteilung der Eisenschmelze nach der Ausbreitung

Analyse von Proben

Es wurden keine Proben analysiert.

3.7 KATS-15 “2-dim Ausbreitung mit niedriger Volumenrate auf Cordierit, trocken“

Versuchsdatum: 30.6.98

Versuchsaufbau

Abb. 3.7.1: Reaktionstiegel und Stoffeinsatz

	Thermitmischung: (10 Al SSH)	30 Beutel a 10,4 kg → 312 kg
	Langsam reagierendes Thermit (EF50):	6,0 kg
	Zuschlag: Quarzsand	20 kg

Abb. 3.7.2: Tiegelinnenmaße

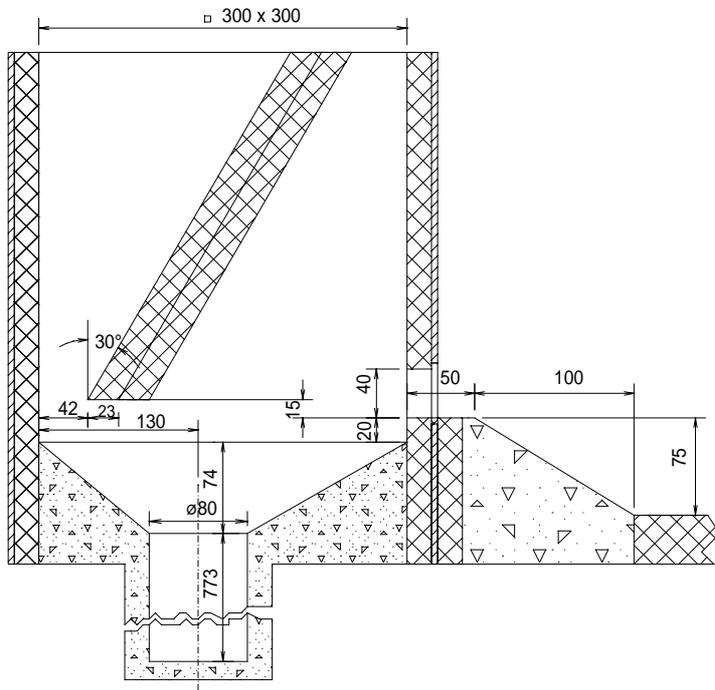
<p> $\alpha = 16,5^\circ$ $\beta = 24,6^\circ$ </p>	<p>Tiegelvolumen:</p> <p>$z = 0$ bis 220 mm</p> $V(z) = \frac{\pi}{3} \tan^2 \alpha \cdot (z + 0,1185m)^3 - 1,53 \cdot 10^{-4} m^3$ <p>$z \geq 220$ mm</p> $V(z) = \frac{\pi}{3} \tan^2 \beta \cdot (z - 1,5 \cdot 10^{-3} m)^3 + 1,12 \cdot 10^{-3} m^3$ <p>Tiegelquerschnitt:</p> <p>$z = 0$ bis 220 mm</p> $A(z) = \pi \tan^2 \alpha \cdot (z + 0,1185m)^2$ <p>$z \geq 220$ mm</p> $A(z) = \pi \tan^2 \beta \cdot (z - 1,5 \cdot 10^{-3} m)^2$
--	---

Düsen-Ø 20 mm (die Düse unter dem Tiegel ist das durchflußbegrenzende Bauteil)

Abb. 3.7.3: Trennung von Oxid und Eisen

	Oxidbehälter- (B × T):	300 × 300 mm
	Oxidfenster (H × B):	40 × 216 mm
	Sumpfvolumen	8,7 dm ³
	Oxidausbreitungsfläche (B × L):	1,80 × 2,80 m
	Substrat:	Cordierit
	Eisenbehälter- (B × T):	200 × 180 mm
	Eisenfenster (H × B):	40 × 120 mm
	Sumpfvolumen	0,6 dm ³
	Eisenausbreitungsfläche (B × L):	1,80 × 2,80 m
	Substrat:	Cordierit

Abb. 3.7.4: Oxidbehälter



Oxidbehälter-

(B × T):

300 × 300 mm

Oxidfenster (H × B):

40 × 216 mm

Oxidrampe

Breite: 245 mm

Sumpfvolumen:

(bis Unterkante

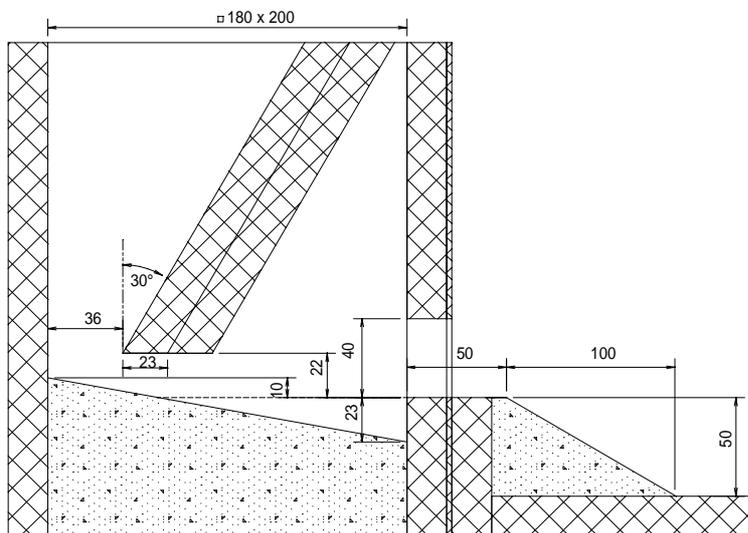
Fenster)

8,7 Liter

Oxidausbreitungsfläche

(B × L): 1,80 × 2,80 m

Abb. 3.7.5: Eisenbehälter



Eisenbehälter-

(B × T):

200 × 180 mm

Eisenfenster (H × B):

40 × 120 mm

Eisenrampe

Breite: 135 mm

Sumpfvolumen:

(bis Unterkante

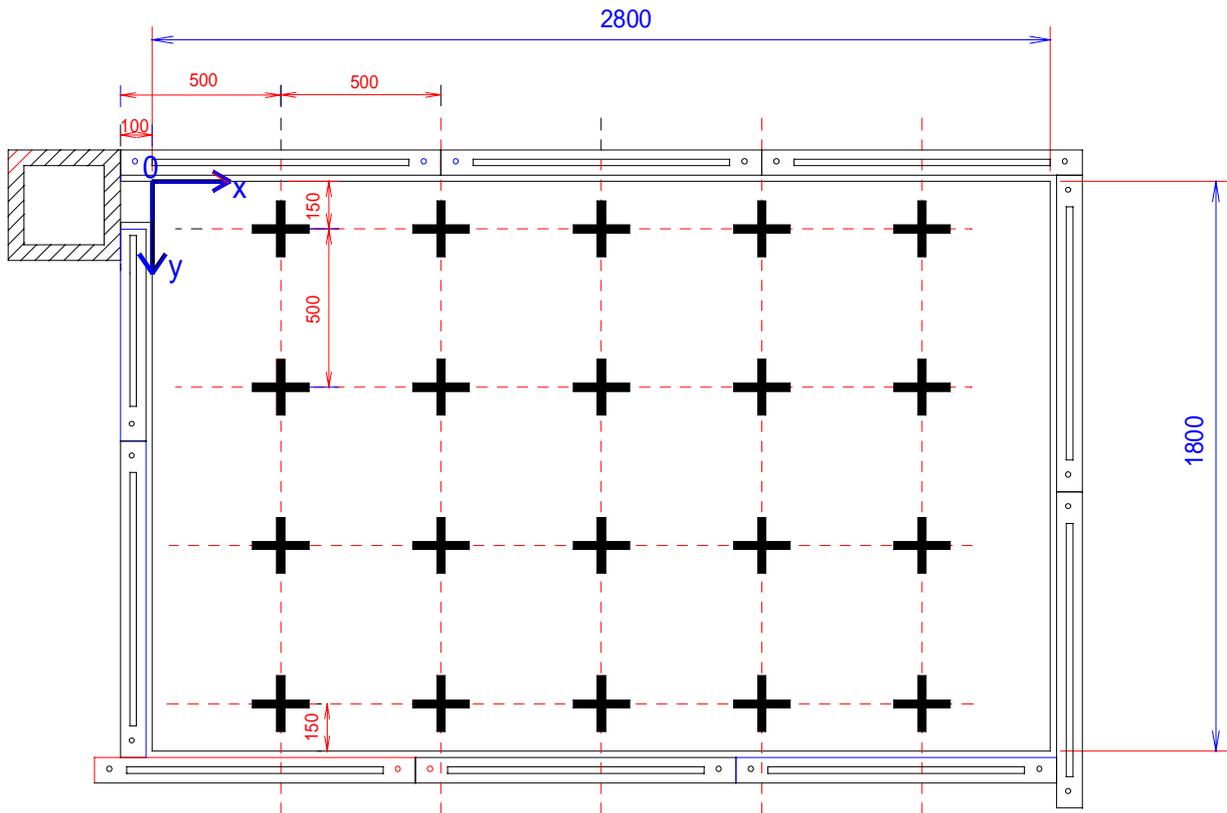
Fenster)

0,6 Liter

Eisenausbreitungs-

fläche (B × L):

1,80 × 2,80 m



✚ Marking

Abb. 3.7.6: Ausbreitungsfläche für Eisen und Oxid

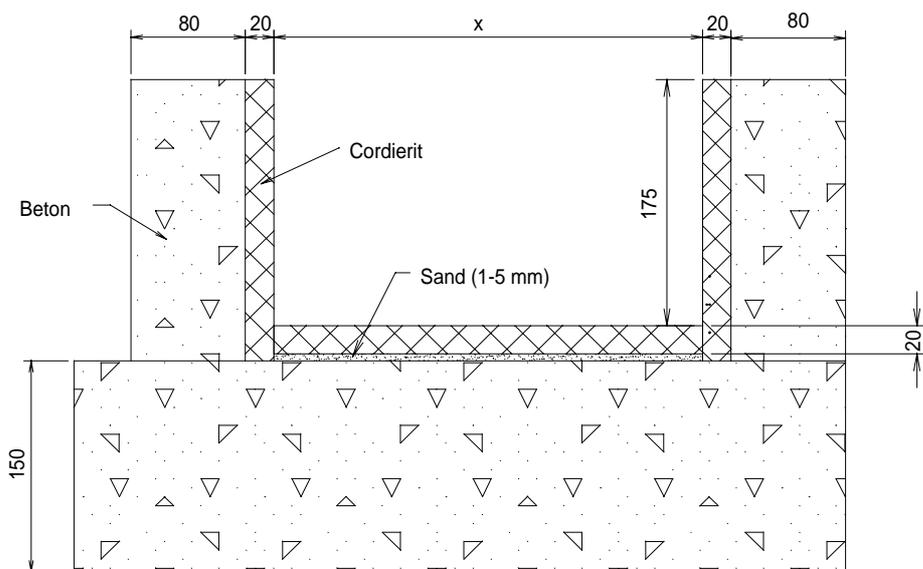


Abb. 3.7.7: Querschnitt durch die Ausbreitungsfläche

Instrumentierung

Temperaturmessung mit W-Re-Tauchthermoelementen

Die W-Re-Thermoelemente sind mit einer Schutzkappe aus 1/10 mm Stahl umgeben. Die Messstelle befindet sich 5 mm hinter dieser Kappe. Die Bezeichnung O.W.xx.05 bedeutet, dass der Boden der Schutzkappe 5 mm über der Ausbreitungsfläche lag, d. h. die Messstelle 10 mm darüber.

Tab. 3.7.1: Temperaturmessung der Oxidschmelze

Oxid	Längenposition (X)	Breitenposition (Y)	Höhe über Boden
O.W.0.1.05	-0,1 m (Fenster)	~ 125 mm	10 mm
O.W.1.1.05	0,14 m	~ 50 mm	10 mm / Stahlkappe seitlich entfernt

Tab. 3.7.2: Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisen	Längenposition (X)	Breitenposition (Y)	Höhe über Boden
E.W.0.1.05	-0,1 m (Fenster)	~ 75 mm	10 mm
E.W.1.1.05	0,17 m	~ 35 mm	10 mm

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit IR-Video

Die Oberflächentemperatur der Oxidschmelze wurde mit einer IR-Kamera thermographisch bestimmt.

Schmelzedetektion in den Ausbreitungskanälen mit NiCr-Ni-Thermoelementen

Die Mantelthermoelemente haben \varnothing 1 mm in TI-Ausführung und werden in einem Edelstahlröhrchen \varnothing 4×1 mm geführt. Die Thermoelemente für den Oxidkanal ragen 2-3 mm aus dem Hüllrohr heraus, die für den Eisenkanal schließen bündig ab.

Tab. 3.7.3: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente auf der Ausbreitungsfläche für Oxid

Oxid	Längenposition (X) [mm]	Breitenposition (Y) [mm]	Höhe über dem Boden [mm]
O.K.1.1.05	140	100	5
O.K.1.2.05	140	590	5
O.K.1.3.05	140	1100	8
O.K.1.4.10	140	1600	13
O.K.1.1.35	140	90	35
O.K.2.1.05	675	90	5
O.K.2.2.05	675	590	7
O.K.2.3.05	675	1110	7
O.K.2.4.10	675	1580	10
O.K.2.1.45	675	80	45
O.K.3.1.05	1150	85	5
O.K.3.2.05	1150	580	8
O.K.3.3.05	1150	1095	8
O.K.3.4.10	1150	1595	11
O.K.3.2.25	1150	590	25
O.K.4.1.05	1605	100	5
O.K.4.2.05	1605	600	7
O.K.4.3.05	1605	1090	7
O.K.4.4.05	1605	1590	6
O.K.4.1.45	1605	90	45
O.K.5.1.05	2140	80	5
O.K.5.2.05	2140	560	7
O.K.5.3.05	2140	1090	7
O.K.5.4.05	2140	1580	5
O.K.5.2.25	2140	570	25
O.K.6.1.05	2675	90	5
O.K.6.2.05	2675	580	5
O.K.6.3.05	2675	1080	5
O.K.6.4.05	2675	1580	5

Tab. 3.7.4: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente auf der Ausbreitungsfläche für Eisen

Eisen	Längenposition (X) [mm]	Breitenposition (Y) [mm]	Höhe über dem Boden [mm]
E.K.1.1.05	170	80	7
E.K.1.2.10	170	590	10
E.K.1.3.15	170	1100	15
E.K.1.4.10	170	1590	10
E.K.2.1.05	640	100	5
E.K.2.2.05	640	590	7
E.K.2.3.10	640	1110	10
E.K.2.4.10	640	1580	10
E.K.3.1.05	1170	80	5
E.K.3.2.05	1170	590	7
E.K.3.3.10	1170	1090	10
E.K.3.4.10	1170	1610	10
E.K.4.1.05	1620	95	5
E.K.4.2.05	1620	610	7
E.K.4.3.10	1620	1100	10
E.K.4.4.10	1620	1600	10
E.K.5.1.05	2150	90	7
E.K.5.2.05	2150	590	9
E.K.5.3.10	2150	1100	12
E.K.5.4.10	2150	1610	12
E.K.6.1.05	2600	85	5
E.K.6.2.10	2600	590	10
E.K.6.3.10	2600	1090	13
E.K.6.4.10	2600	1590	13

Schmelzedetektion am Thermittiegel

Unterhalb der Düse befinden sich zwei Thermoelemente zur Detektion des Schmelzeaustritts aus dem Tiegel (TA1 und TA2).

Zeitlicher Ablauf des Experiments

Zündung vom PC

- TA1 und /oder TA2 detektieren 31.25 s nach Zündung den Schmelzeabstich
- Start der Aufzeichnung der Signale (1 kHz; 256 s; 0 s Pretime)
- Blitze für den Eisenkanal und Oxidkanal zünden
- Die Schmelze läuft durch das schwenkbare Rohr zuerst in den Eisenbehälter und ohne weitere Rückhaltung durch das offene Eisenfenster direkt in den Eisenkanal.
- Start einer Zeitverzögerung von 22 s
- Das Rohr wird umgeschwenkt („Rinne fahren“: 53.38 s nach Zündung)
- Aufzeichnung der Infrarotkamera und des Pyrometers startet
- Die Schmelze läuft in den Oxidbehälter, füllt das Sumpfvolumen und tritt dann durch das offene Oxidfenster in den Oxidkanal ein (Beobachtung aus Infrarotfilm: 1.4 s, Beginn der Oxidausbreitung; also ~54.8 s nach Zündung)

Oxidausbreitung

Ausgebreitete Oxidmasse

Die ausgebreitete Oxidmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 144 kg. Als höchste Anfangstemperatur wurde vom W-Re-Thermoelement O.W.01.05, das direkt im Oxidfenster positioniert war, ein Wert von 2030 °C erreicht. Bei dieser Temperatur kann eine Dichte von $\sim 2800 \text{ kg/m}^3$ zugrunde gelegt werden. Damit ergibt sich ein ausgebreitetes Volumen der Oxidschmelze von $0,0514 \text{ m}^3$.

Volumenrate Oxid

Das Tiegelgewicht wurde von den Wägezellen während des gesamten Reaktions- und Ausfließvorgangs gemessen. Berechnet man die Gewichtsabnahme während des Ausfließens der Schmelze und differenziert diese, erhält man den Massenstrom, der für Eisen und Oxid getrennt mit der jeweiligen Dichte in einen Volumenstrom umgerechnet werden kann. Dieser Volumenstrom entspricht theoretisch, mit einem kleinen Zeitversatz zum Füllen der Behältersümpfe, dem Strom der Schmelzen auf die jeweiligen Ausbreitungsflächen.

Tiegelausfluß von KATS-15

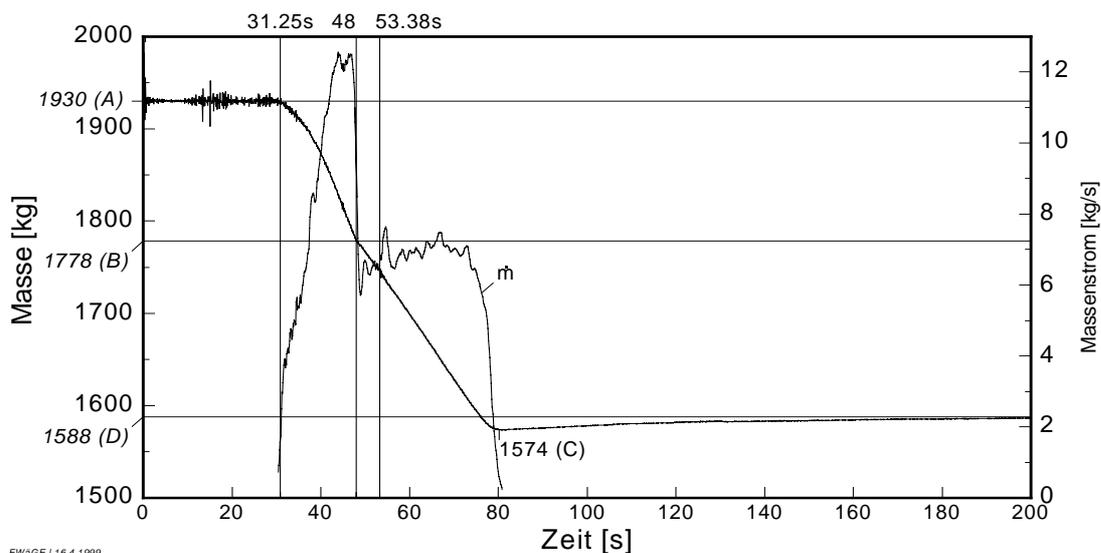


Abb. 3.7.8: Zeitlicher Massenstrom aus dem Reaktionstiegel

Abbildung 3.7.8 zeigt die von den Wägezellen gemessene Gewichtsabnahme sowie den daraus errechneten Massenstrom. Der zeitliche Nullpunkt ist die Zündung. Der Abstich des Tiegels wurde bei 31,25 s detektiert. Etwa bei 48 s ist ein Knick in der Kurve auszumachen, der nur durch den Wechsel von Eisen auf Oxid hervorgerufen werden kann. Der Befehl zum Umschwenken des Trichters auf die Oxidseite wurde 53,38 s nach Zündung erteilt. Aus der Infrarotaufnahme läßt sich der Beginn der Oxid Ausbreitung auf 54,8 s festlegen.

Die Anfangsmasse des Tiegels war 1930 kg (A). Bis zum Knick (1778 kg; B) sind 152 kg ausgetreten. Die nach dem Experiment gefundene Eisenmasse beträgt aber nur 145,5 kg. Nach ca. 81 s ist eine Talsohle von 1574 kg (C) erreicht. Die Masse steigt danach aber wieder an, was sich mit Temperatureffekten erklären lässt, welche die Messung leicht verfälscht haben. Nach etwa 200 s ist die Masse wieder auf 1588 kg (D) gestiegen.

Zur Korrektur der Eisenmasse ist ein Faktor von $145,5 / (A-B) = 0,96$ nötig. Aus der Korrektur $(A-C) * 0,96$ ergibt sich eine gesamte Masseabnahme von 342 kg. Die korrigierte Talsohle liegt dann bei 1588 kg. Die durch Differenzieren errechneten Massen- bzw. Volumenströme werden mit diesem Faktor (0,96) korrigiert.

In Abbildung 3.7.9 sind die ermittelten Volumenströme dargestellt. Für das Eisen wurde mit einer Dichte von 6300 kg/m^3 gerechnet, für Oxid mit 2800 kg/m^3 .

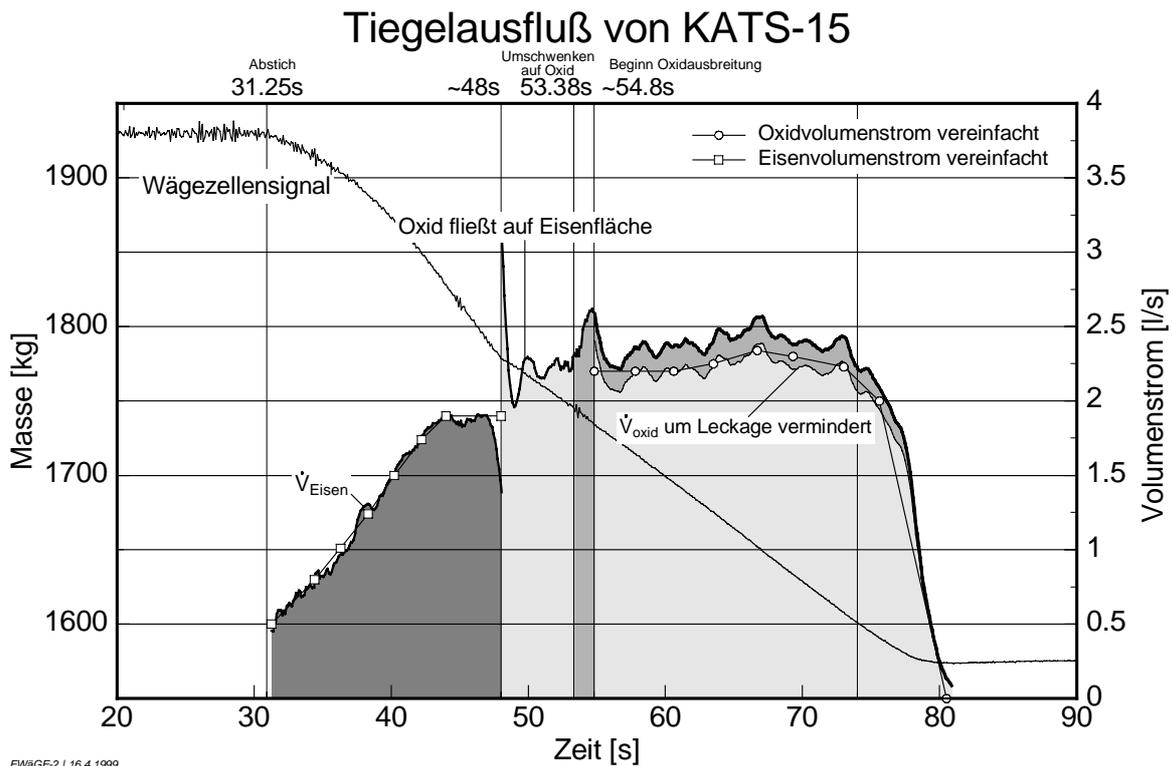


Abb. 3.7.9: Aus dem Massenstrom berechnete Volumenströme für Eisen und Oxid

Aus der Aufnahme einer Videokamera, die den Abgießvorgang beobachtete, ist zu erkennen, daß der Trichter des Umlenkrohres etwa zeitgleich mit dem Beginn des Oxidaustritts aus dem Tiegel überlief. Als das Rohr seine Neigung änderte, um die Oxidschmelze dem Oxidbehälter zuzuleiten, wurde eine Teilmenge durch das Überlaufen in den Eisenbehälter abgegossen. Welche Menge durch diese „Leckage“ verloren ging, wird durch die Wägezellen nicht erfaßt. Bekannt ist nur die Oxidmasse, die auf der Oxidfläche ausgebreitet wurde. Durch einen weiteren Korrekturfaktor wurde der für die Ausbreitung bedeutende Volumenstrom errechnet. Das Integral unter dieser Kurve entspricht nun $0,0514 \text{ m}^3$ bzw. 144 kg .

Die durch Differenzieren ermittelten Volumenstromkurven sind auch nach mehrmaligem Glätten noch durch große Schwankungen gekenn-

zeichnet. In Tabelle 3.7.5 ist der Oxidvolumenstrom mit wenigen Punkten grob wiedergegeben.

Tab. 3.7.5: Zeitlicher Volumenstrom für die Oxidschmelze

Zeit ab der Zündung (s)	Zeit ab Beginn der Oxidausbreitung (s)	Oxidvolumenstrom (l/s) vereinfacht
54.8	0	2.2
57.8	3.0	2.2
60.6	5.8	2.2
63.5	8.7	2.25
66.7	11.9	2.34
69.3	14.5	2.3
73	18.2	2.23
75.6	20.8	2
80.5	25.7	0

Oxidschmelzenausbreitung

Die Oxidschmelze hat sich zunächst der Einströmrichtung folgend entlang der langen Seite der Ausbreitungsfläche ausgebreitet, Abbildungen 3.7.12 und 3.7.13. Es bildeten sich frühzeitig (~10 s) mitschwimmende Krusten, die schließlich an der Wand oder am Boden festhafteten (15 s). Die Ausbreitung setzte sich trotzdem unverzögert fort, indem an mehreren Stellen die Krusten aufbrachen und die Schmelze sich von diesen Punkten ausgehend annähernd kreisförmig ausbreitete. In der letzten Phase der Ausbreitung (ab 25 s) bilden sich immer dünner auslaufende und langsam vorankriechende Schmelzefinger aus. Die Schmelze hat, bis auf einen einzelnen Finger, die gegenüberliegenden Wände der Ausbreitungsfläche nicht erreicht.

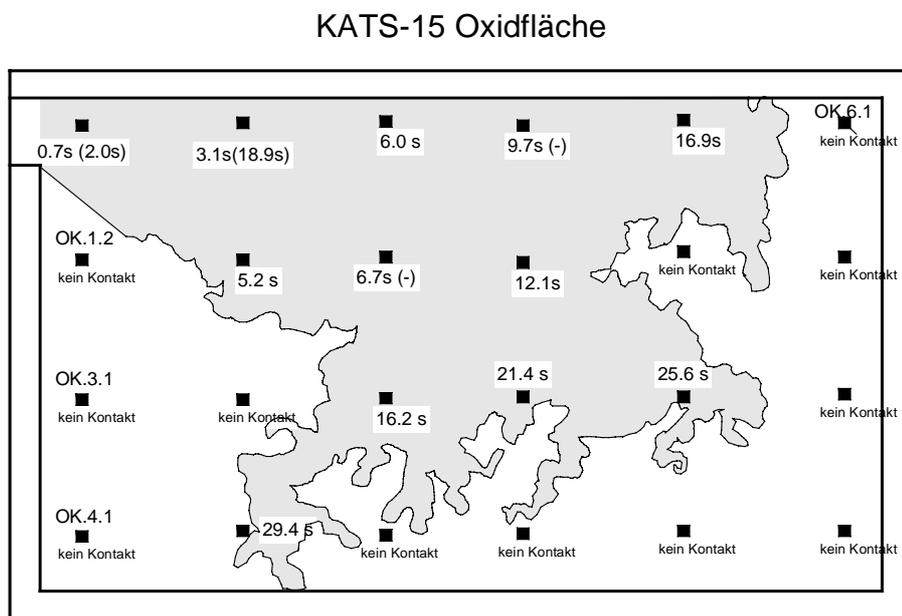
Die zweidimensionale Darstellung der zeitlichen Ausbreitung wurde aus den Videoaufzeichnungen und den NiCr-Ni-Thermoelementsignalen gewonnen. Aus der Videoaufzeichnung können aus den Umrissen der sich

ausbreitenden Schmelze die bedeckten Flächen berechnet werden, sie sind zeitabhängig in Tabelle 3.7.6 und Abbildung 3.7.11 dargestellt.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Abbildung 3.7.10 zeigt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten. Der Bezugszeitpunkt Null ist dabei der Beginn der Ausbreitung, der nach den Videoaufzeichnungen auf 1,4 s nach dem Umschwenken des Umlenkrohres bestimmt wurde, bzw. 54,8 s nach der Zündung, bzw. 23,6 s nach dem Abstich. Die Werte in Klammern beziehen sich auf die in höheren Positionen angebrachten Thermoelemente.

Die grau unterlegte Fläche gibt die maximale Ausbreitung der Oxidschmelze wieder.



FOXIDFL&CHE | 22.4.1999

Abb. 3.7.10: Zeitliches Ansprechen der NiCr-Ni-Thermoelemente

Schmelzenausbreitung aus Infrarot-Videoaufnahme

Aus der Videoaufzeichnung können aus den Umrissen der sich ausbreitenden Schmelze die bedeckten Flächen berechnet werden, sie sind zeitabhängig in Tabelle 3.7.6 und Abbildung 3.7.11 dargestellt.

Tab. 3.7.6: Zeitliche Flächenbedeckung der Oxidschmelze

Zeit ab Beginn der Ausbreitung [s]	Bedeckte Fläche [m ²]
0	0
2	0.2
5	0.55
10	1.05
15	1.43
20	1.83
25	2.18
30	2.39
42	2.49

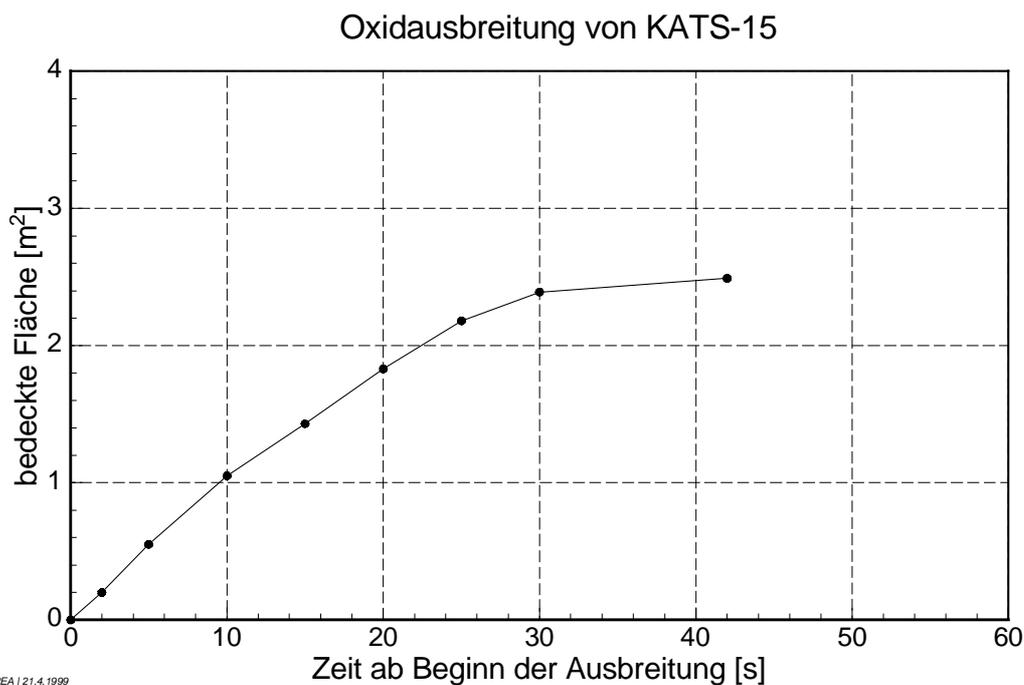


Abb. 3.7.11: Zeitliche Flächenbedeckung der Oxidschmelze

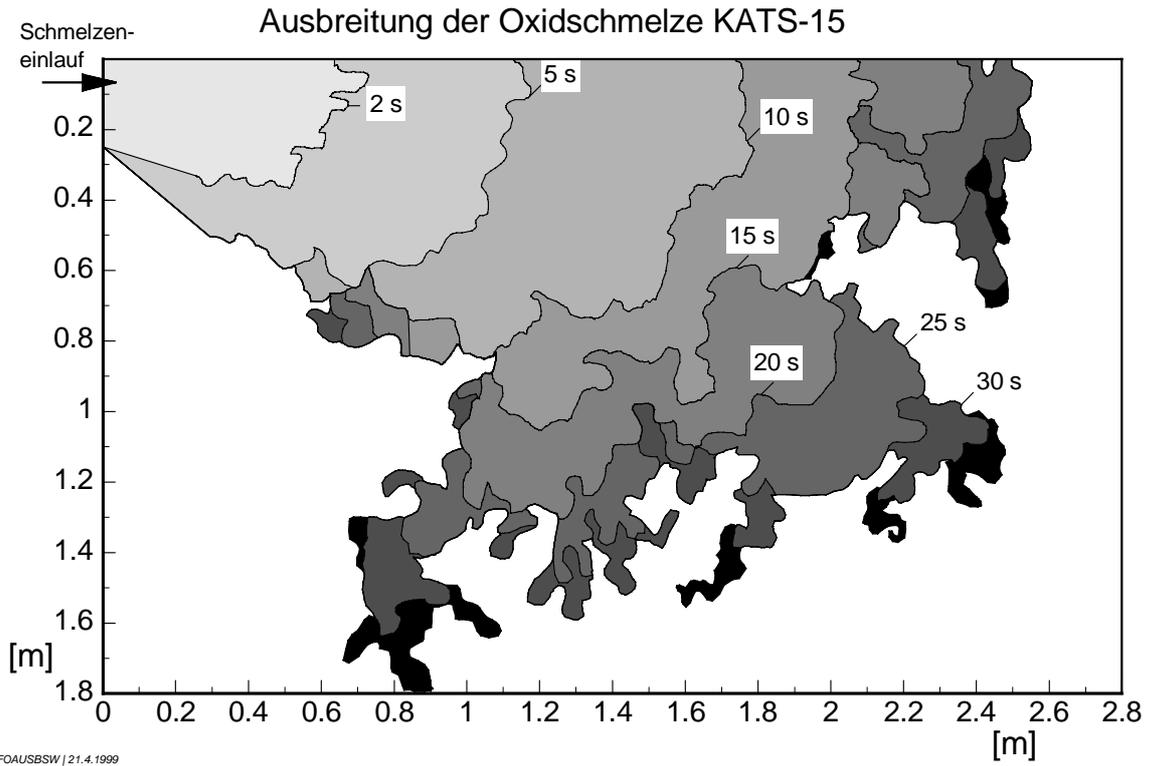
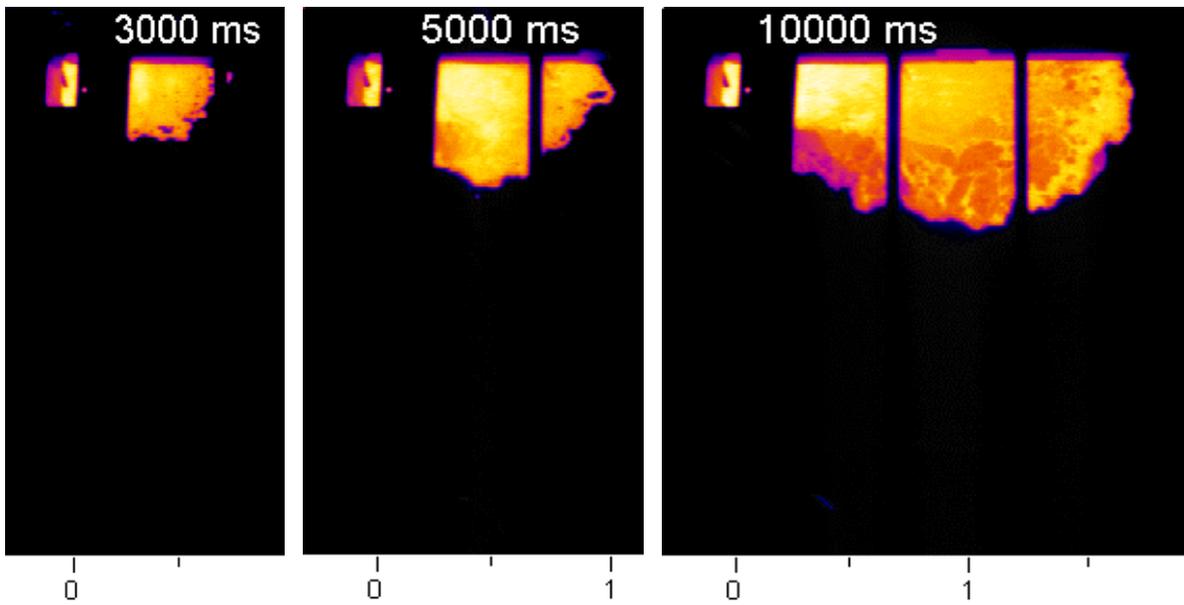


Abb. 3.7.12: Zeitliches Ausbreiten der Oxidschmelze



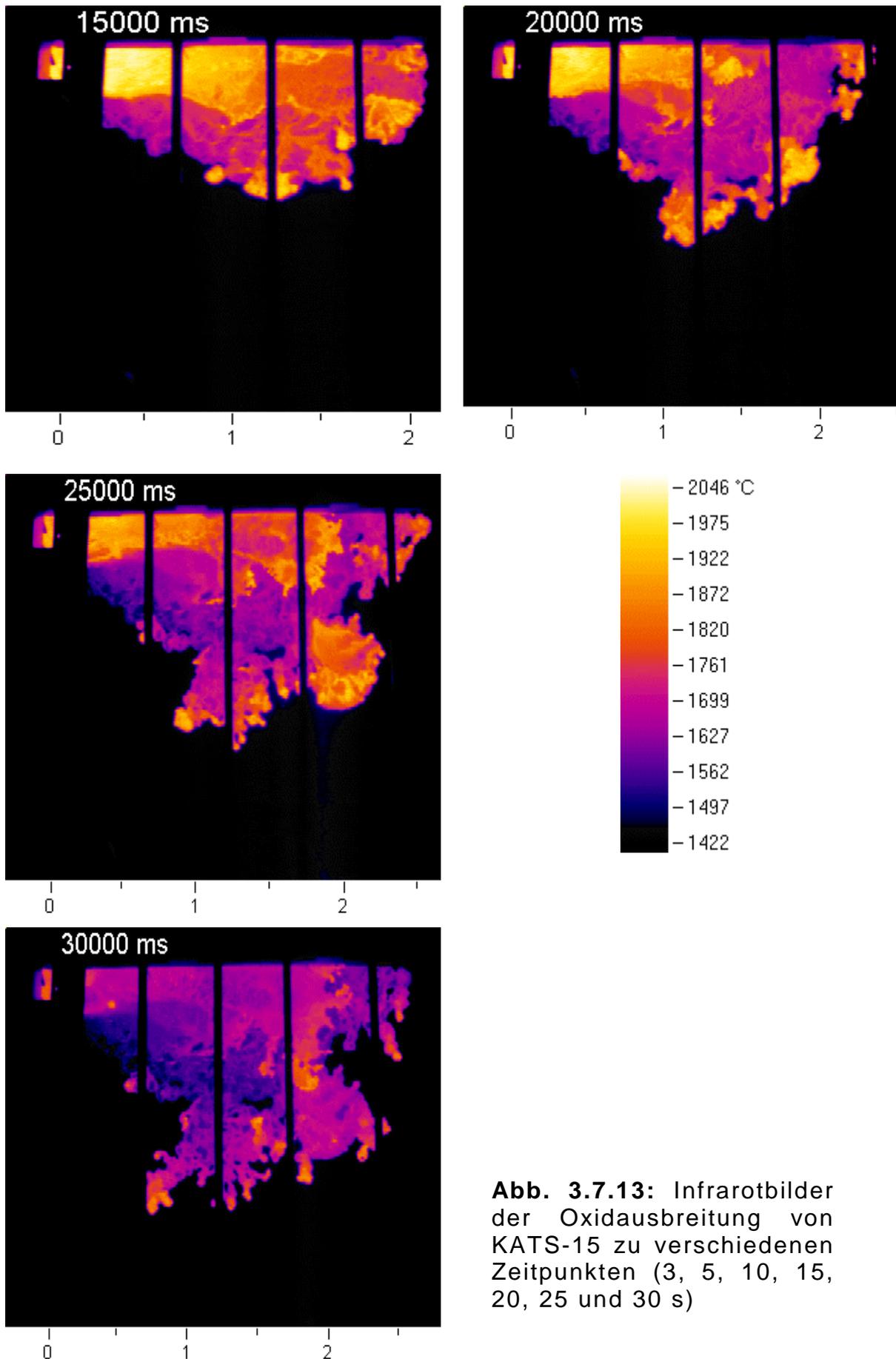


Abb. 3.7.13: Infrarotbilder der Oxid ausbreitung von KATS-15 zu verschiedenen Zeitpunkten (3, 5, 10, 15, 20, 25 und 30 s)

Temperaturmessung im Oxidkanal

In Tabelle 3.7.7 und in Abbildung 3.7.14 sind die Temperaturmessungen im Oxidkanal aufgeführt. Für die Nachrechnungen und weiteren Auswertungen kann von einer Anfangstemperatur zu Beginn der Schmelzenausbreitung von 2030 °C ausgegangen werden.

Tab. 3.7.7: Temperaturmessungen auf der Ausbreitungsfläche für Oxid

Oxid	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bezogen auf Beginn der Ausbreitung)	Bemerkungen
O.W.0.1.05	2032°C	4.7 s	
O.W.1.1.05	2025°C	4.8 s	

Temperaturmessung mit Infrarot-Videokamera

Die von den W-Re-Thermoelementen gemessenen Temperaturen werden von der Infrarotvideoaufnahme bestätigt.

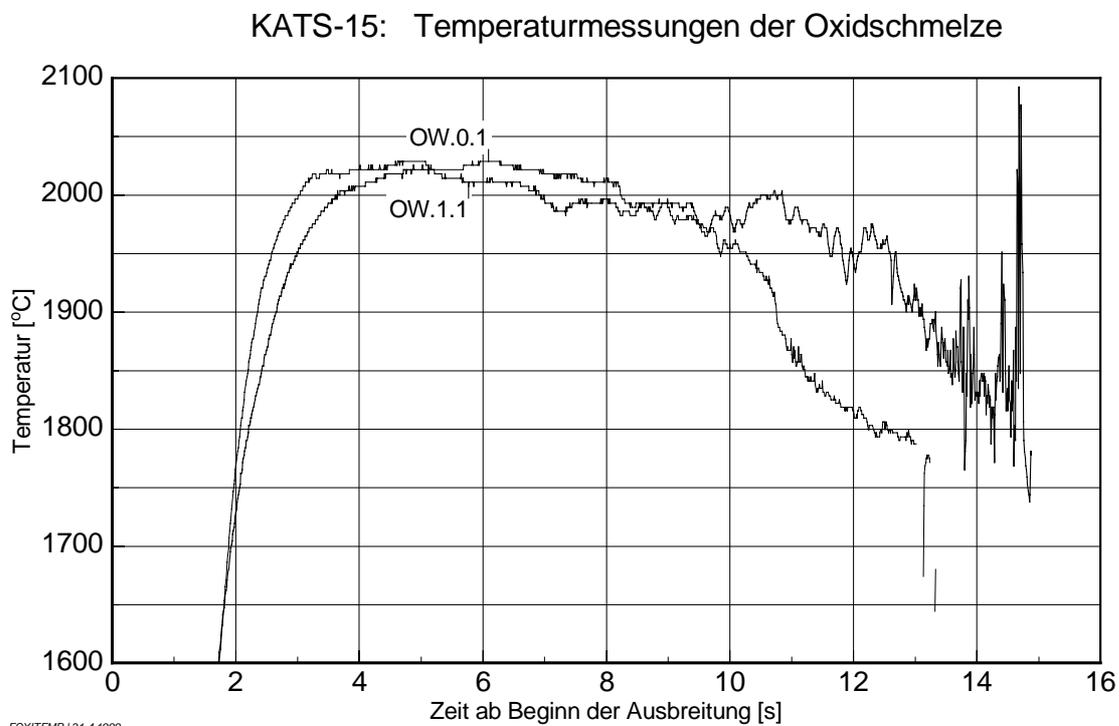


Abb. 3.7.14: Temperaturmessungen auf der Ausbreitungsfläche für Oxid Schmelzeverteilung

Die Dicke der erstarrten Oxidschicht wurde an einer Vielzahl von Stellen ausgemessen (> 100 Einzelmessungen). Abbildung 3.7.15 gibt einen Überblick über die zu Bereichen mittlerer Dicke zusammengefaßten Zonen.

Diese mittlere Dicke ignoriert dabei, daß z.T. einzelne Erhebungen 10 bis 15 mm über das Grundniveau herausragen. Es handelt sich dabei zumeist um Hohlblasen.

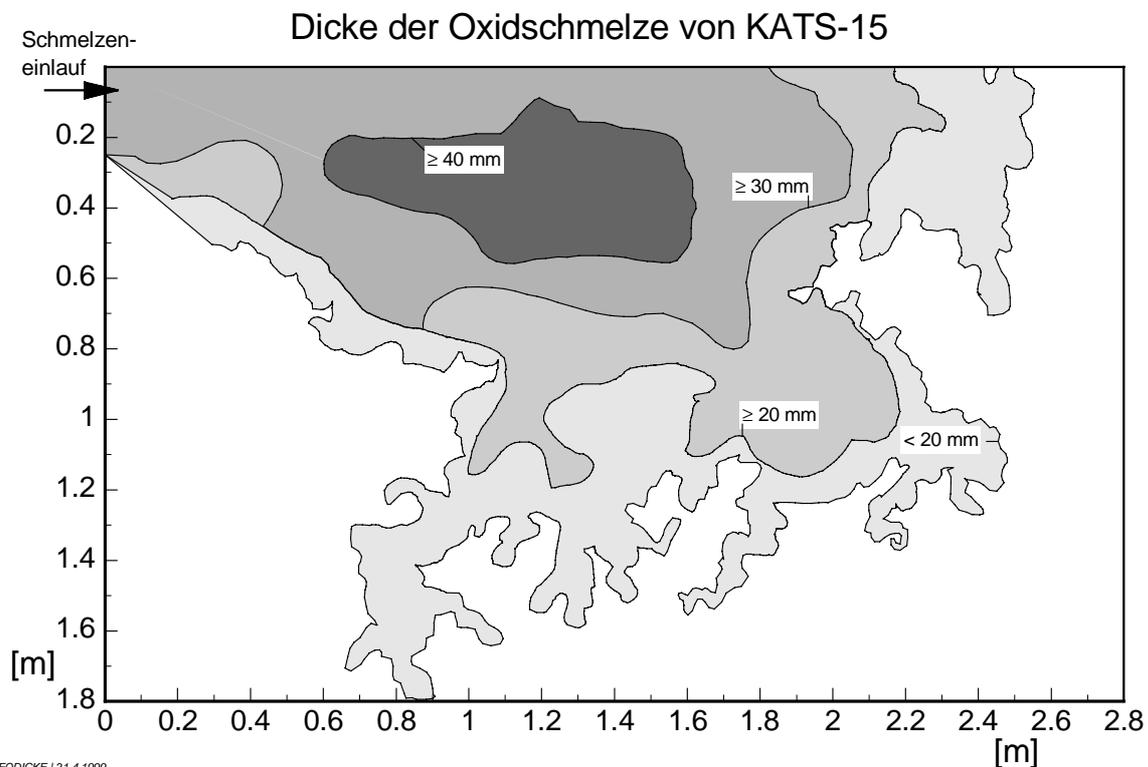


Abb. 3.7.15: Höhenverteilung der Oxidschmelze nach dem Ausbreiten

Erosion im Oxidkanal

Es wurden keine Daten zur Erosion im Oxidkanal gesammelt.

Analyse von Proben

Die Oxidprobe stammt aus dem mittleren Bereich der Ausbreitungsfläche, sie sollte aus einem Gebiet stammen, in welchem das Substrat (Cordierit) nur wenig mit der Schmelze wechselwirkte. Dann ist gewährleistet, daß die Zusammensetzung der Probe mit derjenigen des

ursprünglichen Oxids übereinstimmt. Die Ergebnisse der in Tabelle 3.7.8 beschriebenen Analyse der Oxidprobe ist in Gewichtsprozenten angegeben. Für die Probe sind Werte in zwei Spalten aufgeführt, wobei die erste Spalte die Ergebnisse der Analysen darstellt; bei der zweiten Spalte wurde der Gesamtanteil auf 100 % extrapoliert, indem die unter „Sonstige“ aufgeführten Anteile weggelassen wurden.

Tab. 3.7.8: Analysen von Oxidproben

Analysen-Nr.	169/99	
Herkunft	-	
Al ₂ O ₃	79.04 %	80.2 %
FeO	11.97 %	12.1 %
SiO ₂	7.47 %	7.6 %
MgO	0.09 %	0.1 %
Sonst.	1.19 %	--
Summe	99.76 %	100 %

Eisenausbreitung

Ausgebreitete Masse

Die ausgebreitete Eisenmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 144.8 kg. Das W-Re-Thermoelement, das direkt im Eisenfenster positioniert war, hat 3 s nach Schmelzekontakt eine Maximalspannung entsprechend einer Temperatur von 2200 °C erreicht. Bei dieser Temperatur hat eine reine Eisenschmelze eine Dichte von 6440 kg/m³. Aus den vorangegangenen Experimenten hat man jedoch einen Erfahrungswert von 6300 kg/m³ gewonnen, der auch eventuelle Gasanteile berücksichtigt. Daher soll im folgenden auch dieser Wert zugrunde gelegt werden.

Somit ergibt sich ein Volumen der ausgebreiteten Eisenschmelze von 0,023 m³.

Volumenrate

Die Auswertung der Wägezellsignale wurde bereits im Abschnitt der OxidAusbreitung ausführlich dargestellt, siehe Abbildung 3.7.9.

Tabelle 3.7.9 gibt den vereinfacht ermittelten Eisenvolumenstrom wieder.

Tab. 3.7.9: Zeitlicher Volumenstrom für die Eisenschmelze

Zeit ab Beginn der Eisenausbreitung (s)	Zeit ab der Zündung (s)	Eisenvolumenstrom (l/s) vereinfacht
0	31.25	0.5
3.15	34.4	0.8
5.05	36.3	1.01
7.05	38.3	1.24
8.95	40.2	1.5
10.95	42.2	1.74
12.75	44	1.9
16.75	48	1.9

Eisenschmelzenausbreitung

Die Eisenschmelze hat sich zunächst der Einlaufrichtung folgend entlang der langen Seite (obere Seite in Abbildung 3.7.17) ausgebreitet und die gegenüberliegende kurze Seite erreicht. Danach wurde der Schmelzestrom lateral dazu umgelenkt. Auch die gegenüberliegende lange Seite (untere in der Abbildung) wurde erreicht. Dort entlang floß die Schmelze schließlich auch entgegen der ursprünglichen Einlaufrichtung aufgrund ihrer Trägheit wieder ein Stück zurück.

Nachdem die Eisenschmelze erschöpft war, flossen noch ca. 50 kg Oxidschmelze auf die Eisenfläche (Grund war das Überlaufen des Trichters am Umlenkrohr). Nach dem Experiment wurde das Oxid abgehoben. Der Eisenregulus hatte sich aus der Zone um den Schmelzeneinlauf ganz zurückgezogen. Mehrere große Lücken haben sich noch während der Ausbreitung im Eisenregulus gebildet, dies ist vermutlich ein Effekt der beim Eisen sehr wirksamen Oberflächenspannung.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente

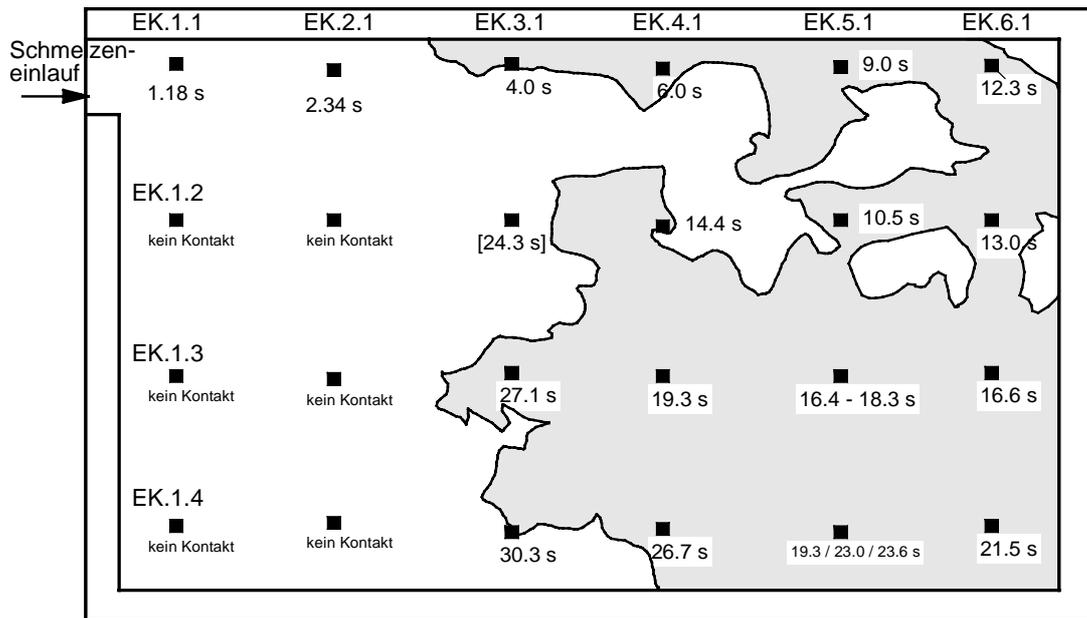
Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Abbildung 3.7.16 zeigt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten.

Der Bezugszeitpunkt Null ist dabei der Beginn der Ausbreitung, der nach den Videoaufzeichnungen nahezu zeitgleich mit dem Blitz, d.h. mit dem Abstich erfolgte.

Wenn mehrere Werte angegeben sind, bedeutet dies mehrere Knickpunkte in der Spannungskurve des Thermoelementes, die nicht eindeutig dem eigentlichen Kontaktzeitpunkt zuzuordnen sind.

Das Thermoelement E.K.3.2 wurde nach dem Experiment in Oxidschmelze eingebettet gefunden. Die Oxidschmelze ist durch das Überlaufen des Trichters am Umlenkrohr nach dem Eisen auf die Eisenfläche ausgelaufen. Der Eisenregulus, wie er nach dem Experiment vorlag, ist als grau unterlegte Fläche im Diagramm dargestellt.

KATS-15 Thermolemente auf der Eisenfläche



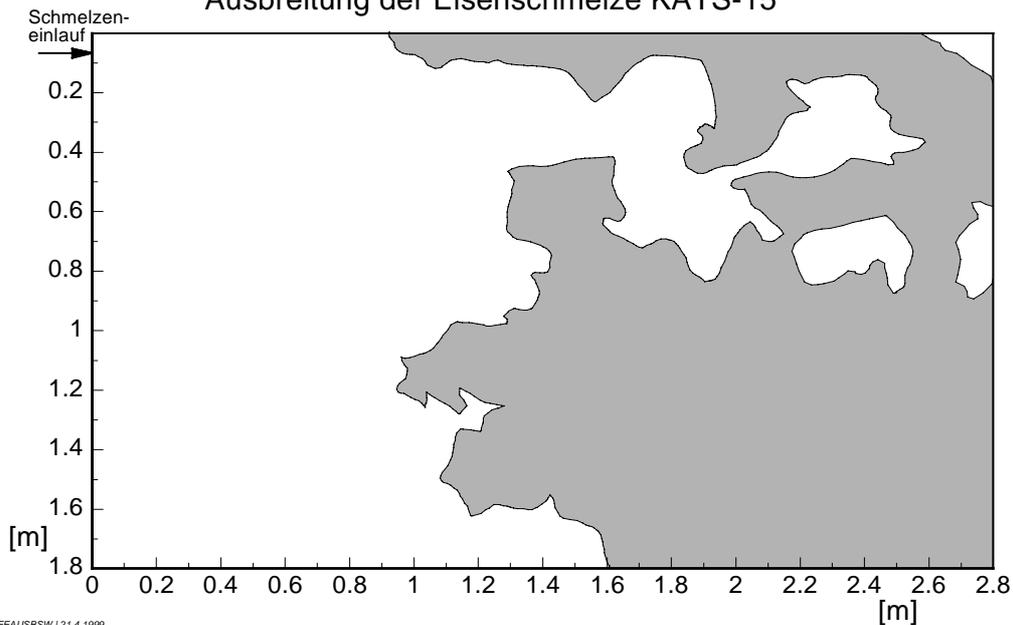
FEISENFLÄCHE | 21.4.1999

Abb. 3.7.16: Detektionszeitpunkte der NiCr-Ni-Thermolemente

Schmelzenausbreitung aus Videoaufnahme

Für das Eisen wurde nur die maximale von Eisen bedeckte Fläche bestimmt, sie betrug 2,3 m².

Ausbreitung der Eisenschmelze KATS-15



FEAUSBSW | 21.4.1999

Abb. 3.7.17: Maximale Ausbreitung der Eisenschmelze

Temperaturmessung im Eisenkanal

In Tabelle 3.7.10 und in Abbildung 3.7.18 sind die Temperaturmessungen im Oxidkanal aufgeführt.

Tab. 3.7.10: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Eisen	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bezogen auf Beginn der Ausbreitung)	Bemerkungen
E.W.0.1.05	2197°C	3.0 s	
E.W.1.1.05	1990°C	4.9 s	

Anfangstemperatur der sich ausbreitenden Eisenschmelze: 2200 °C.

KATS-15: Temperaturmessungen der Eisenschmelze

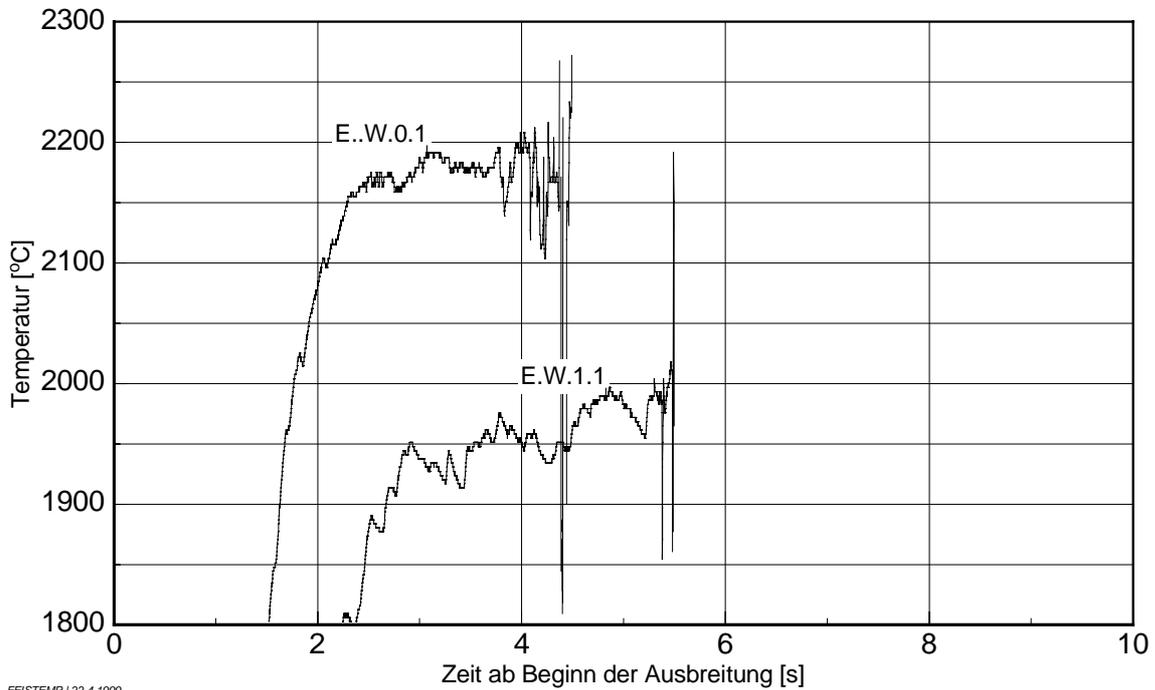


Abb. 3.7.18: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Eisenschmelzeverteilung

Die Dicke des Eisenregulus wurde nicht gemessen. Unter der Annahme, dass die Masse von 144,8 kg gleichmäßig auf 2,3 m² verteilt sind, errechnet man mit einer Dichte von 6,62 kg/dm³ (das entspricht der Schmelztemperatur von 2000 °C während der Ausbreitung) eine Dicke von 9,5 mm. Dieser Wert stimmt recht gut mit dem nach der Laplace'schen Formel (Abschnitt 3.1.5, KATS-8) berechneten von 9.9 mm überein.

Erosion im Eisenkanal

Es wurden keine Daten zur Erosion im Eisenkanal gesammelt.

Analyse von Proben aus dem Eisenkanal

Es wurden keine Proben aus dem Eisenkanal entnommen.

3.8 KATS-16 “2-dim Ausbreitung mit niedriger Volumenrate auf Beton, unbehandelt, trocken“

Versuchsdatum: 26.11.98

Versuchsaufbau

Abb. 3.8.1: Reaktionstiegel und Stoffeinsatz

	Thermitmischung: (10 Al SSH)	30 Beutel a 10,4 kg → 312 kg
	Langsam reagierendes Thermit (EF50):	6,0 kg
	Zuschlag: Quarzsand	20 kg
	(Empty row)	(Empty row)
	(Empty row)	(Empty row)

Abb. 3.8.2: Tiegelinnenmaße

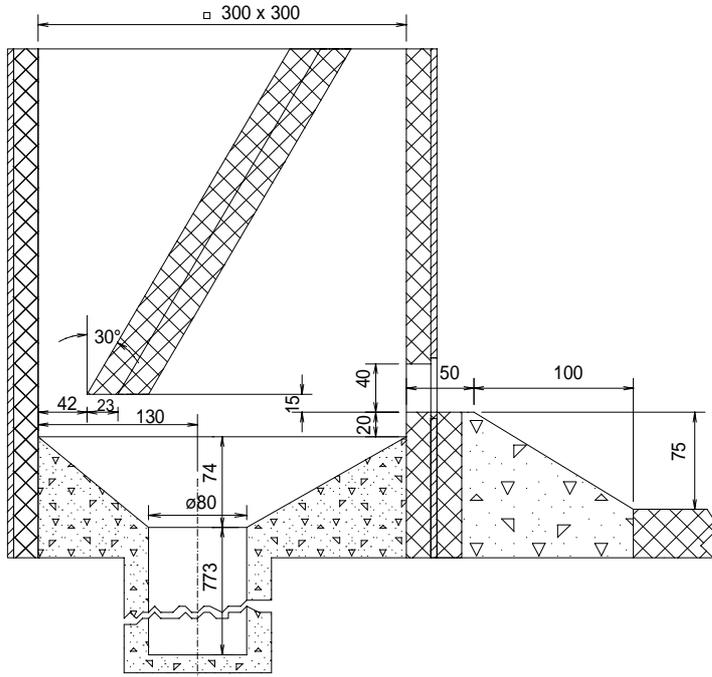
	<p style="text-align: center;"><u>Tiegelvolumen:</u></p> <p style="text-align: center;">$z = 0 \text{ bis } 220 \text{ mm}$</p> $V(z) = \frac{\pi}{3} \tan^2 \alpha \cdot (z + 0,1185m)^3 - 1,53 \cdot 10^{-4} m^3$ <p style="text-align: center;">$z \geq 220 \text{ mm}$</p> $V(z) = \frac{\pi}{3} \tan^2 \beta \cdot (z - 1,5 \cdot 10^{-3} m)^3 + 1,12 \cdot 10^{-3} m^3$
	<p style="text-align: center;"><u>Tiegelquerschnitt:</u></p> <p style="text-align: center;">$z = 0 \text{ bis } 220 \text{ mm}$</p> $A(z) = \pi \tan^2 \alpha \cdot (z + 0,1185m)^2$ <p style="text-align: center;">$z \geq 220 \text{ mm}$</p> $A(z) = \pi \tan^2 \beta \cdot (z - 1,5 \cdot 10^{-3} m)^2$

Düsen-Ø 20 mm (die Düse unter dem Tiegel ist das durchflußbegrenzende Bauteil)

Abb. 3.8.3:Trennung von Oxid und Eisen

	Oxidbehälter- (B × T):	300× 300mm
	Oxidfenster (H × B):	40 × 216 mm
	Sumpfvolumen	8,7 dm ³
	Oxidausbreitungsfläche (B × L):	1,80 × 2,80 m
	Substrat:	Beton
	Eisenbehälter- (B × T):	200 × 180 mm
	Eisenfenster (H × B):	40 × 120 mm
	Sumpfvolumen	0,6 dm ³
	Eisenausbreitungsfläche (B × L):	1,80 × 2,80 m
	Substrat:	Beton

Abb. 3.8.4: Oxidbehälter



Oxidbehälter- (B × T):
300 × 300 mm

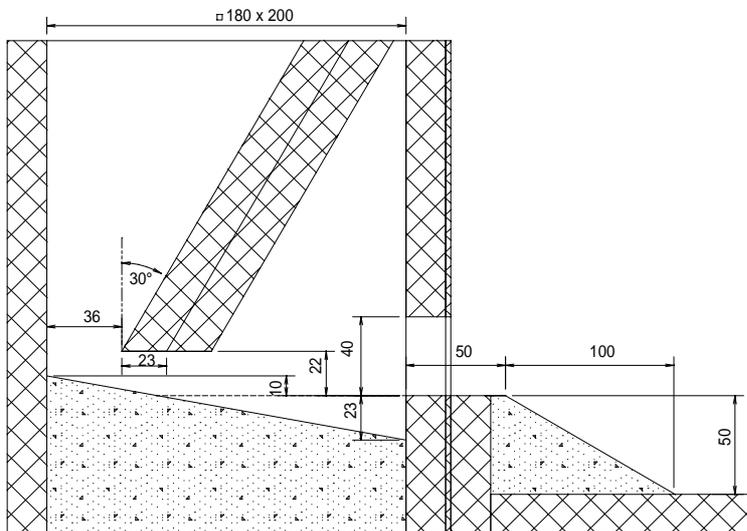
Oxidfenster (H × B):
40 × 216 mm

Oxidrampe
Breite: 245 mm

Sumpfvolumen:
(bis Unterkante Fenster)
8,7 Liter

Oxidausbreitungsfläche
(B × L):
1,80 × 2,80 m

Abb. 3.8.5: Eisenbehälter



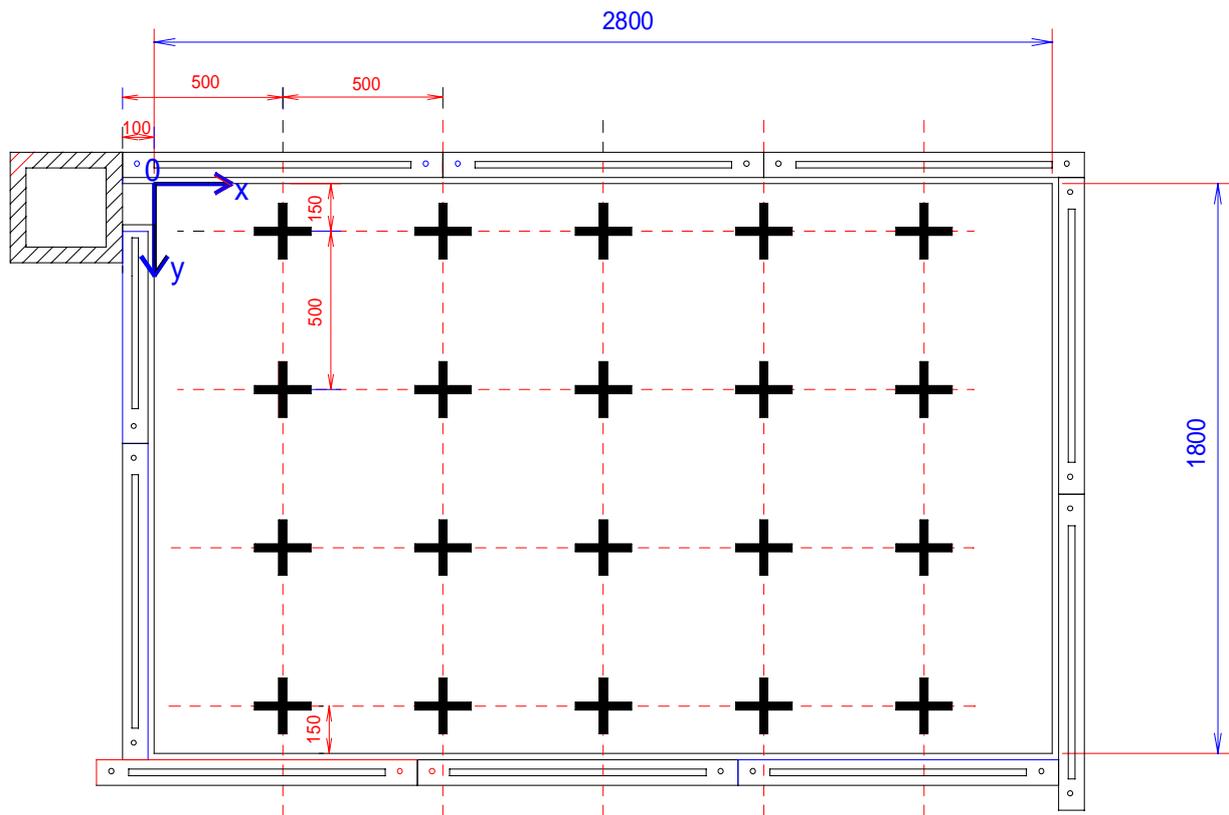
Eisenbehälter- (B × T):
200 × 180 mm

Eisenfenster (H × B):
40 × 120 mm

Eisenrampe
Breite: 135 mm

Sumpfvolumen:
(bis Unterkante Fenster)
0,6 Liter

Eisenausbreitungsfläche
(B × L):
1,80 × 2,80 m



+ Marking

Abb. 3.8.6: Ausbreitungsfläche für Eisen und Oxid

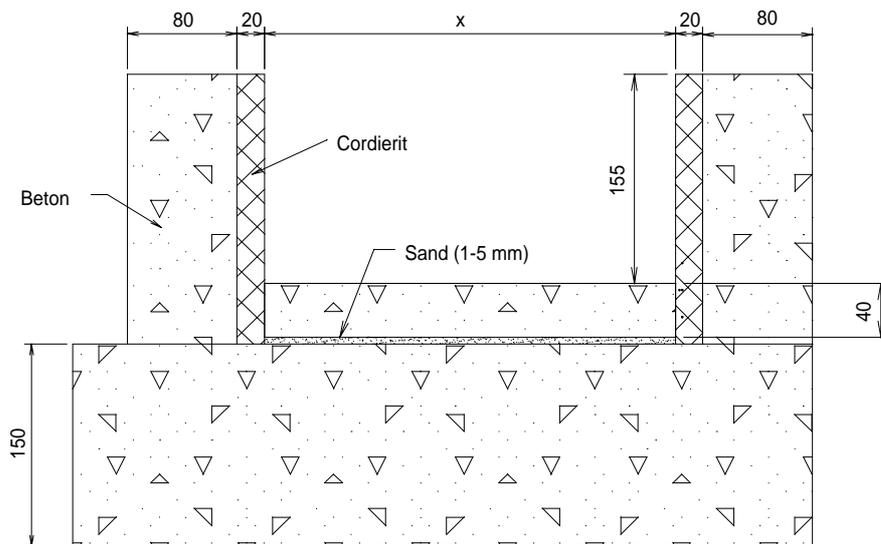


Abb. 3.8.7: Querschnitt durch die Ausbreitungsfläche

Instrumentierung

Temperaturmessung mit W-Re-Tauchthermoelementen

Die W-Re-Thermoelemente sind mit einer Schutzkappe aus 1/10 mm Stahl umgeben. Die Messstelle befindet sich 5 mm hinter dieser Kappe. Die Bezeichnung O.W.x.x.05 bedeutet, dass der Boden der Schutzkappe den Boden berührte, die Messstelle also 10 mm darüber lag.

Tab. 3.8.1: Temperaturmessung der Oxidschmelze

Oxid	Längenposition (X)	Breitenposition (Y)	Höhe über Boden
O.W.0.1.05	-0,1 m (Fenster)	~ 125 mm	10 mm
O.W.1.1.05	0,15 m	~ 50 mm	10 mm

Tab. 3.8.2: Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisen	Längenposition (X)	Breitenposition (Y)	Höhe über Boden
E.W.0.1.05	-0,1 m (Fenster)	~ 75 mm	10 mm
E.W.1.1.05	0,15 m	~ 50 mm	10 mm

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit IR-Video

Die Oberflächentemperatur der Oxidschmelze wurde mit einer IR-Kamera thermographisch bestimmt.

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit Zweifarbenpyrometer

Das Zweistrahlpyrometer wurde zwischen die Längenpositionen der beiden W-Re-Thermoelemente bei 0.10 m gerichtet.

Schmelzedetektion in den Ausbreitungskanälen mit NiCr-Ni-Thermoelementen

Die Mantelthermoelemente haben \varnothing 1 mm in TI-Ausführung und werden in einem Edelstahlröhrchen \varnothing 4×1 mm geführt. Die Thermoelemente für den Oxidkanal ragen 2-3 mm aus dem Hüllrohr heraus, die für den Eisenkanal schließen bündig ab.

Tab. 3.8.3: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente auf der Ausbreitungsfläche für Oxid

Oxid	Länge (X) [mm]	Breite (Y) [mm]	Höhe über dem Boden [mm]
O.K.1.1.05	150	100	5
O.K.1.2.05	150	600	5
O.K.1.3.05	150	1100	5
O.K.1.4.05	150	1600	5
O.K.1.1.35	150	90	35
O.K.2.1.05	650	100	5
O.K.2.2.05	650	600	5
O.K.2.3.05	650	1100	5
O.K.2.4.05	650	1600	5
O.K.2.1.45	650	90	45
O.K.3.1.05	1150	100	5
O.K.3.2.05	1150	600	5
O.K.3.3.05	1150	1100	5
O.K.3.4.05	1150	1600	5
O.K.3.2.35	1150	590	35
O.K.4.1.05	1650	100	5
O.K.4.2.05	1650	600	5
O.K.4.3.05	1650	1100	5
O.K.4.4.05	1650	1600	5
O.K.4.1.45	1650	90	45
O.K.5.1.05	2150	100	5
O.K.5.2.05	2150	600	5
O.K.5.3.05	2150	1100	5
O.K.5.4.05	2150	1600	5
O.K.5.2.25	2150	590	25
O.K.6.1.05	2650	100	5
O.K.6.2.05	2650	600	5
O.K.6.3.05	2650	1100	5
O.K.6.4.05	2650	1600	5

Tab. 3.8.4: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente auf der Ausbreitungsfläche für Eisen

Eisen	Länge (X) [mm]	Breite (Y) [mm]	Höhe über dem Boden [mm]
E.K.1.1.05	150	100	5
E.K.1.2.05	150	600	5
E.K.1.3.05	150	1100	5
E.K.1.4.05	150	1600	5
E.K.2.1.05	650	100	5
E.K.2.2.05	650	600	5
E.K.2.3.05	650	1100	5
E.K.2.4.05	650	1600	5
E.K.3.1.05	1150	100	5
E.K.3.2.05	1150	600	5
E.K.3.3.05	1150	1100	5
E.K.3.4.05	1150	1600	5
E.K.4.1.05	1650	100	5
E.K.4.2.05	1650	600	5
E.K.4.3.05	1650	1100	5
E.K.4.4.05	1650	1600	5
E.K.5.1.05	2150	100	5
E.K.5.2.05	2150	600	5
E.K.5.3.05	2150	1100	5
E.K.5.4.05	2150	1600	5
E.K.6.1.05	2650	100	5
E.K.6.2.05	2650	600	5
E.K.6.3.05	2650	1100	5
E.K.6.4.05	2650	1600	5

Schmelzedetektion am Thermittiegel

Unterhalb der Düse befinden sich zwei Thermoelemente zur Detektion des Schmelzeaustritts aus dem Tiegel (TA1 und TA2).

Zeitlicher Ablauf des Experiments

Zündung vom PC

- TA1 und /oder TA2 detektieren 22,93 s nach Zündung den Schmelzeabstich
- Start der Aufzeichnung der Signale (1 kHz, 256 s, 0 s Pretime)
- Blitze für den Eisenkanal und Oxidkanal zünden
- Die Schmelze läuft durch das schwenkbare Rohr zuerst in den Eisenbehälter und ohne weitere Rückhaltung durch das offene Eisenfenster direkt in den Eisenkanal.
- Start einer Zeitverzögerung von 22 s
- Das Rohr wird umgeschwenkt („Rinne fahren“: 45,26 s nach Zündung)
- Aufzeichnung der Infrarotkamera und des Pyrometers startet
- Die Schmelze läuft in den Oxidbehälter, füllt das Sumpfvolumen und tritt dann durch das offene Oxidfenster in den Oxidkanal ein (Beobachtung aus Infrarotfilm: 2.8 s, Beginn der Oxidausbreitung; also ~48 s nach Zündung)

Oxidausbreitung

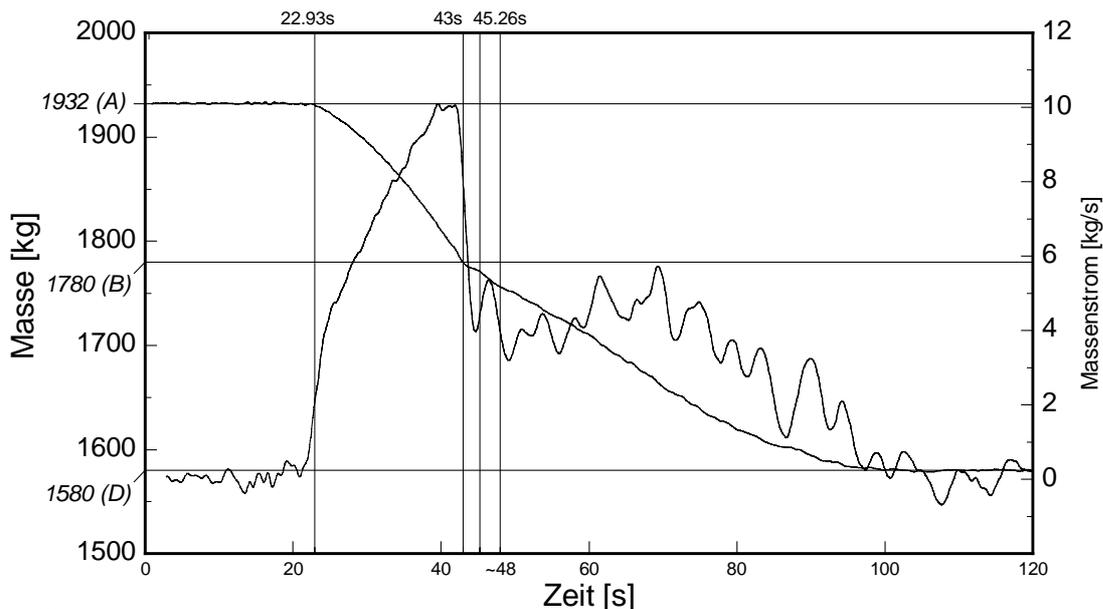
Ausgebreitete Masse

Die ausgebreitete Oxidmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 129 kg. Als Anfangstemperatur kann aus den Infrarotmessungen eine Temperatur von ~ 1950 °C abgelesen werden. Bei dieser Temperatur kann eine Dichte von ~ 2900 kg/m³ zugrunde gelegt werden. Damit ergibt sich ein ausgebreitetes Volumen von 0,0445 m³.

Volumenrate

Das Tiegelgewicht wurde von den Wägezellen während des gesamten Reaktions- und Ausfließvorgangs gemessen. Berechnet man die Gewichtsabnahme während des Ausfließens der Schmelze und differenziert diese, Abbildung 3.8.8, erhält man den Massenstrom, der für Eisen und Oxid getrennt mit der jeweiligen Dichte in Volumenstrom umgerechnet werden kann. Dieser Volumenstrom entspricht theoretisch, mit einem kleinen Zeitversatz zum Füllen der Behältersümpfe, dem Strom der Schmelzen auf die jeweiligen Ausbreitungsflächen.

Tiegel ausfluß von KATS-16



GW8GE | 19.4.1999

Abb. 3.8.8: Zeitlicher Massenstrom aus dem Reaktionstiegel

Die Abbildung 3.8.8 zeigt die von den Wägezellen gemessene Gewichtsabnahme sowie den daraus errechneten Massenstrom. Der zeitliche Nullpunkt ist die Zündung. Der Abstich des Tiegels wurde bei 22,93 s detektiert. Etwa bei 43 s ist ein Knick in der Kurve auszumachen, der nur durch den Wechsel von Eisen auf Oxid hervorgerufen werden kann. Der Befehl zum Umschwenken des Trichters auf die Oxidseite wurde 45,26 s nach Zündung erteilt. Aus der Infrarotaufnahme läßt sich der Beginn der Oxid Ausbreitung auf ~ 48 s festlegen.

Die Anfangsmasse des Tiegels war 1932 kg (A). Bis zum Knick (1780 kg; B) sind 152 kg ausgetreten (Die tatsächliche Eisenmasse wurde nach dem Experiment nicht komplett bestimmt, wird jedoch durch das vorangegangene Experiment und den ähnlichen Eisenoxidgehalt der oxidischen Phase auf maximal 146 kg geschätzt. Auf der Eisenfläche haben sich 141 kg ausgebreitet.). Nach ca. 102 s ist eine Talsohle von 1580 kg (D) erreicht. Die Masse steigt danach nur geringfügig wieder an (Temperatureffekte).

Zur Korrektur der Eisenmasse ist ein Faktor von $146 / 152 = 0.96$ nötig. Aus der Korrektur $(A-D) * 0.96$ ergibt sich eine gesamte Masseabnahme von 338 kg. Die korrigierte Talsohle liegt dann bei 1594 kg. Die durch Differenzieren errechneten Massen- bzw. Volumenströme werden mit diesem Faktor (0.96) korrigiert.

In der folgenden Abbildung 3.8.9 sind die ermittelten Volumenströme dargestellt. Für das Eisen wurde mit einer Dichte von 6300 kg/m^3 gerechnet, für Oxid mit 2900 kg/m^3 .

Bei der Nachuntersuchung stellte sich heraus, daß der Trichter des Umlenkrohres an einer Seite komplett durchgeschmolzen war. Eine direkte Beobachtung durch Videokameras, die Aufschluß geben könnte, wann das Versagen auftrat, gibt es nicht. Auf der „Eisen Top“-Aufnahme ist aber zu erkennen, daß 76 s nach Zündung hell glühende Oxidschmelze auf die schon deutlich abgedunkelte Eisenschmelze fließt. (Die Eisenausbreitung war zu diesem Zeitpunkt schon abgeschlossen.) Dies könnte aus der Leckage des Trichters herrühren. Genaue Informa-

tionen darüber, ob durch das Loch im Trichter erst ab diesem Zeitpunkt Oxidschmelze auf die Eisenfläche auslief, oder ob der Schmelzestrom schon zuvor, in einem unbekanntem Verhältnis, aufgeteilt wurde, gibt es nicht. Die Videoaufzeichnung läßt erstes vermuten. Insgesamt wurden 129 kg auf der Oxidbreitungsfläche gefunden (ab Außenkante Oxidbehälter) und auf der Eisenfläche wurden rund 48 kg oxidisches Material gefunden, wovon aber ein Teil (geschätzt ein Drittel) erodierter Beton ist.

Tiegel ausfluß von KATS-16

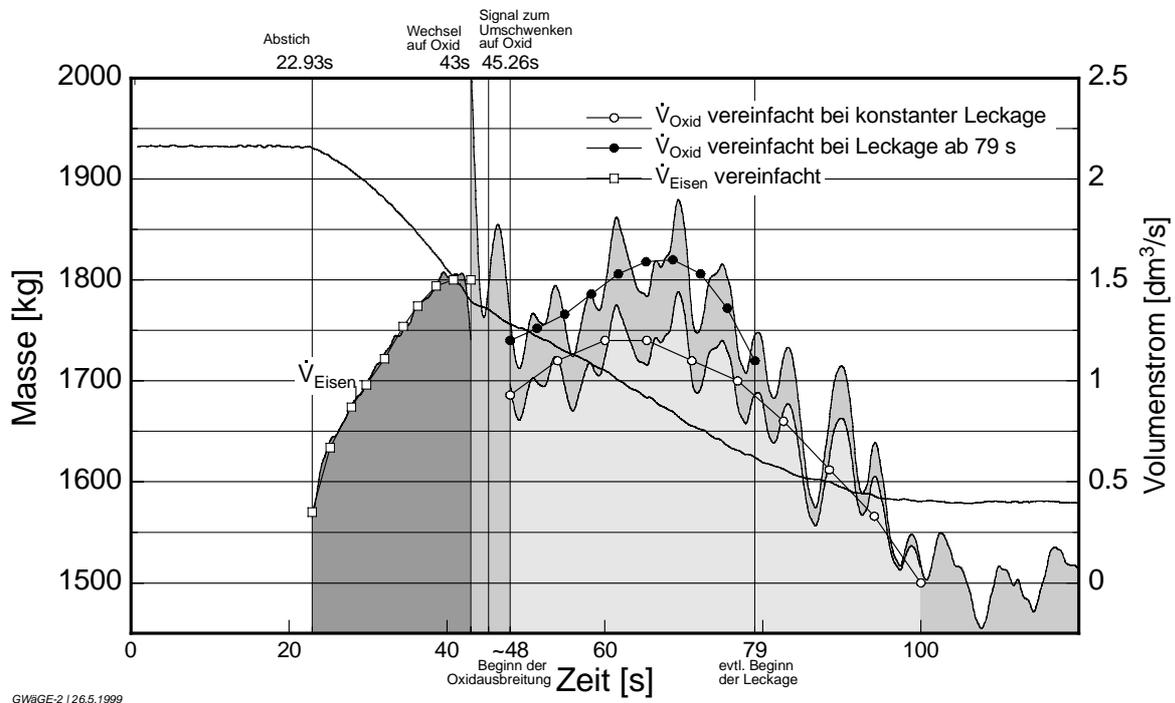


Abb. 3.8.9: Aus dem Massenstrom berechnete Volumenströme für Eisen und Oxid

Da nun Zeitpunkt und Aufteilung der Volumenströme nicht ganz gesichert sind, können zwei Varianten angeboten werden:

Der Oxidvolumenstrom wird durch einen Faktor rechnerisch über die gesamte Zeit von 48 s bis 100 s auf die $(129 \text{ kg} / 2900 \text{ kg/m}^3) = 0,0445 \text{ m}^3$ reduziert, s. Tabelle 3.8.5.

Der Oxidvolumenstrom wird nur von 48 s bis 79 s (entspricht 0,0445 m³) betrachtet, ab dann fließt die Schmelze in den Eisenbehälter, s. Tabelle 3.8.6.

Die durch Differenzieren ermittelten Volumenstromkurven sind auch nach mehrmaligem Glätten noch durch große Schwankungen gekennzeichnet. In der folgenden Tabelle 3.8.5 ist der Oxidvolumenstrom mit wenigen Punkten grob wiedergegeben.

Tab. 3.8.5: Zeitlicher Volumenstrom für die Oxidschmelze (Fall konstanter Leckage)

Zeit ab der Zündung (s)	Zeit ab Beginn der Oxidausbreitung (s)	Oxidvolumenstrom (l/s) vereinfacht
48	0	0.93
54	6.0	1.1
60	12.0	1.2
65.3	17.3	1.2
71	23	1.1
76.8	28.8	1
82.6	34.6	0.8
88.4	40.4	0.56
94.1	46.1	0.33
100	52	0

Tab. 3.8.6: Zeitlicher Volumenstrom für die Oxidschmelze (Fall Leakage ab 79 s)

Zeit ab der Zündung (s)	Zeit ab Beginn der Oxidausbreitung (s)	Oxidvolumenstrom (l/s) vereinfacht
48	0	1.2
51.4	3.4	1.26
54.9	6.9	1.33
58.3	10.3	1.43
61.7	13.7	1.53
65.2	17.2	1.59
68.6	20.6	1.6
72.1	24.1	1.53
75.5	27.5	1.36
79	31	1.1

Oxidschmelzenausbreitung

Unmittelbar nach Beginn der Ausbreitung kann auf den Videoaufzeichnungen eine Wechselwirkung mit dem Beton beobachtet werden. Die Schmelze wird deutlich sichtbar durch die Erosion und die aufsteigenden Gase (Wasserdampf) bewegt. Am Randbereich des sich ausbildenden Schmelzepools ist die Schmelze deutlich kühler, es bildet sich ein Wall aus zusammengeschobenen Krusten, der den Pool eindämmt (nach 5 bis 10 s auf dem IR-Film gut sichtbar), Abbildungen 3.8.12 und 3.8.13. Anders als beim 2-dim Experiment auf Cordierit (KATS-15) ist die nachströmende Schmelze nicht als deutlich abgegrenzter Schmelzefluß auszumachen. Das heftige Rühren der Schmelze durch die Wechselwirkung mit dem Beton läßt diese Strömung (zumindest für das Auge des Betrachters der Filme) untergehen. Womöglich wird diese vorgegebene Fließrichtung aber auch völlig unterdrückt, denn nach etwa 15 s beginnt die Schmelze den Wall im rechten Winkel zur Einströmrichtung zu durchbrechen und sich langsam in diese Richtung weiter

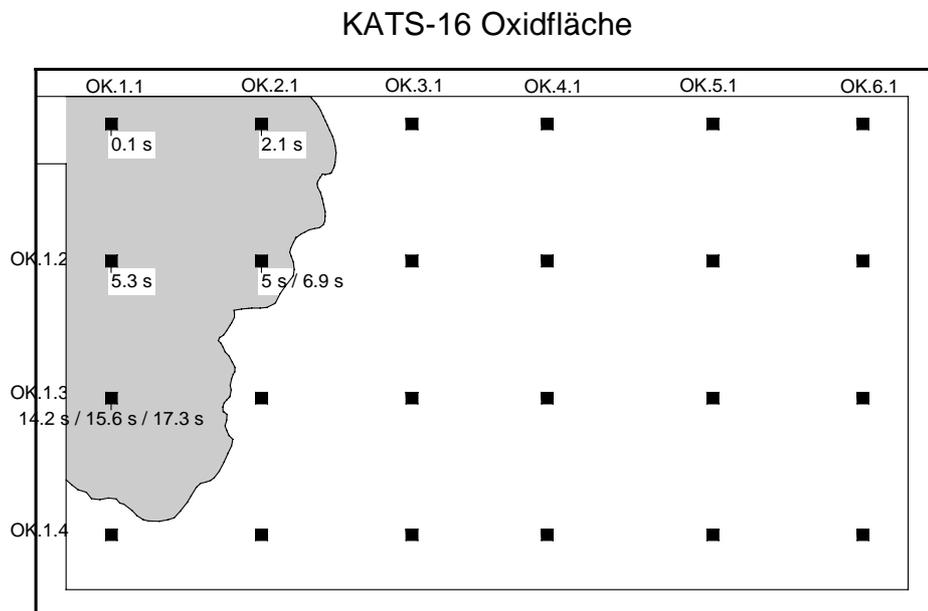
auszubreiten. Die maximale Flächenbedeckung ist bereits nach ca. 30 s erreicht und bleibt auf 1 m² begrenzt bei Dicken bis 90 mm.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Abbildung 3.8.10 zeigt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten. Der Bezugszeitpunkt Null ist dabei der Beginn der Ausbreitung, der nach den Videoaufzeichnungen auf ~2.8 s nach dem Umschwenken des Umlenkrohres bestimmt wurde, bzw. ~48 s nach der Zündung, bzw. 25 s nach dem Abstich.

Wenn mehrere Werte angegeben sind, bedeutet dies mehrere Knicke in der Spannungskurve des Thermoelementes, die nicht eindeutig dem eigentlichen Kontaktzeitpunkt zuzuordnen sind.

Die grau unterlegte Fläche gibt die maximale Ausbreitung der Oxidschmelze wieder.



GOXIDFLÄCHE | 26.4.1999

Abb. 3.8.10: Zeitliches Ansprechen der NiCr-Ni-Thermoelemente

Schmelzenausbreitung aus Infrarot-Videoaufnahme

Aus der Videoaufzeichnung können aus den Umrissen der sich ausbreitenden Schmelze die bedeckten Flächen berechnet werden, sie sind zeitabhängig in Tabelle 3.8.7 und in den Abbildungen 3.8.11 und 3.8.13 dargestellt.

Tab. 3.8.7: Zeitliche Flächenbedeckung der Oxidschmelze

Zeit ab Beginn der Ausbreitung [s]	Bedeckte Fläche [m ²]
0	0
2	0.071
5	0.393
10	0.589
15	0.762
20	0.842
25	0.934
30	1.008

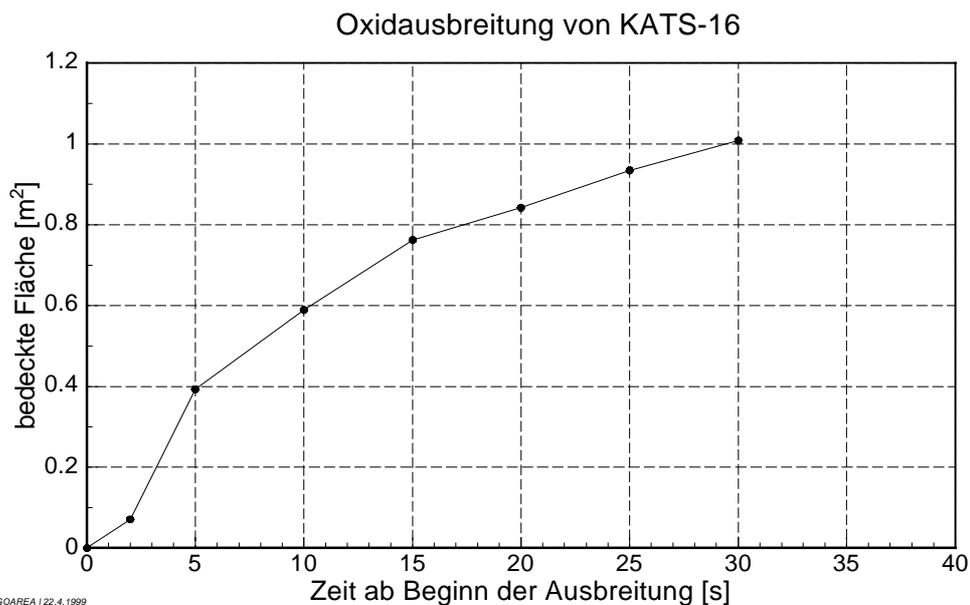


Abb 3.8.11: Zeitliche Flächenbedeckung der Oxidschmelze

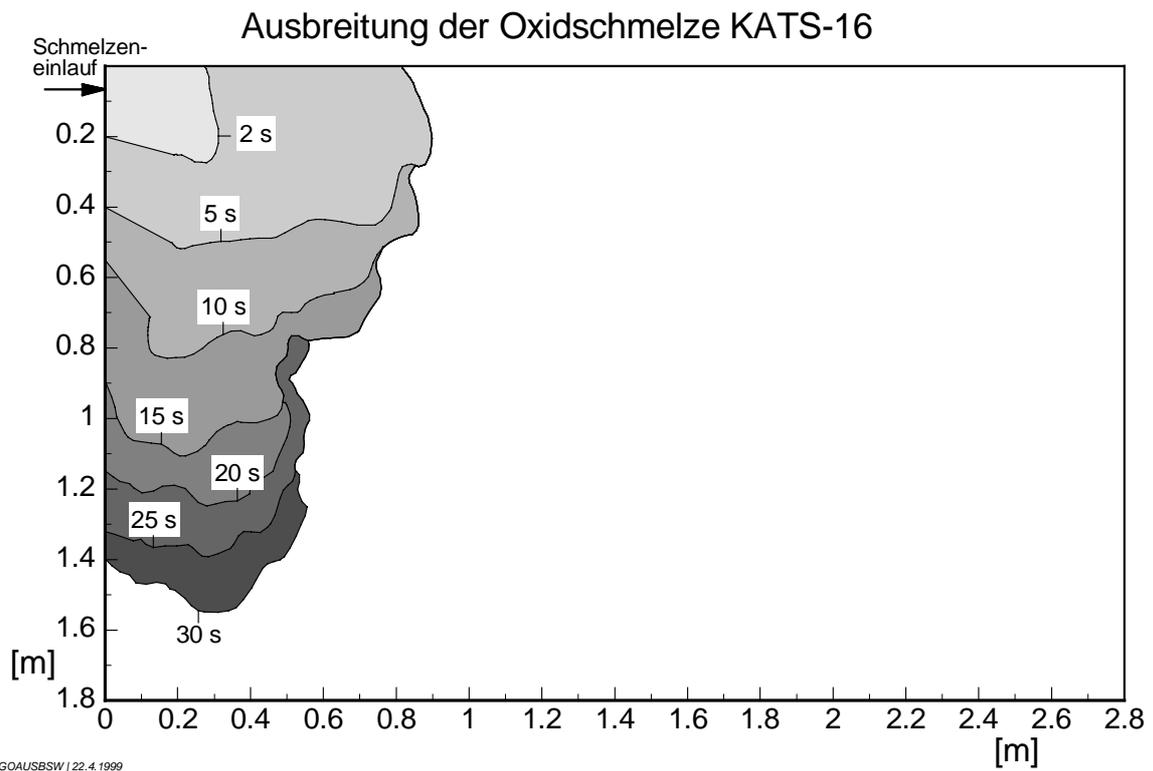


Abb. 3.8.12: Zeitliches Ausbreiten der Oxidschmelze

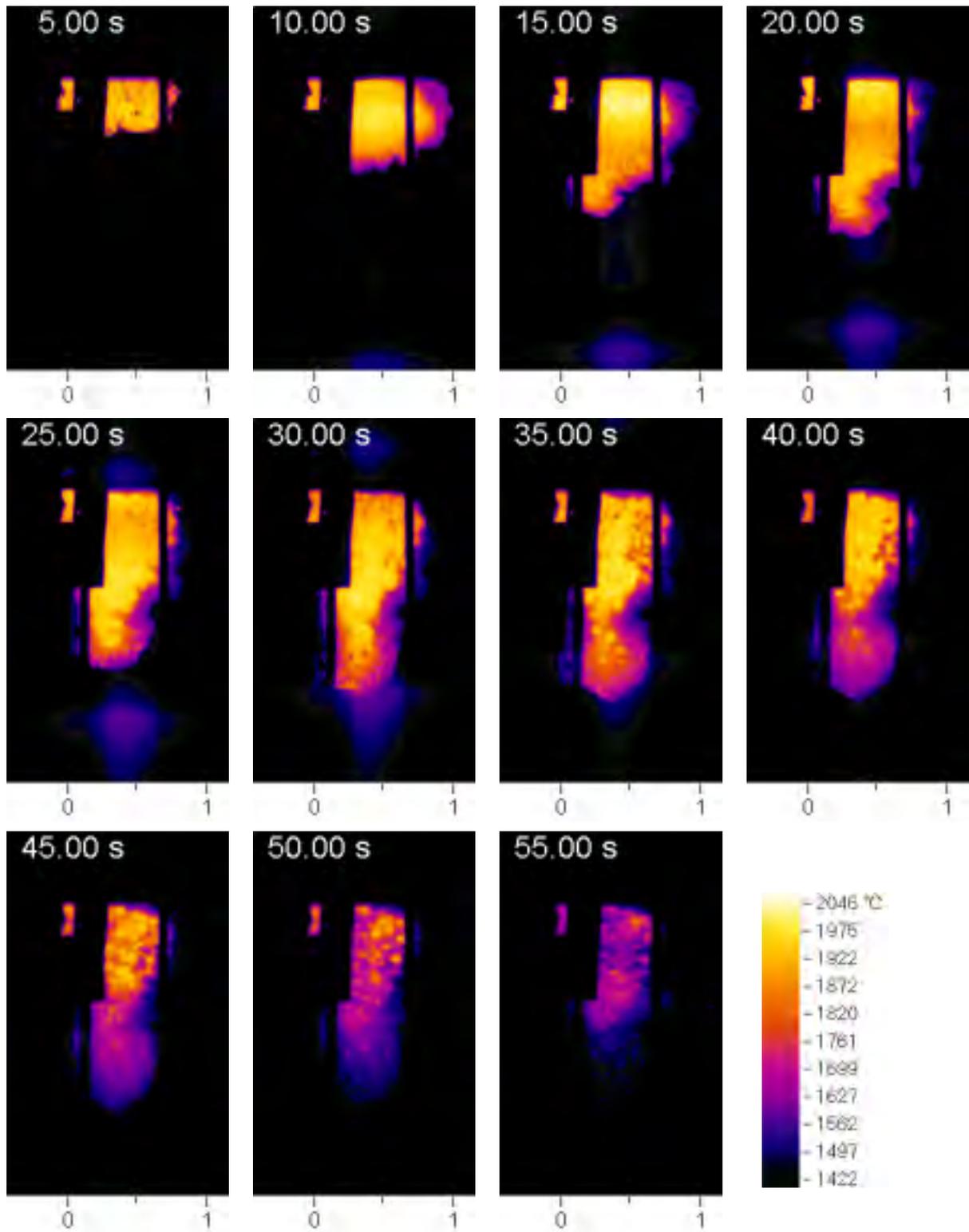


Abb. 3.8.13: Infrarotbilder der Oxid Ausbreitung von KATS-16 zu verschiedenen Zeitpunkten

Temperaturmessung im Oxidkanal

In Tabelle 3.8.8 und in Abbildung 3.8.14 sind die Temperaturmessungen im Oxidkanal aufgeführt.

Tab. 3.8.8: Temperaturmessungen auf der Ausbreitungsfläche für Oxid

Oxid	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bezogen auf Beginn der Ausbreitung)	Bemerkungen
O.W.0.1.05	1890 °C	10.8 s	
O.W.1.1.05	1910 °C	6.3 s	

Das Thermoelement O.W.0.1.05, das direkt in der Öffnung des Schmelzeinlaufs positioniert ist und somit als erstes von der Schmelze kontaktiert wird, benötigt eine sehr lange Zeit, bis sich die maximale Temperatur eingestellt hat. Diese Temperatur liegt zudem deutlich unter der von der Infrarotkamera gemessenen Temperatur. Die W-Re-Thermoelemente scheinen bei diesem Experiment nicht die zuverlässigen Meßinstrumente zu sein. Als Anfangstemperatur der sich ausbreitenden Oxidschmelze wird daher aus der Infrarotaufnahme ein Wert von 1950 °C abgelesen.

Temperaturmessung mit Infrarot-Videokamera

Abbildung 3.8.14 zeigt die mit Infrarotkamera gemessenen Schmelztemperaturen an zwei Stellen in der Nähe des Schmelzeinlaufs.

Temperaturmessung mit Pyrometer

Der schnelle Temperaturanstieg stimmt mit den W/Re-Thermoelementsignalen überein, Abbildung 3.8.14. Der Abfall der Temperatur jedoch nach drei Sekunden ist nicht realistisch. Rauchschwaden verdunkelten die Sicht des Pyrometers.

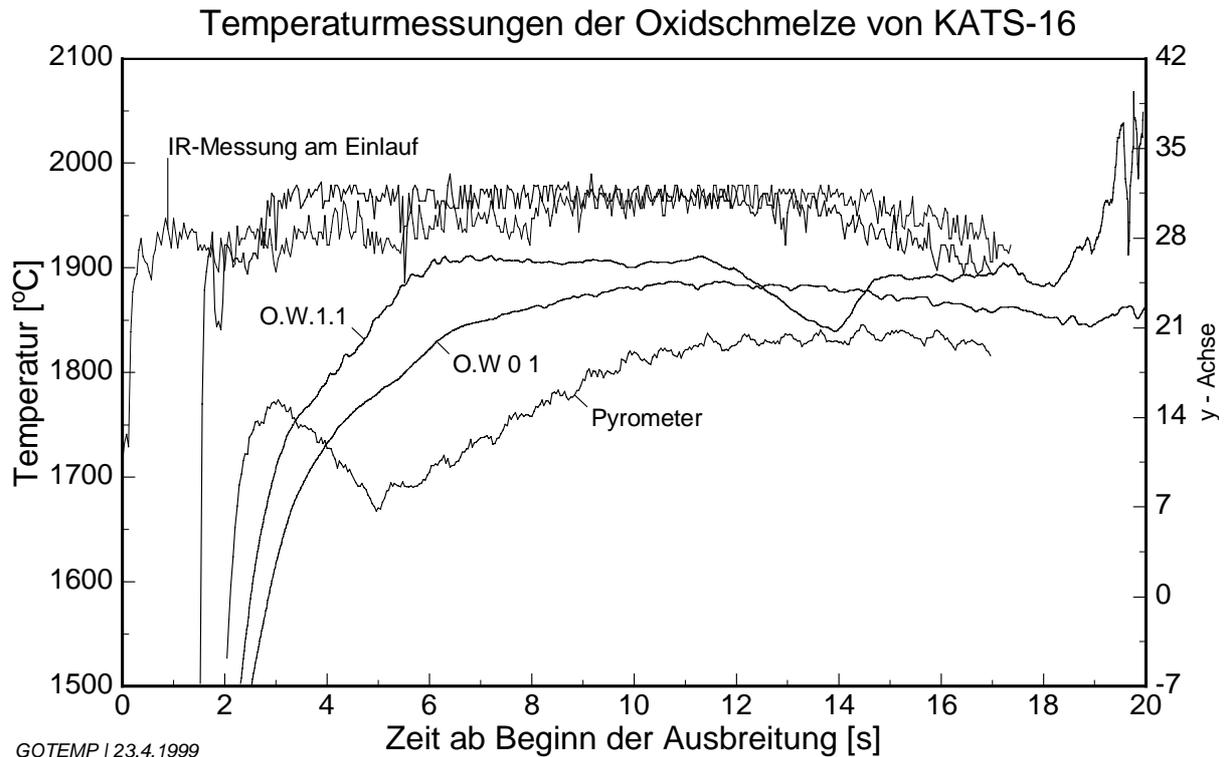


Abb. 3.8.14: Temperaturmessungen auf der Ausbreitungsfläche für Oxid
Schmelzeverteilung

Die Dicke der erstarrten Oxidschicht wurde an einer Vielzahl von Stellen ausgemessen (> 50 Einzelmessungen). Das folgende Diagramm, Abbildung 3.8.15, gibt einen Überblick über die zu Bereichen mittlerer Dicke zusammengefaßten Zonen.

Die Schmelze ist aufgrund der Wechselwirkung mit dem Beton (Erosion, Wasserverdampfung) sehr uneben erstarrt. Es hat sich eine Oberfläche aus vielen einzelnen „Hügeln“ (bzw. Vulkanen) gebildet, die im großen Maßstab betrachtet eine gewisse Regelmäßigkeit aufweist. Die Schmelzehügel haben zum Teil an ihrer höchsten Stelle ein Loch und sind somit wohl als Dampfkanal während der Betonerosion entstanden. Die Durchmesser dieser kleinen Vulkane betragen 60 bis 80 mm. Die typische Höhendifferenz zwischen Gipfel und Talsohle beträgt 30 bis 35 mm.

An den Randbereichen fällt die Schmelzendicke über sehr kurze Strecken (100-200 mm) von stattlichen Dicken um 90 bis 70 mm auf null ab.

Anders als bei der Ausbreitung auf Cordierit (KATS-15) kam es nicht zum Ausfingern der Schmelze, der Umriß der Schmelze ist daher nicht so zerklüftet.

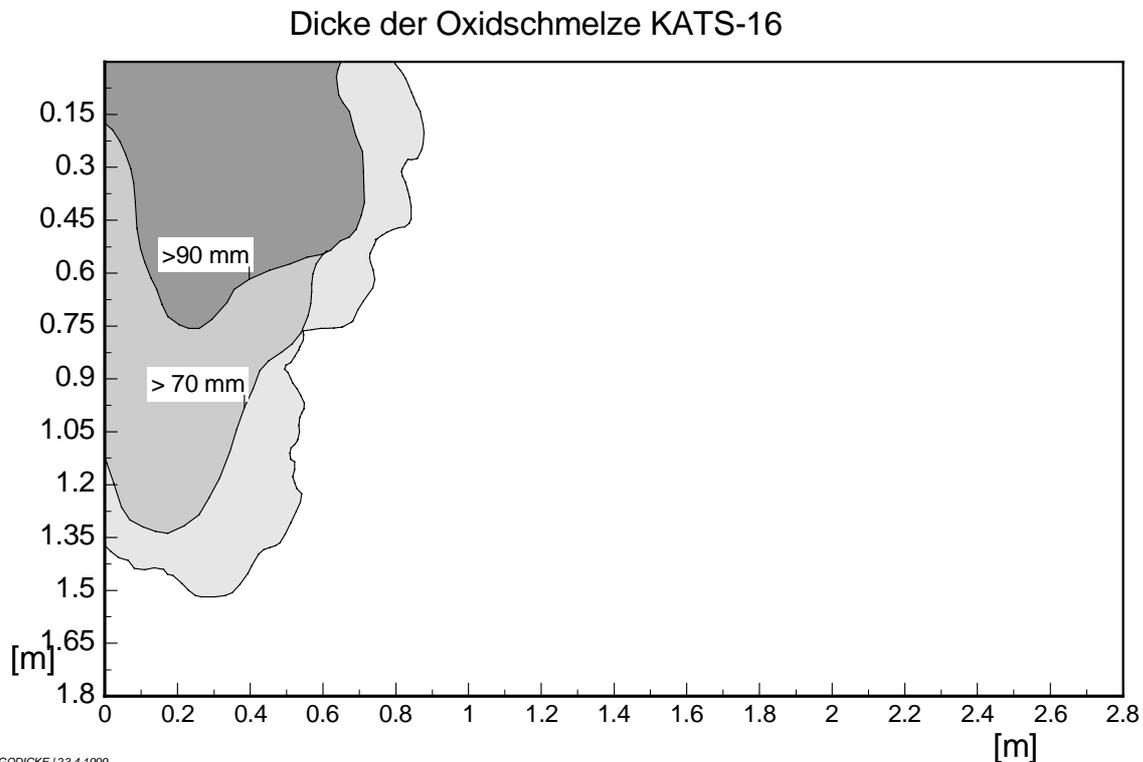


Abb. 3.8.15: Höhenverteilung der Oxidschmelze nach dem Ausbreiten

Erosion im Oxidkanal

Im Bereich, wo die Schmelze die größte Dicke erreicht hat, wurden vier bis fünf Stellen mit ~10 mm Erosionstiefe gefunden. Ansonsten konnte eine mittlere Erosion von 3 – 5 mm festgestellt werden.

Analyse von Proben

Die Ergebnisse der in Tabelle 3.8.9 beschriebenen Analysen von Oxidproben aus dem Oxidbehälter sind in Gewichtsprozenten angegeben. Für die Probe sind Werte in zwei Spalten aufgeführt, wobei die erste Spalte die Ergebnisse der Analysen darstellt; bei der zweiten Spalte wurde der Gesamtanteil auf 100% extrapoliert, indem die unter „Sonstige“ aufgeführten Anteile weggelassen wurden. Die Zusammensetzung dieser Probe aus dem Oxidbehälter stimmt recht gut mit der Oxidprobe

von der keramischen Ausbreitungsfläche in KATS-15 überein, Tabelle 3.7.8. Diese Zusammensetzung ist identisch mit der sich ausbreitenden Oxidschmelze, vor dem Zeitpunkt der chemischen Reaktionen mit dem Betonsubstrat.

Tab. 3.8.9: Analysen von Oxidproben

Analysen-Nr.	170/99	
Herkunft	-	
Al ₂ O ₃	75.57 %	77.8 %
FeO	11.64 %	12.0 %
SiO ₂	8.51 %	8.8 %
CaO	1.38 %	1.4 %
Sonst.	1.12 %	--
Summe	98.22 %	100 %

Eisenausbreitung

Ausgebreitete Masse

Die ausgebreitete Eisenmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 141 kg. Das W-Re-Thermoelement, das direkt im Eisenfenster positioniert war, hat 3 s nach Schmelzekontakt eine Maximalspannung entsprechend einer Temperatur von 2150 °C erreicht. Bei dieser Temperatur hat eine reine Eisenschmelze eine Dichte von 6480 kg/m³. Aus den vorangegangenen Experimenten hat man jedoch einen Erfahrungswert von 6300 kg/m³ gewonnen, der auch eventuelle Gasanteile berücksichtigt. Daher soll im folgenden auch dieser Wert zugrunde gelegt werden.

Somit ergibt sich ein Volumen der ausgebreiteten Eisenschmelze von 0,0224 m³.

Volumenrate

Die Auswertung der Wägezellsignale wurde bereits bei der Oxidausbreitung ausführlich dargestellt. Die folgende Tabelle 3.8.10 gibt den vereinfacht ermittelten Eisenvolumenstrom wieder.

Tab. 3.8.10: Zeitlicher Volumenstrom der Eisenschmelze

Zeit ab der Zündung (s)	Zeit ab Beginn der Eisenausbreitung (s)	Eisenvolumenstrom (l/s) vereinfacht
22.93	0	0.35
25.23	2.3	0.67
27.93	5	0.87
29.83	6.9	0.98
32.13	9.2	1.11
34.53	11.6	1.27
36.33	13.4	1.37
38.63	15.7	1.47
40.83	17.9	1.5
~43	20	1.5

Eisenschmelzenausbreitung

Die eigentliche Ausbreitung kann aus den Videoaufnahmen leider nicht beobachtet werden, da starker Rauch die Sicht behindert hat. Die Rauchentwicklung endete erst, als die Ausbreitung ebenfalls zum Stillstand gekommen war.

Zusammenfassend ist zu bemerken, daß die Eisenschmelze keine der gegenüberliegenden Wände der Ausbreitungsfläche erreicht hat. Die bedeckte Fläche ist jedoch vergleichbar mit der des Ausbreitungsexperimentes auf Cordierit (KATS-15), wo sich die Eisenschmelze nach dem Experiment hauptsächlich in der gegenüberliegenden Ecke befunden hat. Somit hat sich die Eisenschmelze bei KATS-16 über dieselbe Fläche ausgebreitet, aber dabei nicht denselben Weg zurückgelegt.

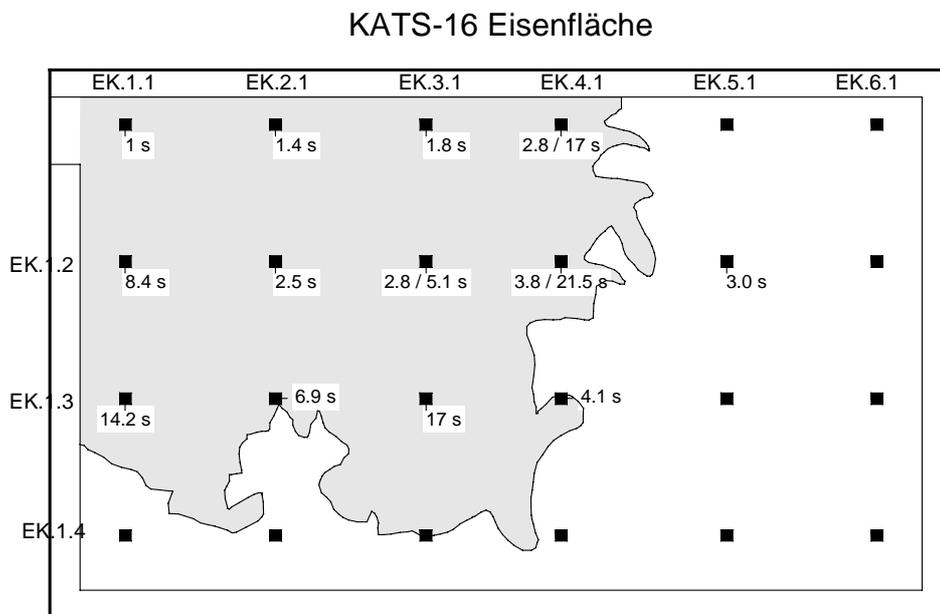
Eine Wechselwirkung mit dem Beton hat stattgefunden, fast der gesamte Eisenregulus ist nach dem Experiment von Rückständen des erodierten Betons bedeckt.

Detektion durch die NiCr-Ni-Thermoelemente

Aus den Signalen der NiCr-Ni-Thermoelemente kann die jeweilige Ankunftszeit der Schmelze bestimmt werden. Abbildung 3.8.16 zeigt die als Detektionszeitpunkt ausgewählten Zeiten.

Der Bezugszeitpunkt Null ist dabei der Beginn der Ausbreitung, der nach den Videoaufzeichnungen nahezu zeitgleich mit dem Blitz, d.h. mit dem Abstich erfolgte.

Wenn mehrere Werte angegeben sind, bedeutet dies mehrere Knicke in der Spannungskurve des Thermoelementes, die nicht eindeutig dem eigentlichen Kontaktzeitpunkt zuzuordnen sind.



GEISENFLÄCHE | 17.5.1999

Abb. 3.8.16: Zeitliches Ansprechen der NiCr-Ni-Thermoelemente auf der Eisenfläche

Auf dem Videofilm ist zu erkennen, daß die Eisenfläche zu Beginn der Ausbreitung von einigen Eisentropfen, die hier nicht eingezeichnet sind, schnell überquert wird (ähnlich Wassertropfen auf einer heißen Platte). Einer dieser Tropfen muß wohl verursacht haben, daß das Thermoele-

ment E.K.5.2 einen Spannungsanstieg registriert hat, obwohl der Eisenregulus sich nicht so weit ausgebreitet hat.

Der Eisenregulus, wie er nach dem Experiment vorlag, ist als grau unterlegte Fläche in Abbildung 3.8.17 dargestellt.

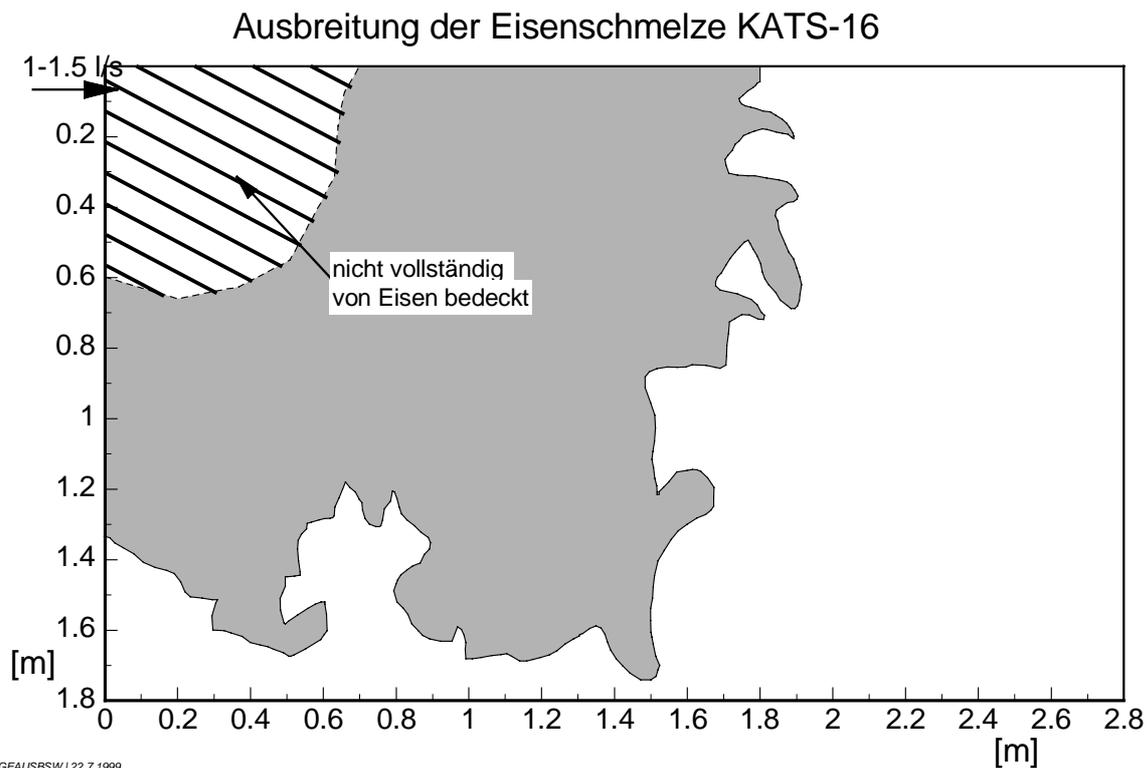


Abb. 3.8.17: Verteilung der Eisenschmelze nach der Ausbreitung

Schmelzenausbreitung aus Videoaufnahme

Für das Eisen wurde kein zeitlicher Verlauf, sondern nur die maximale von Eisen bedeckte Fläche bestimmt: $\leq 2,6 \text{ m}^2$.

Zieht man die (allerdings grob dargestellte) Fläche nicht vollständiger Eisenbedeckung ab, so verbleibt eine Fläche von ca. $2,3 \text{ m}^2$.

Temperaturmessung

In Tabelle 3.8.11 und in Abbildung 3.8.18 sind die Temperaturmessungen im Eisenkanal aufgeführt.

Tab. 3.8.11: Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisen	Max. Temp. (°C)	Zeitpunkt des Maximums (bezogen auf Beginn der Ausbreitung)	Bemerkungen
E.W.0.1.05	~ 2130°C	3 s	
E.W.1.1.05	~ 2150°C	5 s	Kurve geglättet

Anfangstemperatur der sich ausbreitenden Eisenschmelze: ~ 2150°C.

KATS-16: Temperaturmessungen der Eisenschmelze

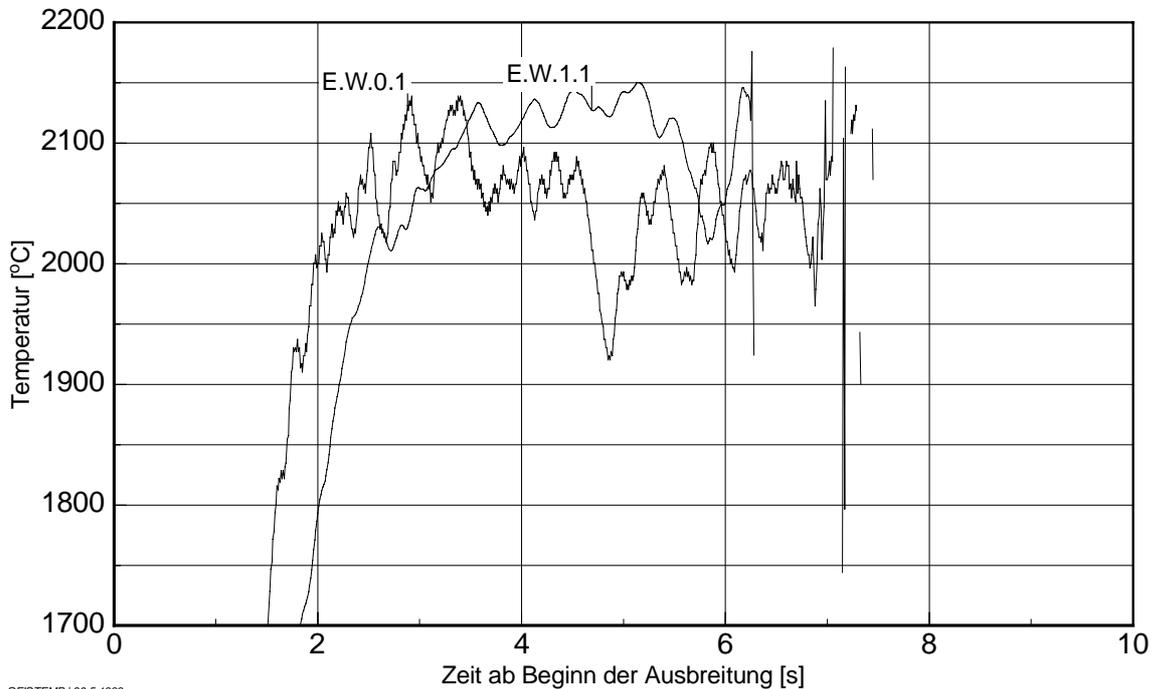


Abb. 3.8.18: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Eisenschmelzeverteilung

Die Dicke des Eisenregulus wurde nicht gemessen. Unter der Annahme, dass die Eisenmasse von 141 kg auf 2,3 m² gleichmäßig verteilt ist, errechnet man mit einer Dichte von 6,3 kg/dm³ eine Dicke von 9,7 mm. Dieser Wert stimmt recht gut mit dem nach der Laplace'schen Formel (s. Kapitel 3.1, KATS-8) berechneten von 9.9 mm überein.

Erosion im Eisenkanal

Es wurden keine Daten zur Erosion im Eisenkanal gesammelt.

Analyse von Proben aus dem Eisenkanal

Es wurden keine Proben aus dem Eisenkanal entnommen.

3.9 KATS-17 “2-dim Ausbreitung mit niedriger Volumenrate auf Beton, ungestrichen, trocken für Oxid und gestrichen mit Epoxy-Lack und 1 mm Wasserfilm für das Eisen“

Versuchsdatum: 10.6.99

Versuchsaufbau

Abb. 3.9.1: Reaktionstiegel und Stoffeinsatz

	Thermitmischung: (10 Al SSH)	30 Beutel a 10,4 kg → 312 kg
	Langsam reagierendes Thermit (EF50):	6,0 kg
	Zuschlag: Quarzsand	20 kg

Abb. 3.9.2: Tiegelinnenmaße

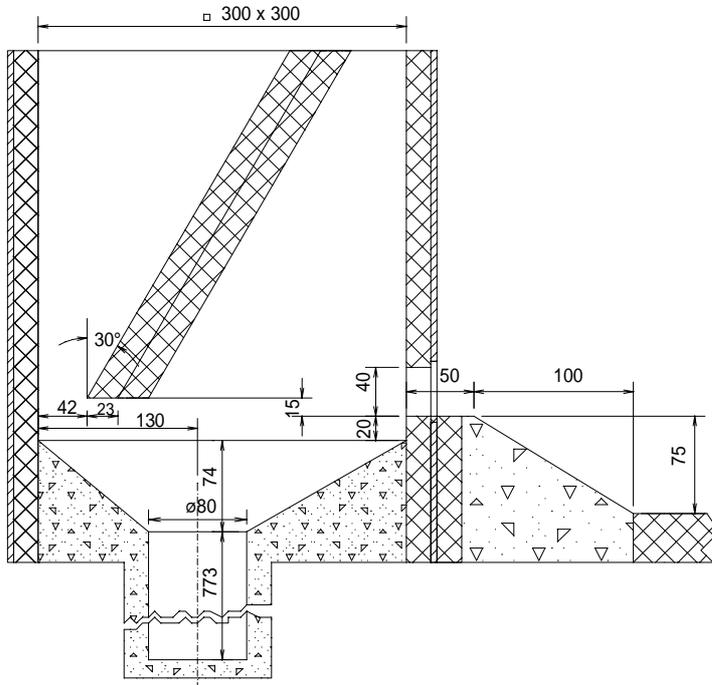
<p> $\alpha = 16,5^\circ$ $\beta = 24,6^\circ$ </p>	<p><u>Tiegelvolumen:</u></p> <p>$z = 0$ bis 220 mm</p> $V(z) = \frac{\pi}{3} \tan^2 \alpha \cdot (z + 0,1185m)^3 - 1,53 \cdot 10^{-4} m^3$ <p>$z \geq 220$ mm</p> $V(z) = \frac{\pi}{3} \tan^2 \beta \cdot (z - 1,5 \cdot 10^{-3} m)^3 + 1,12 \cdot 10^{-3} m^3$
	<p><u>Tiegelquerschnitt:</u></p> <p>$z = 0$ bis 220 mm</p> $A(z) = \pi \tan^2 \alpha \cdot (z + 0,1185m)^2$ <p>$z \geq 220$ mm</p> $A(z) = \pi \tan^2 \beta \cdot (z - 1,5 \cdot 10^{-3} m)^3$

Düsen-Ø 20 mm (die Düse unter dem Tiegel ist das durchflußbegrenzende Bauteil)

Abb. 3.9.3: Trennung von Oxid und Eisen

<p>Reaktionstiegel Oxidschmelze Eisenschmelze Umlenkrohr Düse Eisenbehälter Oxidbehälter Ausbreitungsfläche für Eisen Ausbreitungsfläche für Oxid</p>	Oxidbehälter- (B × T):	300 × 300mm
	Oxidfenster (H × B):	40 × 216 mm
	Sumpfvolumen	8,7 dm ³
	Oxidausbreitungsfläche (B × L):	1,80 × 2,80 m
	Substrat:	Beton unbehandelt
	Eisenbehälter- (B × T):	200 × 180 mm
	Eisenfenster (H × B):	40 × 120 mm
	Sumpfvolumen	0,6 dm ³
	Eisenausbreitungsfläche (B × L):	1,80 × 2,80 m
	Substrat:	Beton, gestrichen mit Epoxy
	Zugabe auf die Fläche:	1 mm Wasser

Abb. 3.9.4: Oxidbehälter



Oxidbehälter- (B × T):
300 × 300 mm

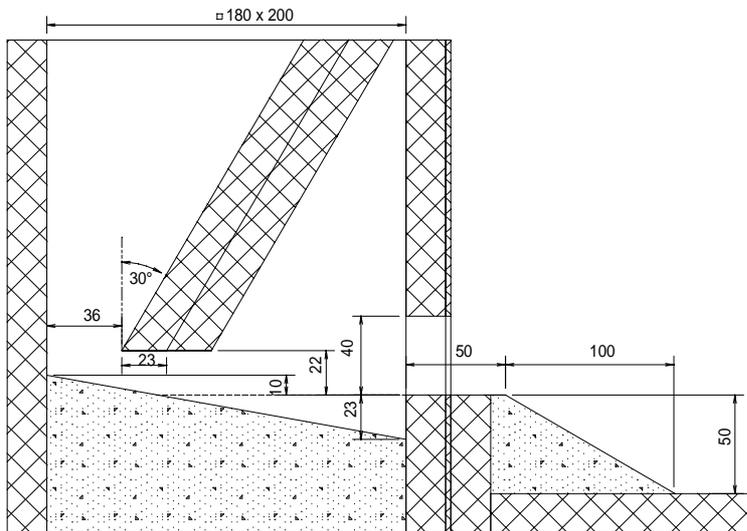
Oxidfenster (H × B):
40 × 216 mm

Oxidrampe
Breite: 245 mm

Sumpfvolumen:
(bis Unterkante Fenster)
8,7 Liter

Oxidausbreitungsfläche
(B × L):
1,80 × 2,80 m

Abb. 3.9.5: Eisenbehälter



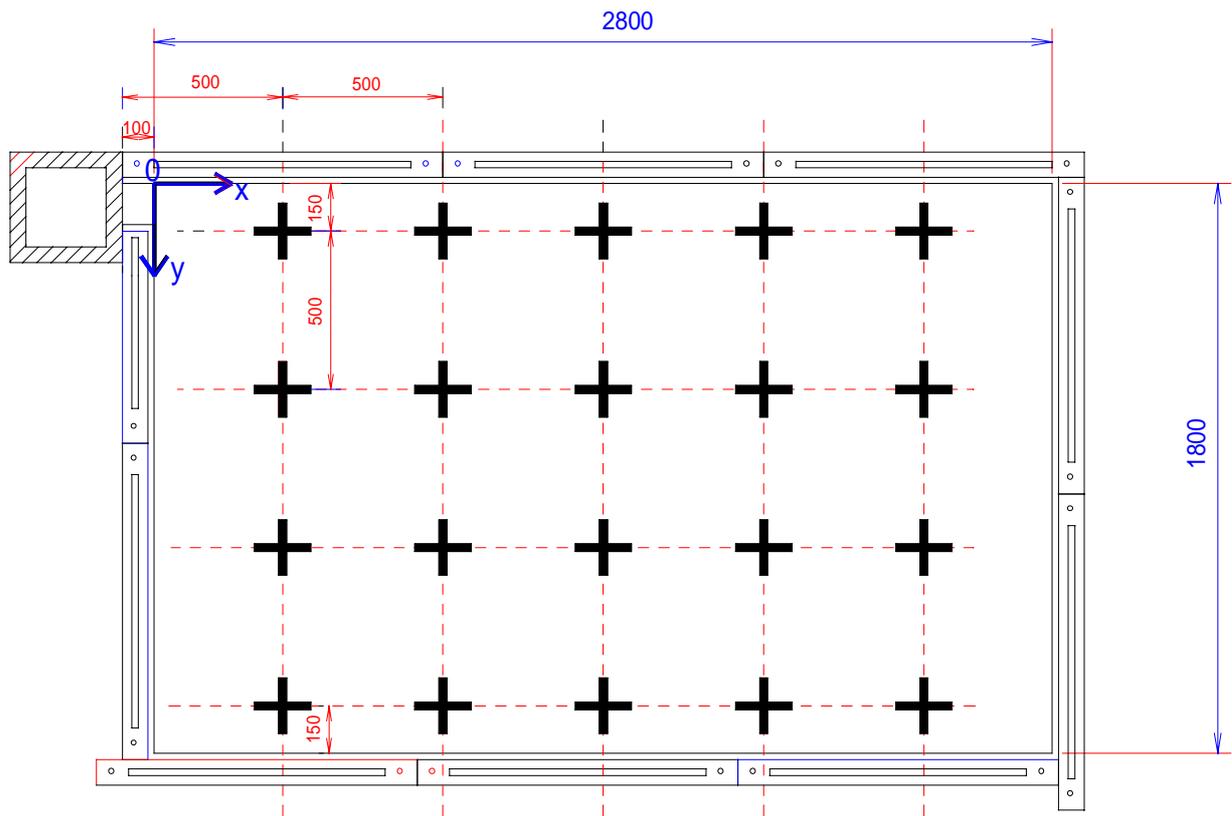
Eisenbehälter- (B × T):
200 × 180 mm

Eisenfenster (H × B):
40 × 120 mm

Eisenrampe
Breite: 135 mm

Sumpfvolumen:
(bis Unterkante Fenster)
0,6 Liter

Eisenausbreitungsfläche
(B × L):
1,80 × 2,80 m



✚ Marking

Abb. 3.9.6: Ausbreitungsfläche für Eisen und Oxid

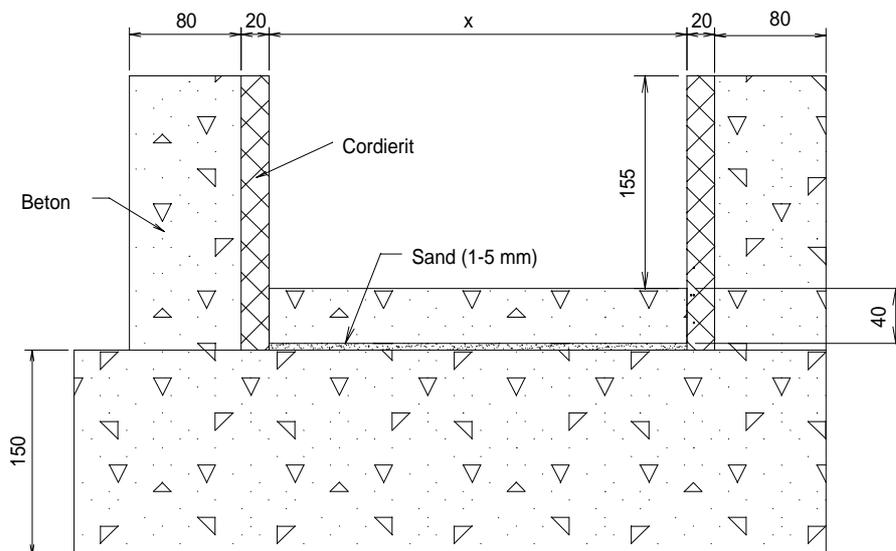


Abb. 3.9.7: Querschnitt durch die Ausbreitungsfläche

Instrumentierung

Temperaturmessung mit W-Re-Tauchthermoelementen

Die W-Re-Thermoelemente sind mit einer Schutzkappe aus 1/10 mm Stahl umgeben. Die Messstelle befindet sich 5 mm hinter dieser Kappe. Die Bezeichnung O.W.x.x.05 bedeutet, dass der Boden der Schutzkappe 5 mm über der Ausbreitungsfläche lag, d. h. die Messstelle 10 mm darüber.

Tab. 3.9.1: Temperaturmessung der Oxidschmelze

Oxid	Längenposition (X)	Breitenposition (Y)	Höhe über Boden
O.W.0.1.05	-0,1 m (Fenster)	~ 125 mm	5 mm
O.W.1.1.05	0,15 m	~ 50 mm	10 mm / Stahlkappe entfernt

Tab. 3.9.2: Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisen	Längenposition (X)	Breitenposition (Y)	Höhe über Boden
E.W.0.1.05	-0,1 m (Fenster)	~ 75 mm	5 mm
E.W.1.1.05	0,15 m	~ 50 mm	10 mm

Oberflächentemperaturmessung im Oxidkanal mit IR-Video

Eine thermographische Messung der Oxidoberflächentemperatur auf der gesamten Ausbreitungsfläche wurde mit einer Infrarotkamera vorgenommen.

Schmelzedetektion in den Ausbreitungskanälen mit NiCr-Ni-Thermoelementen

Die Mantelthermoelemente haben \varnothing 1 mm in TI-Ausführung und werden in einem Edelstahlröhrchen \varnothing 4×1 mm geführt. Die Thermoelemente für den Oxidkanal ragen 2-3 mm aus dem Hüllrohr heraus, die für den Eisenkanal schließen bündig ab.

Tab. 3.9.3: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente auf der Ausbreitungsfläche für Oxid

Oxid	Länge (X) [mm]	Breite (Y) [mm]	Höhe über dem Bo- den [mm]
O.K.1.1.05	150	100	5
O.K.1.2.05	150	600	5
O.K.1.3.05	150	1100	5
O.K.1.4.05	150	1600	5
O.K.1.1.35	150	90	35
O.K.2.1.05	650	100	5
O.K.2.2.05	650	600	5
O.K.2.3.05	650	1100	5
O.K.2.4.05	650	1600	5
O.K.2.1.45	650	90	45
O.K.3.1.05	1150	100	5
O.K.3.2.05	1150	600	5
O.K.3.3.05	1150	1100	5
O.K.3.4.05	1150	1600	5
O.K.3.2.35	1150	590	35
O.K.4.1.05	1600	100	5
O.K.4.2.05	1600	600	5
O.K.4.3.05	1600	1100	5
O.K.4.4.05	1600	1600	5
O.K.4.1.45	1600	90	45
O.K.5.1.05	2120	100	5
O.K.5.2.05	2120	600	5
O.K.5.3.05	2120	1100	5
O.K.5.4.05	2120	1600	5
O.K.5.2.25	2120	590	25
O.K.6.1.05	2620	100	5
O.K.6.2.05	2620	600	5
O.K.6.3.05	2620	1100	5
O.K.6.4.05	2620	1600	5

Tab. 3.9.4: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente auf der Ausbreitungsfläche für Eisen

Eisen	Länge (X) [mm]	Breite (Y) [mm]	Höhe über dem Boden [mm]
E.K.1.1.05	150	100	5
E.K.1.2.05	150	600	5
E.K.1.3.05	150	1100	5
E.K.1.4.05	150	1600	5
E.K.2.1.05	650	100	5
E.K.2.2.05	650	600	5
E.K.2.3.05	650	1100	5
E.K.2.4.05	650	1600	5
E.K.3.1.05	1150	100	5
E.K.3.2.05	1150	600	5
E.K.3.3.05	1150	1100	5
E.K.3.4.05	1150	1600	5
E.K.4.1.05	1650	100	5
E.K.4.2.05	1650	600	5
E.K.4.3.05	1650	1100	5
E.K.4.4.05	1650	1600	5
E.K.5.1.05	2150	100	5
E.K.5.2.05	2150	600	5
E.K.5.3.05	2150	1100	5
E.K.5.4.05	2150	1600	5
E.K.6.1.05	2650	100	5
E.K.6.2.05	2650	600	5
E.K.6.3.05	2650	1100	5
E.K.6.4.05	2650	1600	5

Temperaturmessung im Substrat der Oxidfläche

In das Substrat der Oxidfläche werden 4 NiCr-Ni-Thermoelemente \varnothing 0,5 mm in TI-Ausführung eingebettet.

Tab. 3.9.5: Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente im Substrat für Oxid ausbreitung

Oxid	Längenposition (X) [mm]	Breitenposition (Y) [mm]	Tiefe im Substrat [mm]
O.K.S.1	300	220	1
O.K.S.3	300	220	3
O.K.S.5	300	220	5
O.K.S.10	300	220	10

Schmelzedetektion am Thermittiegel

Unterhalb der Düse befinden sich zwei Thermoelemente zur Detektion des Schmelzeaustritts aus dem Tiegel (TA1 und TA2).

Zeitlicher Ablauf des Experiments

Zündung vom PC

- TA1 und /oder TA2 detektieren den Schmelzeabstich (23,84 s nach Zündung)
- Start der Aufzeichnung aller Thermoelementensignale (500 Hz, ~512 s, 0 s Pretime), Blitze für den Eisenkanal zünden
- Die Schmelze läuft durch das schwenkbare Rohr zuerst in den Eisenbehälter und ohne weitere Rückhaltung durch das offene Eisenfenster direkt in den Eisenkanal.
- Start einer Zeitverzögerung von 22 s
- Das Rohr wird umgeschwenkt (46,26 s nach Zündung)
- Blitze am Oxidkanal zünden
- Aufzeichnung der Infrarotkamera und des Pyrometers startet
- Die Schmelze läuft in den Oxidbehälter, füllt das Sumpfvolumen und tritt dann (ca. 1 s später) durch das offene Oxidfenster in den Oxidkanal ein

Oxidausbreitung

Ausgebreitete Masse

Die ausgebreitete Oxidmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 121 kg. Als Anfangstemperatur kann aus den Thermoelementmessungen eine Temperatur von ~ 2150 °C abgelesen werden. Bei dieser Temperatur kann eine Dichte von ~ 2700 kg/m³ zugrunde gelegt werden. Damit ergibt sich ein ausgebreitetes Volumen von 0,0448 m³.

Volumenrate

Das Tiegelgewicht wurde von den Wägezellen während des gesamten Reaktions- und Ausfließvorgangs gemessen. Die Gewichtsabnahme nach dem Umschwenken auf Oxid (22 s nach Abstich) beträgt 125 kg. 121 kg davon flossen auf die Ausbreitungsfläche, Abbildung 3.9.8. Die durch Differenzieren der Gewichtsabnahme ermittelten Volumenströme sind in der Abbildung dargestellt.

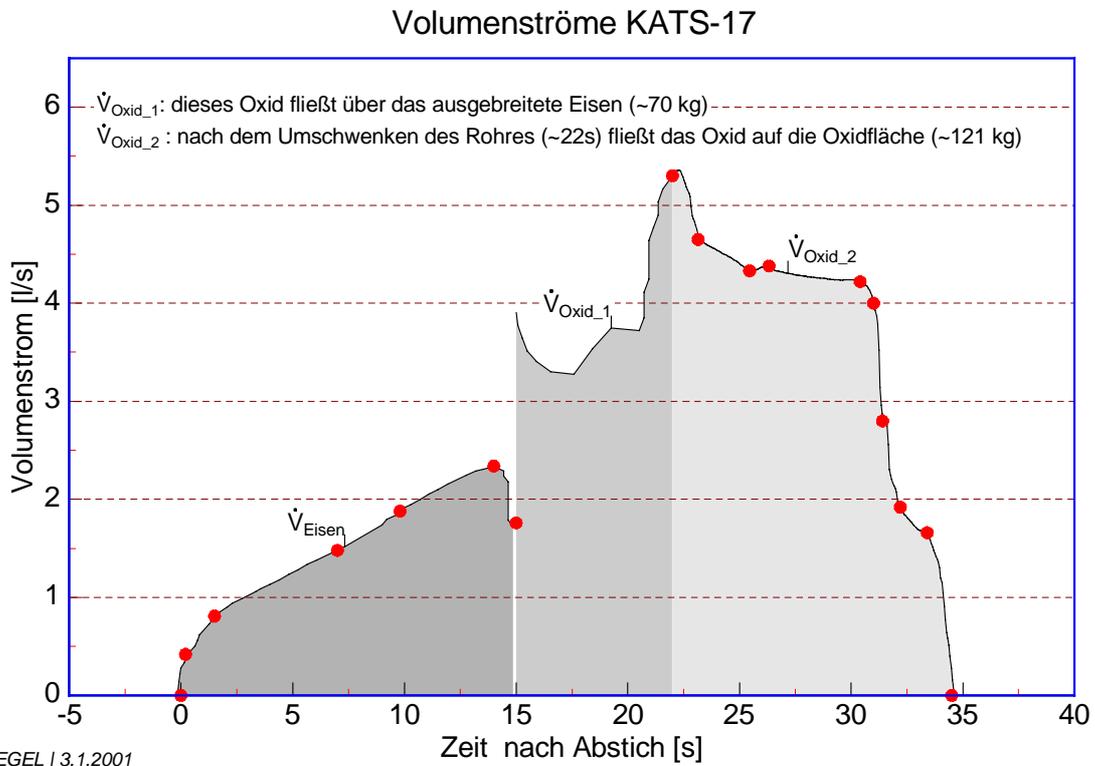


Abb. 3.9.8: Gemessene Volumenströme für Oxid- und Eisenschmelze

In der folgenden Tabelle 3.9.6 ist der Oxidvolumenstrom mit wenigen Punkten grob wiedergegeben (siehe auch Abbildung).

Tab. 3.9.6: Zeitlicher Volumenstrom für die Oxidschmelze

Zeit ab Umschwenken [s]	Volumenstrom [l/s]
0	5.3
1.15	4.65
3.45	4.33
4.32	4.38
8.4	4.22
9.0	4
9.4	2.8
10.2	1.92
11.4	1.66
12.5	0

Oxidschmelzenausbreitung

Die Ausbreitung beginnt schon ca. 1 s nach dem Umschwenken des Schmelzeleitrohres. Ein erster dünner Schmelzefilm und ein Tropfenregen kommen aus dem Oxidbehälter auf die Fläche geschossen und rutschen zunächst scheinbar reibungslos über den Beton, bevor sich der große Massenstrom aufbaut. Unmittelbar nach Beginn der Ausbreitung kann aus den Videoaufzeichnungen eine Wechselwirkung mit dem Beton beobachtet werden. Die Schmelze wird deutlich sichtbar durch die Erosion und die aufsteigenden Gase (Wasserdampf) bewegt. Die Ausbreitung ist als recht gleichmäßig nach allen Seiten zu beschreiben und geschieht ohne wesentliche Stockungen. Die maximale Flächenbedeckung ist bereits nach ca. 15 s erreicht, Abbildung 3.9.10, also etwa zeitgleich mit dem Ende der Nachspeisung der Schmelze.

Es wurde eine Fläche von ca. 3,1 m² bedeckt mit einer sehr gleichmäßigen Schmelzedicke.

Die sichtbare Bewegung der teilerstarten Kruste durch die Wechselwirkung mit dem Beton endet ca. 27 s nach Beginn der Ausbreitung.

Schmelzenausbreitung aus Videoaufnahmen

Die Auswertung der Videoaufzeichnung läßt sich nur graphisch darstellen. Die Umrissse der sich ausbreitenden Schmelze wurden in insgesamt sechs Zeitschritten als Datei abgespeichert und als Fläche berechnet, Tabelle 3.9.7 und Abbildung 3.9.9.

Tab. 3.9.7: Zeitliche Flächenbedeckung der Oxidschmelze

Zeit ab Beginn der Ausbreitung [s]	Bedeckte Fläche [m ²]
0	0
2	0.34
4	0.84
5	1.08
7	1.77
10	2.58
16	3.13

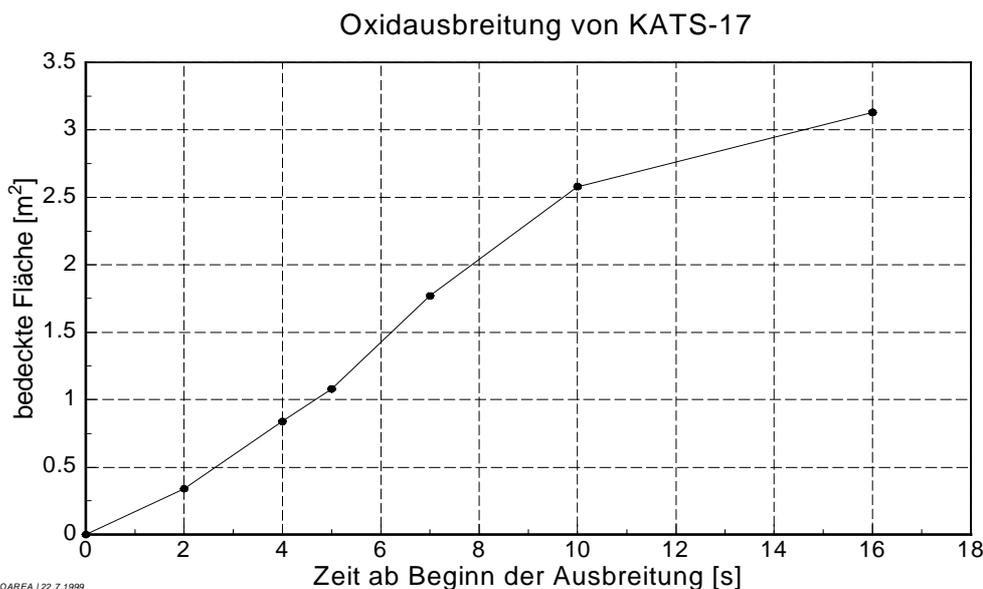


Abb. 3.9.9: Zeitliche Flächenbedeckung der Oxidschmelze

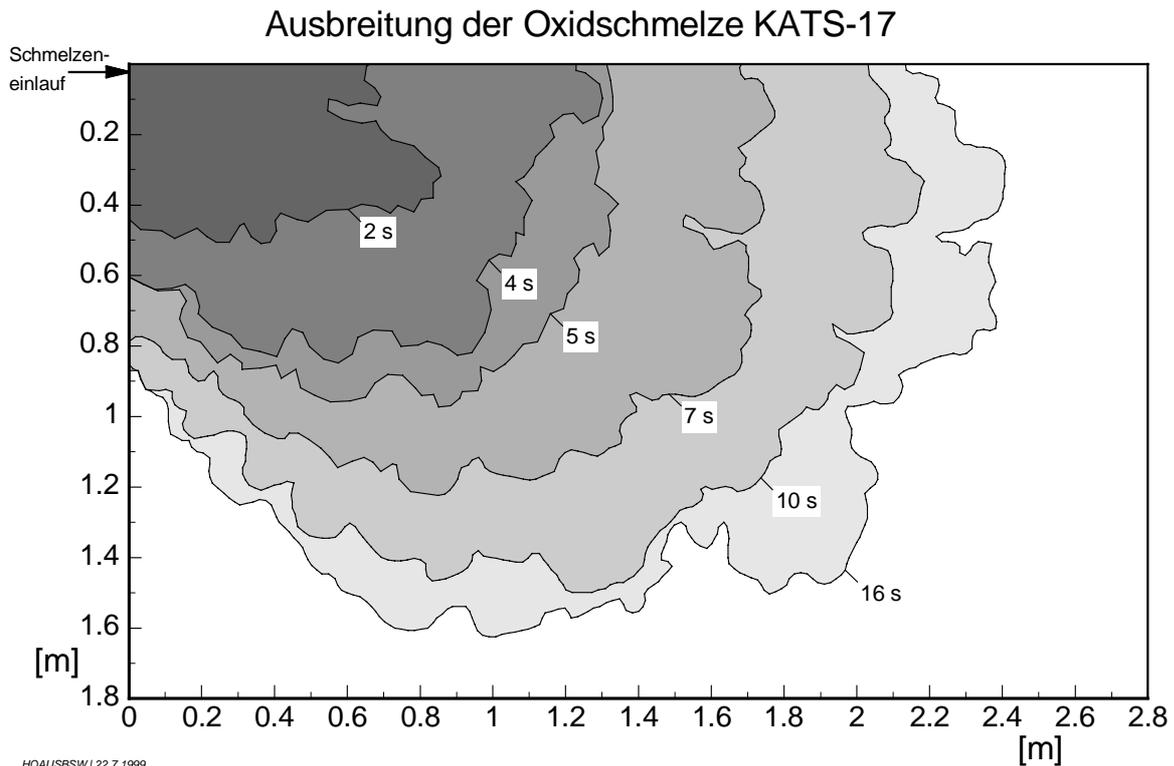


Abb. 3.9.10: Zeitliches Ausbreiten der Oxidschmelze

Temperaturmessung im Oxidkanal

In Tabelle 3.9.8 und in Abbildung 3.9.11 sind die Temperaturmessungen im Oxidkanal aufgeführt. Für die Nachrechnungen und weiteren Auswertungen kann von einer Anfangstemperatur zu Beginn der Schmelzenausbreitung von 2150 °C ausgegangen werden.

Tab. 3.9.8: Temperaturmessungen auf der Ausbreitungsfläche für Oxid

Oxid	Max. Temp.	Zeitpunkt des Maximums (bezogen auf Beginn der Ausbreitung)	Bemerkungen
O.W.0.1.05	2150 °C	2,5 s	
O.W.1.1.05	----		Ausgefallen

Das Thermoelement O.W.1.1.05 hat vor Erreichen des Maximums versagt.

Temperaturmessung im Substrat

Abbildung 3.9.12 zeigt die Aufzeichnungen der in den Beton eingebetteten NiCr-Ni-Thermoelemente. Die Betonerosion an dieser Stelle ($x=300$ mm, $y=220$ mm) war gering, lediglich das oberste Thermoelement O.K.S.1 (1mm unter der Oberfläche, Tabelle 3.9.5) war, nachdem die erstarrte Schmelze von der Ausbreitungsfläche entfernt war, bloßgelegt, aber nicht angeschmolzen. Es hatte demnach keinen direkten Schmelzekontakt.

Die Aufzeichnungen entsprechen den vier Positionen bei 1,3,5 und 10 mm im Beton unter der Oberfläche

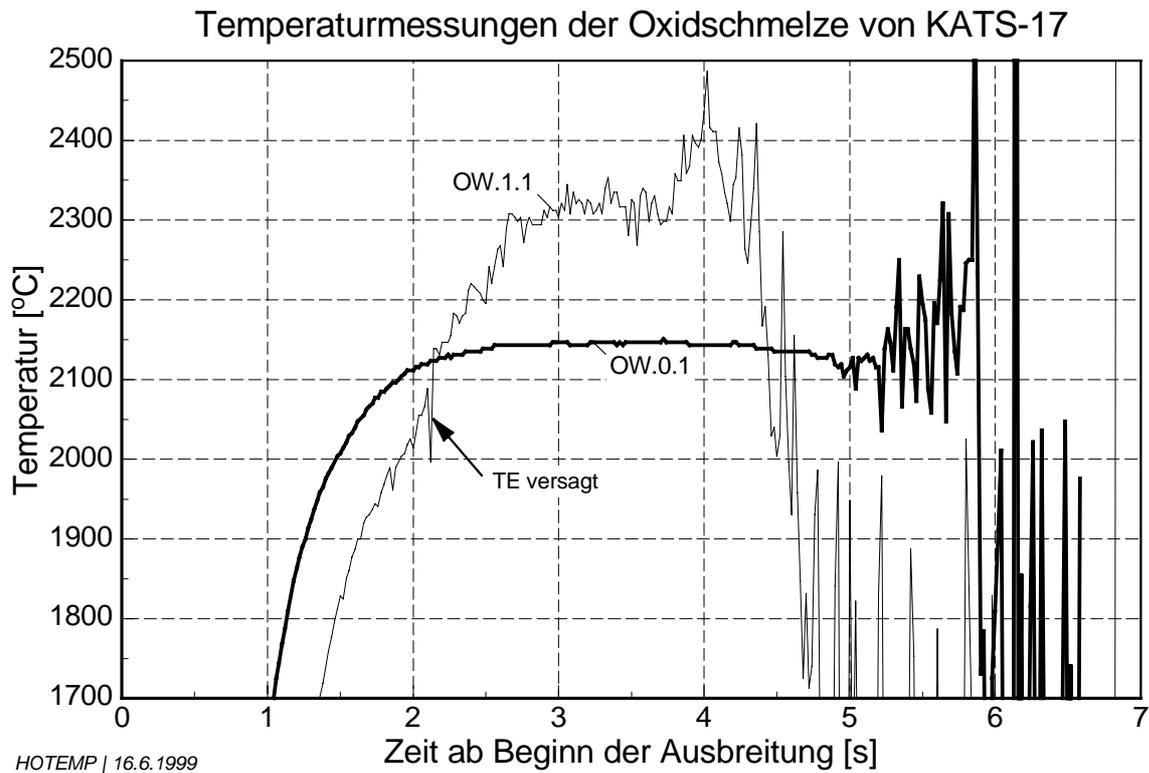


Abb. 3.9.11: Temperaturmessungen der Oxidschmelze

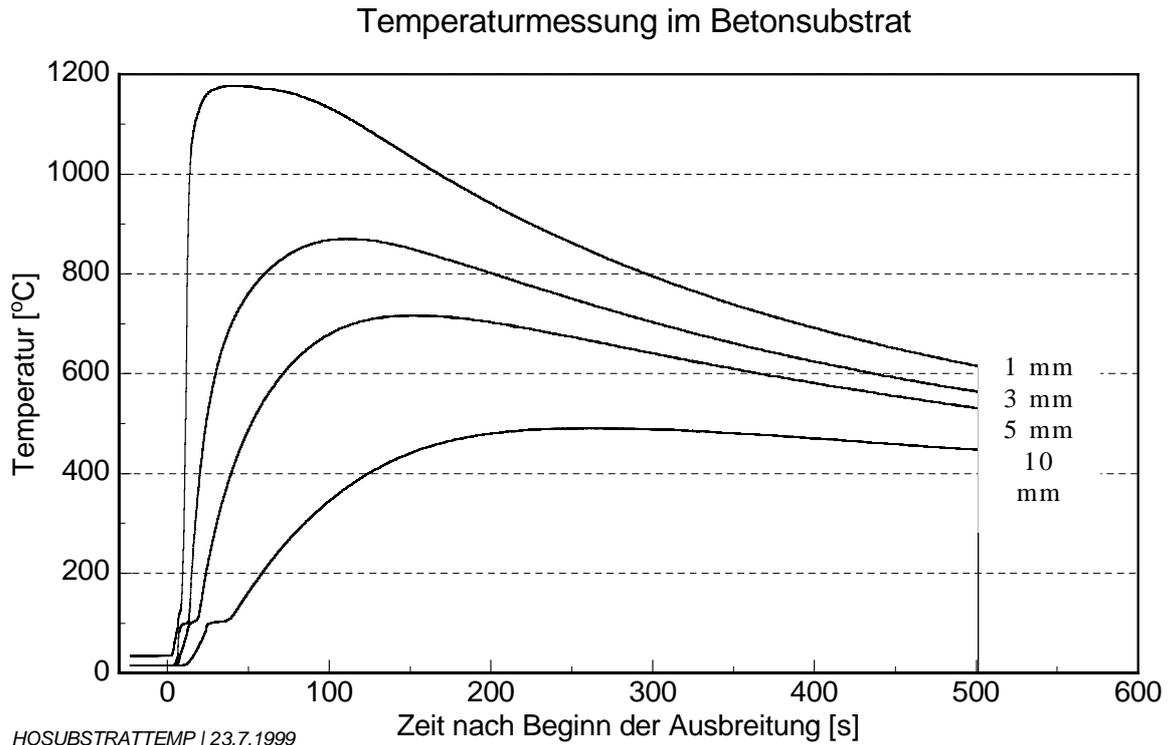


Abb. 3.9.12: Temperaturmessungen im Substrat

Schmelzeverteilung

Die Dicke der erstarrten Oxidschicht wurde an einer Vielzahl von Stellen ausgemessen (~ 20 Einzelmessungen).

Die Schmelze ist aufgrund der Wechselwirkung mit dem Beton (Erosion, Wasserverdampfung) sehr uneben erstarrt. Es hat sich eine Oberfläche aus vielen einzelnen „Hügeln“ (bzw. Vulkanen) gebildet, die im großen Maßstab betrachtet eine sehr große Regelmäßigkeit aufweist. Die Schmelzehügel haben zum Teil an ihrer höchsten Stelle ein Loch und sind somit wohl als Dampfkanal während der Betonerosion entstanden. Die Durchmesser dieser kleinen Vulkane betragen ~60 mm. Die typische Höhendifferenz zwischen Gipfel und Talsohle beträgt 15 bis 20 mm bei Gipfelwerten von 40 bis 50 mm.

An den Randbereichen fällt die Schmelzendicke über sehr kurze Strecken (100-200 mm) vom Durchschnittsniveau 30 mm auf null ab.

Erosion im Oxidkanal

Ein Randbereich von 20 – 30 cm Breite ab der äußeren Kontur der ausgebreiteten Schmelze ist gelbbraun verfärbt. Die Oberfläche ist kaum angegriffen. Eine 10 bis 20 cm breite Zone schließt sich daran nach innen an. Die obere Betonschicht ist angegriffen und rau, aber noch sind keine Kieselsteine freigelegt. In X-Richtung bis 1,8 m und in Y-Richtung bis 1,2 m: Kieselsteine schauen durch; Erosion 5 bis 7 (maximal 10 mm), sehr gleichmäßig.

Eisenausbreitung

Ausgebreitete Masse

Die ausgebreitete Eisenmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 147,3 kg. Das W-Re-Thermoelement, das direkt im Eisenfenster positioniert war, hat 2,2 s nach Schmelzekontakt eine Maximalspannung entsprechend einer Temperatur von 2215 °C erreicht. Bei dieser Temperatur hat eine reine Eisenschmelze eine Dichte von 6420 kg/m³. Aus den vorangegangenen Experimenten hat man jedoch einen Erfahrungswert von 6300 kg/m³ gewonnen, der auch eventuelle Gasanteile berücksichtigt. Daher soll im folgenden auch dieser Wert zugrunde gelegt werden.

Somit ergibt sich ein Volumen der ausgebreiteten Eisenschmelze von 0,0234 m³.

Volumenrate

Das Tiegelgewicht wurde von den Wägezellen während des gesamten Reaktions- und Ausfließvorgangs gemessen.

Die durch Differenzieren der Gewichtsabnahme ermittelten Volumenströme sind bei der Oxidausbreitung dargestellt.

In Tabelle 3.9.9 ist der ermittelte Eisenvolumenstrom mit wenigen Punkten grob wiedergegeben.

Tab. 3.9.9: Zeitlicher Volumenstrom der Eisenschmelze

Zeit ab Umschwenken [s]	Volumenstrom [l/s]
0	0
0.2	0.42
1.5	0.81
7	1.48
9.8	1.88
14	2.34
15	1.76

Eisenschmelzenausbreitung

Ähnlich wie bei der Ausbreitung der Oxidschmelze ist zunächst zu beobachten, daß ein Strom von kleineren und größeren (handtellergrößen) Eisentropfen schnell und ohne merkliche Verzögerung die Ausbreitungsfläche überqueren und an der Umrandung liegenbleiben. Diesen Effekt einer scheinbar reibungslosen Schmelzenausbreitung (wie auf einem Gasfilm) kennt man schon von den 1-dim Experimenten KATS-10 und -11, bei denen der Ausbreitungskanal ebenfalls aus epoxygestrichenem Beton bestand.

Die nachfolgende Schmelze breitet sich, begleitet von starker Rauchentwicklung durch den abbrennenden Lack, auf über die Hälfte der zur Verfügung stehenden Fläche aus. Die gegenüberliegende kurze Seite wurde von der Hauptmasse nicht erreicht, die gegenüberliegende lange Seite wurde zum Teil erreicht.

Eine merkliche energetische Schmelze-Wasser-Wechselwirkung durch die 1 mm Wasserschicht auf der Ausbreitungsfläche war zu keiner Zeit des Vorgangs zu beobachten.

Fast der gesamte Eisenregulus ist nach dem Experiment von einer Oxidkruste bedeckt, die zum Teil aus erodiertem Beton besteht aber auch aus ~70 kg Oxid aus der Thermitreaktion. Insgesamt wurden 97 kg Oxid vom Eisen nach dem Versuch abgehoben. Dabei zeigte sich, daß

um den Schmelzeinlauf herum die Eisenschicht nicht mehr geschlossen war (eine Parallele zu KATS-16).

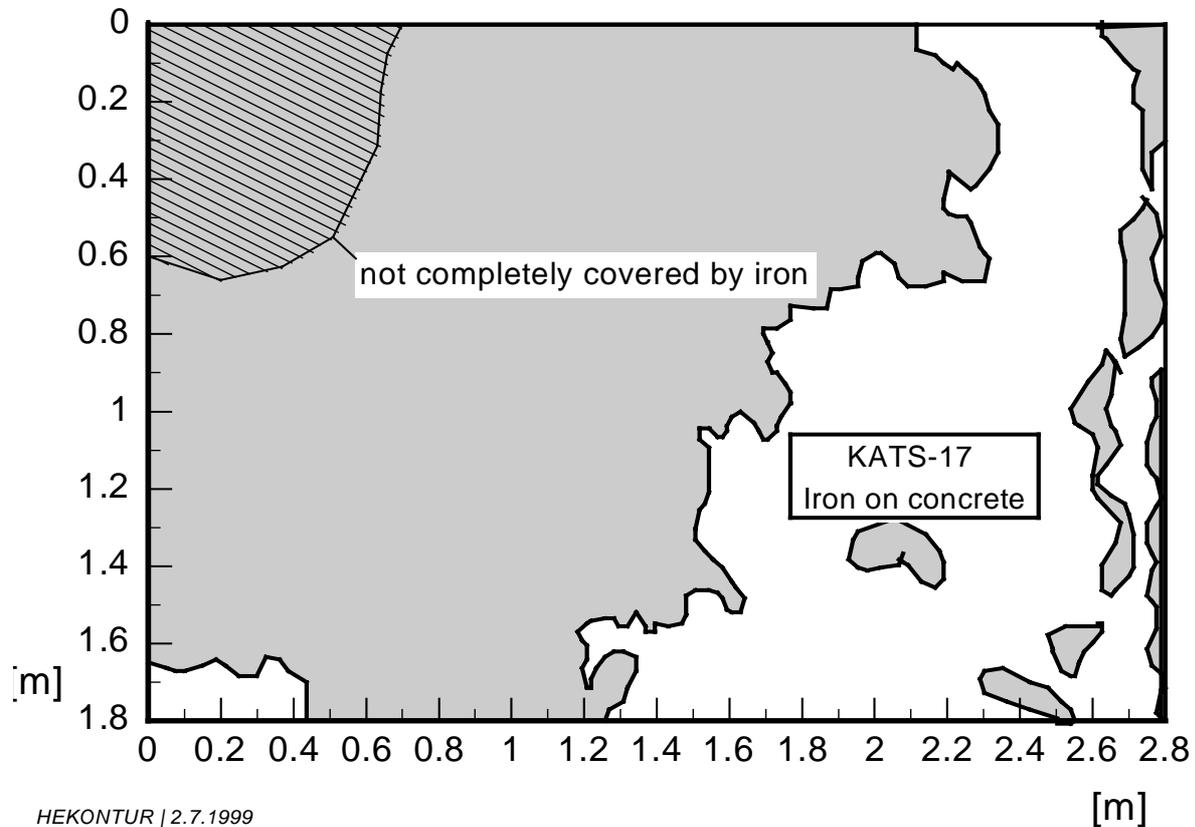


Abb. 3.9.13: Maximale Ausbreitung der Eisenschmelze

Für das Eisen wurde kein zeitlicher Verlauf, sondern nur die maximale von Eisen bedeckte Fläche bestimmt, Abbildung 3.9.13. Ohne die freie Fläche in der Nähe des Einlaufs zu berücksichtigen, können $3,2 \text{ m}^2$ ermittelt werden.

Temperaturmessung

In Tabelle 3.9.10 und in Abbildung 3.9.14 sind die Temperaturmessungen im Eisenkanal aufgeführt.

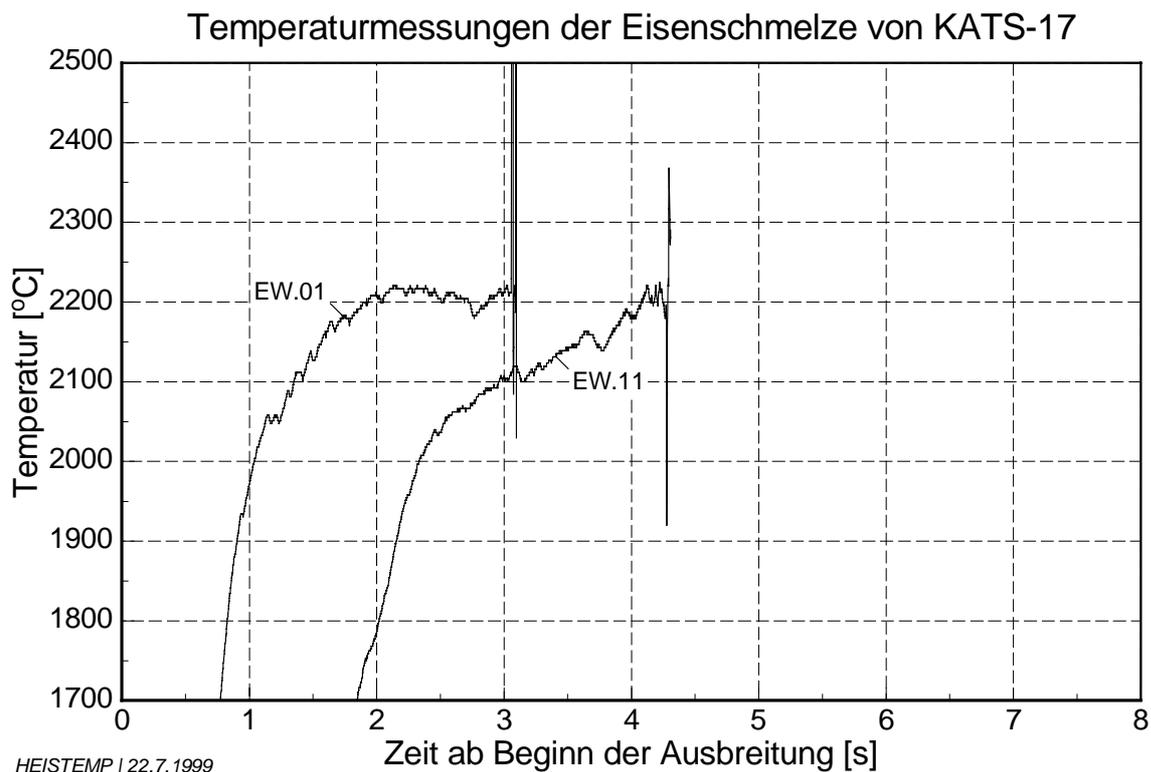
Tab. 3.9.10: Temperaturmessungen im Eisenkanal

Eisen	Max. Temp.	Zeitpunkt des Maximums *)	Bemerkungen
E.W.0.1.05	~ 2215°C	2,2 s	
E.W.1.1.05	-		Maximum unklar

*) bezogen auf Beginn der Ausbreitung

Anfangstemperatur der sich ausbreitenden Eisenschmelze: ~ 2215°C.

Das Thermoelement E.W.1.1 zeigt vor dem endgültigen Ausfall starke Unregelmäßigkeiten und schwingt nicht asymptotisch in einen Maximalwert ein. Die Auswertung ist daher fraglich.

**Abb. 3.9.14:** Temperaturmessung der Eisenschmelze

Eisenschmelzeverteilung

Die Dicke des Eisenregulus betrug 10 – 16 mm, an einigen Stellen 25 mm.

Erosion im Eisenkanal

Es wurden keine Daten zur Erosion im Eisenkanal gesammelt.

Analyse von Proben aus dem Eisenkanal

Es wurden keine Proben aus dem Eisenkanal entnommen.

4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen aus den KATS-Experimenten

4.1 Zusammenfassung

Um zu Schlußfolgerungen aus den hier beschriebenen Ausbreitungstests zu gelangen, müssen diese zuerst in einzelne Gruppen mit gleichen Merkmalen zusammengefaßt und verglichen werden. Dies erfolgt hier zuerst für die Ausbreitungsexperimente in eindimensionale Kanäle, getrennt nach Eisen- und Oxidschmelzen. Danach wird analog mit den zweidimensionalen Ausbreitungstests verfahren.

Eisenschmelze in eindimensionale Kanäle

Die Ausbreitungsversuche auf Keramik dienten immer als Referenzversuche für weitere Experimente.

Tab. 4.1.1: Eisenschmelze in eindimensionale Kanäle

KATS Test #	Substrat	Masse im Kanal (kg)	Temperatur Schmelze (K)	Volumenrate (l/s) / Dauer(s)	Ausbreitungslänge(m)
12	Keramik	135	2170	6.7 → 0 l/s in 6 s	11.35
14	Keramik	154	2440	1 → 1.5 l/s in 20 s	9.4
10	Beton, 1mm Wasser (Epoxy)	131	2220	6.7 → 0 l/s in 6s	>12 m erste Front 7.5 m Hauptfront
11	Beton, trocken (Epoxy)	132	2220	6.7 → 0 l/s in 6s	>15 m erste Front 8.5 m Hauptfront
13	Beton, trocken	134	2220	6.7 → 0 l/s in 6s	8.5

Vergleich der Temperaturen der Eisenschmelze

Die Schmelztemperatur der Eisenschmelze liegt bei 1808 K. Die Eisenschmelze war in allen Versuchen stark überhitzt.

Vergleich der Ausbreitungsversuche auf Keramik

Es wurden zwei Versuche KATS-12 und –14 eindimensional auf Keramik durchgeführt. In KATS-12 war die Temperatur der Eisenschmelze deutlich geringer als in KATS-14. Dagegen war die Volumenrate in KATS-12

deutlich höher als in KATS-14. In KATS-12 beträgt die Ausbreitungslänge 11.35 m, in KATS-14 9.5 m. Vergleicht man diese beiden Versuche mit den früheren Versuchen KATS 6 [14] und KATS 7 [15], die ebenfalls eine eindimensionale Ausbreitung auf Keramik untersuchten, kommt man zu dem Ergebnis, daß die Überhitzung bei einer Eisenschmelze nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die maximale Ausbreitung einer überhitzten Eisenschmelze wird durch die Oberflächenspannung der Eisenschmelze bestimmt.

Vergleich der Ausbreitungsversuche auf Beton

Die drei Ausbreitungsexperimente auf Beton KATS-10, -11 und -13 unterscheiden sich durch die unterschiedliche Behandlung des Betons. In KATS-10 und -11 wurde eine Epoxyschicht auf den Beton aufgebracht, um ihn wasserundurchlässig zu machen. In KATS-10 befand sich zusätzlich eine 1 mm Schicht Wasser auf dem behandelten Beton. Die Massen und die Temperaturen der Eisenschmelze in allen drei Versuchen sind fast identisch, ebenfalls die Volumenraten. Somit unterscheiden sich die drei Versuche nur im Substrat. In KATS-10 und -11 beobachtet man, daß eine erste schnelle Front geradezu über den Beton „schießt“ und dann das Kanalende erreicht, siehe Abbildung 4.1.1.

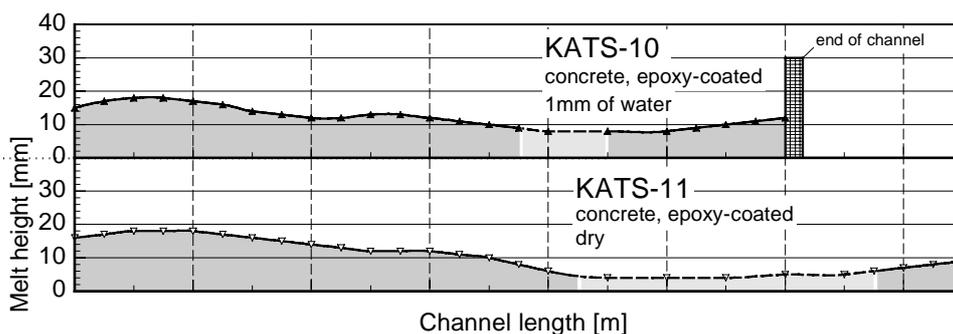


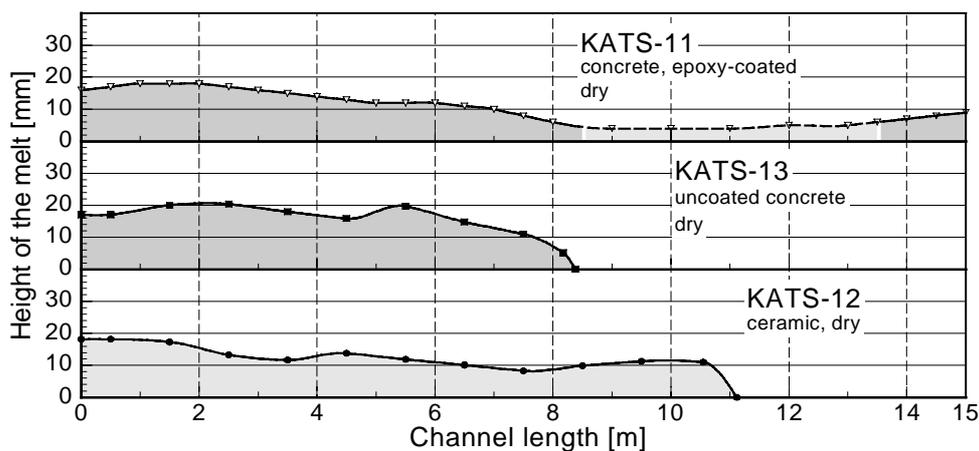
Abb. 4.1.1: Ausbreitung von Eisen auf mit Epoxy behandeltem Beton mit und ohne Wasser

(Masse ≈ 135 kg; Temperatur $\approx 1950 \pm 50$ °C; Anfangsvolumenrate 6.7 l/s, linear abfallend)

Die Epoxyschicht in KATS-10 und -11 wirkt wie ein Gaspolster für die erste Front. Ist die Epoxyschicht durch Verdampfen entfernt worden, breitet sich die restliche Schmelze wie in KATS-13 auf trockenem Beton aus, die Hauptfronten liegen zwischen 7.5 m und 8.5 m. In der Vorläuferfront der Eisenschmelze befindet sich nur ein kleiner Anteil der Gesamtmenge an Eisen, der weitaus größte Massenanteil gehört zur zweiten Hauptfront.

Vergleich der Experimente Keramik/Beton

Für eine Eisenschmelze gibt es keine ausgeprägten Unterschiede zwischen der Ausbreitung auf trockener Keramik und auf Beton, Abbildung 4.1.2. In allen Fällen breitet sich die Eisenschmelze aus, bis sich ihre Höhe gemäß dem Kräftegleichgewicht zwischen Gravitation und Oberflächenspannung einstellt.



B-C-D EISENDICKE | 17.6.1999

Abb. 4.1.2: Trockene Ausbreitung von Eisen auf Keramik und Beton (Masse ≈ 135 kg; Temperatur $\approx 1950 \pm 50$ °C; Anfangsvolumenrate 6.7 l/s, linear abfallend)

Vergleich der Experimente naß/trocken

Die Ausbreitungstests mit Eisen in Gegenwart von einer Wasserschicht von 1 mm in Test KATS-10 und 10 mm in Test KATS-4 [12] zeigten, daß nur geringe energetische Wechselwirkungen zwischen der Eisenschmelze und dem Wasser auftraten. Die Gegenwart von einem Wasserfilm

von einigen Millimetern hat praktisch keinen Einfluß auf die globale Ausbreitung.

Oxidschmelze in eindimensionale Kanäle

Alle hier beschriebenen Versuche wurden mit einem SiO₂-Zuschlag von 8 Gew% durchgeführt. Daher lagen die Anfangstemperaturen bei diesen Versuchen niedriger als bei den früheren Versuchen, KATS-5 [13] und KATS-7 [15]. Der SiO₂-Zuschlag bewirkt eine deutliche Reduktion der Liquidus- und Solidustemperaturen. Die Liquidustemperatur verringert sich um etwa 125 K auf 2198 K (1925 °C).

Wie bei der Eisenschmelze dienen hier die Ausbreitungsversuche auf Keramik als Referenzversuche für weitere Experimente.

Tab. 4.1.2: Oxidschmelze in eindimensionale Kanäle

Test #	Substrat	Masse im Kanal (kg)	Temperatur Schmelze (K)	Volumrate (l/s) / Dauer(s)	Ausbreitungslänge(m)
KATS-12	Keramik	186	2300	12.7 – 0 l/s in 10 s	11.7
KATS-14	Keramik	176	2240	2 → 1.2 l/s in 37 s	7.2
KATS-10	Beton, 1mm Wasser (Epoxy)	179	2310	12.4 → 0 l/s in 10s	>12 erste Front 6.5 m Hauptfront
KATS-11	Beton, trocken (Epoxy)	183	2335	12.7 → 0 l/s in 10s	9.5 m erste Front 6.8 m Hauptfront
KATS-13	Beton, trocken	185	2325	12.7 → 0 l/s in 10s	7.5

Vergleich der Temperaturen der Oxidschmelzen

Die Schmelzentemperaturen von KATS-10, -11, -12 und -13 liegen zwischen 100 K und 140 K über der Liquidustemperatur. In KATS-14 lag die Temperatur mit 42 K nur wenig über Liquidus.

Vergleich der Ausbreitung auf Keramik

Es wurden zwei Versuche, KATS-12 und -14, eindimensional auf Keramik durchgeführt. In KATS-12 war die Temperatur der Schmelze etwas höher als in KATS-14. In KATS-14 war die Schmelze nur etwa 40 K überhitzt. Die Volumenrate war in KATS-12 mit ca. 13 l/s deutlich höher als in KATS-14. In KATS-12 betrug die Ausbreitungslänge 11.7 m und in KATS-14 7.2 m. Diese beiden Experimente zeigen, daß sowohl der Grad der Überhitzung als auch die Volumenrate aufgrund ansteigender Viskosität einen entscheidenden Einfluß auf die Ausbreitung haben.

Vergleich der Ausbreitung auf Beton

Wie bei den Eisenexperimenten unterscheiden sich die drei Ausbreitungsexperimente auf Beton KATS-10, -11 und -13 wiederum durch unterschiedliche Behandlung des Betons. Eine Epoxyschicht, die auf dem Beton aufgebracht wurde, um ihn wasserundurchlässig zu machen, wirkt auch hier beim Oxid für die vorderste Schmelzenfront wie ein Gaspolster. In KATS-10 war zusätzlich eine 1 mm Schicht Wasser auf dem behandelten Beton.

In den beiden Tests KATS-10 und -11 erreichte die Vorläuferfront das Kanalende bei 12 m bzw. 9.5 m. Ist die Epoxyschicht verbrannt und aufgebraucht, breitet sich die restliche Schmelze wie auf trockenem Beton aus, die Hauptfronten liegen zwischen 6.5 m und 7.5 m, Abbildung 4.1.3.

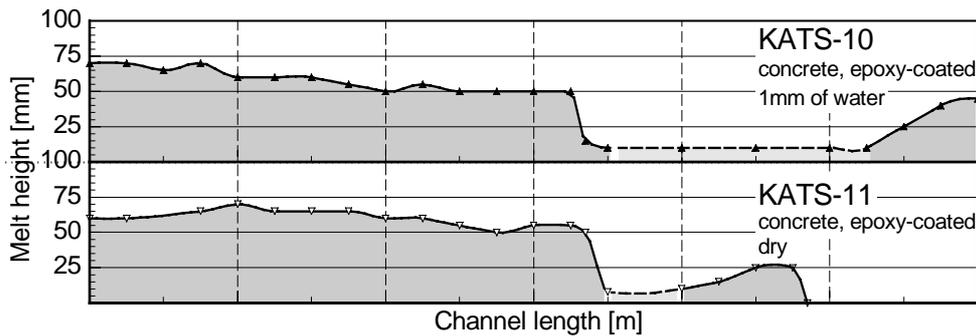


Abb. 4.1.3: Ausbreitung von Oxid auf mit Epoxy behandeltem Beton mit und ohne Wasser

(Masse≈180 kg; Temperatur≈2050±50 °C; Anfangsvolumenrate 13 l/s, linear abfallend)

Vergleich der Ausbreitung Keramik/Beton

KATS-12 ist das trockene Referenzexperiment auf Keramik mit einer Ausbreitung von 11.5 m, ein Wert, der deutlich über den Ergebnissen für Beton liegt. Das heftige Ausgasen des Betonwassers während der Ausbreitung und die intensive Vermischung mit der Oxidschmelze erhöht die effektive Viskosität deutlich, was zu einer Verringerung der Ausbreitungslängen führt, s. Abbildung 4.1.4.

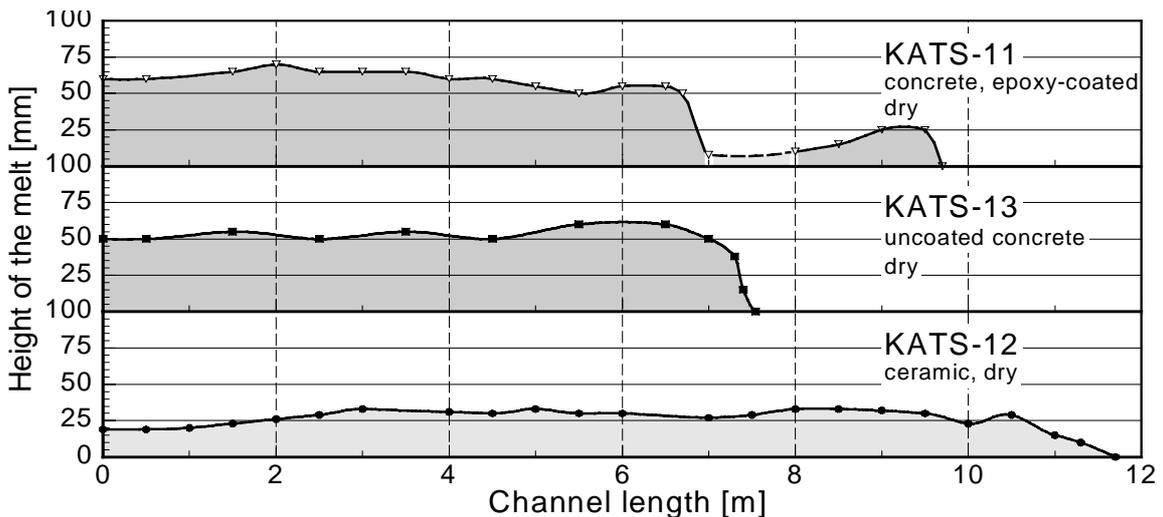


Abb. 4.1.4: Trockene Ausbreitung von Oxid auf Keramik und Beton

(Masse≈180 kg; Temperatur≈2050±50 °C; Anfangsvolumenrate 13 l/s, linear abfallend)

Vergleich der Ausbreitung naß/trocken

Ebenso wie bei den Ausbreitungstests mit Eisen traten hier bei Oxid in Gegenwart einer Wasserschicht auf dem Substrat praktisch keine energetischen Wechselwirkungen zwischen der Oxidschmelze und dem Wasser auf, die Gegenwart von einem Wasserfilm von einigen Millimetern hat auch beim Oxid praktisch keinen Einfluß auf die globale Ausbreitung.

Eisenschmelze auf zweidimensionale Flächen

Tab. 4.1.3: Eisenschmelze auf zweidimensionalen Flächen

Test #	Substrat	Masse im Kanal (kg)	Temperatur Schmelze (K)	Volumrate (l/s) / Dauer(s)	Ausbreitungsfläche (m ²)
KATS-8	Keramik	155 kg Fe, 12 kg Al ₂ O ₃	2373	6.7 – 0 l/s in 7 s	2.6
KATS-15	Keramik	145 kg Fe, 15 kg Al ₂ O ₃	2473	1 → 2 l/s in 17 s	2.3
KATS-16	Beton, trocken	141 kg Fe, 40 kg Al ₂ O ₃	2423	1 → 1.5 l/s in 20s	2.3
KATS-17	Beton, 1 mm Wasser (Epoxy)	147 kg Fe, 80 kg Al ₂ O ₃	2473	1 → 2 l/s in 16s	3

Bei vielen Ausbreitungstests mit Eisenschmelzen trat noch mehr oder weniger eine gewisse Menge an Oxidschmelze durch das Fenster auf die Flächen, nachdem die Eisenschmelze erschöpft war. Stets jedoch war die Reihenfolge so, daß die Ausbreitung der Eisenschmelze davon praktisch unberührt blieb. In der Tabelle 4.1.3 ist die jeweilige Oxidmenge mit angegeben. In der Abbildung 4.1.5 sind alle Ergebnisse graphisch dargestellt.

Vergleich der Temperaturen der Eisenschmelze

Bei den Eisentests lag die Überhitzung in allen Tests oberhalb von 550 K (Schmelztemperatur 1808 K), die Ausbreitungsflächen unterscheiden sich deshalb nicht sehr stark.

Vergleich der Ausbreitung auf Keramik

Es wurden zwei Versuche auf Keramik durchgeführt, KATS-8 und -15. In KATS-8 war die Temperatur etwas geringer, aber immer noch deutlich überhitzt. Die Volumenrate war in KATS-8 deutlich höher als in KATS-15, trotzdem sind die Ausbreitungsflächen ähnlich.

Vergleich der Ausbreitung auf Beton

Es wurden zwei Ausbreitungsversuche auf Beton durchgeführt. In KATS-16 wurde unbehandelter Beton und in KATS-17 wurde mit Epoxy behandelter Beton verwendet. In KATS-17 war zusätzlich eine 1 mm Schicht Wasser auf dem Beton. Die Temperaturen und Massen waren ähnlich. Die endgültige Ausbreitungsfläche ist in KATS-17 größer aufgrund des mit Epoxy behandelten Betons; das an der Wand gegenüber dem Eintrittsfenster gefundene Eisen rührt wie bei den eindimensionalen Tests von der Vorläuferfront her.

Vergleich Ausbreitung Keramik/Beton

Wie bei den eindimensionalen Tests ist die endgültige Ausbreitungsfläche bestimmt durch die Oberflächenspannung des flüssigen Eisens. Die Ausbreitung auf einer trockenen Keramik (Cordierit) ist besser als auf Beton: Bei den Tests mit Keramik sammelt sich die Eisenschmelze gegenüber des Eintrittsfensters (die gemessene Höhendifferenz der genau nivellierten Ausbreitungsfläche beträgt < 0.5 mm/m).

Vergleich Ausbreitung naß/trocken

Wie bei den 1-dimensionalen Experimenten sind auch hier nur geringe energetische Wechselwirkungen zwischen der Eisschmelze und dem Wasser zu erkennen.

Oxidschmelze auf zweidimensionale Flächen

Eine tabellarische Übersicht der Experimente zeigt Tabelle 4.1.3.

Eine graphische Darstellung der zweidimensionalen Ausbreitung der Oxidschmelze erfolgt in Abbildung 4.1.6.

Tab. 4.1.3: Oxidschmelze auf zweidimensionalen Flächen

Test #	Substrat	Masse im Kanal (kg)	Temperatur Schmelze (K)	Volumrate (l/s) / Dauer(s)	Ausbreitungsfläche (m ²)
KATS-8	Keramik	158	2373	7.5 – 0 l/s in 16 s	3.9
KATS-15	Keramik	144	2303	2 l/s in 26 s	2.5
KATS-16	Beton, trocken	129	2223	1.4 l/s in 31s	1
KATS-17	Beton, 1 mm Wasser (Epoxy)	121	2423	3 l/s in 15s	3.1

Vergleich der Temperaturen der Oxidschmelze

In KATS-8 war die Temperatur der Oxidschmelze ca. 200 K über Liquidus, in KATS-15 nur ca. 100 K, in KATS-16 war die Temperatur nur knapp über Liquidus und in KATS-17 war die Temperatur ca. 250 K über Liquidus.

Vergleich der Ausbreitung auf Keramik

In KATS-8 war die Schmelze 200 K über Liquidus und die Volumenrate war mit 7.5 l/s sehr hoch. Aus diesen Gründen breitete sich die Schmelze schnell und weit aus. Die Ausbreitungsfläche beträgt 3.9 m². In KATS-15 dagegen ist die Temperatur der Schmelze etwas niedriger und die Volumenrate ebenfalls mit 2 l/s. Die Schmelze breitet sich langsam aus und gegen Ende der Ausbreitung fächert sich die Schmelze durch Krustenbildung und wieder Aufbrechen auf. Die Ausbreitungsfläche beträgt 2.5 m². An diesen zwei Experimenten kann man deutlich den Einfluß der Viskosität sehen.

Vergleich der Ausbreitung auf Beton

In KATS-16 liegt die Temperatur nahe an der Liquidustemperatur. Die Volumenrate ist ebenfalls sehr klein. Daher breitet sich die Schmelze nur sehr wenig aus (1 m²); die Viskosität ist hoch, bedingt durch die niedrige Anfangstemperatur und durch die Betonerosion. In KATS-17 dagegen ist die Schmelze ca. 250 K überhitzt, die Volumenrate liegt mit 3 l/s nicht ganz so niedrig wie in KATS-16. Die Ausbreitung erfolgt in diesem Fall schnell und die Ausbreitungsfläche beträgt 3.1 m².

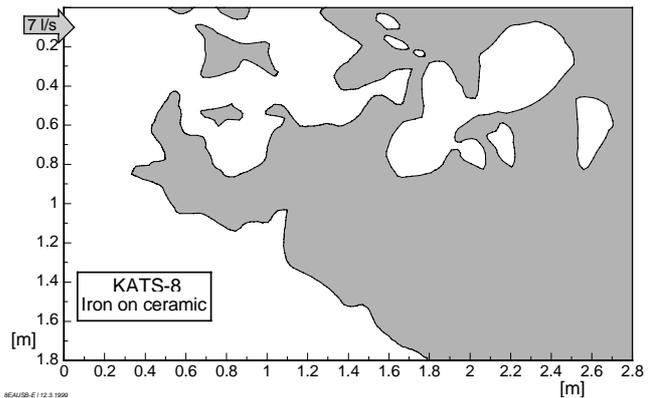
Vergleich Ausbreitung Keramik/Beton

Die Ausbreitung auf Keramik ist auch in den 2-dimensionalen Versuchen mit Oxidschmelzen besser. Durch die Betonerosion wird die effektive Viskosität der Schmelze erhöht.

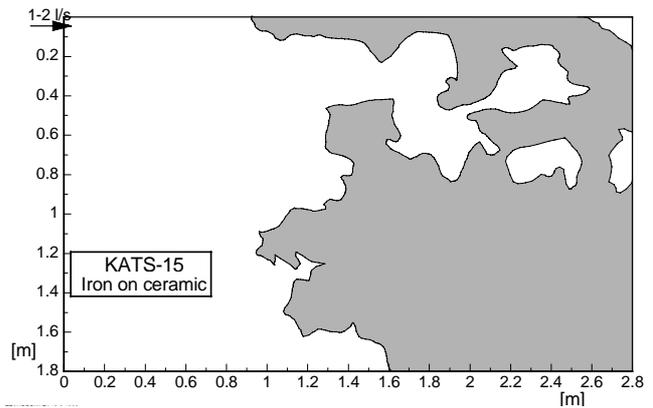
Vergleich Ausbreitung naß/trocken

Ebenso wie bei den eindimensionalen Experimenten mit einer Wasserschicht auf dem Substrat wurden auch hier keine energetischen Wechselwirkungen beobachtet.

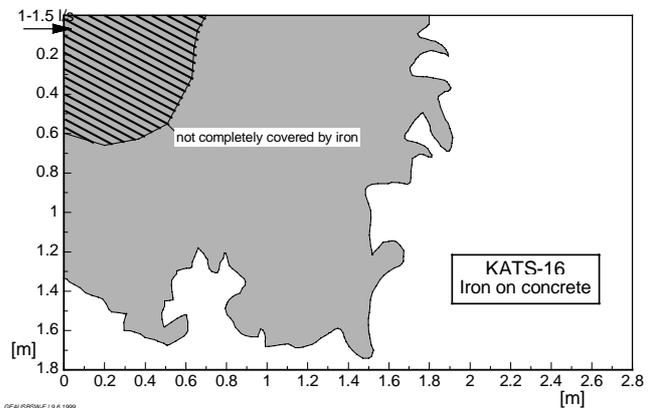
KATS-8	2.6 m²
155 kg Eisen + 12 kg Oxid	
2100°C	
6.7 – 0 l/s in 7 s	
Keramik	



KATS-15	2.3 m²
145 kg Eisen + 15 kg Oxid	
2200°C	
1 – 2 l/s in 17 s	
Keramik	



KATS-16	~ 2.3 m²
141kg Eisen + 40 kg Oxid	
2150°C	
1 – 1.5 l/s in 20 s	
Beton	



KATS-17	~ 3 m²
147 kg Eisen + 80 kg Oxid	
2200°C	
1 – 2 l/s in 16s	
Beton, Epoxy behandelt	
Wasser ~ 1 mm	

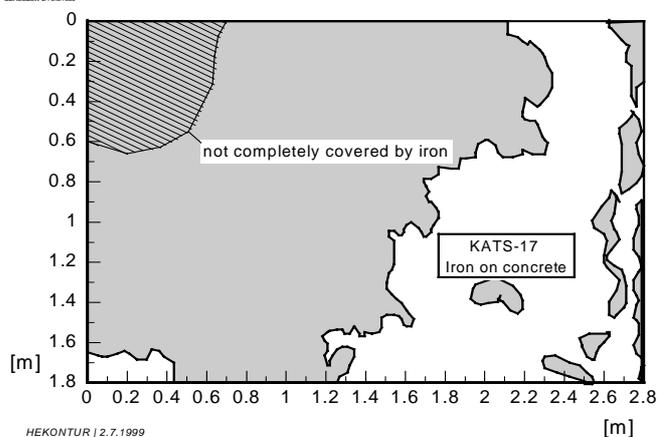
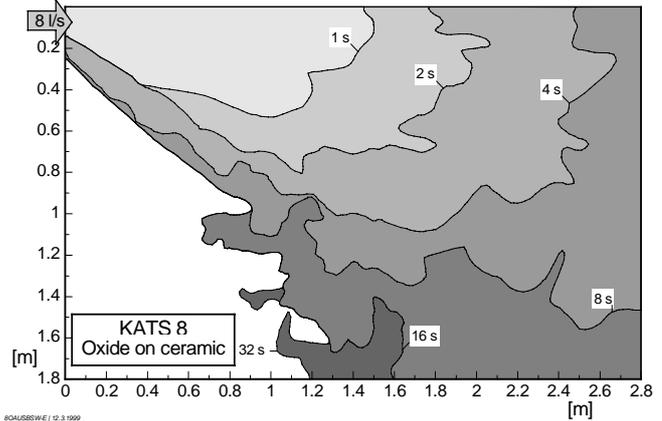
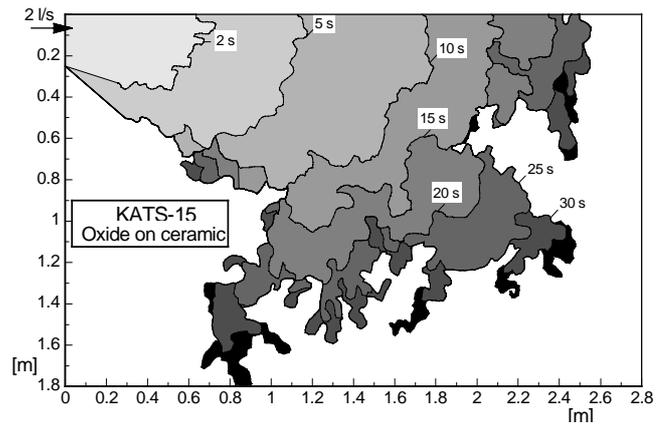


Abb. 4.1.5: 2-dim Ausbreitung einer Eisenschmelze

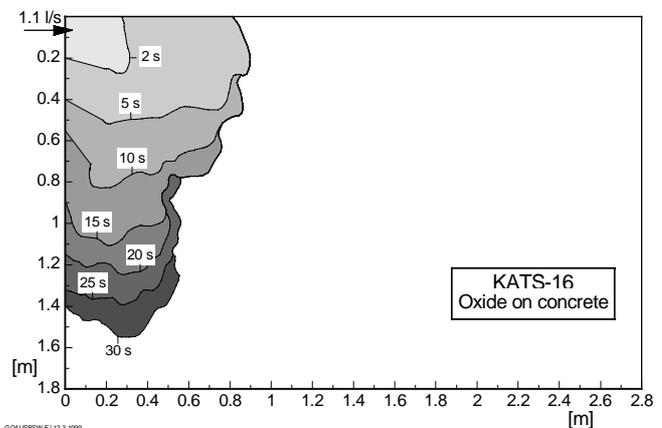
KATS-8	3.9 m²
158 kg	
2100°C	
7.5 – 0 l/s in 16 s	
ceramics	



KATS-15	2.5 m²
144 kg	
2030°C	
~2 l/s in 26 s	
ceramics	



KATS-16	1 m²
129 kg	
1950°C	
~1.4 l/s in 31 s	
concrete	



KATS-17	3.1 m²
121 kg	
2150°C	
~3 l/s in 15 s	
concrete	

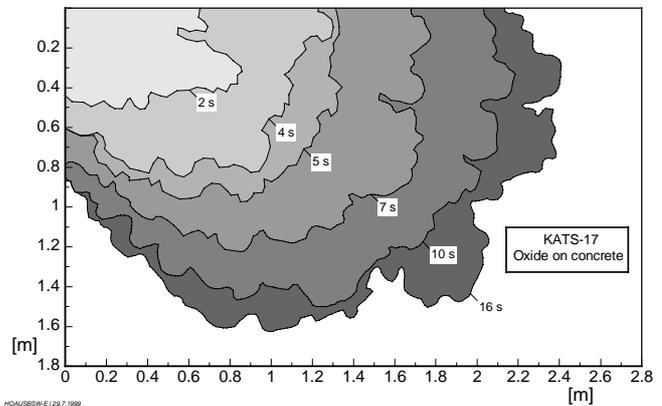


Abb. 4.1.6: 2-dimensionale Ausbreitung einer Oxidschmelze

4.2 Schlußfolgerungen

Trockene Ausbreitung

Die metallische Schmelze ist im allgemeinen stark überhitzt. Deshalb wird die Ausbreitung durch die hohe Oberflächenspannung der noch flüssigen Eisenschmelze beendet. Unter realistischen EPR-Bedingungen ist die metallische Schmelze ebenso überhitzt, das Ausbreiten ist kein kritischer Pfad.

Bei den oxidischen Schmelzen kann die Ausbreitung einen kritischen Pfad darstellen, wenn die Temperatur der Schmelze in dem Bereich liegt, der durch einen starken Anstieg der Viskosität bei sinkender Temperatur charakterisiert ist. Ist eine hohe Volumenrate der Oxidschmelze aus dem Schmelzefenster gewährleistet, so kann durch diese der negative Einfluss geringer Überhitzung kompensiert werden.

In den KATS-Tests konnte beobachtet werden, daß die Ausbreitung auf Beton als Substrat geringer ausfiel als auf trockener Keramik.

Nasse Ausbreitung

Bei sämtlichen Experimenten in Gegenwart einer Wasserschicht von 1-10 mm Höhe zeigte diese keinen großen Einfluß auf die globale Ausbreitung der Schmelzen, geringe Schmelze-Wasser -Wechselwirkungen (Dampfexplosion) traten zwar lokal auf, die Ausbreitung der Schmelze setzte sich jedoch praktisch ungehindert fort. Auch diese Effekte werden im Fall des EPR keine Probleme aufwerfen.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Michel et. al., "EPR Safety Approach and Consideration of Severe Accidents," Transactions of the ENC '94, Lyon, France, October 2-6, 1994, Vol. II, pp 502-506
- [2] M.S. Kazimi, "On the Liner Failure Potential in MARK-I Boiling Reactors," Nucl. Science and Engineering, 103, pp 59-69 (1989)
- [3] H. Suzuki et al., "Fundamental Experiment and Analysis for Melt Spreading on Concrete Floors," Proceedings of 2nd ASME/JSME Nuclear Engineering Conference, 1993, Vol. I, pp 403-407
- [4] F.J. Moody, "First Order Analyses of Molten Corium Heat Transfer," ANS Proc. 1989 National Heat Transfer Conference, August 6-9, 1989, Philadelphia, PE, pp 217-224
- [5] M.T. Farmer, J.J. Sienicki, B.W. Spencer and C.C. Chen, "Status of the MELTSPREAD-1 Computer Code for the Analysis of Transient Spreading of Core Debris Melts," Proc. 2nd Organization for Economic Cooperation and Development Committee on the Safety of Nuclear Installations Specialist's Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interaction, Karlsruhe, Germany, April 1992, KfK-Report 5108, pp 489-502
- [6] R. Wittmaack, "Numerical Simulation of Corium Spreading in the EPR with CORFLOW", Proceedings of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, 15-18 November 1999, FZKA 6475, May 2000, pp 201-211
- [7] J.J. Foit, A. Vesper, "Spreading with Variable Viscosity. CORFLOW Validation and Analysis of KATS Experiments", Proceedings of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, 15-18 November 1999, FZKA 6475, May 2000, pp 212-220

- [8] H.-J. Allelein, A. Breest, C. Spengler, "Simulation of Core Melt Spreading with LAVA: Theoretical Background and Status of Validation", Proceedings of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, 15-18 November 1999, FZKA 6475, May 2000, pp189-200
- [9] N. Reinke et al., „Numerical Modelling of Melt Spreading Phenomena“, Proceedings of ICONE 8, April 2-6, 2000, Baltimore, MD USA
- [10] B.D. Michel et al., "Synthesis of the Validation of the CROCO V1 Spreading Code", Proceedings of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, 15-18 November 1999, FZKA 6475, May 2000, pp 235-245
- [11] B. Spindler et al., "Assessment of THEMA Code Against Spreading Experiments", Proceedings of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, 15-18 November 1999, FZKA 6475, May 2000, pp 221-234
- [12] G. Fieg, H. Werle, F. Huber, "Simulation experiments on the spreading behaviour of molten core melts: KATS-3b and KATS-4", Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftlicher Bericht FZKA 5887, 1997
- [13] G. Fieg, H. Werle, F. Huber, "Simulation experiments on the spreading behaviour of core melts: KATS-5 (1-dim spreading of an oxidic melt into a dry channel)", Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftlicher Bericht FZKA 5920, 1997
- [14] G. Fieg, F. Huber, H. Werle, "Simulation Experiments on the Spreading Behaviour of Core Melts: KATS-6 (1-dim Spreading of a low superheated iron melt into a dry channel)", Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftlicher Bericht FZKA 5956, August 1997

- [15] G. Fieg, F. Huber,, H. Werle, "Simulation Experiments on the Spreading Behaviour of Core Melts: KATS-7 (1-dim spreading of a highly superheated iron and oxide melt into a dry channel at low pouring rates", Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftlicher Bericht FZKA 6005, November 1997
- [16] W. Bohl, Technische Strömungslehre, Vogel Fachbuch Kamprath Reihe 11, Auflage 1998
- [17] P.Y. Chevalier, "Thermodynamic calculation of phase equilibria in a quinary oxide system Al_2O_3 -CaO-SiO₂-UO₂-ZrO₂: Determination of Liquidus and Solidus Temperatures of some selected Mixtures", J. Nucl. Mat. 186, 1992, pp 212-215
- [18] U. Stegmaier, EquiTherm-calculations, private communication
- [19] G. Fieg et al., "Simulationsexperiment zum Fluten von Kernschmelzen: KATS-9", Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftlicher Bericht FZKA 6554, November 2000
- [20] V.P. Elyutin et al, "Viscosity of Alumina", Russian Journal of Physical Chemistry, 43 (3),1969
- [21] B.D. Dingwell, Bayr. Forschungsinstitut für Experimentelle Geochemie und Geophysik, University of Bayreuth, private communication
- [21] G. Urbain,"Viscosity estimations of slags", Steel Research, 58 N.3, 1987, pp 111-116
- [22] S.J. Stedman et al., " Rheology of composite ceramic injection moulding suspensions",J. Mat. Sci. 25,1990, pp 1833-1841
- [23] L. Depelley, "Bestimmung von Stoffdaten (Dichte, Porosität, spez. Wärme, Permeabilität), der Kristallstruktur und Elementzusammensetzung von oxidischen KATS-Proben", Diplomarbeit an der Fakultät für Maschinenbau Universität (TH) Karlsruhe, Juni 1998

ANHANG A

Materialdaten für die oxidische Schmelze, ein Vergleich zweier unabhängiger Untersuchungen

J.M. Veteau and B. Spindler analyzed enthalpy, viscosity and density of the KATS oxidic mixture using results of the GEMINI2 code.

Material data from these investigations then are compared with the input set data which are used to analyze the spreading tests with spreading codes like CORFLOW.

The composition of the oxide mixture chosen in these studies is:

83 wt% Al_2O_3

8.5 wt% SiO_2

6.0 wt% FeO

1.5 wt% MgO

1.0wt% MnO

The temperature dependent solid mass fraction within the liquidus and solidus range are calculated with the GEMINI code. J.M. Veteau and B. Spindler used newer versions of the code and the data base. The difference in the results, Figure 1, must be attributed to this fact. Yet, the liquidus-temperatures are identical (1925 °C) and the 50% solid fraction temperature (1777 °C for the older GEMINI calculation and 1767 °C for the new version) are very close together.

The temperature dependent enthalpy is plotted in Figure 2 for both investigations. The two curves are normalized at room temperature. Whereas in the range from low temperatures to about liquidus the two curves are rather close together, there is a systematic deviation above

liquidus. The reason for this difference lies in different data sets used for the specific heat values of the liquid states.

Figure 3 shows the comparison of the densities. The difference between the two curves is rather small at liquidus. Below solidus the differences are rather large, the reason stems from using different values at room temperature. Here a further investigation is needed.

Also above liquidus some systematic differences are found, yet these are not very sensitive in terms of analysis with spreading codes. One has to keep in mind that for the code CORFLOW a constant density has to be used as input: the volume of the melt is always kept constant during calculation. Therefore, to keep the mass also constant, the density needs to be at a constant value. In the actual CORFLOW investigations the density at liquidus is used as input.

As to the viscosities, Figure 4, two regions have to be regarded separately: above and below liquidus. For both investigations the liquidus temperature is identical.

Above liquidus:

At FZK experimental data of ELYUTIN et. al. [20] have been used to cover the range above the liquidus temperature. These experiments have been performed with only two of the oxidic partners: Al_2O_3 and SiO_2 . The small amount of SiO_2 increases the viscosity only by about 20% compared to the viscosity of pure alumina.

Additional experiments at the University of Bayreuth [21] have been done to investigate the viscosity of an oxidic melt, one sample with a composition as shown above and one with a similar composition, Table A1. The experimental liquidus temperatures are found to be in between 1950 °C and 2000 °C. This is close to the data from ELYUTIN if one considers a realistic error of about 50 K for temperature measurements in this high temperature range. The experimental viscosity data at the

liquidus temperature are in rather good agreement with the data from ELYUTIN.

If one sets the liquidus temperature of the Bayreuth experiments to the value of 1925 °C, it turns out that the viscosity data after this temperature correction are in a rather good agreement with the FZK data.

Tab. A.1: Results of viscosity measurements

	Sample #1	Sample #2
Material composition (wt%)		
Al ₂ O ₃	83.0	79.3
SiO ₂	8.5	7.4
FeO	6.0	7.0
MgO	1.5	5.6
MnO	1.0	0.7
Liquidus Temperature (°C)	1975-2000	1950
Viscosity at Liquidus (Pa s)	0.1 < μ < 0.2	0.12

The viscosity above liquidus calculated by Veteau and Spindler used the URBAIN model [21]. Calculated viscosity data from this correlation are lower by a factor of about two compared to the ELYUTIN data.

Below liquidus:

As to the range below liquidus, there is a discrepancy which originates from the differences in viscosities at the liquidus temperature: viscosity data below liquidus are normalized to the data at the liquidus point. There exist several correlations for the apparent viscosity in the range between liquidus and solidus. Here the Stedman correlation [22] is used, assuming that at 50 % solid fraction the value of the viscosity

reaches infinity asymptotically. The discrepancies between the two investigations below liquidus are due to the differences at liquidus and the minor shift of 10 K for the 50% solid fraction temperature.

Summary:

There are some minor differences between these selected material property data which have been evaluated by different methods. However, with regard to spreading of an oxidic melt they do not change the results dramatically. Especially, the viscosity which is the dominant parameter controlling the spreading, differs only by a factor of two which is tolerable.

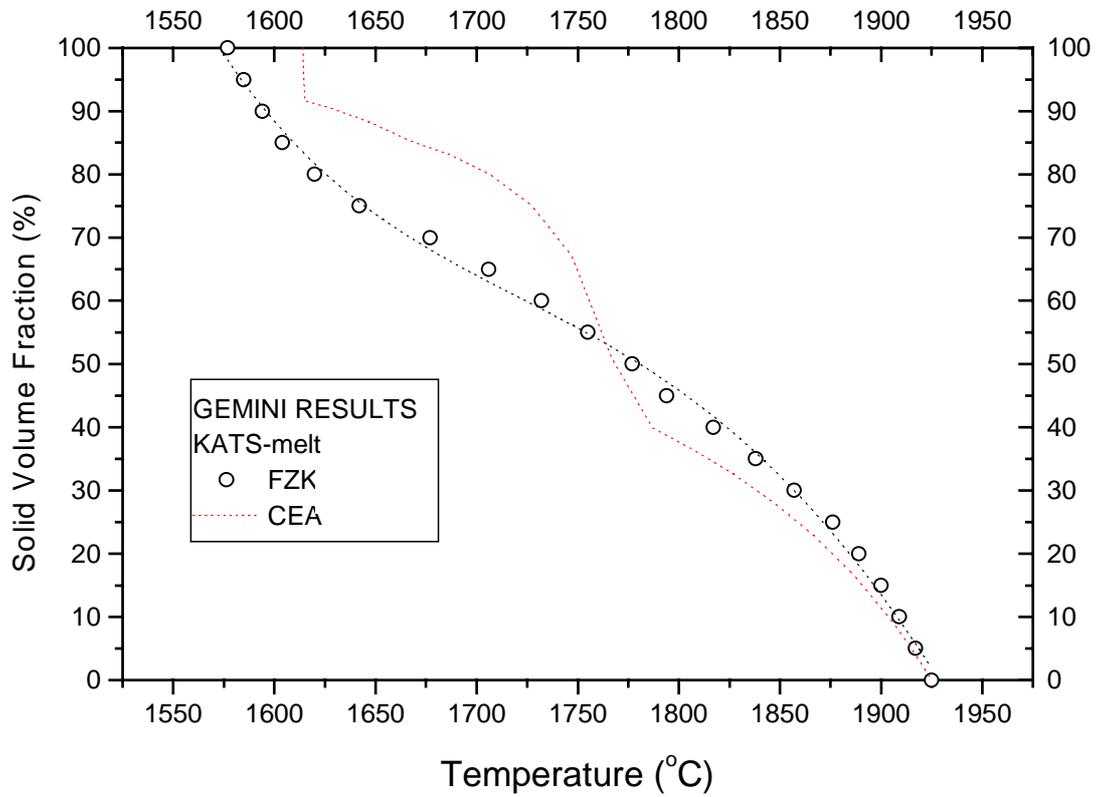


Fig. 1 Solid volume fraction in the liquidus-solidus range

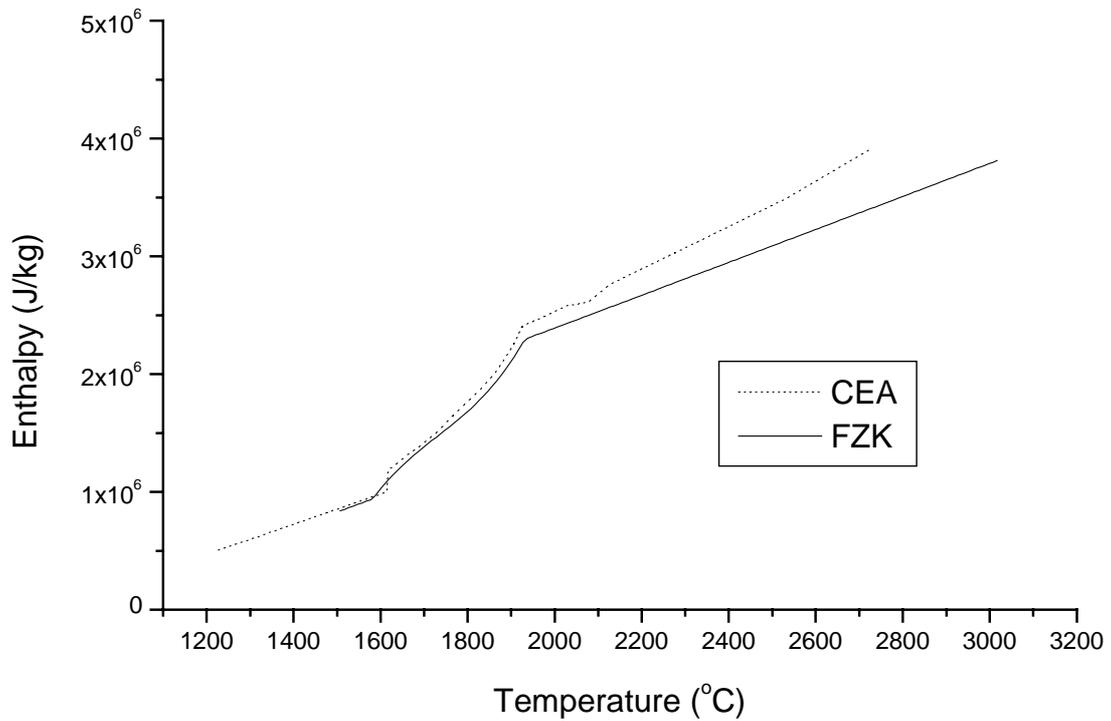


Fig. 2 Enthalpy vs Temperature

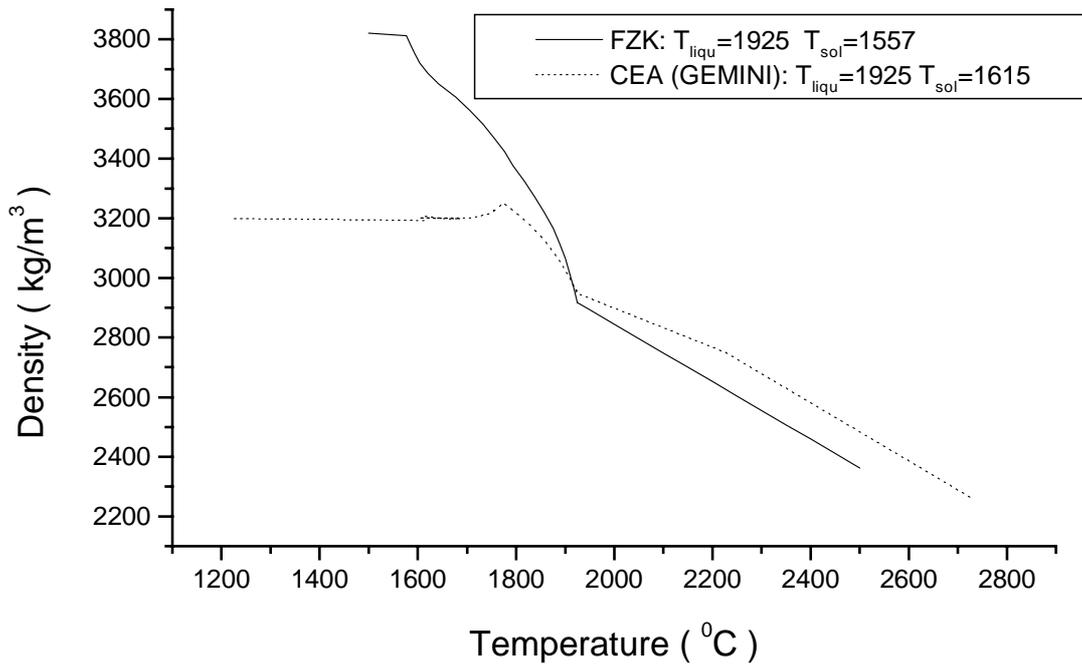


Fig. 3 Density of oxide melt

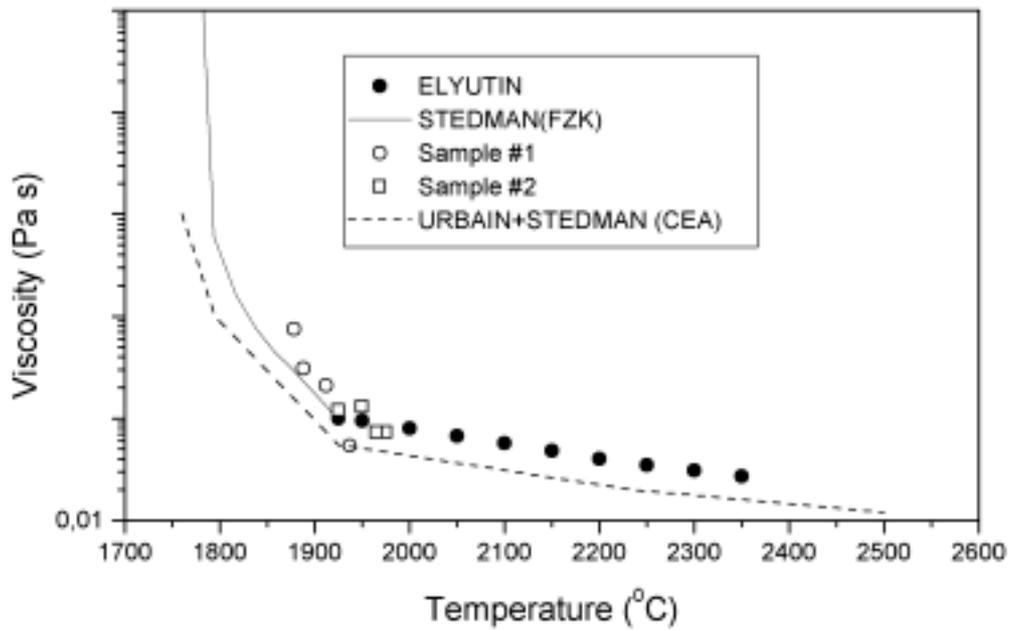


Fig. 4 Comparison of temperature dependant viscosities