

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5844

Funktionstest und Einsatz der Induktionsspule zur Beheizung der Schmelze in den COMET-H Experimenten

S. Mussa, W. Tromm, T. Cron, H. Benz

**Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung**

Dezember 1996

FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Technik und Umwelt
Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5844

**Funktionstest und Einsatz der Induktionsspule zur
Beheizung der Schmelze in den COMET-H
Experimenten**

S. Mussa, W. Tromm, T. Cron, H. Benz*

Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung
* KIKI Ingenieurbüro/Anlagenbau, Ettlingen

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1996

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

ISSN 0947-8620

Kurzfassung

In den COMET-H Versuchen wird die Beheizung der Schmelze durch eine ebene Induktionsspule mit Jochen vorgenommen, die speziell für diese Versuche entwickelt wurde. In dem vorliegenden Bericht werden die Abnahmetests für den Induktor dargestellt und deren Ergebnisse diskutiert. Ziel dieser Abnahmetests ist die Prüfung der Leistungsspezifikation und der an den Induktor gestellten Anforderungen sowie der Nachweis eines sicheren Betriebes des Induktors in Zusammenwirken mit anderen elektrischen Anlagenkomponenten.

Zur Simulation der flüssigen Eisenschmelze wurde ein Stapel runder Metallplatten aus nicht rostendem und unmagnetischem Stahl (VA-Platten) verwendet. In vier Versuchsreihen wurden 18 Leerlauftests und 10 Tests mit VA-Platten als kalorimetrischer Abnahmetest für den Induktor durchgeführt. Um die Homogenität der Leistungseinkopplung zu untersuchen, wurden Temperaturen in dem Plattenstapel bei verschiedenen Radien und Winkeln gemessen. In zwei weiteren Versuchen wurden Magnetfeld- und Thermographiemessungen zur Untersuchung der Homogenität des Induktor-Magnetfeldes durchgeführt. Das Ankopplungsverhalten der Schmelze bei Einguß und Beginn des Aufheizens in den COMET-H Versuchstiegel und die Rückwirkung auf den stabilen Umrichterbetrieb wurden durch einen Versuch mit einer absenkbaren, an einem Seil aufgehängten VA-Platte sowie durch einen Versuch mit ferritischem Schrott im Tiegel simuliert. Ferner werden der Einsatz des Induktors in den bisherigen COMET-H Versuchen und Versuche zur Stabilisierung des Umrichterbetriebes dargestellt und diskutiert.

Während der Abnahmetests mußte eine Reihe von Änderungen an dem Induktor und der Umrichteranlage, die die zum Leistungsbetrieb notwendige Mittelfrequenz-Wechselspannung erzeugt, durchgeführt werden. Dies betrifft vor allem die notwendige Kühlung der Induktionsspule und der Joche sowie die Stabilisierung der Regelung der Wechselspannungsumrichter.

Nach Abschluß der Verbesserungen lassen sich die Ergebnisse der Untersuchungen wie folgt zusammenfassen:

- In den kalorimetrischen Tests wird eine in die Platten eingekoppelte Nettoleistung von 400 kW/m^2 bei Induktorspannungen von 2.5 bis 2.0 kV erreicht, wobei die entsprechenden Abstände der Platten von der Induktoroberkante 160 mm (Abstand bei Schmelzeinguß) bzw. 110 mm (Abstand bei Wasserzutritt) betragen. Damit ist die Leistungsspezifikation des Induktors erfüllt. Die verbesserte Induktorkühlung kann die anfallende Verlustleistung sicher abführen. Die bisherigen COMET-H Versuche zeigen jedoch, daß die metallische Schmelze einen um ca. 20 % (vor Erstarrung) bzw. ca. 5 % (nach Erstarrung) höheren Ankopplungswirkungsgrad besitzt als die Metallplatten. Daher kann die Betriebsspannung des Induktors abgesenkt werden.
- Die durchgeführten Tests bestätigen, daß das Magnetfeld oberhalb des Induktors und damit auch die Leistungsverteilung über dem Radius und über dem Winkel der Schmelze der erwarteten Wärmequellenverteilung entspricht.
- Die Tests, die durchgeführt wurden, um den Umrichterbetrieb während des Versuchsablaufes in den COMET-H Experimenten zu stabilisieren, zeigen, daß ein sicherer Betrieb des Induktors in Zusammenwirken mit anderen elektrischen Anlagenkomponenten erreicht wird.
- Aus den Messungen der Leerlauf- und kalorimetrischen Tests werden für die in die Schmelze eingekoppelte Leistung bei gegebener Induktorspannung und verschiedenen Abständen Nettoleistungen ermittelt, die als Richtwerte für die Leistungseinstellung bzw. -regulierung bei verschiedenen Abständen der Schmelze von der Induktoroberkante in den COMET-H Versuchen herangezogen werden.

Testing and Application of the Inductor for Heating of Melts in the COMET-H Experiments

Abstract

To induce heat in the metal part of thermite melts in the COMET-H Experiments, a flat type Inductor, especially designed for this purpose, is used. In this report the experiments conducted to test the inductor are introduced and their results discussed. The aim of this report is to prove that the inductor meets the power specification and other requirements including a reliable operation in connection with other electrical components of the COMET-H Experimental Facility.

To simulate the iron melts in the COMET-H Experiments, a package of round non-magnetic metal plates made out of stainless steel are used. In four series of experiments 18 no-load power tests and 10 caloric tests with the plates on top of the inductor are conducted. In order to investigate the homogeneity of the power induction, temperatures are measured in the plates at different radii and angles. In further experiments measurements of the magnetic field of the inductor are conducted to investigate the homogeneity of the magnetic field on top of the inductor. The behavior of power induction in the Melt at time of pouring and beginning of heating and the influence on the stable operation of the converters are simulated with the help of a sinkable stainless steel plate and ferric scraps in a vessel. The application of the inductor in COMET-H Experiments conducted so far and experiments to stabilize the operation of the converters are also topics of this report.

In the course of the experiments a series of changes on the inductor and converter facility were carried out in order to improve the cooling of the inductor and stabilize the converter-controls.

With the improvements in action, the results of the investigations can be summarized to the following conclusions:

- In the caloric tests the induction of 400 kW/m^2 power in the plates is achieved at inductor voltages between 2.5 and 2.0 kV by the distances of the plates from inductor varying from 160 mm (beginning of pouring) to 110 mm (water inlet) respectively. Consequently, the power specification of the induction coil is fulfilled. The improved cooling system of the induction coil is able to remove the heat loss. The COMET-H Experiments conducted so far show a better power induction efficiency of the metal melts averaging to about 20 % more before solidification and 5 % more after solidification. As a result, the inductor can be operated at a lower voltage to ensure the power specification.
- The tests confirm the anticipated homogeneity of the magnetic field on top of the inductor, and accordingly a homogeneous radial and angular power distribution.
- The tests conducted to stabilize the operation of converters during the COMET-H Experiments show that a secure operation of the inductor in connection with other electrical components of the test facility is ensured.
- The measurements of the no-load power tests and the caloric test are used to calculate the induced net power in the plates at various inductor voltages and distances of plates from the inductor. The results are used as estimate values to adjust or regulate the requested net power in melts in COMET-H Experiments.

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS DER TABELLEN

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

1. EINLEITUNG	7
2. INDUKTOR	8
2.1 KURZBESCHREIBUNG DES INDUKTORS MIT TECHNISCHEN DATEN	8
2.2 SPEZIFIKATION DES INDUKTORS	9
2.3 MAßNAHMEN ZUR ERREICHUNG DER AUSLEGUNGSDATEN	10
3. KALORIMETRISCHE TESTS ZUR LEISTUNGSEINKOPPLUNG IN DIE SCHMELZE	12
3.1 VERSUCHSAUFBAU	12
3.2 ÜBERSICHT DER EXPERIMENTE	13
3.3 DURCHFÜHRUNG DER EXPERIMENTE	15
3.3.1 ERSTE VERSUCHSREIHE	15
3.3.2 ZWEITE VERSUCHSREIHE	19
3.3.3 DRITTE VERSUCHSREIHE	21
3.3.4 VIERTE VERSUCHSREIHE	25
4. ANKOPPLUNGSVERHALTEN BEIM SCHMELZENEINGUß	28
5. HOMOGENITÄT DES MAGNETFELDES DES INDUKTORS	29
5.1 MAGNETFELDMESSUNGEN (W. RAPP, R. VOLLMER, IATF)	29
5.2 THERMOGRAPHIEMESSUNGEN (W. RAPP, R. VOLLMER, IATF)	31
5.3 HOMOGENITÄT AUS ENERGIEEINTRAG IN DIE VA-PLATTEN	32
6. DISKUSSION DER ERGEBNISSE	34
6.1 LEERLAUFTESTS	34
6.1.1 TEMPERATUREN	34
6.1.2 BESTIMMUNG DER LEERLAUFLEISTUNG	34
6.2 KALORIMETERTESTS	37
6.2.1 TEMPERATUREN	37
6.2.2 BERECHNUNG DES ENERGIEEINTRAGS IN DIE PLATTEN	38
6.2.3 BEZOGENE WÄRMEQUELLENVERTEILUNG	42

7. EINSATZ DES INDUKTORS IN DEN COMET-H VERSUCHEN	43
7.1 ÜBERSICHT DER BISHER DURCHGEFÜHRTEN COMET-H VERSUCHE	43
7.2 VERSUCHE ZUR STABILISIERUNG DES COMET-UMRICHTERBETRIEBES	43
7.2.1 STÖRUNGEN BEIM COMET-UMRICHTERBETRIEB	43
7.2.2 UMRICHTERTEST MIT AUSTENITISCHER PLATTE	44
7.2.3 UMRICHTERTESTS MIT FERRITISCHER STAHLPLATTE	46
7.2.4 UMRICHTERTEST MIT FERRITISCHEM SCHROTT IM TIEGEL	46
7.2.5 ABSCHLIEßENDE BEWERTUNG DER UMRICHTERTESTS UND VERBESSERUNGEN ZUR ERREICHUNG EINES STABILEN UMRICHTERBETRIEBES	47
7.2.6 LEISTUNGSWIRKUNGSGRAD ZUR EINSTELLUNG DER NETTOLEISTUNGEN IN DEN COMET-H VERSUCHEN	48
8. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUBFOLGERUNGEN	52
9. ANHANG: TABELLEN UND ABBILDUNGEN	54

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Technische Daten des Induktors

Tabelle 2: Materialeigenschaften der VA-Platten

Tabelle 3: Betriebszustände der Leerlauftests in der ersten Versuchsreihe

Tabelle 4: Gemessene max. Temp. in Leerlauftests der ersten Versuchsreihe

Tabelle 5: Meßpunktkoordinaten der Platten-Thermoelemente in den Kalorimetertests der ersten Versuchsreihe: IPTEST-1, IPTEST-2, IPTEST-3

Tabelle 6: Betriebszustände bei den kalorimetrischen Tests in der ersten Versuchsreihe

Tabelle 7: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei Kalorimetertests in der ersten Versuchsreihe

Tabelle 8: Betriebszustände der Leerlauftests in der zweiten Versuchsreihe

Tabelle 9: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei Leerlauftests in der zweiten Versuchsreihe

Tabelle 10: Betriebszustände der Leerlauftests in der dritten Versuchsreihe

Tabelle 11: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei den Leerlauftests in der dritten Versuchsreihe

Tabelle 12: Meßpunktkoordinaten der Platten-Thermoelemente in den Kalorimetertests der dritten Versuchsreihe: IPTEST-4, IPTEST-5

Tabelle 13: Betriebszustände bei den kalorimetrischen Tests in der dritten Versuchsreihe

Tabelle 14: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei den kalorimetrischen Tests in der dritten Versuchsreihe

Tabelle 15: Betriebszustände der Leerlauftests in der vierten Versuchsreihe

Tabelle 16: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei den Leerlauftests in der vierten Versuchsreihe

Tabelle 17: Betriebszustände der Kalorimetertests in der vierten Versuchsreihe

Tabelle 18: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei den Kalorimetertests in der vierten Versuchsreihe

Tabelle 19: Versuchsparameter zur Messung der Magnetfeldstärke am Induktor

Tabelle 20: Gemessene Peak-to-Peak Spannungswerte (V_{pp}) und zugehörige Meßpunkte bei Versuchen zur Messung der Magnetfeldstärke

- Tabelle 21: Gemessene max. Temperaturen bei den Leerlauftests mit geöffnetem Induktor zur Messung der Magnetfeldstärke
- Tabelle 22: Betriebszustände und gemessene max. Temperaturen an verschiedenen Stellen der VA-Platte bei den Thermographiemessungen
- Tabelle 23: Vergleich von gemessenen und durch Approximation errechneten Anlagenwerten
- Tabelle 24: Vergleichen von rechnerisch ermittelten Leerlaufleistungen
- Tabelle 25: Temperaturen und Zeiten bei den Kalorimetertests
- Tabelle 26: Vergleich der verschiedenen Werte der in die Platten eingespeiste Energie
- Tabelle 27: Betriebszustände bei Umrichtertest mit austenitischer Platte
- Tabelle 28: Wirkungsgrade in Abhängigkeit von den Plattenabständen
- Tabelle 29: Überblick der Leistungswerte der bisherigen COMET-H Versuche
- Tabelle 30: Nettoleistung bei verschiedenen Induktorspannungen und Plattenabständen
- Tabelle 31: Übersicht der durchgeführten Leerlauftests
- Tabelle 32: Übersicht der durchgeführten kalorimetrischen Tests
- Tabelle 33: Übersicht der durchgeführten Versuche zur Messung der Magnetfeldstärke am Induktor
- Tabelle 34: Übersicht der durch geführten Versuche zur Thermographiemessung

Verzeichnis der Abbildungen

- Bild 1: Aufbau des Spiralinduktors
- Bild 2a: Spiralinduktor nach Umbau
- Bild 2b: Wasserwanne zur Kühlung der Jochblechenden
- Bild 3: Grundplatte für Joche
- Bild 4: Erwartete bezogene Wärmequellenverteilung in der Schmelze
- Bild 5: COMET-H VERSUCHSAUFBAU
Schmelzekühlung nach dem COMET-Konzept
- Bild 6: Versuchsaufbau für die kalorimetrischen Tests
- Bild 7: VA-Platten mit den Temperaturmeßstellen in der zweiten, dritten und vierten
Versuchsreihe
- Bild 8: Abmessung der VA-Platten für die erste Versuchsreihe
- Bild 9: Detailzeichnung der VA-Platten für die erste Versuchsreihe
- Bild 10: Abmessung der VA-Platten für die zweite, dritte und vierte Versuchsreihe
- Bild 11: Detailzeichnung der VA-Platten für die zweite, dritte und vierte Versuchsreihe
- Bild 12: Schema der Meßwerterfassung und -auswertung in den kalorimetrischen Tests
- Bild 13: Zylindrische Koordinaten zur Beschreibung der Meßstellen am Induktor
- Bild 14: VA-Platten mit den Temperaturmeßstellen in der ersten Versuchsreihe
- Bild 15: Zylindrische Koordinaten zur Beschreibung der Meßstellen in den Platten
- Bild 16: IR-Aufnahme unmittelbar nach Ausschalten des Induktors (1:14 min)
bei der ersten Thermographiemessung
- Bild 17: IR-Aufnahme nach Abkühlphase (4:30 min) bei der ersten
Thermographiemessung
- Bild 18: IR-Aufnahme unmittelbar nach Ausschalten des Induktors (0:45 min)
bei der zweiten Thermographiemessung
- Bild 19: IR-Aufnahme nach Abkühlphase (4:30 min) bei der zweiten
Thermographiemessung

- Bild 20: Homogenität des Induktor-Magnetfeldes aus Temperaturverlauf in den VA-Platten bei verschiedenen Winkellagen der Temperaturmeßachse
- Bild 21: Homogenität des Induktor-Magnetfeldes aus Energieverlauf in den VA-Platten bei verschiedenen Winkellagen der Temperaturmeßachse
- Bild 22: Homogenität des Induktor-Magnetfeldes aus Temperaturverlauf in den VA-Platten bei unterschiedlichen Winkellagen der Temperaturmeßstellen
- Bild 23: Induktor-Leerlaufleistung in Abhängigkeit von Induktorspannung bei doppelt-logarithmischer Auftragung
- Bild 24: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-1
- Bild 25: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-2
- Bild 26: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-3
- Bild 27: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-4
- Bild 28: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-5
- Bild 29: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-6
- Bild 30: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-7
- Bild 31: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-8
- Bild 32: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-9
- Bild 33: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-10
- Bild 34: Temperaturverteilung über der Höhe im Plattenstapel in IPTEST-6
- Bild 35: Homogenität der Aufheizung aus Temperaturverlauf in den VA-Platten bei verschiedenen Winkellagen der Temperaturmeßachse
- Bild 36: Homogenität der Aufheizung aus Temperaturverlauf in den VA-Platten bei unterschiedlichen Winkellagen der Temperaturmeßstellen
- Bild 37: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-1, IPTEST-2, IPTEST-3
- Bild 38: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-4, IPTEST-5
- Bild 39: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-4, IPTEST-5, 0 - 500 s

- Bild 40: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-6, IPTEST-8, IPTEST-9
- Bild 41: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-6, IPTEST-8, IPTEST-9, 0 - 500 s
- Bild 42: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-7, IPTEST-9, IPTEST-10
- Bild 43: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-7, IPTEST-9, IPTEST-10, 0 - 500 s
- Bild 44: Temperaturmessung zweier Thermoelemente an der Kontaktfläche zwischen Platte 1 und 2 in IPTEST-7
- Bild 45: Skizze zur Diskrepanz in der Energieberechnung in den VA-Platten durch Interpolation der Temperaturmeßpunkte
- Bild 46: Korrektur des Energieverlaufs in den VA-Platten durch Zurücksetzen des Kurvenmaximums auf die Zeit des Induktorabschaltens
- Bild 47: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-1
- Bild 48: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-2
- Bild 49: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-3
- Bild 50: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-4
- Bild 51: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-5
- Bild 52: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-6
- Bild 53: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-7
- Bild 54: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-8
- Bild 55: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-9
- Bild 56: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-10
- Bild 57: Wassergekühlte VA-Platte zur Umrichterkontrolle bei statischer Last
- Bild 58: Induktorwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Plattenabstand von der Induktoroberkante
- Bild 59: Induzierte Nettoleistungen in den VA-Platten bei verschiedenen Induktorspannungen und Plattenabständen von der Induktoroberkante

1. Einleitung

Im Rahmen der Entwicklung des europäischen Druckwasserreaktors (EPR) wurde im Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik (IATF) des Forschungszentrums Karlsruhe ein Konzept für eine Kernkühlungseinrichtung erarbeitet. Das Kühlkonzept beruht im wesentlichen auf der Ausbreitung der Kernschmelze auf einer Opferschicht und deren Erosion und anschließenden schnellen Kühlung durch Wasserzutritt von unten über rein passiv wirkende Mechanismen.

Die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Konzeptes konnte durch Experimente im kleinen Maßstab (COMET-T) unter Verwendung von unbeheizten Thermit-Schmelzen nachgewiesen werden. Diese Experimente besitzen aber nicht die Möglichkeit der Nachwärme-Simulation, so daß die langfristige Wärmeabfuhr aus der Schmelze nicht untersucht werden kann. Hierzu werden Experimente mit Thermit-Schmelzen und Nachwärme-Simulation im großen Maßstab (COMET-H) in der umgebauten BETA-Anlage durchgeführt. Die Thermit-Schmelze wird in einem Reaktionstiegel erzeugt und nach einer gewissen Zeit auf die Kernfängerkonstruktion abgegossen. Der metallische Anteil der Schmelze, der aufgrund der größeren Dichte die untere Schicht bildet, wird von einer unterhalb der Kernfängerkonstruktion angeordneten Induktionsspule beheizt. Diese spiralförmige, horizontale Induktionsspule wurde speziell für diesen Zweck von der Firma AEG ELOTHERM konstruiert, um flach ausgebreitete, darüberliegende Metallschichten beheizen zu können.

In dem vorliegenden Bericht werden der Aufbau des Induktors und dessen Auslegungsdaten sowie die durchgeführten kalorimetrischen Abnahmetests zur Leistungseinbringung in die Schmelze dargestellt und deren Ergebnisse diskutiert. In einem weiteren Kapitel wird der bisherige Einsatz des Induktors in den COMET-H Versuchen sowie die aufgetretenen Schwierigkeiten und die Maßnahmen zu deren Behebung erläutert. Abschließend werden die ermittelten Leistungswirkungsgrade und die daraus abgeleiteten Einstellwerte für die COMET-H Experimente dargestellt.

2. Induktor

2.1 Kurzbeschreibung des Induktors mit technischen Daten

Der Induktor besteht im wesentlichen aus den beiden Hauptkomponenten, Spiralspule und Feldrückschlußjochen, Bild 1 bis 3. Die mechanischen und elektrischen Daten des Induktors sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Induktortyp:	Spiralinduktor mit Feldrückschlußjochen	
mechanische Daten:	Ind. Durchmesser:	D = 1690 mm
	Ind. Höhe:	H = 540 mm
	Anzahl der Joche:	12
	Spulentyp:	Spiralspule
	Spulendurchmesser:	D = 950 mm
	Windungszahl:	N = 11
	Anz. Spulenkühlkreise:	2
	Anz. Jochkühlkreise:	6
	Sonderkühlkreise:	1
	Vorlaufdruck Spule:	p = 16 bar
	Vorlaufdruck Joche:	p = 6 bar
	Wassermenge Sonder-K.:	Q ≈ 10 l/min
elektrische Daten:	max. Induktorspannung:	U = 2600 V
	max. Induktorstrom:	I = 12000 A

Tabelle 1: Technische Daten des Induktors

Die Spule ist aus unterschiedlichen Kupferhohlprofilen zusammengesetzt, wodurch ein hoher flächenbezogener Kupferfüllfaktor gewährleistet ist. Sie ist in Kunstharzgewebeplatten eingebettet. Ein ausreichender Schutz gegen Feuchtigkeit und Isolationsschäden ist somit vorhanden. Die Dichte der Windungen der Spiralspule ist im Randbereich kleiner als im Zentrumsbereich. Hierdurch wird eine Feldverteilung erreicht, die in der Schmelze eine möglichst homogene Wärmequellichte verteilt.

Die 12 Feldrückschlußjoche bestehen aus beidseitig phosphatierten Dynamoblechen. Sie führen das Magnetfeld unterhalb der Spiralspule. Die geometrischen Abmessungen der Joche wurden so gewählt, daß ein Anstieg der Wärmequellichte im Randbereich der Schmelze verhindert wird. Ein Streufeld, das zur Erwärmung der Wagenkonstruktion unterhalb des Induktors führen würde, wird durch die Joche gemindert.

Die Spule ist wassergekühlt, zusätzlich dient ein Druckluftanschluß zur Kühlung der äußeren Jochblechenden. Zur besseren Kühlung der Joche sind wassergekühlte Kupferplatten in der Mitte und an den Seiten der Joche eingebaut. Zusätzlich werden die Joche an ihrer inneren Stirnseite direkt mit Wasser gekühlt, s. Bild 2a und 2b. Damit das Wasser infolge der Kapilarwirkung zwischen den Dynamoblechen nicht in die Joche eindringt, sind sie vakuum-imprägniert. Kleinere Mengen von Leckwasser können in einem Leckagering aufgefangen und über eine Schlauchleitung nach außen geführt werden.

Um einen zuverlässigen und sicheren Betrieb des Induktors zu garantieren, sollten die folgenden Wartungshinweise von der Fa. AEG-ELOTHERM beachtet werden:

- Vor den Versuchen sind an den temperaturgefährdeten Stellen Temperaturmeßstreifen anzubringen. Die maximalen Jochtemperaturen sollten 160 °C nicht überschreiten.
- Die Wassermenge des Sonderkühlkreises ist so zu wählen, daß eine vollständige Benetzung der Jochstirnseiten erfolgt. 10 l/min sind anzustreben. Ein Überdruck von mehr als 2 bar sollte vermieden werden.
- Nach Betrieb ist der Sonderkühlkreis von der Auslaufseite mit Luft zu spülen. Dies ermöglicht ein rasches Abtrocknen der Jochstirnseiten und vermeidet zu starke Korrosion.

2.2 Spezifikation des Induktors

Damit in den COMET-H Versuchen eine Nachwärme-Simulation garantiert werden kann, muß der Induktor die im folgenden aufgelisteten wichtigsten Anforderungen bzw. Spezifikationen erfüllen:

- Die eingekoppelte Nettoleistung in die Metallschmelze über dem Induktor beträgt ca. 400 KW/m². Dabei soll eine maximale Induktorspannung von 2.6 kV nicht überschritten werden.
- Die Temperatur der Joche beträgt max. 160 °C.
- Die Leistungsverteilung über dem Radius in der Metallschicht entspricht mindestens der in der erwarteten Wärmequellenverteilung, s. Bild 4.
- Die Homogenität der Leistungsverteilung über dem Winkel ist im Rahmen der Bandbreite der erwarteten Wärmequellenverteilung zu gewährleisten.
- Der sichere Betrieb des Induktors ist während des Versuchsablaufes: Leerlauf, Einguß, ausgebreitete Schmelze, Fragmentierung und porös erstarrende Schmelze, zu gewährleisten.

2.3 Maßnahmen zur Erreichung der Auslegungsdaten

Wie später in den entsprechenden Abschnitten dieses Berichts näher erläutert wird, sind in den Induktorabnahmetests Schwierigkeiten mit dem Induktorkühlsystem aufgetreten, deren Behebung für ein sicheres Betriebsverhalten des Induktors unabdingbar war. Eine Chronologie der aufgetretenen Probleme und deren Behebung ist nachfolgend aufgelistet. Hierbei werden jeweils nur die Erkenntnisse aufgelistet, die zum jeweiligen Zeitpunkt bekannt waren und deshalb berücksichtigt wurden.

- Bei der ersten Inbetriebnahme koppelt das äußere Metall-Spannband, das den äußeren Ring umschließt, an den Induktor an und wird dadurch erwärmt. Durch die Erwärmung wird der äußere Pertinax Ring des Induktors aufgeheizt und beginnt zu verkohlen. Ursache für die Erwärmung war das magnetische Streufeld des Induktors. Das Metall-Spannband wird daraufhin durch eine Glasseidenbandage ersetzt.
- Nach der ersten Versuchsreihe wird festgestellt, daß die Induktorkühlung nicht ausreichend ist, die in den Jochen entstehende Verlustwärme, sowohl in den Leerlaufversuchen als auch in den kalorimetrischen Tests, unter Einhaltung der spezifizierten maximalen Jochtemperatur von 160 °C abzuführen. Die Joche werden während der Tests aufgeheizt (>120 °C), so daß deren Lackierung und andere Kunststoffteile des Induktors anfangen zu verkohlen. Der Grund dafür wird in der zu niedrigen Güte der Jochbleche gesehen. Die alten Jochbleche werden durch neue, um den Faktor 4 verlustärmere (nach DIN 46400 V250-50A-120) ersetzt. Ferner wird eine Entkopplung der Kühlkreisläufe der Joche, in dem jetzt 4 Joche in einem Kühlkreis zusammengeschlossen werden, vorgenommen. Eine wassergekühlte Kupferabschirmung unterhalb der Joche wird zusätzlich zur Verringerung der Feldbelastung durch die Induktorzuleitung installiert.
- Die Leerlauftests der zweiten Versuchsreihe zeigen, daß die bisherigen Verbesserungen an der Induktorkühlung noch nicht ausreichend sind, um die bei dem Induktorbetrieb entstehende Verlustwärme sicher abzuführen. Bei einer Induktorspannung von 2.2 kV tritt bereits wenige Minuten nach Einschalten Rauch aus dem Induktor aus, so daß der Test abgebrochen werden muß. Bei höheren Induktorspannungen, die zur Einbringung der spezifizierten Leistung von 400 kW/m² in die Schmelze benötigt werden, kann somit ein sicherer Induktorbetrieb nicht gewährleistet werden. Bei der Demontage wird eine Überhitzung der Jochspitzen (Temp. >500 °C) festgestellt. Die erneuerten Jochbleche mit höherer Güte sind beidseitig isoliert, so daß die Querwärmeleitfähigkeit der Joche verschlechtert wird. Ferner befindet sich der Spulenanschluß außermittig. Zur erneuten Verbesserung der Induktorkühlung wird ein zusätzliches, am Rand wassergekühltes Kupferblech pro Joch eingebaut, das in der Mitte des jeweiligen Jochblechpaketes installiert ist, wodurch die Wärmeleitstrecke halbiert wird. Dazu werden die ursprünglichen Jochblechpakete aufgetrennt. Zusätzlich werden die Joche und Kühlplatten im Zentrum abgeschrägt, wodurch die Felddaustrittsfläche vergrößert wird. Die äußeren Jochkühlplatten werden mit Vorspannung montiert, um den Wärmeaustausch zu verbessern. Die Kühlkreisanzahl wird nochmals erhöht auf 6. Ferner wird der Spulenanschluß zentrisch angeordnet.

- In der dritten Versuchsreihe wird bei dem Leerlaufstest mit 2.2 kV Induktorspannung 5 min nach Induktoreinschaltung abermals eine leichte Rauchentwicklung beobachtet, die aus der Mitte unterhalb der Glasfaser gebundenen Epoxidharz-Platte (grüne Platte) entweicht. Die Mitte der Epoxidharz-Platte wird an der oberen Seite ca. 60 °C heiß. Der Grund für die Erwärmung im Zentrum des Induktors wird in der Feldüberlastung an der Stirnseite der Joche und in der Querfeldkomponente auf den Jochblechen an der Jochspitze gesehen, die bei der letzten Verbesserungsmaßnahme eingeführt wurden. Da die Joche sternförmig zusammenlaufen, werden an den engsten Stellen in der Mitte die Kupferkühlungsbleche schmaler. Deshalb sind in den letzten Zentimetern zur Mitte keine Kühlkanäle eingebaut, sondern nur Wärmeleitbleche aus Kupfer, die nicht wasserdurchströmt sind. Dort erwärmen die Querfeldkomponenten die Wärmeleitbleche so stark, daß die Wärme an den Jochecken nicht abgeleitet werden kann. Zur Behebung dieses Problems wird ein Wasserwanne ring, der drucklos mit einem Kühlwasserstrom von ca. 10 l/min durchströmt wird, zur Kühlung der Jochblechen im Inneren des Induktors installiert. Das dabei eventuell anfallende Leckwasser tropft in einen Leckagering außerhalb der Wanne und wird getrennt nach außen geführt. Zusätzlich ist als Kühlung für die äußeren Jochblechen ein Druckluftanschluß installiert, der Luft aus Ost in den Induktor einleitet und in West abströmen läßt. Der Induktormittenanschluß wird um eine halbe Windung gekürzt damit die Feldbelastung der Jochspitzen durch die Induktorzuleitung verringert wird. Die Vakuumimprägnierung mit einem Tränklack der Klasse H (>180 °C) verbessert die Querwärmeleitfähigkeit, setzt aber auch die Temperaturbelastbarkeit der Joche herunter (<180 °C); dadurch wird auch Korrosion an den Jochspitzen vermieden.

Wie die Versuche in der vierten Versuchsreihe zeigen, ist die Induktorkühlung nach diesen Verbesserungen in der Lage, die bei der spezifizierten maximalen Induktorspannung von 2.6 kV anfallende Verlustwärme sicher und ausreichend abzuführen.

3. Kalorimetrische Tests zur Leistungseinkopplung in die Schmelze

3.1 Versuchsaufbau

Die Einkopplung der Leistung in die Metallschmelze bei den COMET-H Versuchen (Bild 5) wird durch kalorimetrische Leistungsmessungen mit dem Induktor ermittelt. Zur Simulation der Schmelze werden 4 durch zwei Paßstifte fixierte und miteinander verschraubte runde Platten aus nichtrostendem Stahl (im folgenden VA-Platten genannt), die mit einer Isolierung aus Steinwolle eingepackt sind, in einem definierten Abstand auf den Induktor aufgesetzt, s. Bild 6. Der Abstand wird durch Kacheln und Poroton-Steine gewährleistet und stellt die Distanz der Schmelze von der Induktoroberkante durch die Kernfängerkonstruktion und die Betonopferschicht in den COMET-H Versuchen dar. Die geometrischen und physikalischen Daten der VA-Platten (*Mat. Nr. 1.4841 \equiv X15 CrNiSi 25 20*) sind in Tabelle 2 angegeben. Die technischen Zeichnungen der VA-Platten sind in den Bildern 7 bis 11d dargestellt.

geometrische Daten:	physikalische Daten: (Quelle: SEW 310, 470)
Masse VA-Platten = 473.2 kg Platte 1 = 119.0 Platte 2 = 114.1 kg Platte 3 = 119.0 kg Platte 4 = 121.1 kg Außendurchmesser = 1 m Höhe VA-Platten = 77.95 mm Platte 1 = 19.60 mm Platte 2 = 18.80 mm Platte 3 = 19.60 mm Platte 4 = 19.95 mm	$\rho = 7.7448 \text{ g/cm}^3$ $\lambda(20^\circ\text{C}) = 11.9 \text{ W/m K}$ $c_p(20^\circ\text{C}) = 472 \text{ J/kg K}$ $\mu \approx 1.0$, rel. magn. Permeabilität

Tabelle 2: Materialeigenschaften der VA-Platten

In den vier VA-Platten und in der Isolierung sind insgesamt 40 NiCr-Ni Thermoelemente befestigt, um Temperaturen an verschiedenen Stellen messen zu können. In den unteren 3 Platten sind flache Nuten eingefräst (Bild 8 und 10), damit die Thermoelemente zwischen den einzelnen Platten nicht zusammengedrückt und beschädigt werden. Die Thermoelemente werden an den Meßstellen angeschweißt und über Ausgleichsleitungen parallel an Meßwertschreiber zur sofortigen Anzeige und Kontrolle der Temperaturen und an das ORION-Meßwerterfassungssystem geführt. Die in ORION erfassten Temperaturen werden anschließend mit der IBM3090 und mit DIA-PC weiterverarbeitet, s. Bild 12.

3.2 Übersicht der Experimente

In vier Versuchsreihen wurden insgesamt 18 Leerlauftests ohne VA-Platten und 10 Tests mit den VA-Platten mit der Thermoelementinstrumentierung als kalorimetrischer Abnahmetest für den Induktor durchgeführt. Bei den Tests mit VA-Platten wird der Induktor dann abgeschaltet, wenn die Temperatur in der unteren Platte ca. 700 °C erreicht hat, um u.a. eine eventuelle Verformung der Platten durch die Erwärmung zu vermeiden. Die Temperaturen werden jedoch solange erfaßt, bis die Temperatur in den Platten ausgeglichen ist. Bei den Versuchen ohne VA-Platten wird der Induktor abgeschaltet, wenn eine Überhitzungsgefahr für die Joche (> 160 °C) besteht oder die Temperaturen (< 160 °C) eingelaufen sind, d.h. sich nicht mehr ändern.

Die Leerlauftests dienen der Untersuchung der Temperaturentwicklung an den Jochen des Induktors und an umgebenden Bauteilen (z.B. Zuganker). Für die Temperaturmessung an den Jochen werden NiCr-Ni Thermoelemente und an den umgebenden Bauteilen Temperaturmeßstreifen verwendet. Die erfaßten Temperaturen werden ausgewertet und mit den spezifizierten Anforderungen an den Induktor verglichen.

Die Leistungseinkopplung in die Platten wird durch die kalorimetrischen Abnahmetests bestimmt. Mittels der gemessenen Temperaturen an verschiedenen Stellen des Plattenstapels und entsprechenden temperaturabhängigen c_p -Werten wird durch ein geeignetes numerisches Integrationsverfahren der zeitliche Verlauf der in die Platten eingekoppelten Energie (Gl. 1 bis Gl. 4) ermittelt.

$$\Delta E = m * c_p * \Delta T = \int_V \rho * c_p * T * dV \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\Rightarrow \Delta E = E - E_o = \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^H \rho * c_p(T) * T(r, z) * \theta * r * dr d\theta dz \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\Rightarrow \Delta E = E - E_o \cong \sum_{i=1}^{\infty} (m_i * c_{pi} * T_i) - m * c_p(T_o) * T_o \quad (\text{Gl. 3})$$

$$\Rightarrow \Delta E = E - E_o \cong 2\pi * \rho * \left(\sum_{i=1}^{\infty} c_{pi} * T_i * r_i * \Delta r_i * \Delta z_i \right) - m * c_p(T_o) * T_o \quad (\text{Gl. 4})$$

Bei dem hier gewählten Integrationsverfahren werden im ersten Schritt, ausgehend von den gemessenen Temperaturwerten, durch Interpolationen (SURF/DSURF und BS2IN/DBS2IN aus IMSL, Inc. MATH/LIBRARY) neue Werte erzeugt, die im zweiten Schritt bei der eigentlichen Integration (BS2SIG/DBS2IG aus IMSL, Inc. MATH/LIBRARY) verwendet werden. Eine Integration mit diesem Verfahren von auch analytisch integrierbaren Testfunktionen, die einen ähnlichen Verlauf wie die in den Versuchen erwarteten Temperaturprofile aufweisen, ergibt einen Fehler von unter 1 %.

Um die Winkelunabhängigkeit (Homogenität) der Leistungseinkopplung zu untersuchen, werden bei den kalorimetrischen Tests Temperaturen in dem Plattenstapel bei verschiedenen Winkelanordnungen der Platten gemessen, wobei der Spulenanschluß an die Stromzuführungsschiene als 0° Winkellage definiert wird (Bild 13). Aus einer gleichmäßigen Temperaturverteilung über den Winkel läßt sich auf die Homogenität des Magnetfeldes des Induktors schließen.

Sowohl die Leerlauftests als auch die Kalorimetertests werden bei verschiedenen, aber während des jeweiligen Tests konstant gehaltenen Induktorspannungen durchgeführt, um auch eventuelle Inhomogenitäten der Leistungseinkopplung bei unterschiedlichen Spannungsniveaus erfassen zu können.

In zwei weiteren Versuchen werden Magnetfeldmessungen und Thermographiemessungen zur Homogenität des Magnetfeldes des Induktors durchgeführt. Bei der Magnetfeldmessung werden mit einer H-Feld Sonde Spannungen an den Jochen sowie an verschiedenen Stellen des Induktors gemessen. Dabei wird der Induktor im Leerlauf (ohne Last) betrieben. Die gemessenen Spannungen geben Aufschluß über die Homogenität der Magnetfeldstärke im interessierenden Bereich des Induktors.

Bei der Thermographiemessung wird eine Platte aus nicht rostendem Stahl (*Mat. Nr. 1.4571 ≡ X6 CrNiMoTi 17 12 2, Quelle: DIN 17440*) von 1 m Durchmesser und 10 mm Dicke in einem Abstand von 160 mm oberhalb der Induktoroberkante mit dem eingeschalteten Induktor aufgeheizt. Mit einer IR-Kamera (IRC-160) werden über einem Umlenkspiegel aus 3,2 m Höhe die Temperaturänderungen aufgenommen.

Das Ankopplungsverhalten der Schmelze beim Einguß in den COMET-H Versuchstiegel wird durch einen Versuch mit einer absenkbaren, an einem Seil aufgehängten VA-Platte von 1 m Durchmesser simuliert. Dabei kann die Platte von 1 m Anfangshöhe bis 150 mm über den Induktor abgesenkt werden.

Als Ergebnisse werden bei den Leerlauftests die gemessenen Temperaturen in Tabellen dargestellt und näher erläutert. Bei den Kalorimetertests wird der zeitliche Verlauf der in die Platten eingekoppelten Energie (Gl. 1 bis Gl. 4) in einem Plot dargestellt und diskutiert. Zur Untersuchung der Homogenität werden Temperaturen der Thermoelemente mit verschiedenen Winkel-, aber gleichen Radius- und Höhenkoordinaten in einem Plot dargestellt. Der Temperaturverlauf in der untersten Platte zu bestimmten Zeitpunkten bis zum Abschalten des Induktors wird über dem Radius aufgetragen, um das Temperaturprofil während der Aufheizungsphase darzustellen. Aus den gemessenen Temperaturen und zugehörigen c_p -Werten wird die spezifische Energie ($e = c_p(T) \cdot T$) jedes einzelnen Temperaturmeßpunktes errechnet und daraus für die unterste Platte (Platte 1) die bezogene Wärmequellenverteilung ermittelt und in einem Plot dargestellt, siehe (Gl. 5).

$$\frac{e}{e_{\max}} = \frac{\frac{c_p(T_i) \cdot T_i}{t}}{\frac{c_p(T_{\max}) \cdot T_{\max}}{t}} = \frac{c_p(T_i) \cdot T_i}{c_p(T_{\max}) \cdot T_{\max}} \quad (\text{Gl. 5})$$

$i = 1 \dots n, \quad n = \text{Anzahl der Temperaturmeßpunkte an einer Platte.}$

Die während der Magnetfeldmessung registrierten Spannungen sind in einer Tabelle aufgetragen und erläutert. Ferner sind die IR-Aufnahmen der Thermographiemessung abgebildet und beschrieben.

Die Einhaltung der spezifizierten Anforderungen an den Induktor wird nach der Auswertung der Versuche geprüft und gegebenenfalls Verbesserungen an dem Induktor vorgenommen.

3.3 Durchführung der Experimente

3.3.1 Erste Versuchsreihe

3.3.1.1 Leerlauftests

In der ersten Versuchsreihe wurden zunächst 3 Leerlauftests mit den Induktorspannungen 1.1 kV, 1.55 kV und 2.2 kV durchgeführt, wobei die jeweilige Leerlaufleistung des Induktors ermittelt wurde. Jeweils 3 Thermoelemente an der oberen Seite der 12 Joche (Bild 13) des Induktors sowie Temperaturmeßstreifen an den umgebenden Bauteilen, i.e. Zuganker und Tiegelwagen, registrierten Temperaturen, um die Erwärmung dieser Komponenten bei dem Induktorbetrieb zu erfassen. Die Temperaturmeßstreifen messen z.T. nur Temperaturen über 70 °C, so daß Temperaturen unterhalb dieser Grenze nicht angezeigt werden. Die Betriebszustände der durchgeführten Leerlauftests sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Versuchs- bezeichnung:	Induktor- spannung:	Induktor- bruttoleistung:	Induktor- frequenz:	Einschaltdauer des Induktors:
	U_{ind} [kV]	P_{brutto} [kW]	f [Hz]	t_e [min]
ILTEST-1	1.10	182	880	21:30
ILTEST-2	1.55	376	880	20:24
ILTEST-3	2.20	796	880	22:00

Tabelle 3: Betriebszustände der Leerlauftests in der ersten Versuchsreihe

Die Versuche zeigen, daß die Joche sowie die Zuganker und der Tiegelwagen, der sich unterhalb des Induktors befindet (Bild 12), sich relativ stark erwärmen. Die Erwärmung der beiden zuletzt genannten Bauteile rührt von den Magnetfeldverlusten (Streifeld) des Induktors im Leerlaufbetrieb her. Das Streifeld wird mit Schmelze auf dem Induktor schwächer, da die Schmelze das Magnetfeld bündelt.

Eine zu hohe Erwärmung der Joche kann zum Überhitzen der als Abdeckung dienenden Glasfaser gebundene Epoxidharz-Platten oder der Lackierungen der Jochbleche führen. Die maximal registrierten Temperaturen traten an den Stellen, die in der Nähe der

Stromzuführungsschiene (Spulenanschluß) liegen, auf (Bild 1). Dort addieren sich die Magnetfelder der Stromzuführungsschiene und der spiralig laufenden Stromleitung der Spule, und führen so zu einem Bereich mit größter Magnetfeldstärke. Dementsprechend ist dort die Ankopplung am größten (Joch 1 und Zuganker 1). Die registrierten maximalen Temperaturen bei verschiedenen Induktorspannungen an Joch 1 und Zuganker 1 sind in Tabelle 4 angegeben.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung U_{ind} [kV]	max. Temp. Joch 1 [°C]	max. Temp. Zuganker 1 [°C]
ILTEST-1	1.10	54.9	< 70
ILTEST-2	1.55	85.5	82
ILTEST-3	2.20	140.0	138

Tabelle 4: Gemessene max. Temp. in Leerlauf tests der ersten Versuchsreihe

Aus den registrierten Temperaturen läßt sich schließen, daß bei höheren Induktorspannungen, die zur Einbringung der spezifizierten 400 kW/m^2 in die Schmelze benötigt werden, an Joch 1 noch höhere Temperaturen ($>160 \text{ °C}$) erreicht werden. Bei Temperaturen über 160 °C fangen die Kunststoffteile des Induktors an zu verkohlen, so daß ein sicherer Leerlaufbetrieb nicht gewährleistet ist. Die Kühlung an den Jochen ist daher nicht ausreichend, weshalb eine Verbesserung des Kühlsystems des Induktors unumgänglich ist.

3.3.1.2 Kalorimetertests

Anschließend an diese Leerlauf tests wurden 3 Tests mit den VA-Platten mit der Thermoelementinstrumentierung durchgeführt. Die Versuche wurden bei Induktorspannungen von 1.1 und 1.5 kV und Plattenabständen von 168 und 140 mm bis zur Induktoroberkante durchgeführt. Die Haupttemperaturmeßachse liegt 180° gegenüber dem Spulenanschluß an die Stromzuführungsschiene, der als 0° Winkellage definiert ist (Bild 13). Zur Untersuchung der Homogenität über den Winkel wurden einige der Thermoelemente im Winkel versetzt in dem Plattenstapel befestigt. Sechs Thermoelemente wurden in der Wärmeisolierung der Platten befestigt, um Aufschluß über den Wärmeverlust in die Umgebung zu erhalten. Die Meßpunktkoordinaten für die Platten-Thermoelemente sind in Tabelle 5 wiedergegeben, s. Bild 14 und 15. Parallel zur Messung der Plattentemperaturen wurden, wie in den vorhergehenden Leerlauf tests, Temperaturen an den Jochen und den Zugankern registriert, um eventuelle Unterschiede in der Temperaturentwicklung gegenüber den Leerlauf tests feststellen zu können. Die Betriebszustände bei diesen kalorimetrischen Versuche sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Meßstellen- bezeichnung	Radius r [mm]	Winkel θ [°]	Abstand Platte/Induktor a [mm]	Platten-Nr. []
TE1	0.0	180	0.0	1
TE2	48.6	180	0.0	„
TE3	99.3	180	0.0	„
TE4	149.4	180	0.0	„
TE5	199.6	180	0.0	„
TE6	300.0	180	0.0	„
TE7	397.3	180	0.0	„
TE8	477.6	180	0.0	„
TE9	477.8	315	0.0	„
TE10	478.4	60	0.0	„
TE11	297.8	315	0.0	„
TE12	298.3	60	0.0	„
TE13	499.5	180	4.5	„
TE14	299.4	180	18.0	„
TE15	0.0	180	21.4	2
TE16	49.7	180	21.4	„
TE17	100.0	180	21.4	„
TE18	149.4	180	21.4	„
TE19	199.2	180	21.4	„
TE20	299.2	180	21.4	„
TE21	400.0	180	21.4	„
TE22	478.9	180	21.4	„
TE23	0.0	180	40.2	3
TE24	148.4	180	40.2	„
TE25	300.8	180	40.2	„
TE26	479.0	180	40.2	„
TE27	478.9	315	40.2	„
TE28	480.1	60	40.2	„
TE29	299.4	315	40.2	„
TE30	300.1	60	40.2	„
TE31	0.0	180	77.95	4
TE32	147.7	180	77.95	„
TE33	296.8	180	77.95	„
TE34	478.3	180	77.95	„

Tabelle 5: Meßpunktkoordinaten der Platten-Thermoelemente in den Kalorimetertests der ersten Versuchsreihe:IPTEST-1, IPTEST-2, IPTEST-3

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung	Induktor- Brutto- leistung	Induktor- frequenz	Winkel der Temperatur- meßachsen	Abstand Platten / Induktor	Einschaltdauer des Induktors
	U_{ind} [kV]	P_{brutto} [kW]	f [Hz]	θ [°]	a [mm]	t_e [min]
IPTEST-1	1.1	250	880	60/180/315	140	9:15
IPTEST-2	1.5	495	880	60/180/315	168	8:54
IPTEST-3	1.1	223	880	60/180/315	168	17:12

Tabelle 6: Betriebszustände bei den kalorimetrischen Tests in der ersten Versuchsreihe

Die an Joch 1 und Zuganker 1 registrierten maximalen Temperaturen sind in Tabelle 7 wiedergegeben. Die Temperaturen zeigen, daß die Erwärmung der Joche und der Zuganker um ca. 20 % kleiner wird als in den entsprechenden Leerlauftests, weil die VA-Platten das Magnetfeld des Induktors bündeln. Kalorimetertests mit einer Induktorspannung von über 1.55 kV wurden nicht durchgeführt, da in den vorangegangenen Leerlauftests ein sicherer Leerlaufbetrieb bei höheren Induktorspannungen aufgrund der unzureichenden Induktorkühlung nicht möglich war.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung	max. Temp. Joch 1	max. Temp. Zuganker 1
	U_{ind} [kV]	[°C]	[°C]
IPTEST-1	1.1	47.1	< 70
IPTEST-2	1.5	67.2	< 70
IPTEST-3	1.1	48.6	< 70

Tabelle 7: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei Kalorimetertests in der ersten Versuchsreihe

3.3.2 Zweite Versuchsreihe

3.3.2.1 Leerlauftests

Nach der ersten Versuchsreihe wurde die Kühlung des Induktors verbessert. Die alten Jochbleche wurden durch neue, um den Faktor 4 verlustärmere ersetzt. Ferner wurde eine Entkopplung der Kühlkreisläufe der Jochbleche vorgenommen und eine wassergekühlte Kupferabschirmung unterhalb der Joche installiert. Nach diesen Neuerungen wurden in der zweiten Versuchsreihe zunächst 5 Leerlaufversuche mit den Induktorspannungen 1.2 kV, 1.5 kV und 2.2 kV durchgeführt. Für die Erfassung der Temperaturen an den Jochen und Zugankern wurden Temperaturmeßstreifen verwendet, die z.T. erst ab 70 °C ansprechen. Die Betriebszustände der durchgeführten Leerlauftests sind in Tabelle 8 angegeben.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung	Induktor- Bruttoleistung	Induktor- frequenz	Einschaltdauer des Induktors
	U_{ind} [kV]	P_{brutto} [kW]	f [Hz]	t_e [min]
ILTEST-4	1.2	106	860	5:00
ILTEST-5	1.2	106	860	20:00
ILTEST-6	1.55	182	860	20:00
ILTEST-7	2.2	394	860	2:00
ILTEST-8	2.2	395	860	3:00

Tabelle 8: Betriebszustände der Leerlauftests in der zweiten Versuchsreihe

Bei den Leerlauftests kam es wiederum zu hohen Temperaturen an den Jochen und deren Umgebung. In dem Versuch mit 1.55 kV Induktorspannung sind die stationären Temperaturen am Joch 1 104 °C, die anderen Joche bleiben unter 70 °C. In den Tests mit einer Induktorspannung von 2.2 kV trat bereits wenige Minuten nach Einschalten Rauch aus dem Induktor aus. Die Tests mußten abgebrochen werden. Daraus folgt, daß bei der spezifizierten Induktorspannung von 2.6 kV die zulässigen Temperaturen wesentlich überschritten werden. Nach den Tests in der ersten Versuchsreihe ist auch nicht zu erwarten, daß sich die thermische Belastung der Jochbleche unter Last, d.h. mit VA-Platte bzw. metallischer Schmelze wesentlich verringert. Zu dem muß der Induktor in den COMET-H Experimenten versuchsbedingt auch im Leerlauf gefahren werden (vor Einguß der Schmelze Warmfahren der Anlage, während des Versuches evtl. „Verlust“ der metallischen Schmelze durch Einmischen in Oxid). Die registrierten maximalen Temperaturen an Joch 1 und Zuganker 1 bei den verschiedenen Induktorspannungen sind in Tabelle 9 angegeben.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung U_{ind} [kV]	max. Temp. Joch 1 [°C]	max. Temp. Zuganker 1 [°C]
ILTEST-4	1.2	< 70	< 70
ILTEST-5	1.2	60	< 70
ILTEST-6	1.55	104	< 70
ILTEST-7	2.2	60*	82
ILTEST-8	2.2	58*	82

Tabelle 9: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei Leerlauf tests in der zweiten Versuchsreihe

* : Die Einschaltdauer des Induktors ist sehr kurz, 2 bzw. 3 min.

Unmittelbar nach Beendigung der Versuche wurde der Induktor geöffnet, d.h. der äußere Ring abgehoben, um eventuelle Verkohlungen an den Epoxidharz-Platten oder der Lackierung der Jochbleche festzustellen. Alle Stege des Kupferblechs waren sehr heiß. Ursache hierfür war der in den Kupferblechen induzierte Ringstrom, der die Stege belastet. Die Kühlung für den Induktor reicht für einen sicheren Betrieb offenbar noch nicht aus.

Nach Trennung der Stege des Kupferblechs, wurden bei geöffnetem Induktor ein Leerlauf test mit 1.5 kV ca. 25 min und zwei Leerlauf tests mit jeweils 2.2 kV Induktorspannung durchgeführt. Bei 1.5 kV Induktorspannung wurde eine Temperatur von 105 °C an Joch 1 gemessen. Bei 2.2 kV lagen die gemessenen Temperaturen an Joch 1 über 160 °C bei Versuchszeiten von jeweils nur ca. 2 min. Danach mußte der Induktor abgeschaltet werden, weil an Joch 1 und 12 starke Rauchentwicklung zu beobachten war. Die Brandstelle und ihre genaue Ursache konnten auch bei geöffnetem Induktor nicht gefunden werden.

Deshalb wurden in dieser Versuchsreihe keine Kalorimetertests durchgeführt, es wurden aber Magnetfeldmessungen und Thermographiemessungen zur Untersuchung der Homogenität durchgeführt. Diese Messungen werden im Abschnitt 4 behandelt.

3.3.3 Dritte Versuchsreihe

3.3.3.1 Leerlauftests

Die Kühlung wurde verbessert durch ein zusätzliches, am Rand wassergekühltes Kupferblech pro Joch, das in der Mitte des jeweiligen Jochblechpaketes installiert ist. Dazu wurden die ursprünglichen Jochblechpakete aufgetrennt. In dieser dritten Versuchsreihe wurden 3 Leerlauftests mit den Induktorspannungen 1.1 kV, 1.5 kV und 2.2 kV durchgeführt. Diese Leerlauftests wurden ohne Unterbrechung direkt hintereinander durchgeführt, in dem nur die Induktorspannung erhöht wurde. Wie in den vorangegangenen Versuchen, wurden die Temperaturen der Joche und der umliegenden Bauteile registriert. Die Betriebszustände bei den Leerlaufversuchen sind in Tabelle 10 dargestellt.

Versuchsbezeichnung	Induktorspannung	Induktor-Bruttoleistung	Induktorfrequenz	Einschaltdauer des Induktors
	U_{ind} [kV]	P_{brutto} [kW]	f [Hz]	t_e [min]
ILTEST-12	1.1	147	880	17:00
ILTEST-13	1.5	317	880	15:00
ILTEST-14	2.2	710	880	14:00

Tabelle 10: Betriebszustände der Leerlauftests in der dritten Versuchsreihe

Die ersten zwei Tests mit den Induktorspannungen von 1.1 und 1.5 kV verliefen ohne große Temperaturerhöhung an den Induktorbauteilen. Bei dem Leerlauftest mit 2.2 kV Induktorspannung zeigte sich ca. 5 min nach Einschalten eine leichte Rauchentwicklung, die aus der Mitte unterhalb der Epoxidharz-Platte entwich. Die Mitte der Epoxidharz-Platte war an der oberen Seite zu Versuchsende ca. 60 °C heiß. Der Grund für die Erwärmung in der Mitte des Induktors wird in der Anordnung der Kupferkühlungsbleche gesehen. Da die Joche sternförmig zusammenlaufen, müßten an den engsten Stellen in der Mitte die Kupferkühlungsbleche schmaler werden. Deshalb sind in den letzten Zentimetern zur Mitte keine Kühlkanäle eingebaut, sondern nur Wärmeleitbleche aus Kupfer, die nicht wasserdurchströmt sind. Dort wird der hohe Wärmestrom nicht ausreichend abgeführt, so daß lokale Überhitzungen auftreten können. Die maximalen Temperaturen wurden, wie zu erwarten, an Joch 1 und Zuganker 1, beide in der Nähe der Stromzuführungsschiene, registriert, s. Tabelle 11.

Die durchschnittliche Erwärmung der zentralen Kühlwassertemperatur lag bei 3.7 K bei einer Durchflußrate von 21.7 l/s. Der Induktorkühlkreislauf erwärmte sich um 7.8 K bei einer Durchflußrate von 13 l/s. Diese Messungen sind aber aufgrund der unzureichenden Meßgenauigkeit der installierten Geräte fehlerbehaftet, so daß eine Abschätzung der induzierten Leistung über die Volumenstromrate und Temperaturdifferenz einer genaueren Meßwerterfassung bedarf. Hierzu sei an dieser Stelle auf Abschnitt 6.2.2 verwiesen.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung U_{ind} [kV]	max. Temp. Joch 1 [°C]	max. Temp. Zuganker 1 [°C]
ILTEST-12	1.1	40	< 70
ILTEST-13	1.5	55	< 70
ILTEST-14	2.2	110	135

Tabelle 11: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei den Leerlauftests in der dritten Versuchsreihe

3.3.3.2 Kalorimetertests

Bei der Planung des ersten COMET-H Versuches (COMET-H 1.1) wurde festgelegt, daß die in die Schmelze einzubringende Leistung 200 kW betragen soll. Nach einer überschlägigen Rechnung entspricht dieser Leistung einer Induktorspannung von 1.75 kV. Da bei den vorangegangenen Leerlauftests lokale Überhitzungen nur bei einer Induktorspannung von 2.2 kV auftraten, konnten in dieser Versuchsreihe Kalorimetertests mit einer Induktorspannung von 1.75 kV durchgeführt werden. Dabei wurden, wie in den früheren kalorimetrischen Tests, die nun mit insgesamt 39 Thermoelementen instrumentierten VA-Platten verwendet (Bild 7). In der Außenisolierung wurde zusätzlich ein Thermoelement befestigt. Die Meßpunktkoordinaten der Platten-Thermoelemente sind in Tabelle 12 angegeben. Parallel zur Messung der Plattentemperaturen wurden Temperaturen an Jochen und umliegenden Bauteilen registriert. Es wurden 2 Versuche bei gleicher Induktorspannung aber unterschiedlichen Abständen des Plattenstapels von der Induktoroberkante (Simulation unterschiedlicher Opferschichthöhen) durchgeführt. Die Betriebszustände bei den Versuchen sind in Tabelle 13 zusammengefaßt.

Meßstellen- bezeichnung	Radius r [mm]	Winkel θ [°]	Abstand Platte/Induktor a [mm]	Platten-Nr. [--]
TE1	0.0	180	0.0	1
TE2	50.0	180	0.0	„
TE3	99.0	180	0.0	„
TE4	150.0	180	0.0	„
TE5	200.0	180	0.0	„
TE6	250.5	180	0.0	„
TE7	300.0	180	0.0	„
TE8	350.0	180	0.0	„
TE9	401.0	180	0.0	„
TE10	450.0	180	0.0	„
TE11	480.0	180	0.0	„
TE12	300.0	180	18.0	„
TE13	400.0	180	18.0	„
TE14	480.0	180	18.0	„
TE15	0.0	180	21.4	2
TE16	50.0	180	21.4	„
TE17	100.0	180	21.4	„
TE18	150.0	180	21.4	„
TE19	200.0	180	21.4	„
TE20	250.0	180	21.4	„
TE21	300.0	180	21.4	„
TE22	350.0	180	21.4	„
TE23	400.0	180	21.4	„
TE24	450.0	180	21.4	„
TE25	480.0	180	21.4	„
TE26	0.0	180	40.2	3
TE27	100.0	180	40.2	„
TE28	200.0	180	40.2	„
TE29	300.0	180	40.2	„
TE30	400.0	180	40.2	„
TE31	450.0	180	40.2	„
TE32	480.0	180	40.2	„
TE33	0.0	180	78.0	4
TE34	100.0	180	78.0	„
TE35	200.0	180	78.0	„
TE36	300.0	180	78.0	„
TE37	401.0	180	78.0	„
TE38	451.0	180	78.0	„
TE39	481.0	180	78.0	„

Tabelle 12: Meßpunktkoordinaten der Platten-Thermoelemente in den Kalorimetertests der dritten Versuchsreihe: IPTEST-4, IPTEST-5

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung	Induktor- Brutto- leistung	Induktor- frequenz	Winkel der Temperatur- meßachse	Abstand Platten / Induktor	Einschalt- dauer des Induktors
	U_{ind} [kV]	P_{brutto} [kW]	f [Hz]	θ [°]	a [mm]	t_e [min]
IPTEST-4	1.75	607	960	180	165	3:45
IPTEST-5	1.75	643	1000	180	145	3:45

Tabelle 13: Betriebszustände bei den kalorimetrischen Tests in der dritten Versuchsreihe

In dem ersten Experiment hatten die Platten zu Beginn eine Anfangstemperatur von 20 °C. Bis zum Ausschalten des Induktors erreichte die unterste Platte eine maximale Temperatur von 645 °C. Nach einer Ausgleichsphase von ca. 2 h wurde in den Platten eine homogene Temperatur von 175 °C gemessen. In dem zweiten Experiment betrug die Anfangstemperatur der Platten ca. 170 °C und die maximale Temperatur an der Plattenunterseite, unmittelbar nach Ausschalten des Induktors, 930 °C. Die Ausgleichstemperatur wurde nach ca. 2 h erreicht und betrug 370 °C. Die registrierten maximalen Temperaturen an Joch 1 und Zuganker 1 sind in Tabelle 14 wiedergegeben. Sie liegen unter der spezifizierten Temperaturgrenze von 160 °C.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung	max. Temp. Joch 1	max. Temp. Zuganker 1
	U_{ind} [kV]	[°C]	[°C]
IPTEST-4	1.75	< 70	< 70
IPTEST-5	1.75	< 70	< 70

Tabelle 14: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei den kalorimetrischen Tests in der dritten Versuchsreihe

Unter Vernachlässigung der Wärmeverluste an die Umgebung kann die während des 3:45 min langen Induktorbetriebs in die Platten eingekoppelte Leistung überschlägig bestimmt werden. Werden die Materialdaten: Gewicht der Platten = 473.2 kg, $\Delta T_1 = 155$ K, $\Delta T_2 = 200$ K, $c_{p1} = 503$ J/(kg K) und $c_{p2} = 540$ J/(kg K) zugrunde gelegt, betragen die eingekoppelten Leistungen im ersten Versuch 164 kW und im zweiten Versuch 227 kW. Dabei sind ΔT_1 und ΔT_2 die Temperaturänderungen ($T_a - T_o$) der VA-Platten, c_{p1} und c_{p2} die zugehörigen mittleren spezifischen Wärmekapazitäten. Aufgrund des geringeren Plattenabstandes von der Induktoroberkante wird in dem Versuch IPTEST-5 bei gleicher Induktorspannung mehr Leistung in die Platten eingebracht.

Um einen entsprechenden Vergleich zu diesen zwei Kalorimetertests zu bekommen, wurde anschließend mit der gleichen Induktorspannung von 1.75 kV, entsprechend einer Induktorleistung von 442 kW und einer Induktorfrequenz von 880 Hz, ein Leerlaufstest gefahren. Dabei zeigte sich, daß die Erwärmung der Joche und Zuganker gering ist. Joch 1 und Zuganker 1 erwärmten sich auf maximal 65 °C bzw. Unter 70 °C. Die Epoxidharz-Platte über den Kupferwindungen wurde in der Mitte ca. 50 °C warm.

Für den ersten geplanten COMET-H 1.1 Versuch, bei dem ca. 200 kW Leistung in der Schmelze benötigt werden, kann der Induktor in diesem Zustand gefahren werden. Um die spezifizierte Leistung von 400 kW/m² zu erreichen, sind jedoch weitere Verbesserungen an der Kühlung notwendig.

3.3.4 Vierte Versuchsreihe

3.3.4.1 Leerlaufstests

Die Ergebnisse der dritten Versuchsreihe zeigen, daß die Induktorkühlung nicht ausreicht, die bei höheren Induktorleistungen anfallende Verlustwärme abzuführen. Daraufhin wurde der Induktor von der Firma AEG-ELOTHERM abermals umgebaut, um die Kühlung zu verbessern. Als wichtigste Maßnahme wurde ein Wasserwanne ring zur Kühlung der Jochblechen im Inneren des Induktors eingebaut, der drucklos mit einem Kühlwasserstrom von ca. 10 l/min durchströmt wird. Ein Leckagering, der um diese Wanne installiert ist, erfaßt eventuell auftretendes Leckwasser aus der Wanne und führt es getrennt nach außen ab. Zusätzlich ist als Kühlung für die äußeren Jochblechen ein Druckluftanschluß installiert, der Luft aus Ost in den Induktor einleitet und in West abströmen läßt.

Mit diesen Verbesserungen wurden in der vierten Versuchsreihe zunächst 3 Leerlaufstests mit den Induktorspannungen 1.75 kV, 2.2 kV, und 2.6 kV durchgeführt. Wie in den vorangegangenen Leerlaufstests wurden auch hier Temperaturen an den Jochblechen und Zugankern sowie an anderen umliegenden Bauteilen registriert, um die Erwärmung des Induktors zu erfassen. Die Betriebszustände der Tests sind in Tabelle 15 angegeben.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung U_{ind} [kV]	Induktor- Bruttoleistung P_{brutto} [kW]	Induktor- frequenz f [Hz]	Einschalt- dauer des Induktors t_e [min]
ILTEST-16	1.75	454	890	30
ILTEST-17	2.2	722	890	23
ILTEST-18	2.6	1060	880	20

Tabelle 15: Betriebszustände der Leerlaufstests in der vierten Versuchsreihe

Die bei den Leerlauftests registrierten Temperaturen sind in Tabelle 16 dargestellt. Bei einer Induktorspannung von 2.6 kV bleiben die maximalen Temperaturen im Induktor unter der spezifizierten Grenze von 160 °C. Die Temperatur an Tiegelwagen und Zuganker erreichen dabei 150 bzw. 170 °C. Ursache dafür ist das starke Streufeld des Induktors im Leerlaufbetrieb, das aber bei vorhandener Last (mit aufliegender Schmelze) durch Ankopplung stark vermindert wird. Die Temperaturen der anderen umliegenden Bauteile bleiben unter der spezifizierten Grenze von 160 °C. Alle angegebenen Temperaturen sind eingelaufen, d.h. bei einem längeren Betrieb des Induktors steigen die Temperaturen nicht mehr an.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung	max. Temp. Joch 1	max. Temp. Joch 2...12	max. Temp. ZA 3	max. Temp. TW	max. Temp. Schl.
	U_{ind} [kV]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]
ILTEST-16	1.75	57	< 57	132	110	30
ILTEST-17	2.2	104	< 73	132	110	27
ILTEST-18	2.6	127	< 100	170	150	32

ZA: Zuganker, TW: Tiegelwagen, Schl: Schlauchschelle

Tabelle 16: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei den Leerlauftests in der vierten Versuchsreihe

Damit ist die Induktorkühlung in der Lage, die beim Leerlaufbetrieb entstehende Verlustwärme so abzuführen, daß die geforderten Grenztemperaturen des Induktors und der umliegenden Bauteile nicht überschritten werden.

3.3.4.2 Kalorimetertests

Anschließend an die Leerlauftests wurden 5 Versuche mit den VA-Platten für einen erneuten kalorimetrischen Test des Induktors durchgeführt. Vier der durchgeführten Versuche wurden bei einer reduzierten konstanten Induktorspannung von 2.0 kV gefahren, um die Aufheizungsphase zu verlängern und somit eventuelle Inhomogenitäten der Leistungseinkopplung besser messen zu können. Lediglich in einem Versuch wurde die Spannung auf 2.5 kV erhöht, um einen Vergleich bei höherer Leistung zu erhalten. Hier wurde vor allem geprüft, ob die Induktorkühlung die bei der spezifizierten Nettoleistung von 400 kW/m² entstehende Verlustleistung abführen kann. Die Versuchsanordnung ist die gleiche wie in den früheren Kalorimetertests. Die Meßpunktkoordinaten der Platten-Thermoelemente sind in Tabelle 12 angegeben. Die Betriebszustände sind in Tabelle 17 zusammengefaßt.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung	Induktor- Brutto- leistung	Induktor- frequenz	Winkel der Temperatur- meßachse	Abstand Platten / Induktor	Einschaltdauer des Induktors
	U_{ind} [kV]	P_{brutto} [kW]	f [Hz]	θ [°]	a [mm]	t_e [min]
IPTEST-6	2.0	800	980	180	160	3:00
IPTEST-7	2.5	1317	980	180	160	1:50
IPTEST-8	2.0	815	980	15	160	2:40
IPTEST-9	2.0	815	990	345	160	2:50
IPTEST-10	2.0	1000	1040	180	110	1:30

Tabelle 17: Betriebszustände der Kalorimetertests in der vierten Versuchsreihe

Die im Induktor und an umliegenden Bauteilen registrierten Temperaturen blieben unter der spezifizierten Grenze von 160 °C. Wie bereits in den vorangegangenen Leerlauftests auch festgestellt wurde, konnte die Induktorkühlung die bei den höheren Leistungen anfallende Verlustleistung abführen. In Tabelle 18 sind die gemessenen max. Temperaturen angegeben.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung	max. Temp. Joch 1	max. Temp. Zuganker 1	max. Temp. Transportwagen	max. Temp. Schlauch- schellen
	U_{ind} [kV]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]
IPTEST-6	2.0	51	< 70	< 70	< 25
IPTEST-7	2.5	55	< 70	< 70	< 25
IPTEST-8	2.0	47	< 70	< 70	< 25
IPTEST-9	2.0	50	< 70	< 70	< 25
IPTEST-10	2.0	35	< 70	< 70	< 25

Tabelle 18: Gemessene max. Temperaturen an Bauteilen bei den Kalorimetertests in der vierten Versuchsreihe

4. Ankopplungsverhalten beim Schmelzeinguß

Um das Verhalten des Induktorbetriebes beim Einguß der Schmelze in den COMET-H Versuchstiegel zu simulieren, wurden 2 Versuche mit einer an einem Seil aufgehängten, beweglichen, absenkbaren VA-Platte mit 1 m Durchmesser durchgeführt. Die Versuche wurden bei einer Induktorspannung von 2.0 kV, entsprechend 612 kW Bruttoleistung und 890 Hz Induktorfrequenz, durchgeführt. Die Platte befindet sich zu Beginn ca. 1 m über dem Induktor, kann aber schnell abgesenkt werden bis auf eine Höhe von 150 mm. Damit soll Schmelze simuliert werden, die in den Tiegel abgegossen wird.

Im ersten Versuch zeigt sich, daß die Platte beim Absenken ca. 300 mm über dem Induktor durch das Magnetfeld stark nach außen abgelenkt wird. Die Umrichter der Induktionsanlage blieben aber im Betrieb. Im zweiten Versuch wurde eine seitliche Führung für die Stahlplatte, die das seitliche Ablenken verhindert, eingebaut und der Versuch wiederholt. Bei einer Induktorspannung von 2.0 kV, entsprechend 616 kW Bruttoleistung und 890 Hz Frequenz, wurde der Induktor 4 min lang betrieben, wobei die Platte ständig hochgezogen und abgesenkt wurde bis zu einem Abstand von ca. 150 mm über dem Induktor. Dadurch wurde der Betrieb der Umrichter nicht beeinflusst, so daß der Einguß der Schmelze in den Versuchstiegel hinsichtlich des Betriebes des Induktors und der Umrichter kein Problem bereiten sollte.

5. Homogenität des Magnetfeldes des Induktors

5.1 Magnetfeldmessungen (W. Rapp, R. Vollmer, IATF)

Anschließend an die Leerlauftests der zweiten Versuchsreihe wurden bei geöffnetem Induktor (äußerer Ring abgehoben) mit einer H-Feld Sonde, die im wesentlichen aus einer Drahtschlinge, angeschlossen an ein Voltmeter, besteht, Spannungsmessungen zur Untersuchung der Magnetfeldstärke durchgeführt. Parallel dazu wurden Temperaturen an verschiedenen Stellen des Induktors gemessen. Der Induktor wurde dabei im Leerlaufbetrieb mit einer Induktorspannung von 1.13 kV gefahren. Es wurden an jeweils 5 verschiedenen Positionen an den 12 Jochen und den Zwischenräumen mit der H-Feld Sonde Messungen der induzierten Spannung durchgeführt. Die 12 Joche des Induktors befinden sich in 30° Abstand voneinander, wobei Joch 1 15° von der Stromzuführungsschiene, die als 0° Winkellage definiert ist, entfernt liegt. Die Messungen wurden nach einer ausreichend langen Zeit nach Induktoreinschaltung durchgeführt (stationärer Zustand). Die Versuchsparameter sind in Tabelle 19 angegeben.

Versuchs- bezeichnung	Meßposition und Orientierung der H-Feld Sonde bezüglich der Jochoberkante (siehe hierzu Bild 2 und 13)	Induktorspannung / Bruttoleistung / Induktorfrequenz $U_{ind}/P_{brutto}/f$ [kV]/[kW]/[Hz]
IMTEST-1	180 mm über den Jochen, Sonde horizontal und an jedem Joch	1.13 / 95 / 860
IMTEST-2	seitlich an Außenkante anliegend, an jedem Joch, Sonde vertikal an jedem Joch	1.13 / 95 / 860
IMTEST-3	unterhalb der Joche, anliegend zwischen Kühlwasserein- und austritt, Sonde horizontal	1.13 / 95 / 860
IMTEST-4	160 mm oberhalb der Abdeckplatte des Induktors auf Radius der Jochinnenkante, an den Jochen, Sonde vertikal,	1.13 / 93 / 860
IMTEST-5	160 mm oberhalb der Abdeckplatte des Induktors auf Radius der Jochinnenkante, an den Zwischenräumen der Joche, Sonde vertikal	1.13 / 93 / 860

Tabelle 19: Versuchsparameter zur Messung der Magnetfeldstärke am Induktor

Die gemessenen Spannungen zeigen, daß das Magnetfeld oberhalb der Joche und in den Zwischenbereichen über dem Winkel nur geringe Inhomogenitäten aufweist. Somit ist eine ausreichende Homogenität für die COMET-H Versuche gewährleistet. Bei diesen Messungen wurde aber auch ein sehr starkes Streufeld festgestellt, vor allem im Bereich der

Stromzuführungsschienen, mit der die stärkere Erwärmung der umliegenden Bauteile wie Joch 1 und Zuganker 1 zu erklären ist. Die gemessenen maximalen Temperaturen und Spannungswerte sind in den Tabellen 20 und 21 wiedergegeben.

Versuchsbezeichnung	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6
	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]
IMTEST-1	15 0.30	45 0.22	75 0.23	105 0.22	135 0.26	165 0.30
IMTEST-2	15 0.90	45 0.70	75 0.70	105 0.70	135 0.70	165 0.70
IMTEST-3	15 0.50	45 0.40	75 0.40	105 0.41	135 0.40	165 0.42
IMTEST-4	15 1.0	45 1.0	75 1.0	105 1.0	135 1.0	165 1.0
IMTEST-5	30 1.0	60 1.0	90 0.9	120 1.0	150 1.0	180 1.0

Versuchsbezeichnung	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12
	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]	$\theta/[^{\circ}]$ U/[V]
IMTEST-1	195 0.30	225 0.22	255 0.22	285 0.27	315 0.20	345 0.20
IMTEST-2	195 0.70	225 0.70	255 0.70	285 0.50	315 0.50	345 0.21
IMTEST-3	195 0.41	225 0.41	255 0.40	285 0.40	315 0.24	345 0.07
IMTEST-4	195 1.0	225 1.0	255 1.0	285 1.0	315 0.9	345 0.9
IMTEST-5	210 1.0	240 1.0	270 1.0	300 1.0	330 0.9	360 0.9

Tabelle 20: Gemessene Peak-to-Peak Spannungswerte (Vpp) und zugehörige Meßpunkte bei Versuchen zur Messung der Magnetfeldstärke

MP = Meßpunkt

Beisp: Bei Versuch IMTEST-1 ist die Winkelkoordinate des Meßpunkts 1 (MP1) 15°, also Joch 1, und der Spannungswert 0.3 Vpp

Die gemessene Spannung im Zentrum des Induktors ist 4 Vpp.

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung	Einschaltdauer des Induktors	T1	T2	T3	T4	T5
	U_{ind} [kV]	t_e [min]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]
IMTEST-1	1.13	23:30	35	32	22	--	69
IMTEST-2	1.13	11.42	35	32	20	45	62
IMTEST-3*	1.13	0:54	--	--	--	--	--

Tabelle 21: Gemessene max. Temperaturen bei den Leerlauftests mit geöffnetem Induktor zur Messung der Magnetfeldstärke

Meßpositionen: T1 = max. Temperatur 30 mm vom Außenrand zwischen Joch 1 und 2
T2 = max. Temperatur 190 mm vom Außenrand zwischen Joch 3 und 4
T3 = max. Temperatur 400 mm vom Außenrand zwischen Joch 6 und 7
T4 = max. Temperatur Joch 1 Unterseite
T5 = max. Temperatur Joch 1 Oberseite

* Im Versuch IMTEST-3 konnten aufgrund der kurzen Einschaltzeit des Induktors keine Temperaturerhöhungen festgestellt werden.

Bem.: Die Umgebungstemperatur bei den Messungen war ca. 18 °C.

5.2 Thermographiemessungen (W. Rapp, R. Vollmer, IATF)

In dieser Versuchsreihe wurden Thermographie-Aufnahmen von einer runden VA-Platte (*Material-Nr. 1.4571 \equiv X6 CrNiMoTi 17 12 2, Quelle: DIN 17440*) mit 1 m Durchmesser und 10 mm Dicke während der Aufheizung im Induktor gemacht. Durch die Thermographie-Aufnahme kann über die Temperaturverteilung in der Platte die Magnetfeldstärke oberhalb des Induktors untersucht werden. Die VA-Platte bündelt dabei das Magnetfeld in gleicher Weise wie bei den späteren Versuchen der metallische Anteil der Schmelze. Messungen mit der H-Feld Sonde in der direkten Umgebung der Spule bestätigen, daß mit der Platte das Streufeld stark vermindert wird. Die VA-Platte wurde durch Keramikklötze auf einen Abstand von 160 mm über den Induktor gesetzt. Zur Messung der Referenztemperatur wurden zwei Thermoelemente auf der Plattenoberseite an den Stellen (TE1: $r = 185$ mm, $\theta = 180^\circ$) und (TE2: $r = 495$ mm, $\theta = 180^\circ$), und ein Thermoelement auf der Plattenunterseite an der gleichen Position wie das erste Thermoelement angebracht (TE3: $r = 185$ mm, $\theta = 180^\circ$). Mit einer IR-Kamera wurde von der Platte aus einer Höhe von ca. 3.2 m zu verschiedenen Zeiten Aufnahmen gemacht, wobei der Induktor bei einer Induktorspannung von 790 V, entsprechend einer Induktorbruttoleistung von 51 kW und einer Induktorfrequenz von 960 Hz, betrieben wurde.

In zwei Versuchen wurden insgesamt 4 Bilder aufgenommen. Im ersten Versuch (ITTEST-1) wurde der Induktor 1:14 min betrieben. Bild 16 wurde zum Zeitpunkt des Ausschaltens und

Bild 17 nach einer Temperaturlausgleichsphase von 4:30 min gemacht, um eine möglichst einheitliche Temperatur über der Platte zu erhalten. Die Helligkeitsunterschiede auf den Bildern geben Aufschluß über den unterschiedlichen lokalen Erwärmungsgrad der Platte und damit über die Homogenität des Magnetfeldes oberhalb des Induktors.

Im zweiten Versuch (ITTEST-2) wurde das Objektiv der Kamera um 90° gedreht, um zu untersuchen, ob die im ersten Versuch beobachtete stärkere Erwärmung an einer Stelle der Platte nicht u.U. auf die Meßapparatur zurückzuführen ist. Bild 18 wurde zum Zeitpunkt des Ausschaltens und Bild 19 nach einer Abkühlphase gemacht. In der Tat zeigt auch der zweite Versuch, daß diese lokal stärkere Erwärmung der Platte ebenfalls um 90° gedreht erscheint, d.h. die scheinbar heißere Zone ist auf Unregelmäßigkeiten der Kamera zurückzuführen, vgl. Bild 17 und 19. Die mit den Thermolementen gemessenen Temperaturen sind in Tabelle 22 wiedergegeben.

Die Bildaufnahmen dieser Thermographiemessungen zeigen, daß die Beheizung der Platte über den Winkel homogen ist. Über den Radius lassen sich Temperaturunterschiede erkennen, wobei die Platte in der Mitte nicht beheizt wird und im äußeren Bereich die größte Erwärmung stattfindet. Genauere quantitative Aussagen lassen sich aus den Kalorimetertests mit den VA-Platten herleiten.

Versuchs- bezeichnung	Induktorspannung/ Bruttoleistung/ Frequenz $U_{ind}/P_{brutto}/f$ [kV]/[kW]/[Hz]	Einschaltdauer des Induktors t_e [min]	vor	Ende	nach
			Aufheizung TE1/TE2 T [°C]	Aufheizung TE1/TE2 T [°C]	Abkühlphase TE1/TE2 T [°C]
ITTEST-1	0.79/51/960	1:14	20/20	143/220	104/107
ITTEST-2	0.79/51/960	0:45	87/97	163/218	149/164

Tabelle 22: Betriebszustände und gemessene max. Temperaturen an verschiedenen Stellen der VA-Platte bei den Thermographiemessungen

5.3 Homogenität aus Energieeintrag in die VA-Platten

Die drei Tests IPTEST-6, IPTEST-8 und IPTEST-9 der vierten Versuchsreihe, die bei gleicher Induktorspannung und gleichem Plattenabstand von dem Induktor, aber unterschiedlichem Winkel der Temperaturmeßachse (Variation von θ) durchgeführt wurden, zeigen während der Einschaltdauer des Induktors einen praktisch identischen Temperaturverlauf, als Beispiel TE6 im Bild 20. Der Verlauf der Energiekurven der oben genannten Versuche ist in dem Zeitbereich ebenfalls identisch, s. Bild 21. Auch der Verlauf der Temperaturen ST6, ST11, ST12 aus dem ersten kalorimetrischen Test, IPTEST-1, deren Radius- und Höhen-

koordinaten praktisch gleich, aber deren Winkelkoordinaten unterschiedlich sind, ist in dem Zeitbereich identisch, s. Bild 22. Diese Beobachtungen zeigen, daß der Erwärmungsgrad der Plattenbereiche unabhängig vom Winkel ist. Die postulierte Winkelunabhängigkeit bei der integralen Energiebestimmung ist durch dieses Ergebnis bestätigt. Die in den Anforderungen an den Induktor spezifizierte Homogenität über dem Winkel ist damit erfüllt.

6. Diskussion der Ergebnisse

6.1 Leerlauftests

6.1.1 Temperaturen

Wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, ist die Temperaturentwicklung an den thermisch hoch belasteten Induktorbauteilen ein wichtiges Kriterium für das sichere Betriebsverhalten des Induktors. In der Spezifikation wurde eine Temperaturgrenze von maximal 160 °C festgelegt, damit die Induktorbauteile aus Kunststoff nicht beschädigt werden. Die letzten drei Leerlauftests zeigen, daß die Temperatur am Joch 1, thermisch am höchsten belastetes Teil, unter 130 °C bleibt. Alle anderen Temperaturen der Induktorbauteile liegen weit unter 160 °C, so daß diesbezüglich von einem zuverlässigen Betriebsverhalten ausgegangen werden kann. Die Temperaturbelastung wird geringer, wenn der Induktor unter Last betrieben wird, da ein Teil der Verlustleistung in die Aufheizung der Schmelze geht; das Streufeld wird geringer. Der Schwingkreisstrom ändert sich von Leerlaufbetrieb zu Betrieb mit VA-Platten bzw. Schmelze praktisch nicht, da die Blindströme um den Faktor 10 höher sind als die Wirkströme. Deshalb ist der Leerlaufbetrieb für den Induktor die höchste Belastung, da die höchsten Temperaturen an Induktorbauteilen in Leerlauftests ermittelt werden können. Der jetzige Stand der Induktorkühlung ist ausreichend, um die bei Leerlaufbetrieb anfallende Verlustwärme abzuführen, so daß daran nichts mehr geändert werden muß.

6.1.2 Bestimmung der Leerlaufleistung

Auf der Basis der gemessenen Daten bei den Kalorimetertests für den COMET-Induktor in der vierten Versuchsreihe und dem COMET-H 1.2 Experiment wurden die Leerlaufleistungen als Funktion der Induktorspannungen aufgezeichnet. Eine doppelt-logarithmische Auftragung der Leerlaufleistung (P_L) über der entsprechenden Induktorspannung (U_{ind}) ergibt eine Gerade (Bild 23), so daß die Beziehung

$$P_L = C * U_{ind}^n \quad (\text{Gl. 6})$$

P_L = Leerlaufleistung
 U_{ind} = Induktorspannung

gilt. Zur Bestimmung der Konstanten C und n wird die Ausgleichsgerade durch Regressionsanalyse berechnet nach dem HP-15C-Handbuch, S. 55.

$$\log P_L = \log C + n * \log U_{ind} \quad (\text{Gl. 7})$$

Die Regressionsanalyse ergibt:

$$\log C = 2.127353$$

$$C = 134.076$$

$$n = 2.170015$$

Somit kann der Zusammenhang zwischen Leerlaufleistung und Induktorspannung durch die einfache Beziehung

$$P_L = 134.1 * U_{ind}^{2.170} \quad (\text{Gl. 8})$$

P_L = Leerlaufleistung in kW
 U_{ind} = Induktorspannung in kV

approximiert werden. Die obige Gleichung berücksichtigt aber nicht die Feldverbesserung bei beladenem Induktor. In Tabelle 23 werden die gemessenen Leerlaufleistungen aus den letzten 3 Leerlaufversuchen und dem COMET-H 1.2 Versuch sowie die mit Gl. 8 errechnete Leerlaufleistung dargestellt. Der durch Approximation entstehende Fehler wird zum Vergleich ebenfalls in der gleichen Tabelle eingetragen.

Anlagenwerte	ILTEST-16	ILTEST-17	COMET-H 1.2	ILTEST-18
U_{ind} [kV]	1.75	2.2	2.38	2.6
$\log U_{ind}$ [kV]	0.243038	0.342422	0.376577	0.414973
$P_{L,Messung}$ [kW]	454	722	905	1060
$\log P_L$ [kW]	2.657055	2.858537	2.956648	3.025305
P_L [kW]	451.7	742.1	880.2	1066.4
Fehler % ($P_L - P_{L,Messung}$) / $P_{L,Messung}$	-0.5	+2.8	-2.7	+0.6

Tabelle 23: Vergleich von gemessenen und durch Approximation errechneten Anlagenwerten

$P_{L,Messung}$: gemessene Induktor-Leerlaufleistung in kW
 P_L : mit $P_L = 134,1 \cdot U_{ind}^{2,170}$ gerechnete Leerlaufleistung in kW
 U_{ind} : eingestellte Induktorspannung in kV.

Die obige Tabelle zeigt, daß die Abweichungen durch Approximation von den vorhandenen Meßwerten der momentanen Leistung kleiner als 3 % sind.

Die Leistung des Induktors sollte proportional zum Quadrat der angelegten Induktorspannung sein. Aus der Regressionsanalyse ergibt sich jedoch $n > 2$, was aufgrund der Stromverdrängung benachbarter Leiter zustandekommt. Gl. 8 kann auch für die Ermittlung der Nettoleistung am Schaltpult benutzt werden. Im Bereich $1.0 < U_{ind} < 2.5$ läßt sich Gl. 8 auch darstellen durch

$$P_L = 158.1 * U_{ind}^2 - 26.3 \quad (\text{Gl. 9})$$

Dies ist für die Realisierung einer Anlogschaltung besser geeignet. Diese Gleichung hat im Gültigkeitsbereich einen Fehler von unter 2 % (s. Tabelle 24). Außerhalb dieses Bereichs wird allerdings der Fehler unzulässig groß.

U_{ind} [kV]	P_L [kW]	P_{L1} [kW]	Fehler [%]
0.5	29.8	13.2	-56
0.6	44.2	30.6	-31
0.7	61.8	51.2	-17
0.8	82.6	74.9	-9.4
0.9	107	102	-4.9
1.0	134	132	-1.6
1.1	165	165	0
1.2	199	201	1.1
1.3	237	241	1.6
1.4	278	284	2.0
1.5	323	329	1.9
1.6	372	378	1.7
1.7	424	431	1.6
1.8	480	486	1.2
1.9	540	544	0.8
2.0	603	606	0.5
2.1	671	671	0
2.2	742	739	-0.4
2.3	817	810	-0.9
2.4	896	884	-1.3
2.5	979	962	-1.8
2.6	1066	1042	-2.3

Tabelle 24: Vergleichen von rechnerisch ermittelten Leerlaufleistungen

P_L : mit $P_L = 134,1 U_{\text{ind}}^{2,170}$ gerechnete Leerlaufleistung in kW
 P_{L1} : mit $P_{L1} = 158,1 U_{\text{ind}}^2 - 26,3$ gerechnete Leerlaufleistung in kW
 U_{ind} : eingestellte Induktorspannung in kV.

6.2 Kalorimetertests

6.2.1 Temperaturen

Der Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte (Platte 1) ist für ausgewählte Zeitpunkte bis zum Abschalten des Induktors in Bild 24 bis 33 dargestellt. Das Temperaturmaximum in dem Plattenstapel wird an der unteren Seite der untersten Platte (Platte 1) in ca. 30 cm Abstand von der Mitte erreicht. Diese Temperaturplots zeigen bis zu diesem Abstand eine mit dem Radius zunehmende Erwärmung, anschließend nimmt die Erwärmung ab bis ca. 45 cm Abstand von der Mitte. Danach ist bis zum Rand der Platten (0.5 m Radius) ein leichter Anstieg zu beobachten. Zurückzuführen ist dies auf den Verdrängungseffekt der VA-Platten im Magnetfeld. Die Magnetfeldlinien aus der Mitte des Induktors werden von der VA-Platte nach außen verdrängt, so daß sich im Randbereich der Platten dichtere Magnetfeldlinien befinden. Dort ist die Ankopplung größer und somit auch die Temperaturen höher.

Die Temperaturverteilung über der Höhe im Plattenstapel ist in Bild 34 dargestellt. Daraus zu ersehen ist der Temperaturverlauf von vier gewählten Thermoelementen mit gleichen Radius- und Winkel-, aber unterschiedlichen Höhenkoordinaten aus dem Versuch IPTEST-6. Erwartungsgemäß zeigen die Kurven, daß mit zunehmendem Abstand der VA-Platten von der Induktoroberkante die Ankopplung geringer ist und dadurch die Temperaturen abnehmen. Die Magnetfeldstärke nimmt mit zunehmender Entfernung von der Induktoroberkante ab.

Die drei Tests IPTEST-6, IPTEST-8 und IPTEST-9, die bei gleicher Induktorspannung und gleichem Plattenabstand von der Induktoroberkante, aber unterschiedlichem Winkel der Temperaturmeßachse (Variation von θ) durchgeführt wurden, zeigen einen praktisch identischen Verlauf der Temperaturkurven bis zum Abschalten des Induktors, s. Bild 35. Auch der Verlauf der Temperaturen ST6, ST11 und ST12 aus dem ersten kalorimetrischen Test, IPTEST-1, deren Radius- und Höhenkoordinaten gleich, aber deren Winkel unterschiedlich sind, ist in diesem Zeitbereich identisch, s. Bild 36. Diese Beobachtungen zeigen, daß der Erwärmungsgrad der Platten unabhängig vom Winkel ist, d.h. die spezifizierte Homogenität des Magnetfeldes gegenüber der Rotationsachse ist erfüllt. Die wichtigsten Informationen über die gemessenen Temperaturen sind in Tabelle 25 zusammengefaßt.

Versuchs- bezeichnung	T_o [°C]	T_a [°C]	T_{max} [°C]	$T_a - T_o$ [°C]	t_d [hh:mm]	t_e [s]
IPTEST-1	23	225	713	202	1:30	555
IPTEST-2	212	453	1005	241	1:56	534
IPTEST-3	450	669	1007	219	0:59	1032
IPTEST-4	20	175	645	155	2:37	225
IPTEST-5	170	370	930	200	2:23	225
IPTEST-6	18	175	630	157	3:20	180
IPTEST-7	40	180	640	140	2:50	113
IPTEST-8	105	238	600	133	2:00	160
IPTEST-9	35	190	650	155	2:25	169
IPTEST-10	125	245	700	120	2:50	90

Tabelle 25: Temperaturen und Zeiten bei den Kalorimetertests

- T_o : Anfangstemperatur der Platten
- T_a : Temperatur der Platten nach Ausgleichsphase
- T_{max} : maximale gemessene Temperatur der Platten
- t_d : Dauer der Temperaturmessung bzw. benötigte Zeit bis zum
Temperaturausgleich in den Platten
- t_e : Einschaltdauer des Induktors

6.2.2 Berechnung des Energieeintrags in die Platten

In den Kalorimetertests sind einige der in den Platten eingesetzten Thermolemente vor bzw. während der Versuche ausgefallen, so daß ihre Temperaturwerte für die Auswertung nicht herangezogen werden konnten. Aus den gültigen Temperaturmeßwerten und den entsprechenden temperaturabhängigen c_p -Werten wurde durch numerische Integration über das ganze Volumen der zeitliche Verlauf der in die Platten eingekoppelten Energie berechnet. Diese berechneten Energiekurven, Bild 37 bis 43, steigen mit dem Einschalten des Induktors ($t_e = 0$) linear mit der Temperatur ($E = m \cdot c_p \cdot \Delta T$) an. Die Energiezunahme setzt sich über die Einschaltdauer des Induktors hinaus fort bis einige Zeit später das Maximum erreicht ist. Diese scheinbare Energiezunahme trotz abgeschaltetem Induktor resultiert daraus, daß in dem Integrationsverfahren die Temperaturen der Meßpunkte zu einer gegebenen Zeit durch eine stetige Funktion (Polynom) verbunden werden. Tatsächlich sind jedoch Temperatursprünge an den Kontaktflächen zwischen den vier miteinander verschraubten Platten zu beobachten, s. z.B. TE 13 und TE 23 in IPTEST-7. Beide Thermolemente messen praktisch an der gleichen Stelle (Bild 44), TE 13 auf der Oberseite der untersten Platte, TE 23 auf der Unterseite der darübergelegenen Platte. Die Annahme der Stetigkeit der Temperaturen führt dazu, daß bei der Energieberechnung durch numerische Integration ein niedrigerer Energieeintrag errechnet wird als in der Platte induziert wird, weil ein gewisser Energieanteil (schraffierte Fläche in Bild 45) unberücksichtigt bleibt. Dieser Energieanteil führt jedoch im weiteren Verlauf des Temperaturausgleichs zur Aufheizung kälterer, mit Thermolementen bestückten Stellen und führt dadurch zu einem scheinbar weiteren Energieeintrag in die Platten. Um diese Diskrepanz

in der Energieberechnung zu berücksichtigen, wird das Kurvenmaximum der berechneten Energiekurve auf die Zeit des Induktorabschaltens zurückgesetzt. Zusätzlich wird aus dem Verlauf der Energiekurve nach dem Maximum der Energieverlust pro Zeit bestimmt und anteilig zu dem Maximalwert zum Zeitpunkt des Abschaltens hinzuaddiert, um die Verluste während des Induktorbetriebs zu berücksichtigen. Es ergibt sich ein Soll-Verlauf, der exemplarisch im Bild 46 dargestellt ist.

Die drei Tests IPTEST-6, IPTEST-8 und IPTEST-9, die bei gleicher Induktorspannung und gleichem Plattenabstand von der Induktoroberkante, aber unterschiedlichem Winkel der Temperaturmeßachse (Variation von θ) durchgeführt wurden, zeigen einen identischen Verlauf in ihren Energiekurven während des Induktorbetriebes, Bilder 40 und 41. Dies bedeutet, daß der Energieeintrag in die Platten unabhängig von dem Winkel ist. Somit ist die geforderte Winkel-Unabhängigkeit des Energieeintrages nachgewiesen.

Um das Integrationsverfahren zu kontrollieren, wurde eine überschlägige Energieberechnung mit einem mittleren c_p -Wert und der Ausgleichstemperatur T_a durchgeführt und mit der berechneten Energie verglichen, s. Tabelle 26. Zusätzlich sind in Tabelle 26 die Nettoleistung und der Wirkungsgrad der Induktor sowie die Abhängigkeit der Nettoleistung von der Induktorspannung dargestellt.

Versuchs- bezeichnung	t_s	ΔE_s	ΔE_{zu}	$\Delta E_{zu} / \Delta E_s$	$\frac{P_{N1}}{P_{N2}}$	$\frac{P_{N1}/m^2}{P_{N2}/m^2}$	η_1 η_2	ΔE_a	ΔE_r
$(U_{ind}/P_{br.}/a)$ [kV-kW-mm]	[s]	[MJ]	[MJ]	[%]	[kW]	[kW/m ²]	[%]	[MJ]	[MJ]
IPTEST-1 (1.1-250-140)	555	58.71	17.1	29	106 85	135 108	42 34	49.35	50.71
IPTEST-2 (1.55-495-168)	534	84.34	29.42	35	158 148	201 188	32 30	62.92	60.50
IPTEST-3 (1.1-223-168)	1032	78.09	6.07	8	76 58	97 74	34 26	62.54	54.97
IPTEST-4 (1.75-607-165)	225	43.99	13.63	31	195 155	248 197	32 25	37.38	38.91
IPTEST-5 (1.75-643-145)	225	62.81	19.14	30	279 191	355 243	43 30	51.27	50.21
IPTEST-6 (2.0-800-160)	180	42.11	11.78	28	234 196	298 250	29 24	37.46	39.41
IPTEST-7 (2.5-1317-160)	113	37.56	11.01	29	332 338	422 430	25 26	33.69	35.14
IPTEST-8 (2.0-815-160)	160	34.07	9.19	27	213 211	271 269	26 26	31.47	33.34
IPTEST-9 (2.0-815-160)	169	37.91	10.52	28	224 211	285 269	27 26	35.3	38.91
IPTEST-10 (2.0-1000-110)	90	32.06	11.21	34	356 396	453 504	36 40	28.14	30.12

Tabelle 26: Vergleich der verschiedenen Werte der in die Platten eingespeiste Energie

- U_{ind} : Induktorspannung
 P_{br} : Induktor-Bruttoleistung
 a : Plattenabstand vom Induktor
 t_s : Zeitdauer zwischen Ein- und Ausschalten des Induktors
 ΔE_s : Energieeintrag in die Platten, ermittelt durch Extrapolation der berechneten Energiekurve
 ΔE_{zu} : scheinbare Energiezunahme nach dem Abschalten des Induktors
 P_{N1} : mittlere Nettoleistung errechnet aus $\Delta E_s / t_s$
 P_{N2} : mittlere Nettoleistung errechnet aus Bruttoleistung minus Leerlaufleistung (Abschnitt 6.1.2)
 ΔE_a : Energieinhalt der Platten am Ende der Meßdauer
 ΔE_r : überschlägig errechnete Energie zum Ende der Meßdauer als Vergleich zu ΔE_a
 $(\Delta E_r = m \cdot c_p \cdot \Delta T)$, wobei für c_p ein Mittelwert von 488 J/kgK eingesetzt wurde.
Dieser c_p -Wert ergibt sich als arithmetisches Mittel aus den c_p -Werten bei den
Temperaturen: 0°C, 20°C, 100°C, 200°C, 300°C.
 η_1 : Wirkungsgrad des Induktors aus Verhältnis P_1 / Bruttoleistung
 η_2 : Wirkungsgrad des Induktors aus Verhältnis P_2 / Bruttoleistung

Aus Tabelle 26 ist ersichtlich, daß die überschlägig errechnete Energie (ΔE_r) am Ende der Meßdauer mit dem durch das Integrationsverfahren bestimmten Energieinhalt (ΔE_a) der Platten gut übereinstimmt; d.h. das für die Bestimmung des Energieeintrags in die Platten

verwendete Integrationsverfahren liefert zuverlässige Werte. Der Wirkungsgrad des Induktors verbessert sich erwartungsgemäß mit abnehmendem Abstand der Platten von der Induktoroberkante, vergl. hierzu IPTEST-4 mit IPTEST-5 (Bild 39) und IPTEST-9 mit IPTEST-10 (Bild 43).

Die mittlere Nettoleistung in den VA-Platten wurde nach zwei verschiedenen Methoden berechnet. Bei der ersten Methode wird die durch das Zurücksetzen auf den Zeitpunkt des Induktorabschaltens ermittelte Nettoenergie durch die Einschaltdauer des Induktors dividiert (P_{N1}); betrachtet wird also die in die VA-Platten eingekoppelte Energie ohne Wärmeverluste. Bei der zweiten Methode wird die mittlere Nettoleistung als die Differenz aus der Induktorbruttogleistung und der dazugehörenden Leerlaufleistung ermittelt (P_{N2}); ein indirektes Verfahren der Nettoenergieermittlung. Wie aus Tabelle 26 zu entnehmen ist, weichen die beiden Werte z.T. bis zu 30 % von einander ab. Der Hauptgrund ist darin zu sehen, daß bei der ersten Methode (P_{N1}) die Verluste nicht berücksichtigt werden. Bei der zweiten Methode (P_{N2}) werden dagegen Verlustleistungen des Induktors durch die Leerlaufleistung berücksichtigt.

Um die bei der Auslegung des Induktors spezifizierte Nettogleistung von 400 kW/m^2 in die Schmelze einzubringen, muß bei der COMET-H Geometrie (ca. 1 m Tiegelinnendurchmesser) eine Nettogleistung von ca. 315 kW erreicht werden. In den Versuchen IPTEST-7 und IPTEST-10 sind bei Abständen von 160 mm bzw. 110 mm Nettogleistungen von 338 kW bzw. 396 kW erzielt worden. Diese Versuche wurden bei 2.5 kV bzw. 2.0 kV durchgeführt. Damit muß der Induktor bei einer Induktorspannung von 2.5 bis 2.0 kV betrieben werden, um die geforderte maximale Nettogleistung zu erreichen.

Der Ankopplungsgrad hängt stark von der Eindringtiefe des Induktionsfeldes in die Platten ab. Die Eindringtiefe ist aber für verschiedene Materialien unterschiedlich, so daß die Ergebnisse der hier durchgeführten Abnahmetests nicht unbedingt für die in den COMET-H Versuchen eingesetzten Thermitschmelzen gelten müssen. In den hier durchgeführten Tests wird lediglich gezeigt, ob bei stabilem Betriebsverhalten mit dem vorhandenen Induktor eine geforderte Nettogleistung von 400 kW/m^2 in die Platten eingebracht werden kann. Die ersten zwei COMET-H Versuche haben aber gezeigt, daß die Ankopplung des metallischen Anteils der Thermitschmelze größer ist als die der VA-Platten, weil der ohmsche Widerstand der Thermitschmelze geringer ist als der der VA-Platten. Mit Thermitschmelzen wird bei einer kleineren Induktorspannung die geforderte Nettogleistung von 315 kW erreicht, wodurch auch die thermische Belastung des Induktors geringer ist.

Zur genaueren Bestimmung der Nettogleistung in den COMET-H Versuchen werden zwei Methoden angewandt. Bei der ersten Methode wird eine Anlogschaltung eingesetzt, die aus der einzustellenden Induktorspannung die Leerlaufleistung mittels Gl. 8 errechnet und von der Induktorbruttogleistung subtrahiert. Die so ermittelte Nettogleistung wird on-line am Schalterpult angezeigt, um bei Bedarf die Induktorspannung auf die geforderte Nettogleistung nachregeln zu können.

Bei der zweiten Methode wird die gesamte Verlustleistung als Temperaturanstieg des Kühlwassers in der Rückkühlanlage des Induktors erfaßt. Dabei wird der Kühlwasservolumenstrom \dot{V} mit der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Vor- und Rücklauf über die Beziehung

$$\dot{Q} = \dot{V} * \rho * c_p * \Delta T \quad (\text{Gl. 10})$$

in eine Wärmeleistung \dot{Q} umgerechnet. Die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_p werden als Konstanten, wenn erforderlich auch als von der Temperatur abhängig, vorgegeben. Die ermittelte Leistung wird von der Induktorbruttoleistung subtrahiert, um die tatsächliche Nettoleistung zu erhalten.

Für die Erfassung der Kühlwasserenergie sind stationäre Bedingungen notwendig, die sich erst ca. 5 min nach Einschalten des Induktors im Kühlkreislauf einstellen. Deshalb muß bei den COMET-H Versuchen der Induktor 5 min vor Abstich gestartet werden und der Kühlturm sollte nur in einer bestimmten Stufe betrieben werden.

6.2.3 Bezogene Wärmequellenverteilung

Die aus den spezifischen Energien ($e_i = c_{pi} \cdot T_i$) jedes einzelnen Meßpunktes ermittelte bezogene Wärmequellenverteilung (e_i/e_{max}) für die unterste Platte (Platte 1, Höhe = 0 mm) ist für ausgewählte Zeitpunkte bis zum Abschalten des Induktors über den Radius in den Bildern 47 bis 56 dargestellt. Bei der Berechnung der bezogenen Wärmequellenverteilung werden die einzelnen spezifischen Energien durch die maximale spezifische Energie der betreffenden Platte dividiert. Die maximale spezifische Energie (e_{max}) wird an dem Radius $r = 30$ cm erreicht. Die ermittelte bezogene Wärmequellenverteilung erfüllt die Spezifikation des Induktors, welche auf Ergebnissen von Versuchen im kleineren Maßstab (1:10) des Herstellers beruht. Wie der Verlauf zeigt, steigen die Kurven mit zunehmendem Radius bis 0.3 m an. Danach fallen sie leicht ab, um ab 0.45 m wieder anzusteigen.

Prinzipbedingt ist die Magnetfeldstärke in der Mitte der Induktionsspule nahezu null, weshalb dort keine Ankopplung der VA-Platten erfolgt. Der Anstieg der Temperatur in der Mitte der Platten mit zunehmender Versuchszeit resultiert aus der Wärmeleitung in den Platten. Der Grund für eine stärkere Ankopplung im Randbereich der Platten liegt in der Verdrängung der Magnetfeldlinien durch die Platte.

7. Einsatz des Induktors in den COMET-H Versuchen

7.1 Übersicht der bisher durchgeführten COMET-H Versuche

Um bei dem COMET Core-Catcher Konzept das langfristige Verhalten von Schmelzen zu untersuchen, werden Experimente mit nachbeheizten Thermitschmelzen im großen Maßstab in der umgebauten BETA-Anlage durchgeführt. Die Nachwärme-Simulation wird dabei durch den in diesem Bericht dargestellten Induktor der Fa. AEG-ELOTHERM erreicht. Mit diesem Induktor im Einsatz wurden bisher zwei Versuche, COMET-H 1.1 und COMET-H 1.2, durchgeführt. Der erste Versuch (COMET-H 1.1) wurde bei 1.75 kV Induktorspannung, entsprechend einer Leerlaufleistung von 442 kW, durchgeführt, um eine Nettoleistung von 200 kW in die 250 kg Stahlschmelze einzuspeisen. Während des Versuches konnte aber nur eine mittlere Nettoleistung von 137 kW in die Schmelze eingebracht werden, da die Mittelfrequenzversorgung für den Induktor wegen zu empfindlich eingestellter Überwachungskreise mehrfach abschaltete.

Nach Behebung dieses Problems und anderer Verbesserungsarbeiten an dem Induktor, wurde der zweite Versuch - COMET-H 1.2 - mit der Induktorspannung von 2.38 kV, entsprechend einer Leerlaufleistung von 905 kW, durchgeführt, um eine Nettoleistung von 300 kW in die 325 kg Stahlschmelze einzubringen. Im Versuch wurde wider erwarten zu Beginn eine sehr hohe Nettoleistung von etwa 916 kW in die Schmelze eingespeist. Nach einem plötzlichen Ausfall der Umrichter, ca. 2 min nach Beginn, wurde die Anlage bei einer reduzierten Induktorspannung von 1.2 kV gefahren, weshalb anschließend nur etwa 170 kW in die Schmelze eingekoppelt wurden.

Bei der Betriebsweise in den beiden COMET-H Experimenten werden die Leistungs- und Stromgrenzen bei weitem nicht erreicht. Andererseits entsprechen die an die Induktionsanlage gestellten Anforderungen durchaus den in der Stahlindustrie üblichen. Daher sollte ein sicheres Betriebsverhalten der Umrichter zu erwarten sein.

7.2 Versuche zur Stabilisierung des COMET-Umrichterbetriebes

7.2.1 Störungen beim COMET-Umrichterbetrieb

Um die bei den bisherigen COMET-H-Experimenten aufgetretenen Störungen beim Umrichterbetrieb zu beheben, wurde mit AEG-ELOTHERM eine Folge von Versuchen abgesprochen. Ziel ist dabei, die Induktionsanlage so zu ertüchtigen, daß die Induktionsbeheizung der Schmelze auf dem Niveau von 315 kW netto, entsprechend den spezifizierten 400 kW/m^2 bei der COMET-H Geometrie, sicher funktioniert. Dazu müssen 3 Betriebszustände und deren Übergänge sicher beherrscht werden: (1) leerer Induktor; (2) Induktor mit austenitischer Schmelze und starker Badbewegung; (3) Induktor mit ferromagnetischer, erstarrter Schmelze. Nach Aussagen von AEG-ELOTHERM entsprechen diese Anforderungen dem Betrieb von Industrie-Schmelzöfen und sollten erreichbar sein.

Zunächst wird vermutet, daß die bisherigen Störungen an den Umrichtern 3 und 4 auf zwei Ursachen beruhen. Erstens haben noch ungeklärte Störungen im Umrichter 3 (evtl. 4) zum

Versagen eines Thyristors geführt. Als Folge des defekten Thyristors vermutlich ist der Drahtwiderstand der Löscheiterfassung durchgebrannt. Zweitens hat die Regelung der Löschezit den Lastzustand mit der Schmelze nicht beherrscht.

Zur Behebung dieser Ursachen wurden in Zusammenarbeit mit AEG-ELOTHERM Tests mit statischer und dynamischer Last im Induktor durchgeführt. Die Tests werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Obwohl diese Tests durch zahlreiche Einstellarbeiten erfolgreich durchgeführt wurden, konnten die grundsätzlichen Probleme an den Umrichtern nicht beseitigt werden, wie spätere mißlungene Anschwingtests zeigten.

Nach weiteren aufwendigen Fehlersuchen wurde schließlich erkannt, daß der Spannungswandler (Transformator 1000 V / 250 V) im Umrichter, der die Löschimpulse für den Löschezitregler überträgt, einen falschen Istwert liefert. Die Ursache der schlechten Übertragung ist die jetzt um 100 Hz niedrigere Induktorfrequenz von unter 900 Hz gegenüber 1000 Hz in früheren BETA-Versuchen, für die die Bandbreite der vorhandenen Wandler nicht ausreicht. Nachträglich erscheinen damit der AEG-ELOTHERM die Störungen an den Umrichtern seit Einbau des neuen Induktors erklärbar. Als Lösung wurden geeignete Spannungswandler in den Umrichter eingebaut, wodurch die beiden zur Verfügung stehenden Umrichter 3 und 4 wieder als Führungsumrichter gefahren werden können. Die anschließend an die Behebung der Umrichterstörungen durchgeführten statischen und dynamischen Leistungstests mit dem Induktor konnten ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden. Umrichter und Schwingkreis verhalten sich wie erwartet stabil und die Löschezitregelung funktioniert gut.

7.2.2 Umrichtertest mit austenitischer Platte

Eine wassergekühlte Platte aus nicht rostendem Stahl (VA-Platte) von 1 m Durchmesser wird auf dem Induktor so aufgebaut, daß der Abstand Unterkante Platte zur Oberfläche Induktor 150 mm beträgt. Eine Skizze der Platte ist im Bild 57 dargestellt. Der Induktor wird gegen Strahlung von der heißen Platte mit Keramikwolle abgedeckt. Zusätzlich ist der vertiefte Innenbereich im Induktor mit zwei Schichten Keramik-Fliesen ausgelegt. Dieser Test dient der Umrichterkontrolle bei statischer Last.

Bei der Platte handelt es sich um eine Doppelplatte mit einem wasserdurchströmten Spalt von 50 mm Höhe. Die Wassermenge (Versorgung aus der COMET-Tiegelbespeisung, Kontrolle von der Schaltwarte) beträgt bis zu 100 l/min. Damit ist, zumindest bei nicht zu hohen Nettoleistungen, auch ein Dauerbetrieb des Induktors möglich. Bei dieser Kühlwassermenge nimmt unter stationären Bedingungen pro 100 kW Heizleistung die Temperatur des Kühlwassers um 15 °C zu. Da ab etwa 200 bis 300 kW Nettoleistung in der Doppelplatte Filmsieden auftreten kann, sind bei stationärer Fahrweise die Temperaturen an der unteren Platte zu kontrollieren.

Die Unterseite der Platte wird mit 3 Thermoelementen instrumentiert und überwacht: 2 Thermoelemente sind 20 mm vom äußeren Rand entfernt (gegenüberliegend, um 90° gegenüber Wasserein- und -austritt versetzt), das dritte Thermoelement liegt 300 mm außerhalb der Plattenmitte. Bei den Versuchen wird die Platte durch einen Betonstein von ca. 600 kg belastet, um sicheres Aufliegen zu gewährleisten.

Nach Austausch einer Stromversorgung, Beseitigung von Erdschleifen und Abgleich der Regelung (u.a. Löschzeiten) an der Umrichterelektronik wurden zunächst Leerlauf tests gefahren. Danach folgte die Montage der kühlbaren Doppelplatte aus nichtrostendem Stahl (Bild 57) auf dem Induktor. Eingestellt wurde in den Versuchen mit der kühlbaren VA-Platte eine Kühlwassermenge von 96 l/min. Um eine eventuell auftretende Dampfbildung zu erkennen, wird die Temperatur des auslaufenden Kühlwasser mittels eines Thermoelements erfaßt. Damit besteht auch die Möglichkeit, die eingekoppelte Nettogleistung ungefähr zu bestimmen. Durchfahren wurden verschiedene Laststufen (Induktorspannungen) mit je einem der Umrichter als Führungsumrichter. Dabei stellten sich die in Tabelle 27 dargestellten Betriebszustände ein.

U_{ind} [Volt]	$P_{Leerl.}$ [kW]	P_{brutto} [kW]	T_{Platte} [°C]	$T_{Wasser,aus}$ [°C]	$P_{Wasser,aus}$ [kW]	$P_{netto,PDP}$ [kW]	$P_{brutto}-P_{Leerl.}$ [kW]
860		138	75	10	27	65	
1000	(212*)	219	92	13	47	88	(7)
1500	320	505	150	26	134	188	185
2000	625	915	214	45	262	336	290
2600	1125	1688	330	92	598	616	563

Tabelle 27: Betriebszustände bei Umrichtertest mit austenitischer Platte

* bei 1200 V Induktorspannung (Mindestspannung bei Leerlauf)

- U_{ind} : eingestellte Induktorspannung
- P_L : Induktorleistung im Leerlauf, d.h. ohne ankoppelbares Material im Magnetfeld.
- P_{brutto} : Induktorbruttogleistung mit Platte auf dem Induktor
- T_{Platte} : mit TE2 (Plattenrand 180°) gemessene Temperatur, die maximale Temperatur an der Plattenunterseite liegt bei TE3 noch etwas höher.
- $P_{Wasser,aus}$: mit dem Kühlwasser ausgetragene Leistung
- $P_{netto,PDP}$: die in der PDP berechnete eingekoppelte Leistung.

Die Induktorfrequenz betrug durchgehend 980 Hz, die Löschzeiten wurden zwischen 55 und 80 μ s variiert. Die Einlauf temperatur des Plattenkühlwassers betrug ca. 6 °C.

Die Abweichung der in der Platte induzierten ermittelten Nettogleistung aus der Berechnung mit der PDP im Vergleich mit der Leistung im Kühlwasser und der Differenz ($P_{brutto} - P_{Leerl.}$) kann die folgenden Ursachen haben:

- geänderte Leerlaufleistung, d.h. Feldverbesserung bei beladenem Induktor
- durchgreifen des Magnetfeldes durch die relativ dünne VA-Platte
- (geringe) Wärmeverluste von der VA-Platte
- Fehler in der Temperaturmessung des Kühlwassers

Angesichts der Tatsache, daß die Feldverluste bei beladenem Induktor geringer werden, bleibt zu prüfen, ob die Leerlaufleistung, mit der zukünftig gerechnet werden soll, angepaßt wird. Die höchste mit aufliegender VA-Platte gefahrene Induktorspannung betrug 2.741 kV, entsprechend einer Bruttogleistung von 1913 kW. Die zugehörige gerechnete Nettogleistung beträgt 716 kW. Mit fest eingestelltem Löschzeitregler konnte stabiler Betrieb bei Löschzeiten für Umrichter 3 von 80 μ s und für Umrichter 4 von 75 μ s gefahren werden.

Nach Abnahme der VA-Platte wurden nochmals Leerlauftests gefahren. Die Induktorfrequenz betrug dabei durchgehend 880 Hz, bei einer Induktorspannung von 2.6 kV stellte sich eine Leistung von ca. 1125 kW ein. Anschwingen des Induktors war immer möglich. Die übrigen Leistungswerte sind in Tabelle 27 enthalten.

7.2.3 Umrichterests mit ferritischer Stahlplatte

Es wird eine normale Stahlplatte aus ferritischem Material (St 37) von 1 m Durchmesser und 30 mm Stärke eingesetzt, instrumentiert mit 3 Thermoelementen wie im Abschnitt 7.2.2. Der Versuchsaufbau entspricht dem im Abschnitt 7.2.2. Zum Schutz gegen Abheben wurde die Platte ebenfalls mit dem Betonstein (ca. 600 kg) beschwert, der auf ca. 10 cm hohen Abstandsklötzen aus Poroton lag, um ein besseres Abkühlen der Platte zu gewährleisten. Die Platte wird nicht extra gekühlt und kann daher nur pulsweise beheizt werden. Mit der Videokamera in der Tiegelhaube wird dabei eventuelles Glühen der Platte beobachtet. Gegen Ende der Tests wird die Platte bis über die Curie-Temperatur von 774 °C erhitzt. Auch dieser Test dient der Umrichterkontrolle bei statischer Last.

Nach einigen kurzen Anschwing- und Leistungstests wurde die Platte bei einer Induktorspannung von 1.43 bis 1.52 kV bis auf ca. 785 °C auf der Unterseite aufgeheizt (Überschreitung des Curie-Punktes). Dabei stellte sich eine Bruttoleistung von 806 bis 614 kW bei einer errechneten Nettoleistung von 572 bis 281 kW ein, entsprechend einem maximalen Wirkungsgrad von 65 % unterhalb der Curie-Temperatur und ca. 45 % oberhalb der Curie-Temperatur. Umrichter 3 war dabei mit einer Löschzeit von 50 µs, Umrichter 4 mit 70 µs eingestellt.

Das gegenläufige Verhalten der Induktorspannung und Bruttoleistung resultiert daraus, daß mit heißer werdender Platte durch zunehmenden ohmschen Widerstand und abnehmende Magnetisierbarkeit die einkoppelbare Leistung kleiner wird.

Nach Abheben der Stahlplatte wurden wiederum Leerlauftests mit beiden Umrichtern gefahren. Die Induktorfrequenz betrug dabei durchgehend 880 Hz, bei einer Induktorspannung von 2.6 kV stellte sich eine Leistung von ca. 1125 kW ein. Anschwingen des Induktors war immer möglich. Die übrigen Leistungswerte sind in Tabelle 27 enthalten.

7.2.4 Umrichtertest mit ferritischem Schrott im Tiegel

Diese Tests stellen durch die Ausbildung sich häufig ändernder Lichtbögen und Strompfade beim Beginn des Aufheizens von Schrott hohe Anforderungen an die Dynamik der Umrichter.

Der Tiegel wurde aus Glasfaser-arniertem Beton hergestellt: Innendurchmesser 800 mm, Außendurchmesser 1100 mm ± 10 mm, Tiegelboden 150 mm dick, Tiegelhöhe 1200 mm. Der Tiegel wird direkt auf die Doppellage der Keramikplatten aufgesetzt. Auf der Tiegelunterseite werden 4 Thermoelemente angebracht, um die Betontemperatur zu kontrollieren. Im Tiegel sind in regelloser Anordnung dicke, ferritische Schrotteile (hauptsächlich kreisrunde Blechausschnitte von 10 bis 30 mm Dicke) von ca. 280 kg eingebracht. Diese Teile sollen

nicht erschmolzen werden, sondern nur kurzzeitig erhitzt oder geringfügig angeschmolzen werden. Daher ist nur kurzzeitige Fahrweise des Induktors möglich.

Nach etlichen Anschwing- und Einstellungstests wurden mit beiden Umrichtern für einige Minuten Spannungen von ca. 1.53 bis 1.58 kV gefahren. Die Bruttoleistung betrug hierbei 615 bis 670 kW bei einer Induktorfrequenz von etwa 880 Hz. Die errechnete Nettoleistung erreichte bei diesen Versuchen 275 bis 300 kW. Während des Induktorbetriebes verschweißten die Schrotteile an den Berührungsstellen unter z.T. erheblicher Funkenbildung. Dies war beabsichtigt, um für den Umrichter einen Betriebszustand mit schnellen Laständerungen zu erzeugen. Der Umrichterbetrieb war dabei problemlos.

Nach dem Abheben des Betontiegels erfolgten nochmals Leerlauftests sowie Test mit der VA-Platte, beides mit reproduzierbaren Ergebnissen wie in den vorhergegangenen Versuchen. Dabei erfolgte auch die abschließende Einstellung der Löschzeiten.

7.2.5 Abschließende Bewertung der Umrichtertests und Verbesserungen zur Erreichung eines stabilen Umrichterbetriebes

Die Umrichtertests mit drei verschiedenen Einsätzen im Induktor und im Leerlauf sind erfolgreich durchgeführt. Zu Beginn wurde festgestellt, daß die negative Versorgungsspannung für die Elektronik von Umrichter 4 zwischen -14.7 und -17.2 V schwankt (Sollwert -15.0 V). Dies wurde durch Tausch der Stromversorgungskarte aus dem nicht benötigten Umrichter 1 beseitigt. Es ist denkbar, daß die Schwankung dieser Versorgungsspannung für den Ausfall der Umrichter bei Versuch COMET-H 1.2 verantwortlich war, auch wenn bei diesem Versuch Umrichter 3 der Leitumrichter war. Die Umrichter 3 und 4 wurden bezgl. der Löschzeit optimal eingestellt (Matthes-Kriterien erfüllt): Umrichter 3 auf 60 - 65 μ s, Umrichter 4 auf 65 - 70 μ s. Allerdings war nach Entfernen der Extender-Karten zum Schluß der Arbeiten ein Nachjustieren der Löschzeit von Umrichter 4 notwendig. Nach AEG ist solches Verhalten normal und hat keine negativen Auswirkungen auf die Stabilität des Umrichters.

Im Leerlauf sind die Löschzeiten bei Führungsumrichter 3 60 μ s bei Leistungspoti = 0 und 65 μ s bei Induktorspannung 2.6 kV. Bei Führungsumrichter 4 sind die Löschzeiten im Leerlaufbetrieb 65 μ s bei Leistungspoti = 0 und 70 μ s bei Induktorspannung 2.6 kV.

Die Beschaltung der Wechselrichter wurde durch Einbau anderer R/C-Glieder parallel zu den Thyristoren verbessert, um hohe negative Spannungsspitzen, wie sie bei zu langen Löschzeiten auftreten, zu vermeiden. Diese Spannungsspitzen (> 1800 V) haben vermutlich in der Vergangenheit die Thyristoren zerstört. Diese Maßnahme soll die Thyristoren vor Zerstörung schützen, falls die Löschzeit durch Fehler in der Regelung doch einmal weglaufen sollte. Diese Beschaltung ist jetzt Standard bei AEG-ELOTHERM.

Nach Ausfall des Induktors ist es gleichgültig, bei welcher Induktorspannung wieder gestartet wird. Ein Restart mit Sollspannung ist möglich und sinnvoll. Bei schlechtem Reglerverhalten ist anfahren von unten sinnvoll. Fahren mit nur einem Umrichter gibt keine bessere Sicherheit; Parallelbetrieb ist vorzuziehen.

7.2.6 Leistungswirkungsgrade zur Einstellung der Nettoleistungen in den COMET-H Versuchen

Unabhängig von den eingestellten Induktorspannungen bleiben die Wirkungsgrade bei den bisherigen COMET-H Versuchen in der Phase nach der Erstarrung praktisch gleich und betragen ca. 45 %. In den kalorimetrischen Tests IPTEST-7 und IPTEST-8, die mit gleichem Plattenabstand von der Induktoroberkante, aber bei verschiedenen Induktorspannungen, 2.5 bzw. 2.0 kV durchgeführt wurden, bleibt der Induktorwirkungsgrad ebenfalls gleich und beträgt ca. 26 %. Der Induktorwirkungsgrad ist damit bei einem festen Abstand des ankoppelnden Metalls von der Induktoroberkante zunächst unabhängig von der Induktorspannung.

Die Induktorwirkungsgrade aus den kalorimetrischen Tests wurden als Funktion der Plattenabstände von der Induktoroberkante aufgezeichnet und durch die Beziehung:

$$\eta = 99.365 \cdot \exp(-0.00813 \cdot a) \quad (\text{Gl. 11})$$

η = Induktorwirkungsgrad in %

a = Plattenabstand von der Induktoroberkante in mm

angenähert, s. Tabelle 28 und Bild 58. Diese Beziehung wurde durch Regressionsanalyse ermittelt. Wie aus Tabelle 28 zu sehen, beträgt der Induktorwirkungsgrad bei einem Plattenabstand von 110 mm, entsprechend der Betonschichthöhe bei Wasserzutritt in den bisherigen drei COMET-H Versuchen, ca. 40 %.

Die bisherigen drei COMET-H Versuche haben aber gezeigt, daß die Ankopplung des metallischen Anteils der Thermiterschmelze größer ist als der VA-Platten. Die Induktorwirkungsgrade in diesen drei Versuchen liegen bei Einguß und Betonerosion zwischen 40 und 60 %, und nach Erstarrung im Mittel bei ca. 45 %, also ca. 5 % höher als bei den VA-Platten mit Plattenabstand von 110 mm, s. Tabelle 29. In der Anfangsphase der COMET-H Versuche (starke Schmelzbadbewegung) wird somit bei gleicher Induktorspannung mehr Leistung in die Schmelze eingekoppelt als in der späteren Phase. Grund für diese Unterschiede ist das unterschiedliche Ankopplungsverhalten aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften der Schmelze während der Betonerosion, Fragmentierung und Erstarrung. In den COMET-H Versuchen muß deshalb die Induktorspannung von einem anfangs niedrigeren Wert auf einen später etwas höheren Wert reguliert werden, um die gewünschte Nettoleistung einzustellen.

a [mm]	$\eta_{p,m}$ [%]	$\eta_{p,r}$ [%]
100	--	44,00
105	--	42,30
110	40	40,60
115	--	39,00
120	--	37,40
125	--	35,90
130	--	34,50
135	--	33,10
140	34	31,80
145	30	30,50
150	--	29,30
155	--	28,10
160	26	27,00
165	25	25,90
168	26	25,30
170	--	24,90
175	--	23,90
180	--	22,90
185	--	22,00
190	--	21,20
195	--	20,30
200	--	19,50
205	--	18,70
210	--	18,00
215	--	17,30
220	--	16,60

Tabelle 28: Wirkungsgrade in Abhängigkeit von den Plattenabständen

- a : Plattenabstand von der Induktoroberkante
 $\eta_{p,m}$: Induktorwirkungsgrad aus den kalorimetrischen Tests
 $\eta_{p,r}$: Induktorwirkungsgrad aus der Näherungsgleichung (Gl. 11)

COMET-H 1.1	Induktorspannung [kV]:	1.6	1.75	Wirkungsgrad [%]:	
	Leerlaufleistung [kW]:	385	400	Einguß bis Wasserzutritt: 45-57	
	mittl. Nettoleistung [kW]:	315	360	nach Erstarrung: ≈45	
COMET-H 1.2	Induktorspannung [kV]:	1.2	2.38	Wirkungsgrad [%]:	
	Leerlaufleistung [kW]:	200	905	Einguß bis Wasserzutritt: 50-57	
	mittl. Nettoleistung [kW]:	170	916	nach Erstarrung: ≈45	
COMET-H 1.3	Induktorspannung [kV]:	1.5	1.6	1.8	Wirkungsgrad [%]:
	Leerl.leistung [kW]:	338	390	500	Einguß bis Wasserzutritt: 40-60
	mittl. Nettoleist. [kW]:	292	345	340	nach Erstarrung: ≈45

Tabelle 29: Überblick der Leistungswerte der bisherigen COMET-H Versuche

Zur Ermittlung der in die Platten eingekoppelten Nettoleistung bei verschiedenen Induktorspannungen und Abständen, werden die den Abständen entsprechenden Wirkungsgrade verwendet, s. Tabelle 30. Die hier ermittelten Nettoleistungen sind als Anhaltswerte bzw. Richtwerte für die in die Schmelze eingekoppelte Leistung bei gegebener Induktorspannung und verschiedenen Abständen zu sehen. Entsprechend können diese Werte, s. auch Bild 59, als Empfehlung für die Leistungseinstellung bzw. -regulierung bei verschiedenen Abständen der Schmelze von der Induktoroberkante in den COMET-H Versuchen angesehen werden.

U_{ind}	P_L	SN1 (a=110 mm) CH _{1,1} /CH _{1,2} /CH _{1,3} 3 [kW]	SN1 (a=110 mm) [kW]	SN1 (a=140 mm) [kW]	SN1 (a=160 mm) [kW]	SN1 (a=220 mm) [kW]
0.80	82.60	--	56.42	38.49	30.56	16.44
0.90	107.00	--	73.08	49.86	39.59	21.29
1.00	134.00	--	91.52	62.44	49.58	26.67
1.10	165.00	--	112.70	76.89	61.05	32.84
1.20	199.00	-- / 170 / --	135.92	92.73	73.63	39.60
1.30	237.00	--	161.87	110.44	87.69	47.16
1.40	278.00	--	189.87	129.55	102.86	55.32
1.50	323.00	/ -- / 292	220.61	150.52	119.51	64.28
1.60	372.00	315 / -- / 345	254.08	173.35	137.64	74.03
1.70	424.00	--	289.59	197.58	156.88	84.38
1.75	452.00	360 / -- / --	308.72	210.63	167.24	89.95
1.80	480.00	-- / -- / 340	327.84	223.68	177.60	95.52
1.90	540.00	--	368.82	251.64	199.80	107.46
2.00	603.00	--	458.29	281.00	223.11	120.00
2.10	671.00	--	458.29	312.69	248.27	133.53
2.20	742.00	--	506.79	345.77	274.54	147.66
2.30	817.00	--	558.01	380.72	302.29	162.58
2.38	880.00	-- / 916 / --	601.04	410.08	325.60	175.12
2.40	896.00	--	611.97	417.54	331.52	178.30
2.50	979.00	--	668.66	456.21	362.23	194.82
2.60	1066.00	--	728.08	496.76	394.42	212.13

Tabelle 30: Nettoleistung bei verschiedenen Induktorspannungen und Plattenabständen

- U_{ind} : Induktorspannung
- P_L : gerechnete Leerlaufleistung mit $P_L = 134.1 U_{\text{ind}}^{2,170}$
- SN1: mittlere Nettoleistung bei mittlerem Wirkungsgrad des Induktors
- a: Plattenabstand von der Induktoroberkante
- CH_{x,y}: COMET-H Versuche

8. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

In den COMET-H Versuchen wird die Beheizung der Schmelze durch eine ebene Induktionsspule mit Jochen vorgenommen, die speziell für diese Versuche von der Fa. AEG-ELOTHERM entwickelt wurde. In dem vorliegenden Bericht werden die Abnahmetests für den Induktor dargestellt und deren Ergebnisse diskutiert. Ziel dieser Abnahmetests ist die Prüfung der Leistungsspezifikation und der an den Induktor gestellten Anforderungen, s. Kap. 2.2, sowie der Nachweis des sicheren Betriebes des Induktors in Zusammenwirken mit den anderen elektrischen Anlagenkomponenten.

Zur Simulation der flüssigen Eisenschmelze wurde ein Stapel runder Metallplatten aus nicht rostendem und unmagnetischem Stahl (VA-Platten) verwendet. In vier Versuchsreihen wurden 18 Leerlauftests (Tabelle 31) und 10 Tests mit VA-Platten als kalorimetrische Abnahmetests für den Induktor (Tabelle 32) durchgeführt. Die Leerlauftests dienen der Untersuchung der Temperaturentwicklung an den Jochen des Induktors und an umgebenden Bauteilen. Die Leistungseinkopplung in die Platten wurde durch die kalorimetrischen Abnahmetests ermittelt. Um die Winkelunabhängigkeit (Homogenität) der Leistungseinkopplung zu untersuchen, wurden bei den kalorimetrischen Tests Temperaturen in dem Plattenstapel bei verschiedenen Radien und Winkeln gemessen. In zwei weiteren Versuchen wurden Magnetfeld- und Thermographiemessungen zur Untersuchung der Homogenität des Magnetfeldes des Induktors durchgeführt (Tabelle 33 und 34). Das Ankopplungsverhalten der Schmelze beim Einguß und Beginn des Aufheizens in den COMET-H Versuchstiegel und die Rückwirkung auf den stabilen Umrichterbetrieb wurden durch einen Versuch mit einer absenkbaaren, an einem Seil aufgehängten VA-Platte sowie durch einen Versuch mit ferritischem Schrott im Tiegel simuliert. Ferner werden der Einsatz des Induktors in den bisherigen COMET-H Versuchen und Versuche zur Stabilisierung des Umrichterbetriebes dargestellt und diskutiert.

Als Ergebnisse der kalorimetrischen Abnahmetests sind die Leistungswirkungsgrade und die daraus abgeleiteten Einstellwerte der induzierten Nettoleistungen für die COMET-H Experimente dargestellt. Die Leistungseinkopplung in den kalorimetrischen Tests wird mit der in den bisherigen COMET-H Versuchen verglichen, um eine Aussage zur Übertragbarkeit der Ergebnisse zu erhalten.

Während der Abnahmetests mußte eine Reihe von Änderungen an dem Induktor und der Umrichteranlage, die die zum Leistungsbetrieb notwendige Mittelfrequenz-Wechselspannung erzeugt, durchgeführt werden. Dies betrifft vor allem die notwendige Kühlung der Induktionsspule und der Joche sowie die Stabilisierung der Regelung der Wechselspannungsumrichter.

Nach Abschluß der Verbesserungen lassen sich die Ergebnisse der Untersuchungen wie folgt zusammenfassen:

- In den kalorimetrischen Tests wird eine in die Platten eingekoppelte Nettoleistung von 400 kW/m^2 bei Induktorspannungen von 2.5 bis 2.0 kV erreicht, wobei die entsprechenden Abstände der Platten von der Induktoroberkante 160 mm (Abstand bei Schmelzeinguß) bzw. 110 mm (Abstand bei Wasserzutritt) betragen. Damit wird die in der Spezifikation des Induktors geforderte Nettoleistung erreicht. Je kleiner der Abstand der Platten von der Induktoroberkante ist, desto höher ist der Eindringtiefe der Magnetfeldlinien und damit der

Ankopplungswirkungsgrad. Die bisherigen COMET-H Versuche zeigen jedoch, daß die metallische Schmelze einen um ca. 20 % (Schmelzeneinguß, Betonerosion, Wasserzutritt) bzw. ca. 5 % (nach Erstarrung) höheren Einkopplungsgrad besitzt als die Platten; d.h. in den COMET-H Versuchen wird die spezifizierete Nettogleistung von 400 kW/m^2 in der Schmelze bei geringeren Induktorspannungen erreicht.

- Die verbesserte Induktorkühlung ist in der Lage, die während des Induktorbetriebes bei maximal zulässiger Induktorspannung von 2.6 kV anfallende Verlustleistung sicher abzuführen, ohne daß die maximal zulässige Jochtemperatur von $160 \text{ }^\circ\text{C}$ überschritten wird.
- Aus den kalorimetrischen Tests und den Tests zur Untersuchung der Homogenität des Induktor-Magnetfeldes geht hervor, daß das Magnetfeld oberhalb des Induktors und damit auch die Leistungsverteilung über dem Radius in den Platten der erwarteten Wärmequellenverteilung entspricht. Auch die Leistungsverteilung über dem Winkel ist im Rahmen der Bandbreite der erwarteten Wärmequellenverteilung ausreichend homogen.
- Die Tests, die durchgeführt wurden, um den Umrichterbetrieb während des Versuchsablaufes in den COMET-H Experimenten zu stabilisieren, zeigen, daß ein sicherer Betrieb des Induktors in Zusammenwirken mit anderen elektrischen Anlagenkomponenten erreicht wird.
- Aus den Messungen der Leerlauf- und kalorimetrischen Tests werden für die in die Schmelze eingekoppelte Leistung bei gegebener Induktorspannung und verschiedenen Abständen Nettogleistungen ermittelt, die als Richtwerte für die Leistungseinstellung bzw. -regulierung bei verschiedenen Abständen der Schmelze von der Induktoroberkante in den COMET-H Versuchen herangezogen werden.

9. Anhang: Tabellen und Abbildungen

Tabellen: 31-34

Abbildungen: 1-59

Versuchs- bezeichnung	Induktor- Bruttoleistung	Induktor- spannung	Induktor- frequenz	Einschaltdauer des Induktors
	[kW]	[kV]	[Hz]	[min]
ILTEST-1	182	1.10	880	21.5
ILTEST-2	376	1.55	880	20.4
ILTEST-3	796	2.20	880	22.0
ILTEST-4	106	1.20	860	5
ILTEST-5	106	1.20	860	20
ILTEST-6	182	1.55	860	20
ILTEST-7	394	2.20	860	2
ILTEST-8	395	2.20	860	3
ILTEST-9	184	1.55	860	30
ILTEST-10	395	2.2	860	2
ILTEST-11	395	2.2	860	4
ILTEST-12	147	1.1	880	17
ILTEST-13	317	1.5	880	15
ILTEST-14	710	2.2	880	14
ILTEST-15	442	1.75	880	45
ILTEST-16	454	1.75	890	30
ILTEST-17	722	2.2	890	23
ILTEST-18	1060	2.6	880	20

Tabelle 31: Übersicht der durchgeführten Leerlauftests

Versuchs- bezeichnung	Induktor- spannung	Induktor- frequenz	Induktor- Brutto- leistung	Winkel θ der Temperatur- meßachse	Abstand Platten / Induktor	Einschalt- dauer des Induktors	Platten- temperatur- meßpunkte
	[kV]	[Hz]	[kW]	[°]	[mm]	[min]	[-]
IPTEST-1	1.1	880	250	60,180,315	140	9:15	34
IPTEST-2	1.55	880	495	60,180,315	168	8:54	34
IPTEST-3	1.1	880	223	60,180,315	168	17:12	34
IPTEST-4	1.75	960	607	180	165	3:45	38
IPTEST-5	1.75	1000	643	180	145	3:45	38
IPTEST-6	2.0	980	800	180	160	3:00	39
IPTEST-7	2.5	980	1317	180	160	1:50	39
IPTEST-8	2.0	980	815	15	160	2:40	39
IPTEST-9	2.0	990	815	345	160	2:50	39
IPTEST-10	2.0	1040	1000	180	110	1:30	39

Tabelle 32: Übersicht der durchgeführten kalorimetrischen Tests

Versuchs- bezeichnung	Meßposition und Orientierung der H-Feld Sonde bezüglich der Jochoberkante (siehe hierzu Bild 2 und 13)	Induktorspannung / Bruttoleistung / Induktorfrequenz $U_{ind}/P_{brutto}/f$ [kV]/[kW]/[Hz]
IMTEST-1	180 mm über den Jochen, Sonde horizontal und an jedem Joch	1.13 / 95 / 860
IMTEST-2	seitlich an Außenkante anliegend, an jedem Joch, Sonde vertikal an jedem Joch	1.13 / 95 / 860
IMTEST-3	unterhalb der Joche, anliegend zwischen Kühlwasserein- und austritt, Sonde horizontal	1.13 / 95 / 860
IMTEST-4	160 mm oberhalb der Abdeckplatte des Induktors auf Radius der Jochinnenkante, an den Jochen, Sonde vertikal,	1.13 / 93 / 860
IMTEST-5	160 mm oberhalb der Abdeckplatte des Induktors auf Radius der Jochinnenkante, an den Zwischenräumen der Joche, Sonde vertikal	1.13 / 93 / 860

Tabelle 33: Übersicht der durchgeführten Versuche zur Messung der Magnetfeldstärke am Induktor

Versuchs- bezeichnung	Induktorspannung/ Bruttoleistung/ Frequenz $U_{ind}/P_{brutto}/f$ [kV]/[kW]/[Hz]	Einschaltdauer des Induktors t_e [min]	Abstand der VA-Platte von Induktor- oberkante a [mm]
ITTEST-1	0.79/51/960	1:14	160
ITTEST-2	0.79/51/960	0:45	160

Tabelle 34: Übersicht der durchgeführten Versuche zur Thermographie

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

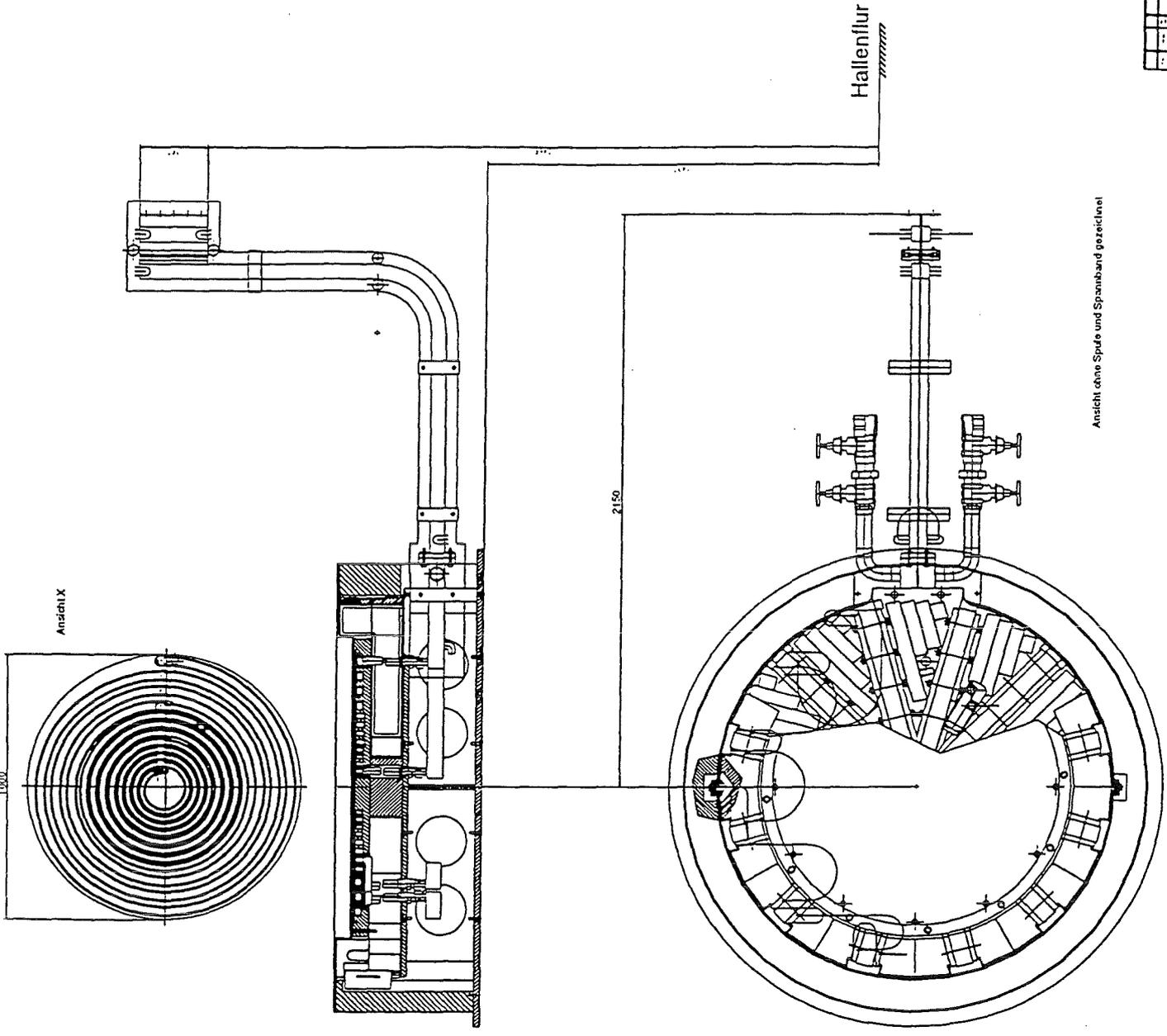
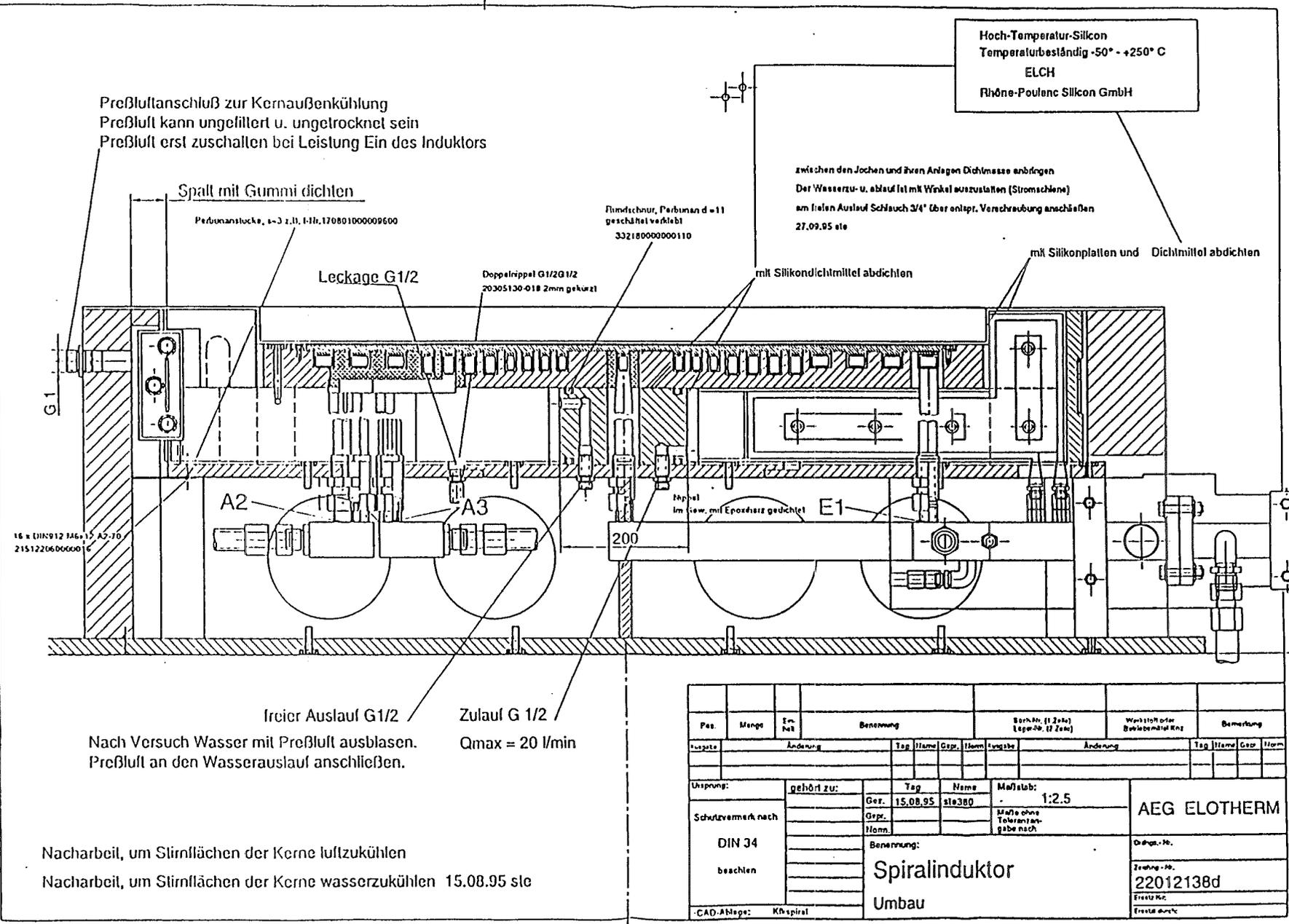
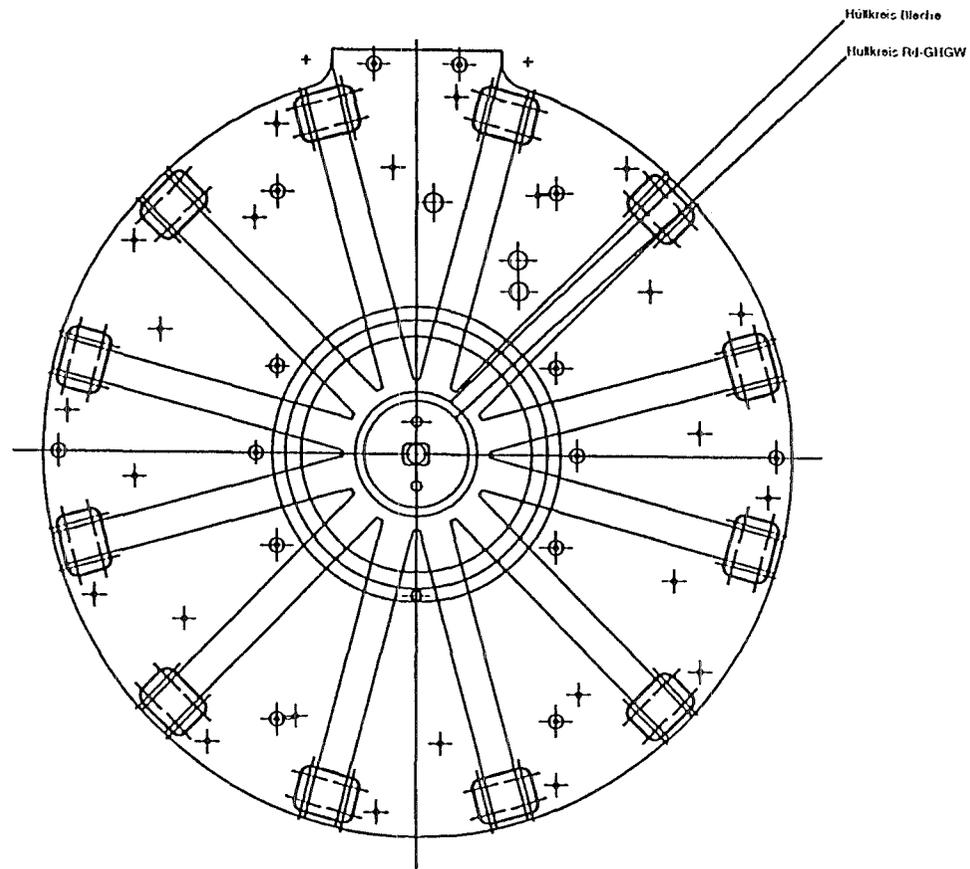
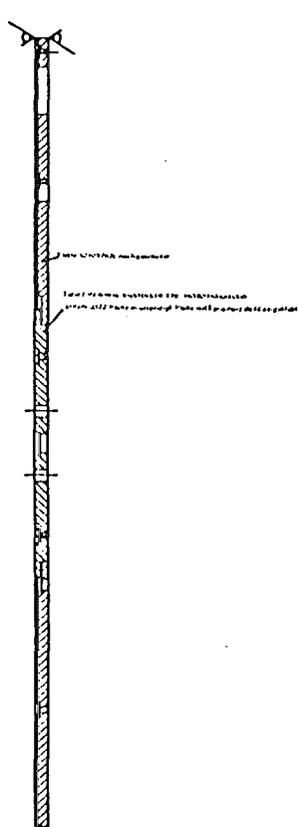


Bild 1: Aufbau des Spiralinduktors (Quelle: AEG-Eloterm Remscheid)



Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Stückzahl (Zusatz)	Legen-Nr. (Zusatz)	Werkstoff oder Bezeichnung	Bemerkung
			Änderung	Tag	Name	Gepr.	Norm
Ursprung:				gehört zu:	Tag	Name	Maßstab:
Schutzvermerk nach				Gez.	15.08.95	ste380	1:2.5
DIN 34				Gepr.			Stufe ohne Toleranzangabe nach
beachten				Norm.			
Benennung:				Spiralinduktor			
CAD-Anlage:				Khs spiral			
				Umbau			
				AEG ELOTHERM			
				Draht-Nr.			
				Zeichnung-Nr.			
				22012138d			
				Freigegeben			
				Erstellt durch			

Bild 2a: Spiralinduktor nach Umbau (Quelle: AEG-Eloterm Remscheid)



$\sqrt{Rz 100}$ (\checkmark)

Kanten 0.5 x 45° gebrochen

Bild 3: Grundplatte für Joche (Quelle: AEG-Elotherm Remscheid)

Zusammenfassung		Technische Zeichnung		Datei	
Titel	Grundplatte	Zeichner		Geprüft	
Material		Gezeichnet am		Geprüft am	
Maßstab	1:1	Gezeichnet von		Geprüft von	
Zusätzliche Angaben		AEG ELOTHERM		521927571	
EINLEITUNG		Grundplatte		521927571	

Erwartete bezogene Wärmequellenverteilung in der Schmelze

62

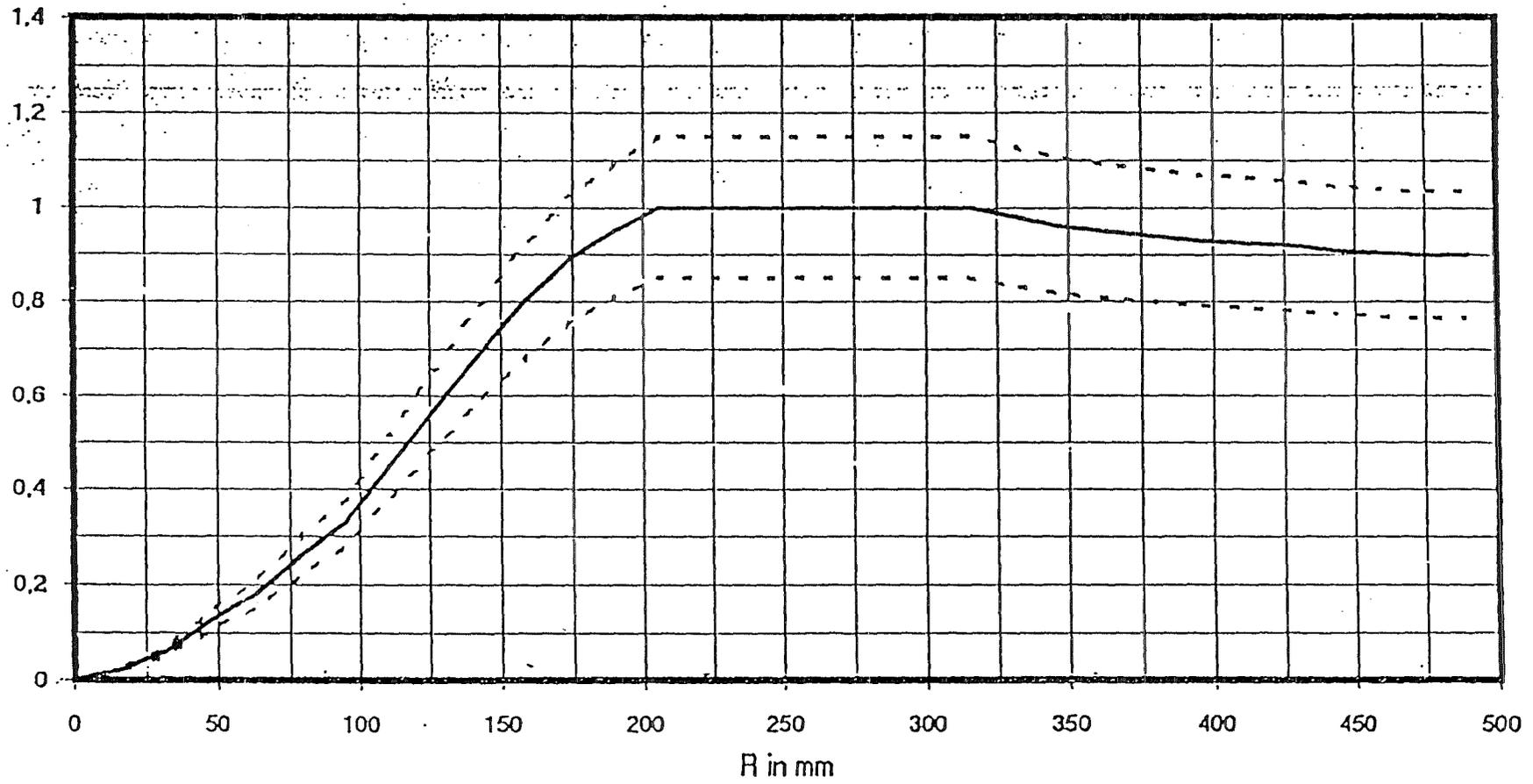


Bild 4: Erwartete bezogene Wärmequellenverteilung in der Schmelze

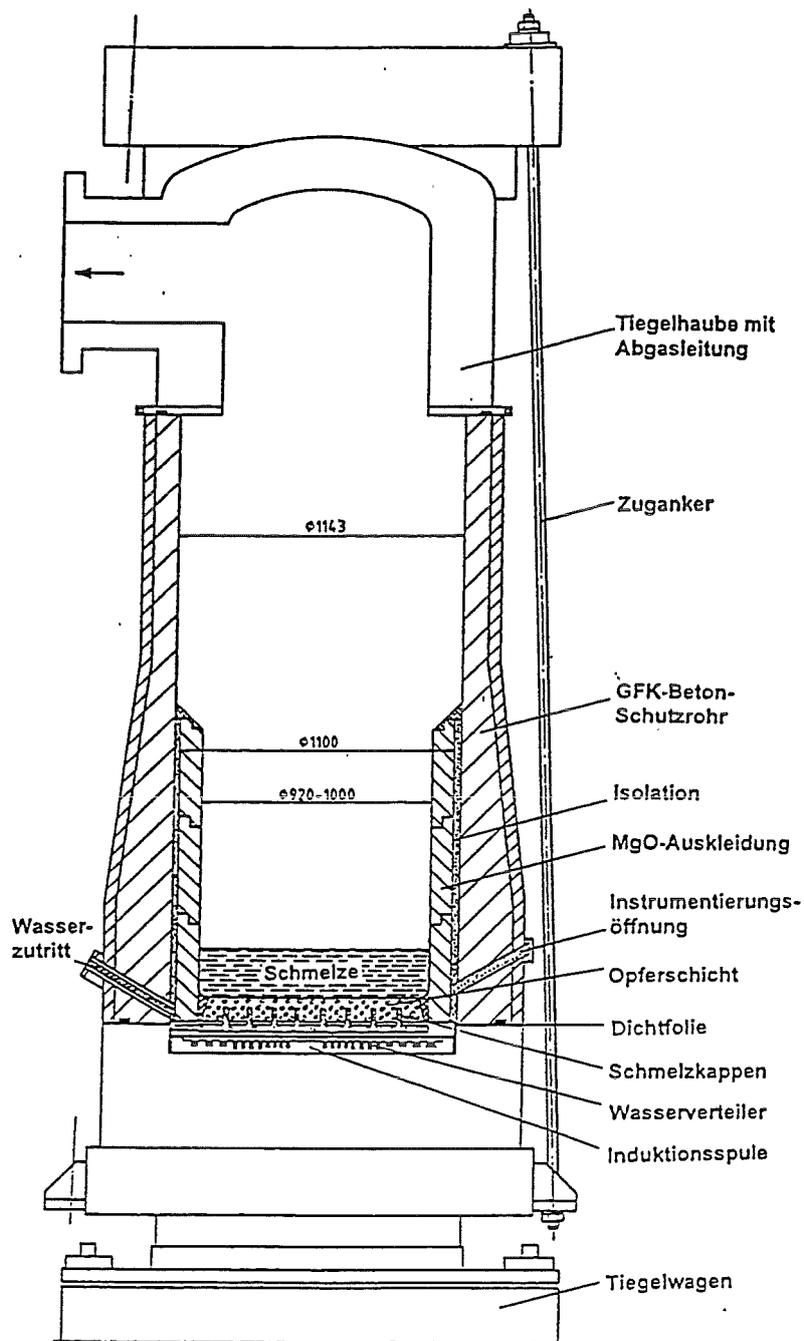


Bild 5: COMET-H VERSUCHSAUFBAU
Schmelzekühlung nach dem COMET-Konzept

Schnitt A-B

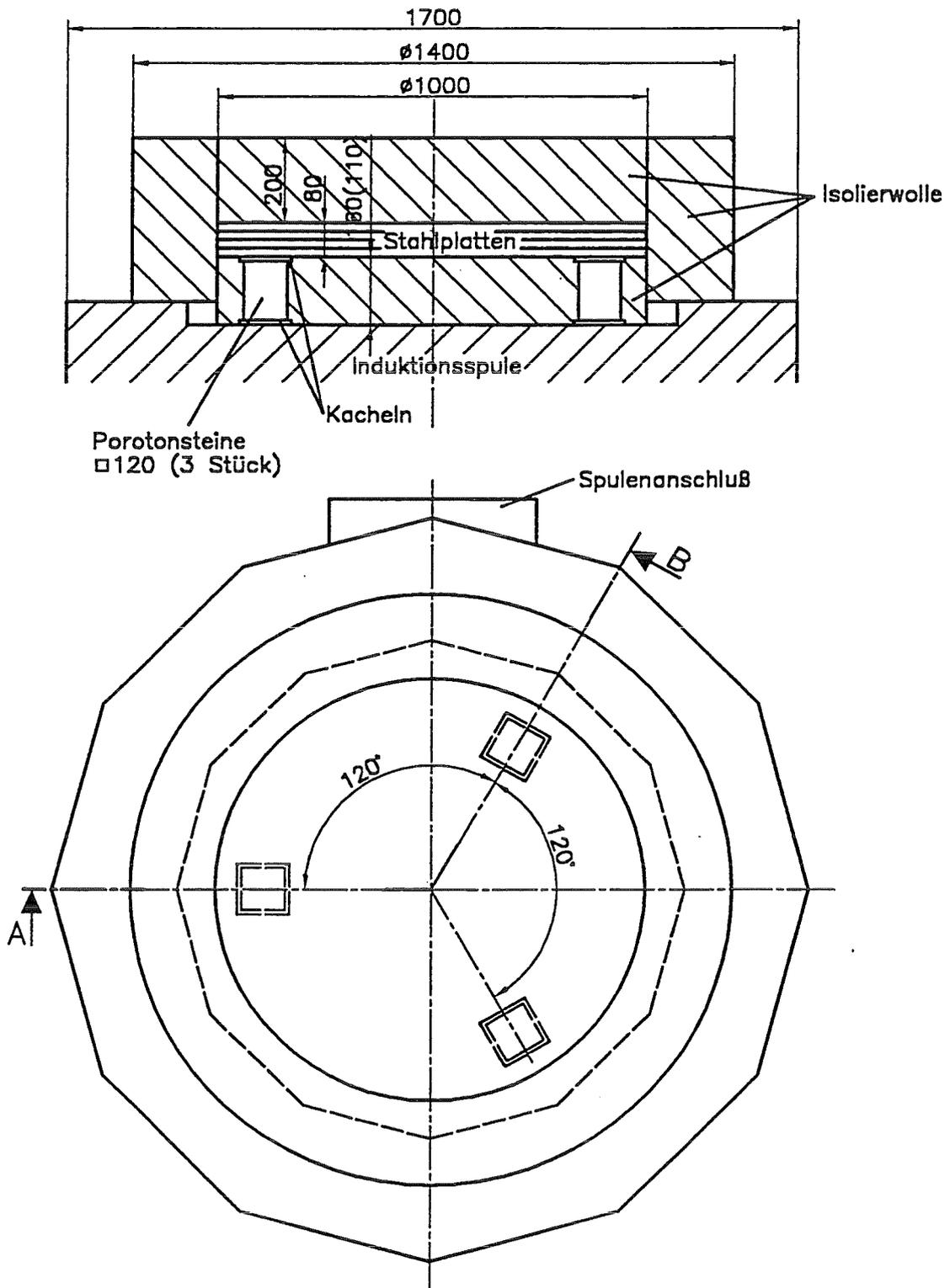


Bild 6: Versuchsaufbau für die kalorimetrischen Tests

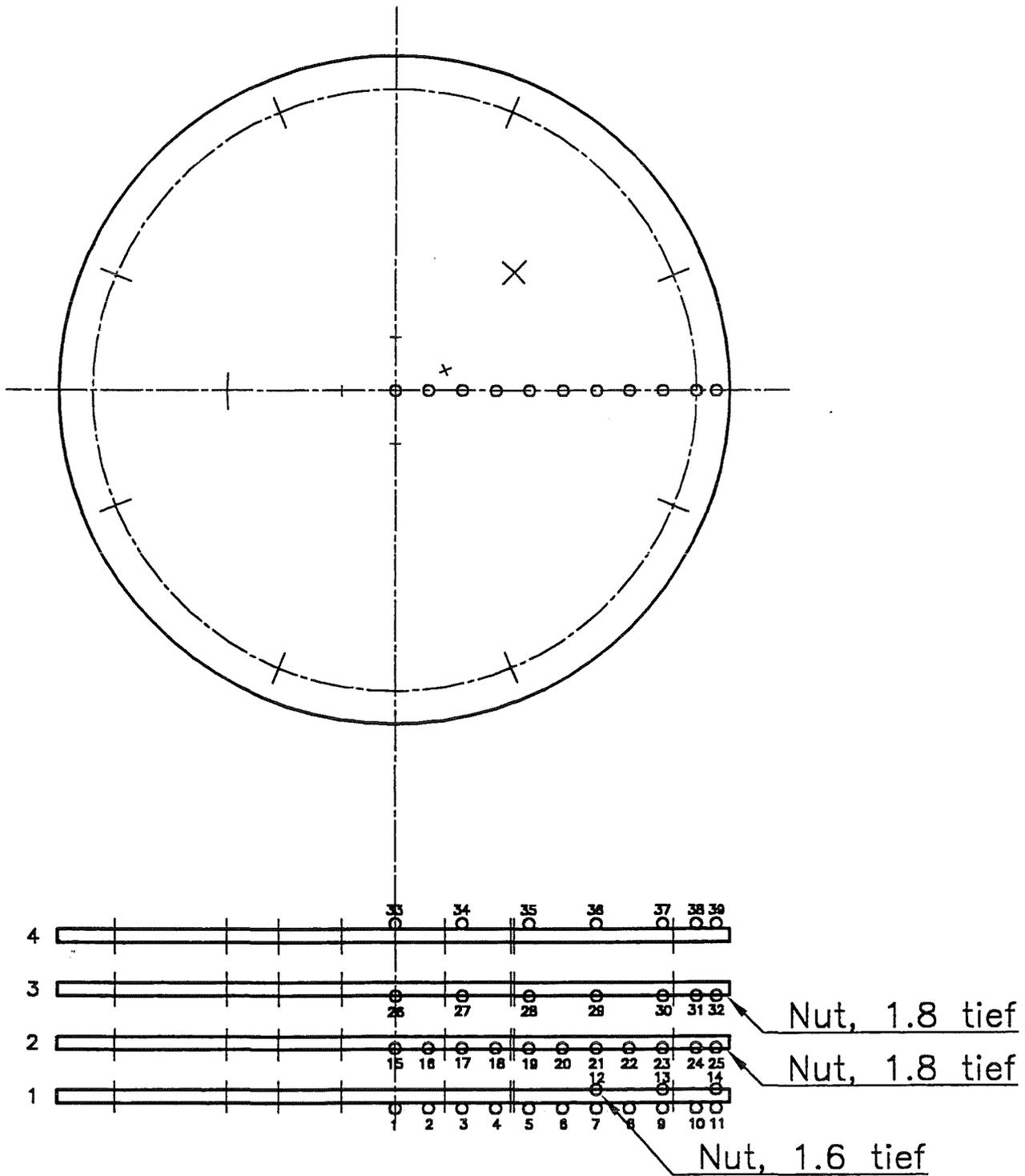


Bild 7: VA-Platten mit den Temperaturmeßstellen in der zweiten, dritten und vierten Versuchsreihe

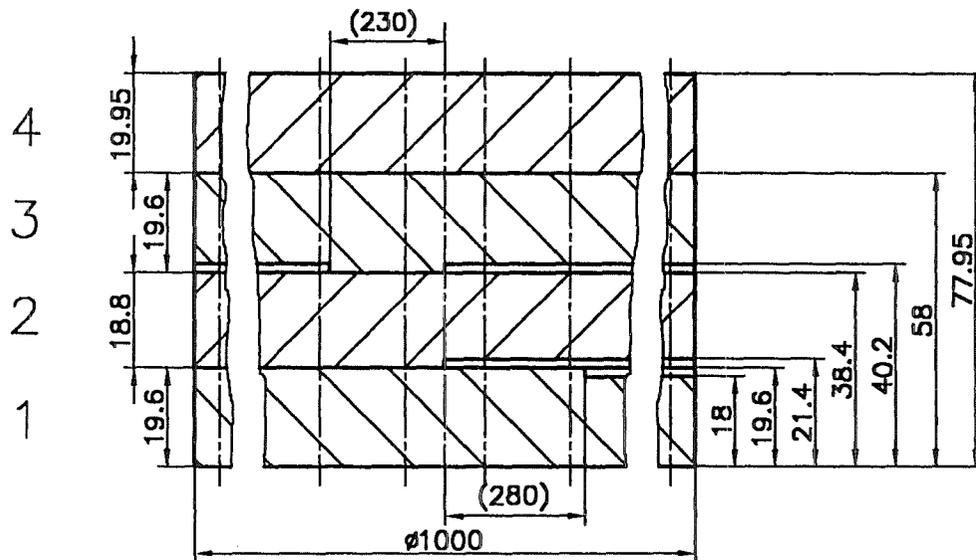
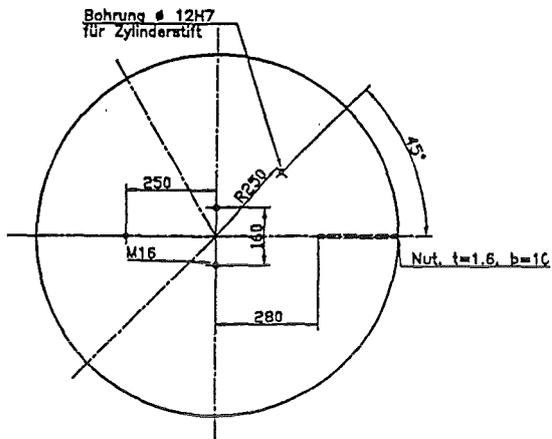
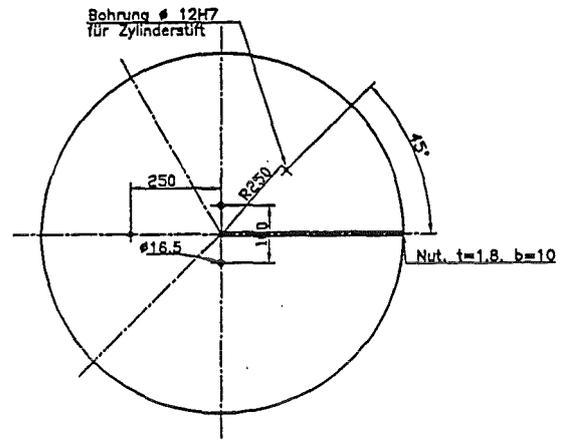


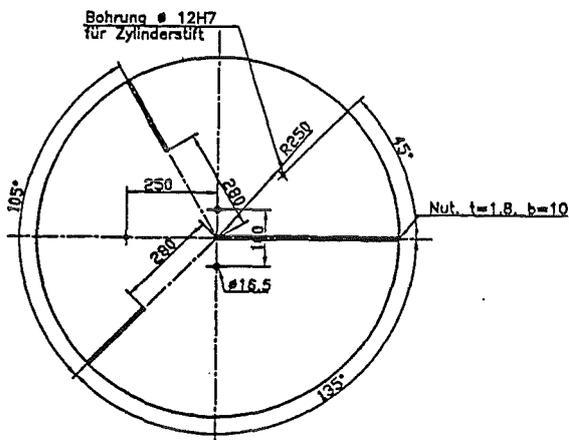
Bild 8: Abmessung der VA-Platten für die erste Versuchsreihe



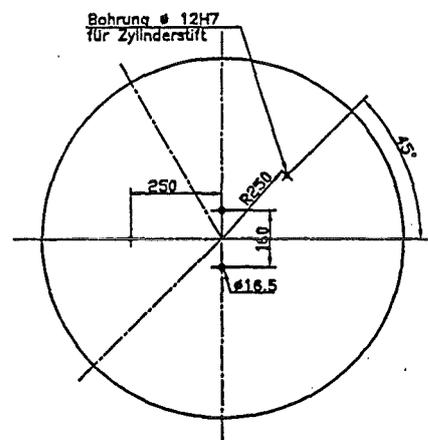
a) Platte 1



b) Platte 2



c) Platte 3



d) Platte 4

Bild 9: Detailzeichnung der VA-Platten für die erste Versuchsreihe

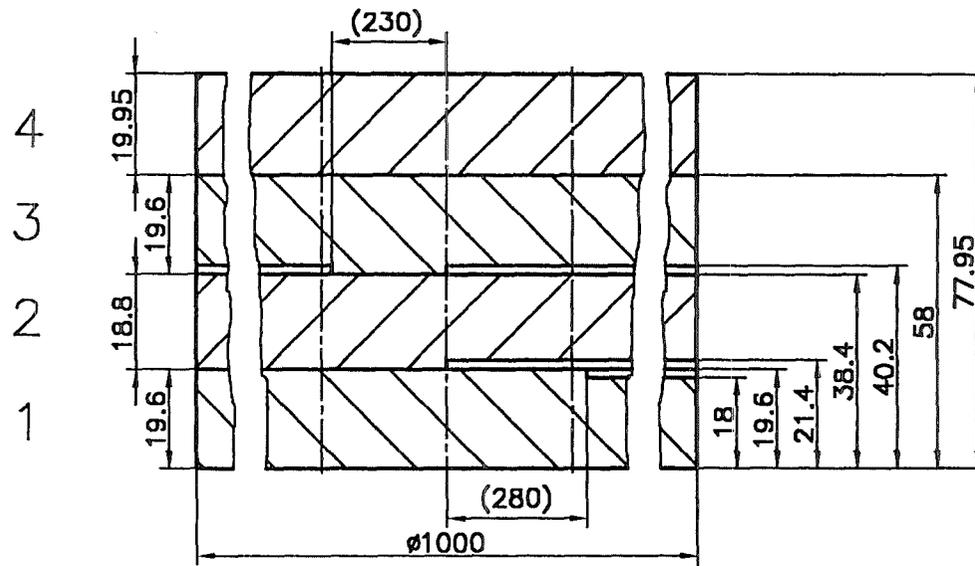


Bild 10: Abmessung der VA-Platten für die 2., 3. und 4. Versuchsreihe

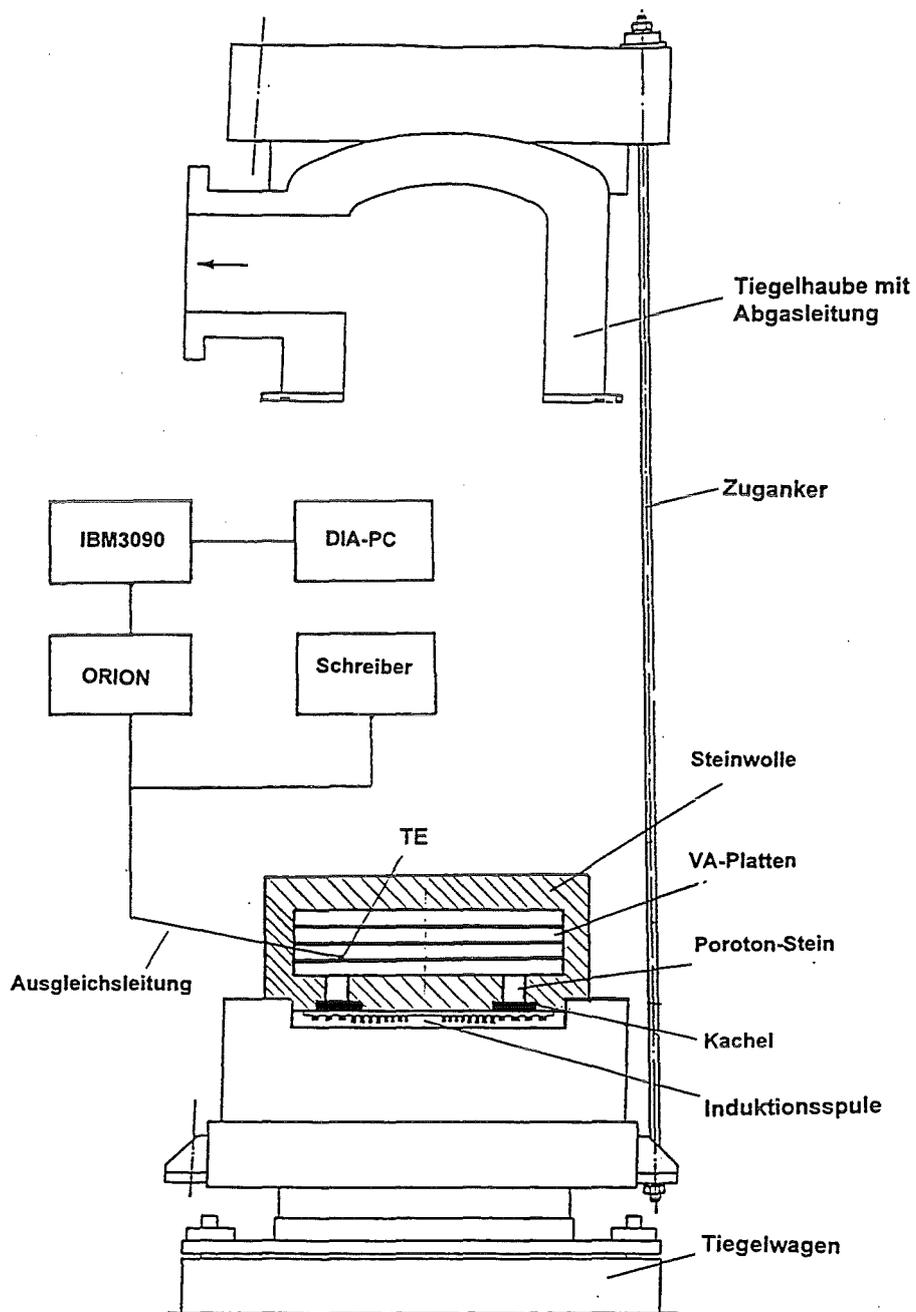


Bild 12: Schema der Meßwerterfassung und -auswertung in den kalorimetrischen Tests

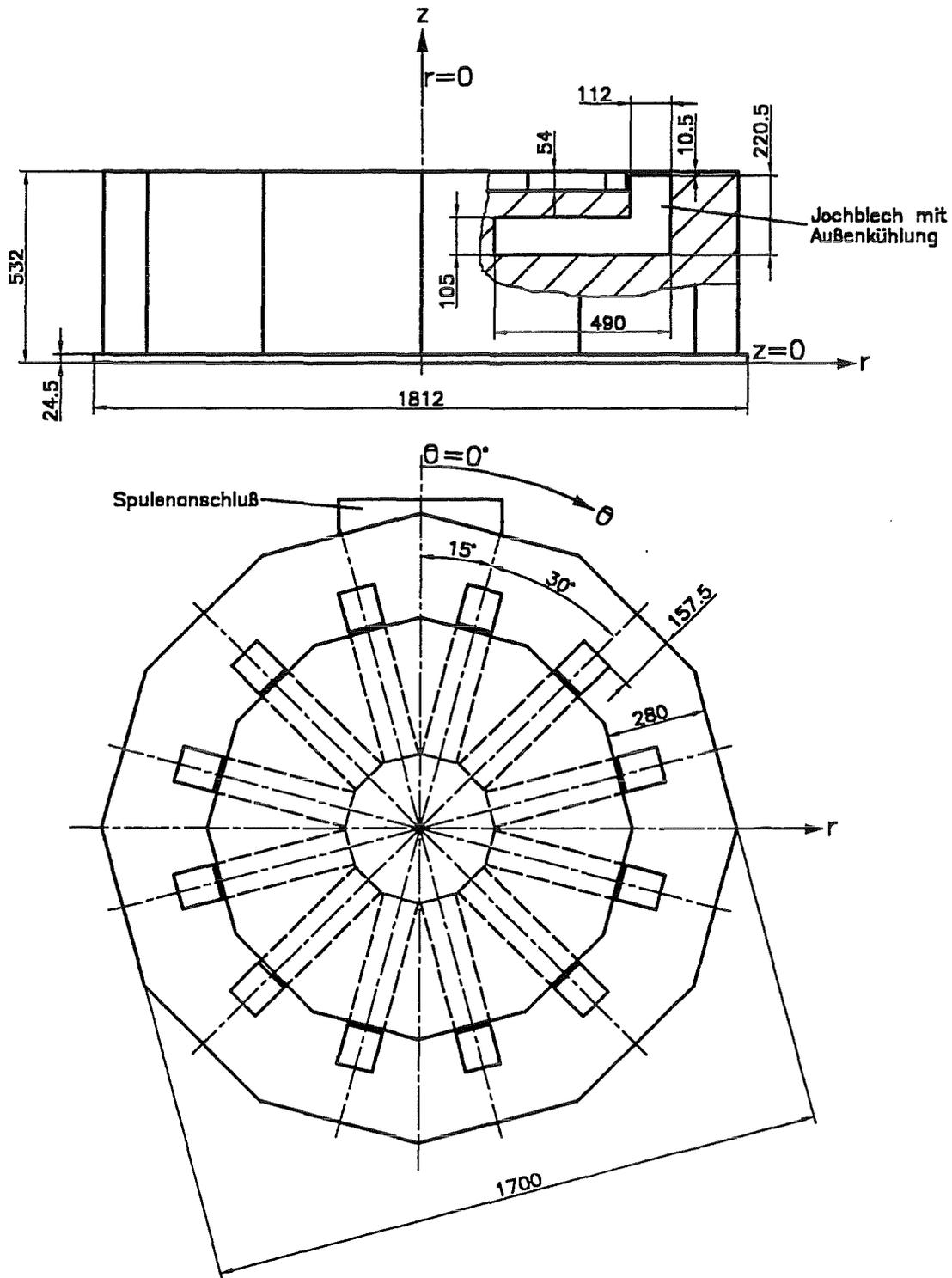


Bild 13: Zylindrische Koordinaten zur Beschreibung der Meßstellen am Induktor

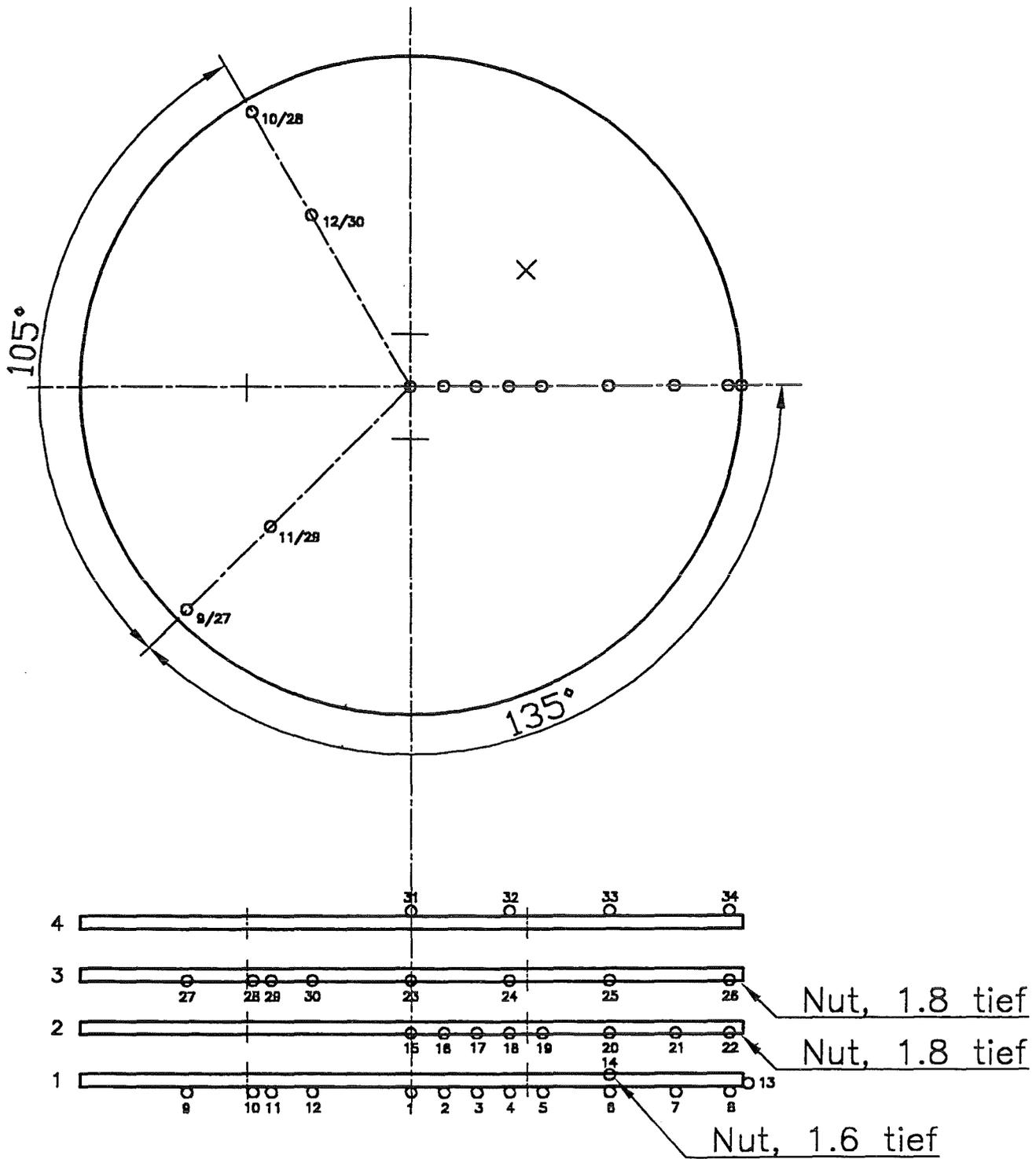


Bild 14: VA-Platten mit den Temperaturmeßstellen in der ersten Versuchsreihe

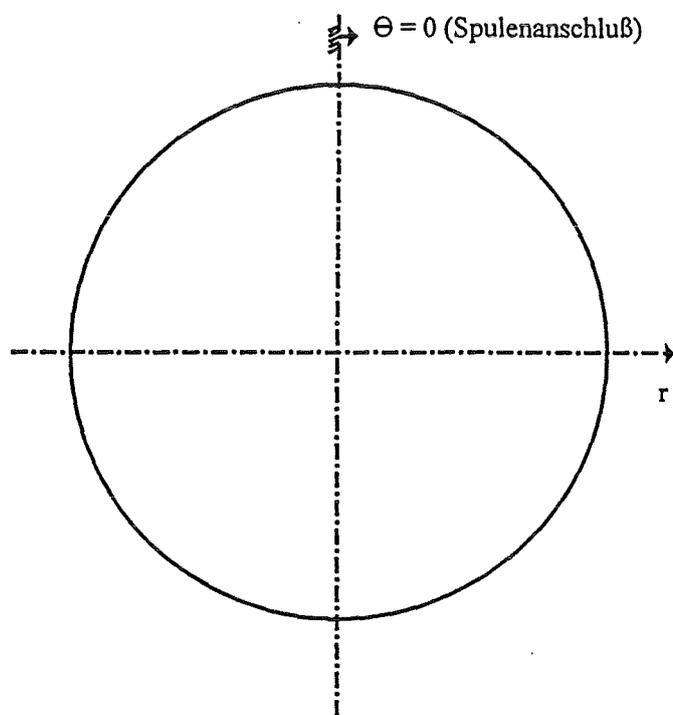
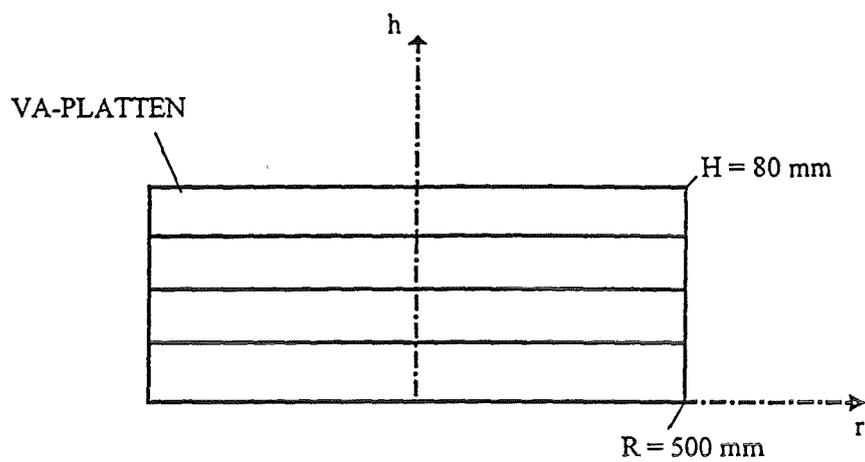


Bild 15: Zylindrische Koordinaten zur Beschreibung der Meßstellen in den Platten

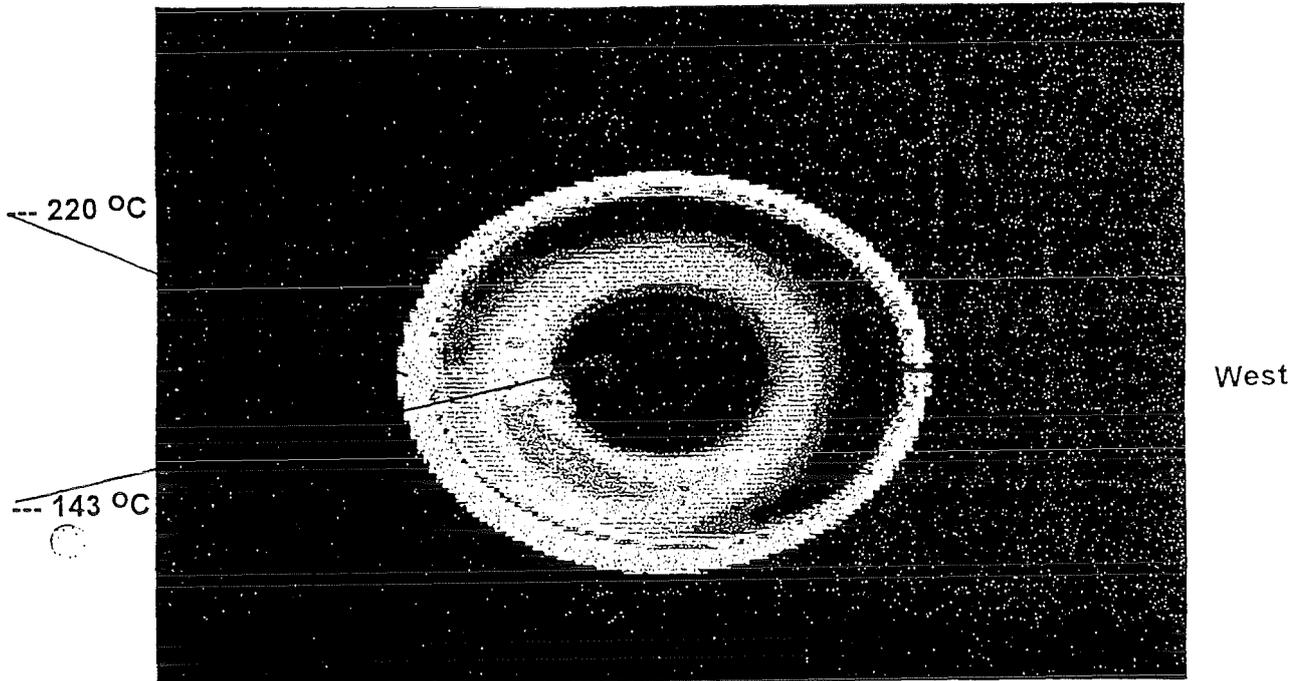


Bild 16: IR-Aufnahme unmittelbar nach Ausschalten des Induktors (1:14 min) bei der ersten Thermographiemessung

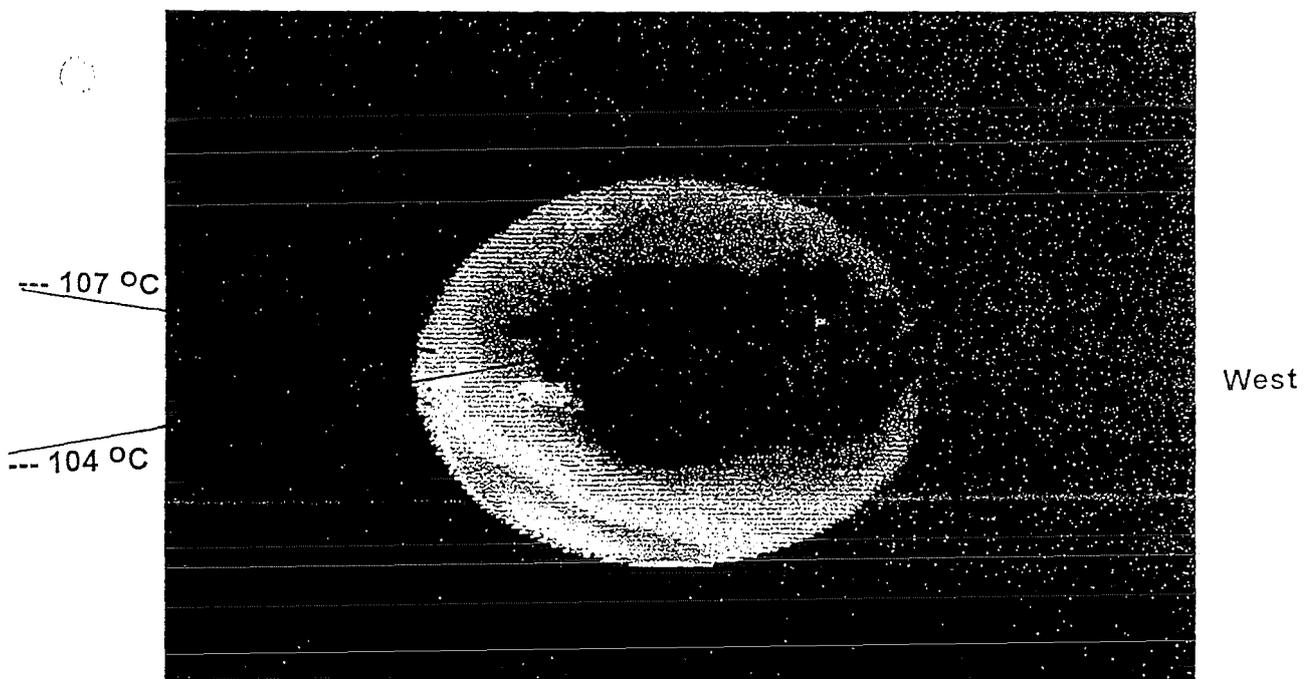


Bild 17: IR-Aufnahme nach Abkühlphase (4:30 min) bei der ersten Thermographiemessung

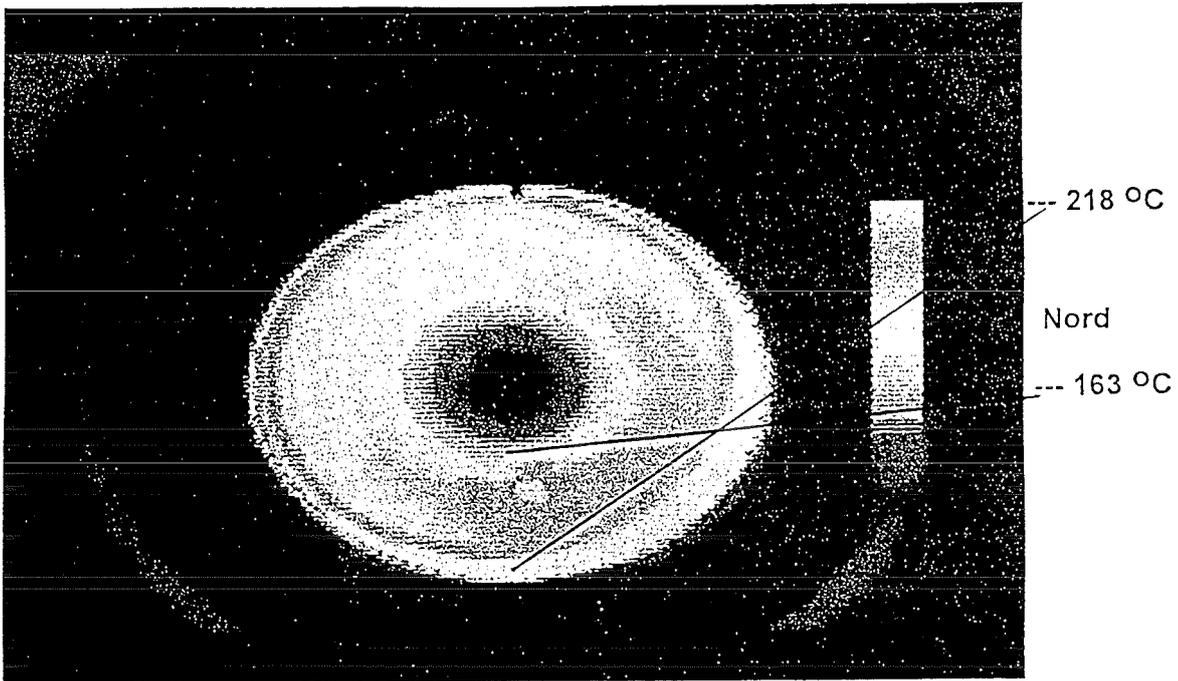


Bild 18: IR-Aufnahme unmittelbar nach Ausschalten des Induktors (0:45 min) bei der zweiten Thermographiemessung

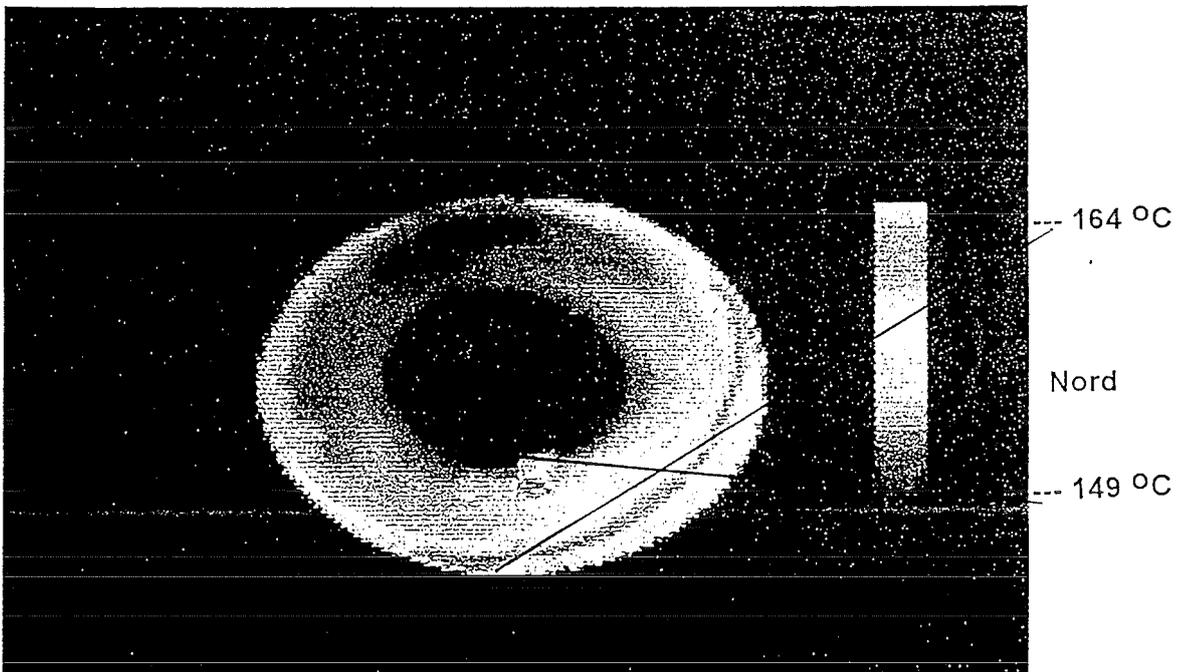


Bild 19: IR-Aufnahme nach Abkühlphase (4:30 min) bei der zweiten Thermographiemessung

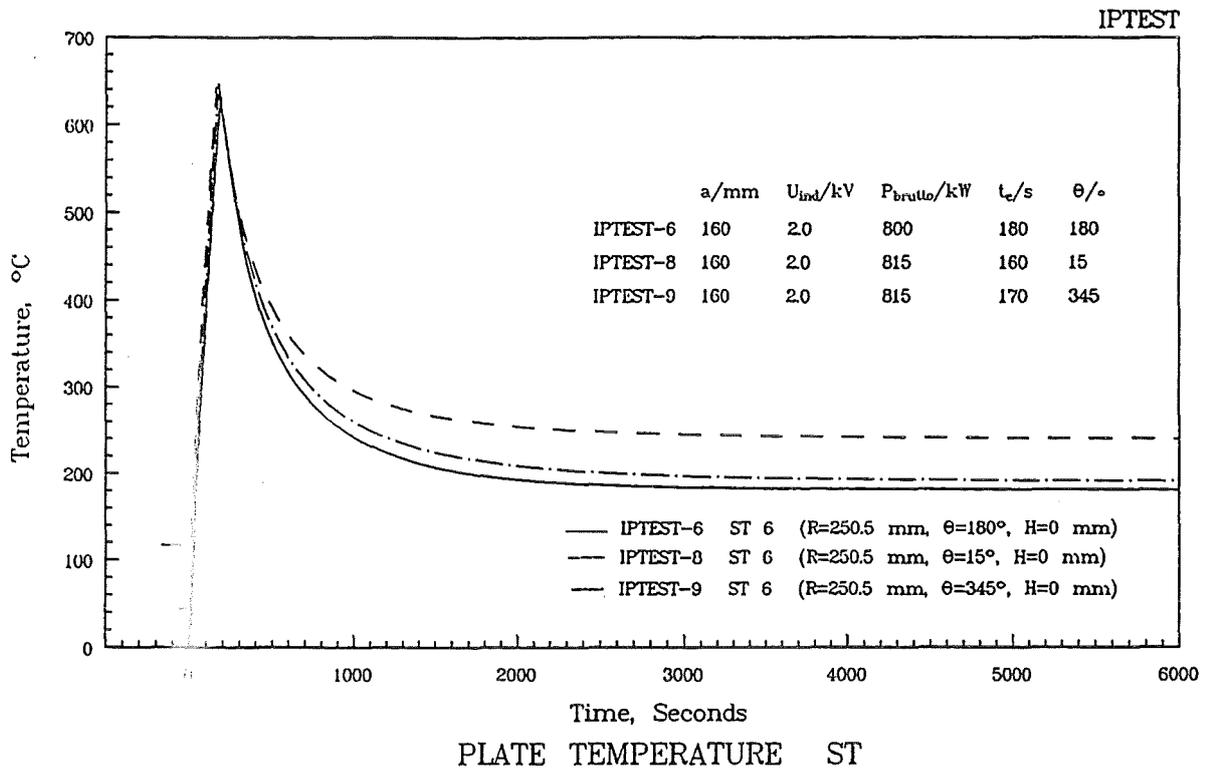


Bild 20: Homogenität des Induktor-Magnetfeldes aus Temperaturverlauf in den VA-Platten bei verschiedenen Winkellagen der Temperaturmeßachse

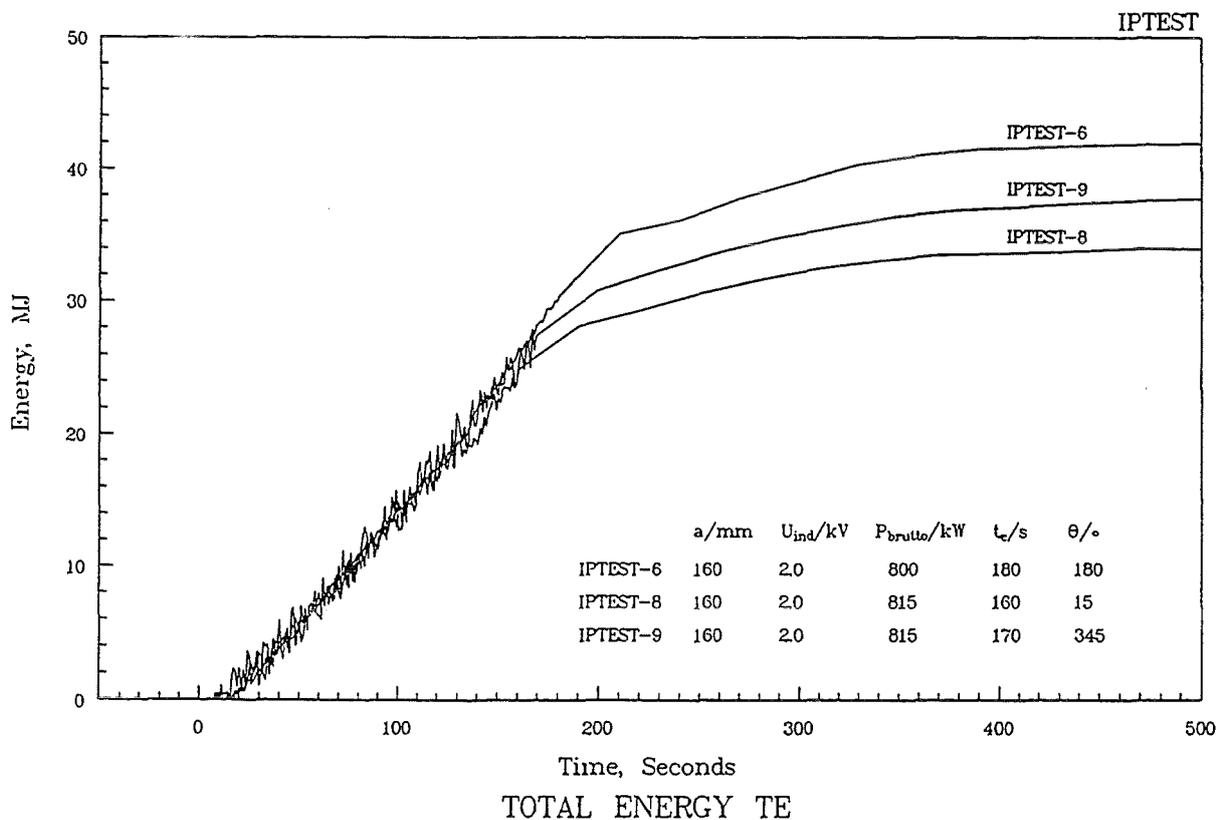


Bild 21: Homogenität des Induktor-Magnetfeldes aus Energieverlauf in den VA-Platten bei verschiedenen Winkellagen der Temperaturmeßachse

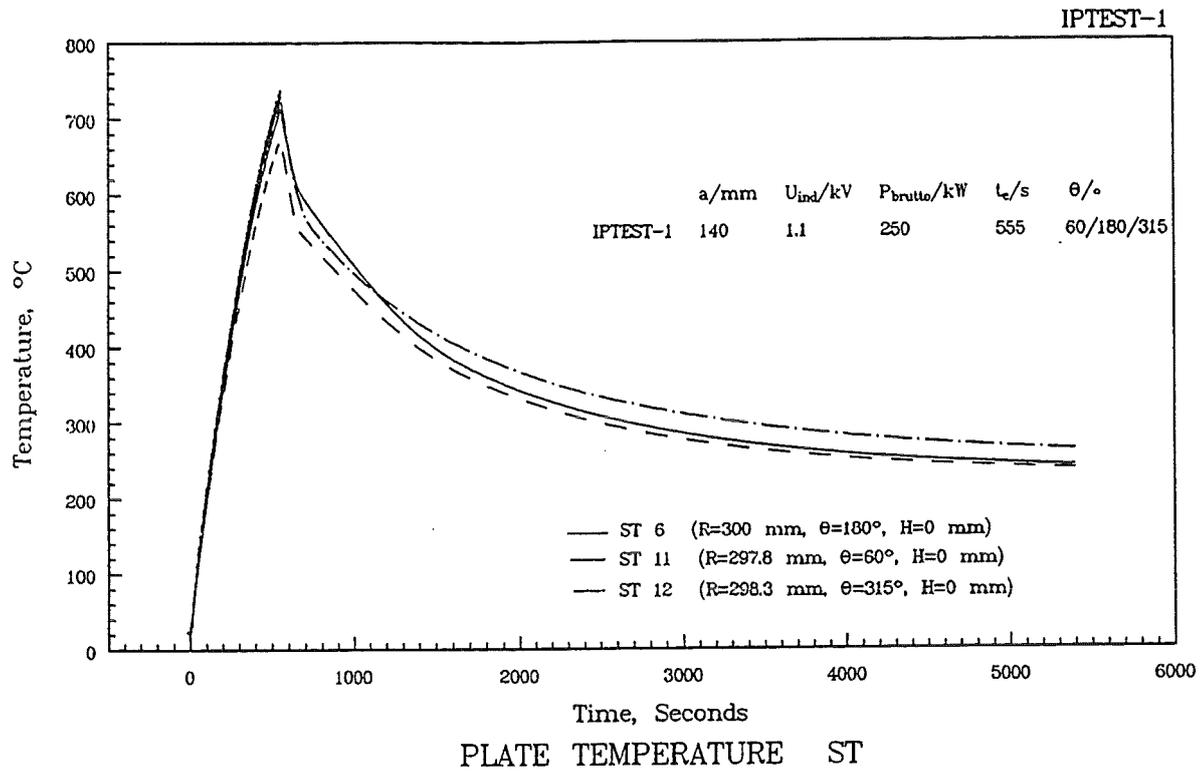


Bild 22: Homogenität des Induktor-Magnetfeldes aus Temperaturverlauf in den VA-Platten bei unterschiedlichen Winkellagen der Temperaturmeßstellen

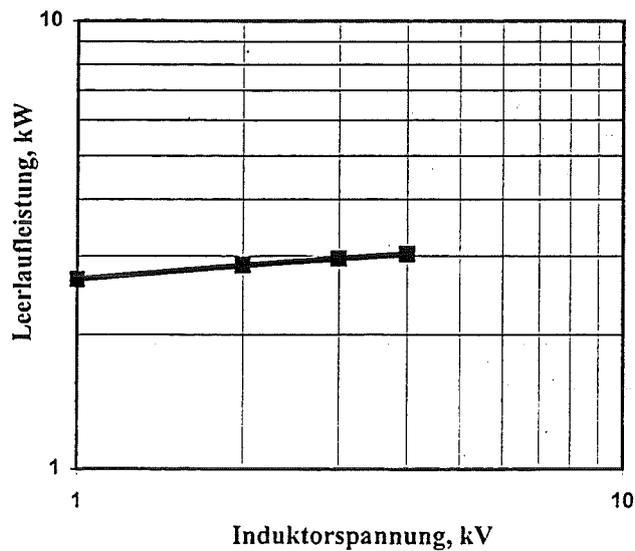


Bild 23: Induktor-Leerlaufleistung in Abhängigkeit von Induktorspannung bei doppelt-logarithmischer Auftragung

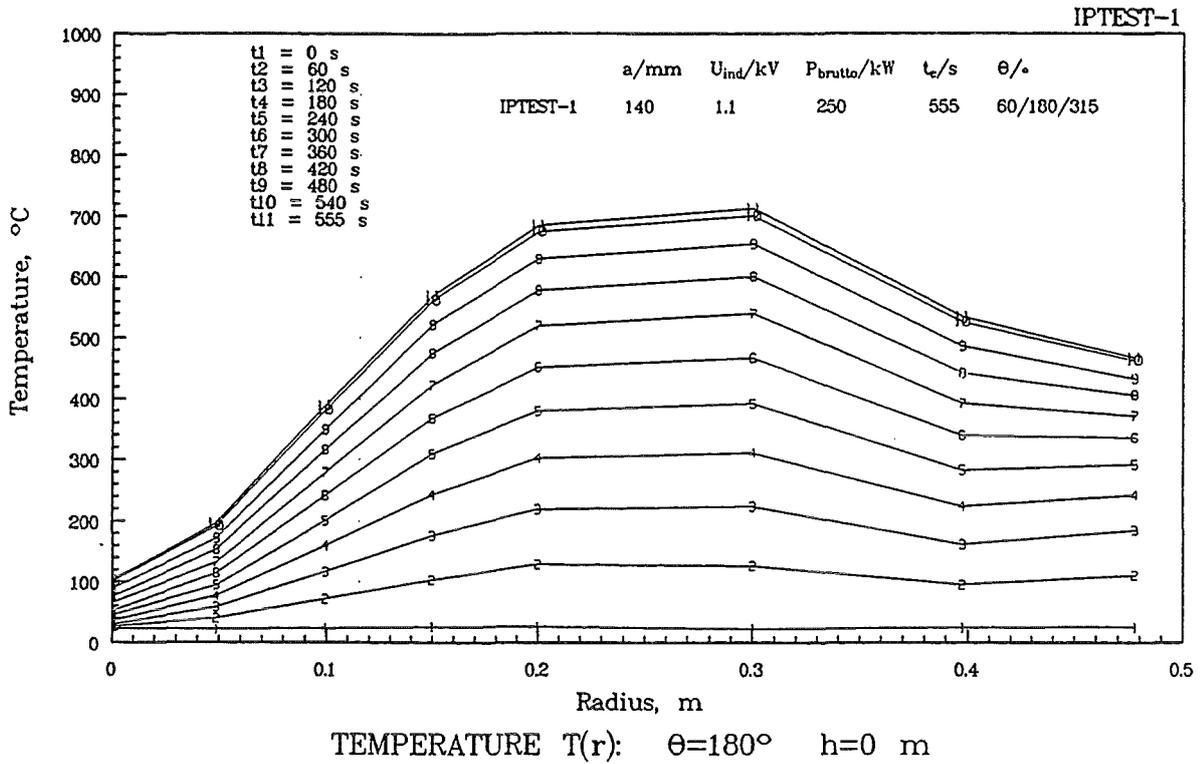


Bild 24: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in Iptest-1

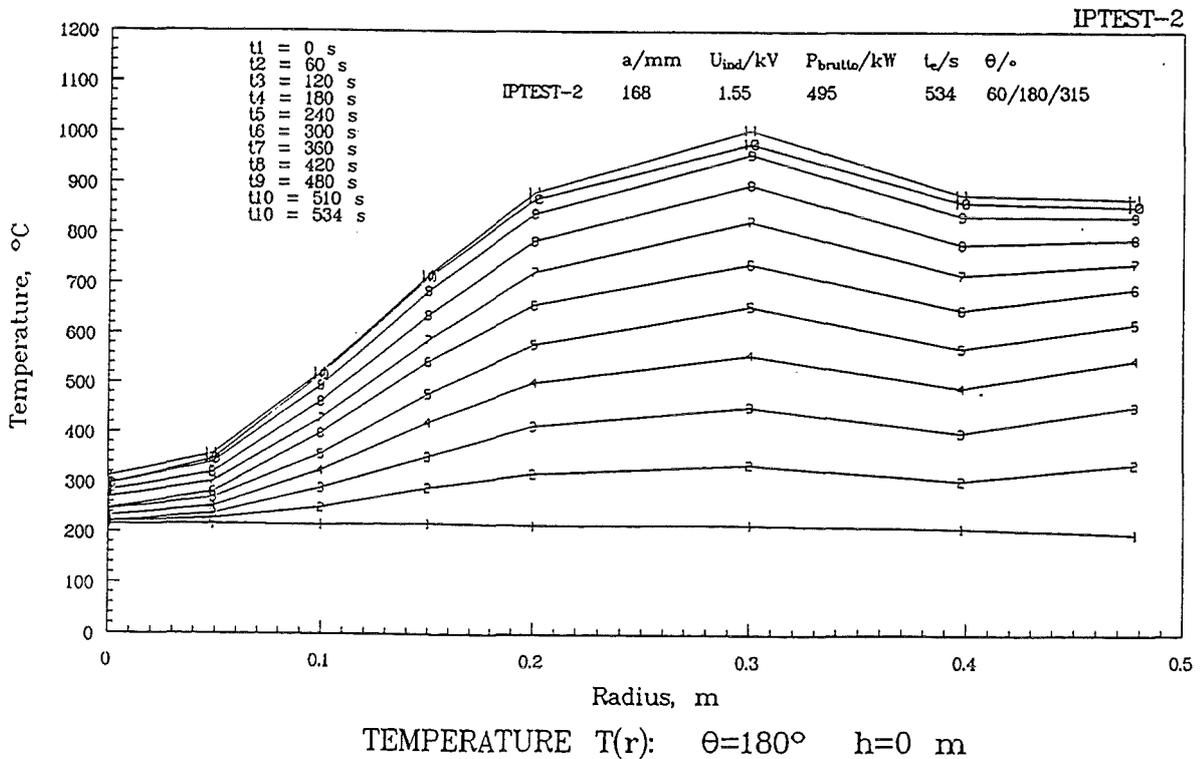


Bild 25: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in Iptest-2

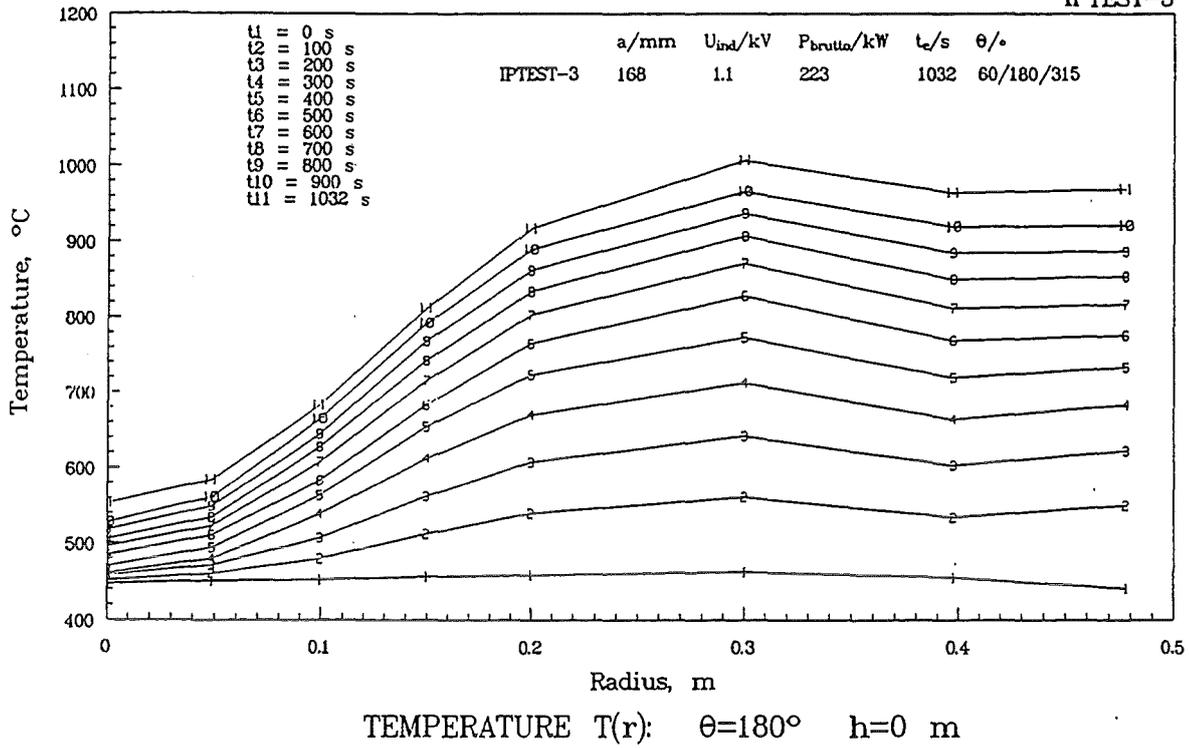


Bild 26: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-3

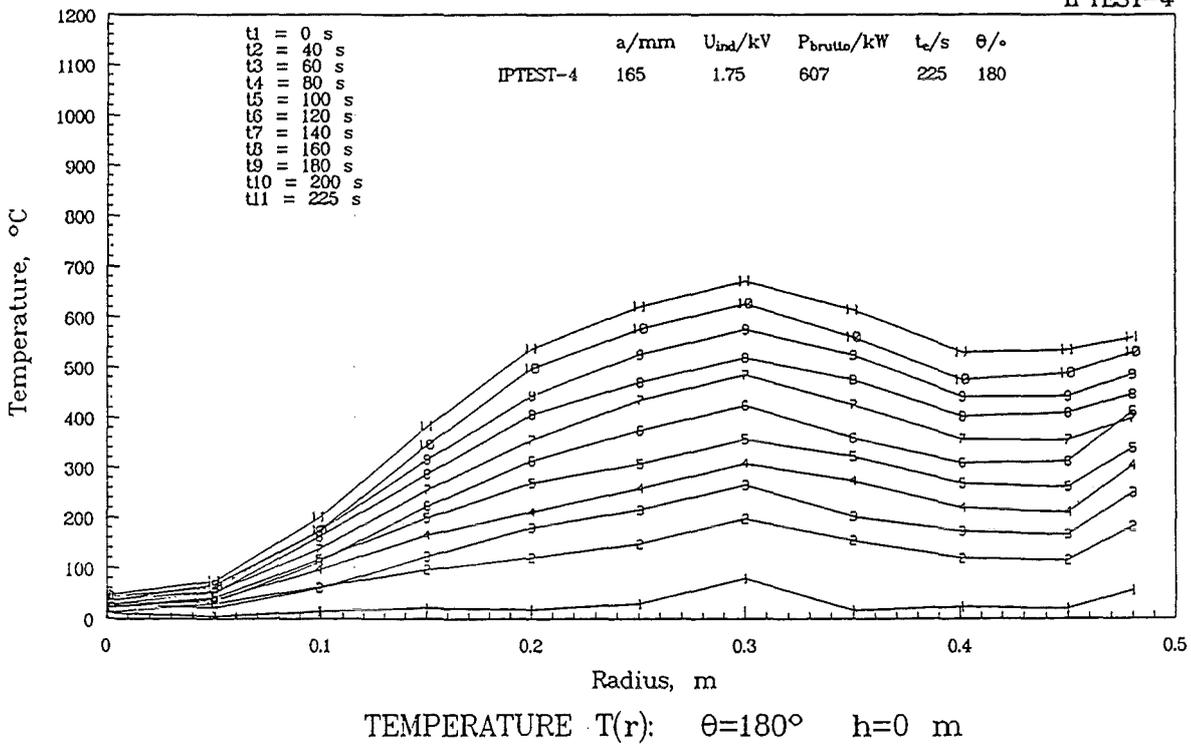


Bild 27: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-4

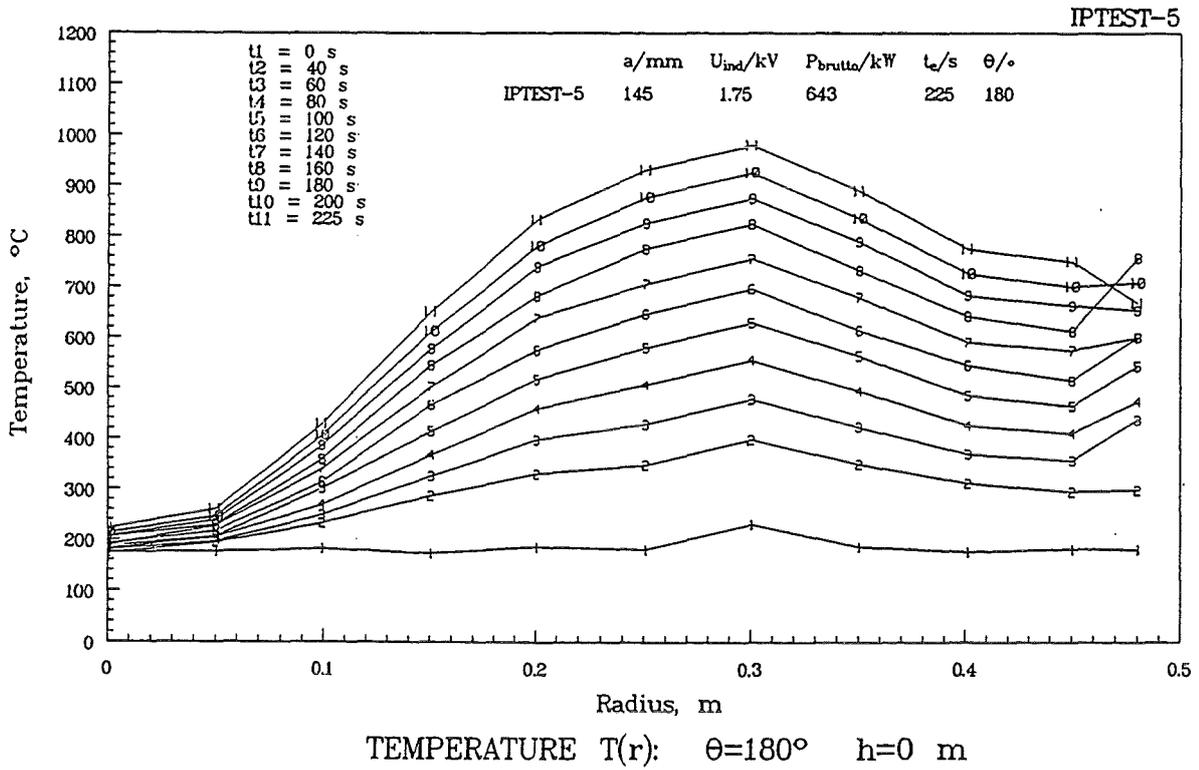


Bild 28: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-5

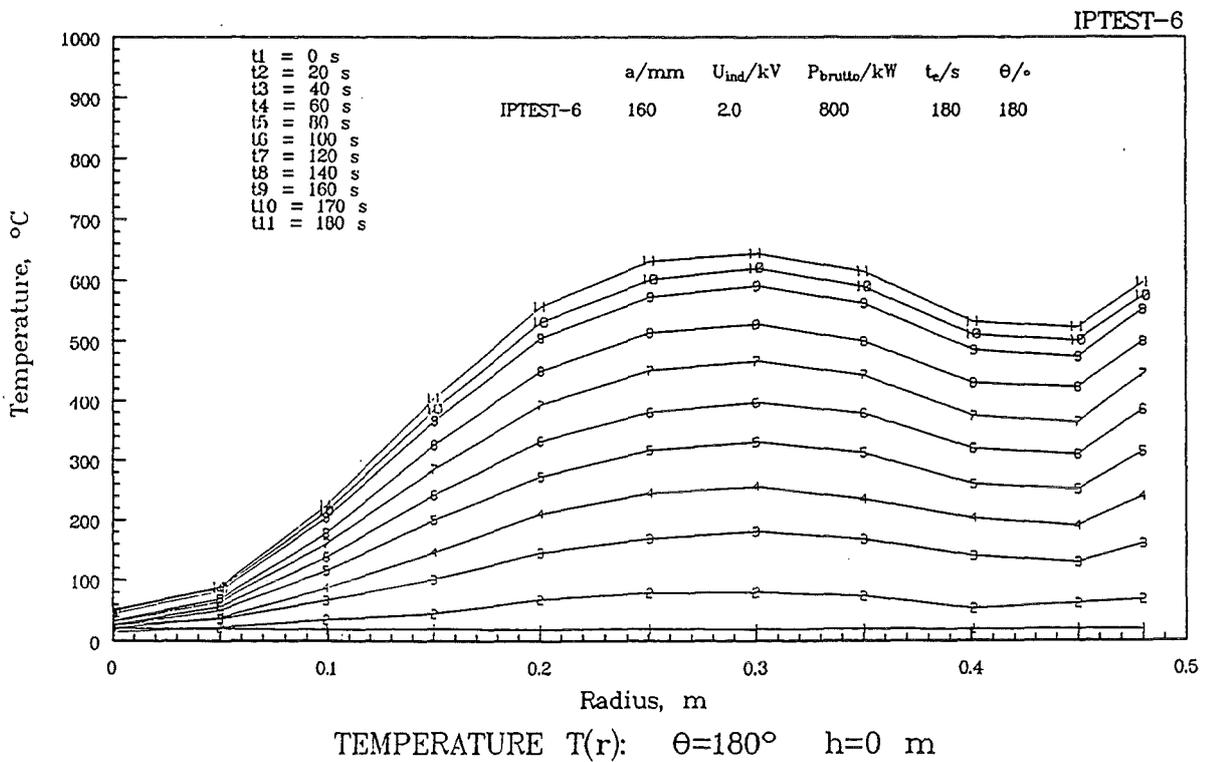


Bild 29: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-6

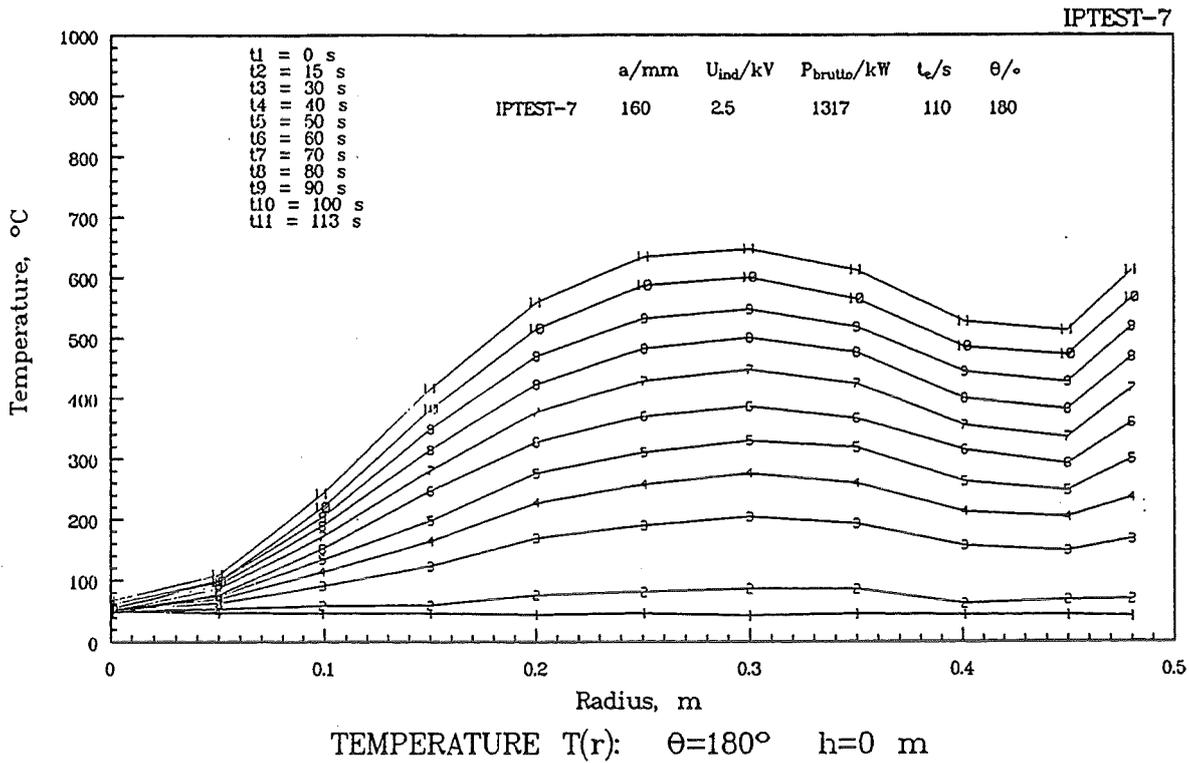


Bild 30: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-7

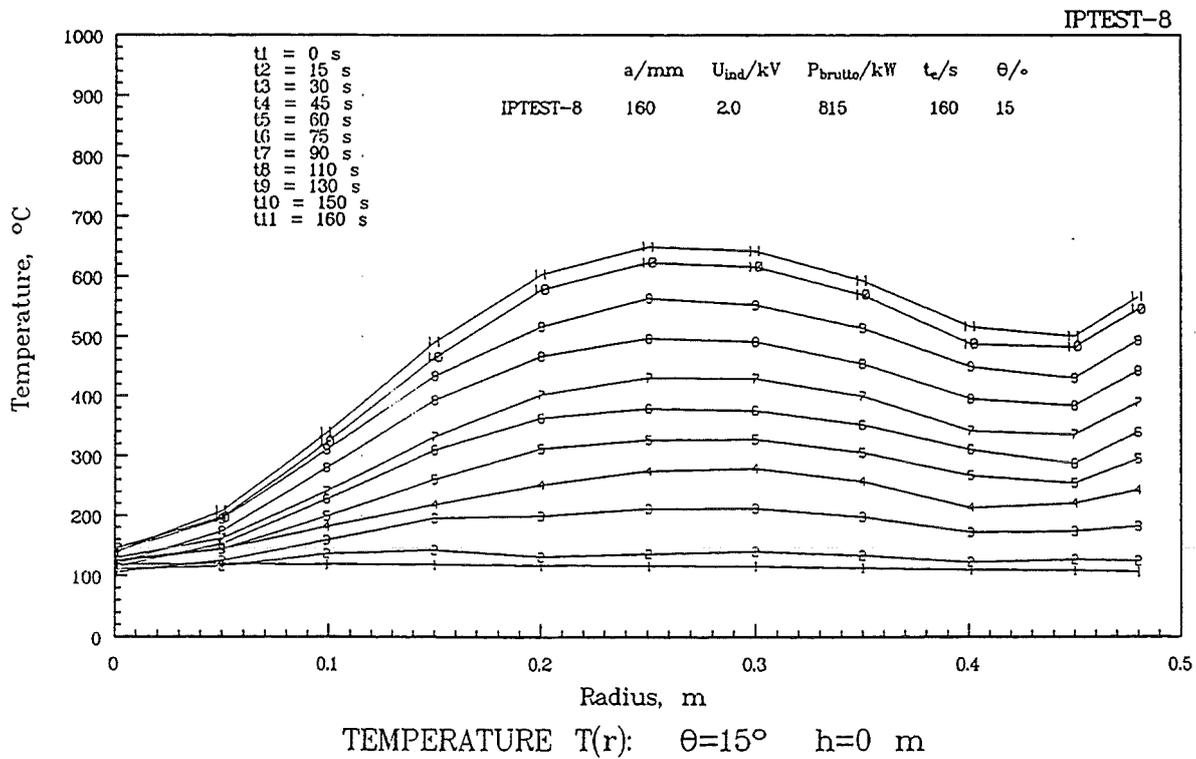


Bild 31: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-8

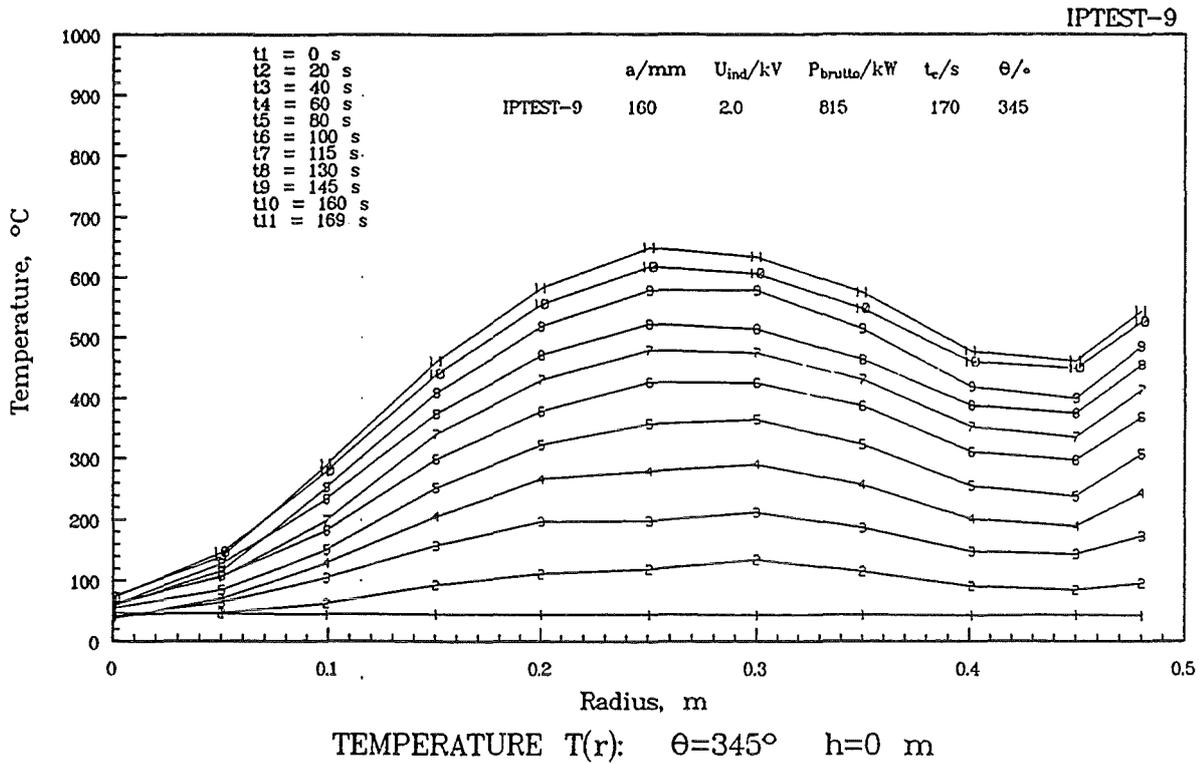


Bild 32: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-9

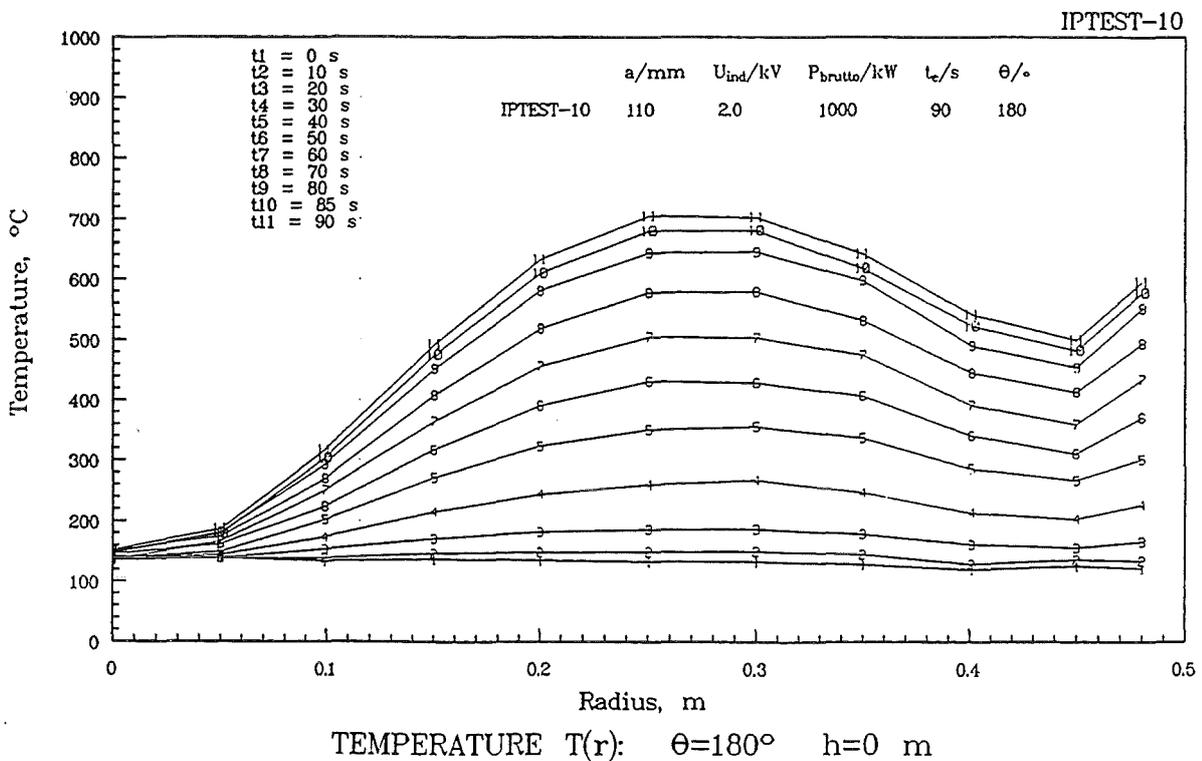


Bild 33: Temperaturverlauf über dem Radius für die unterste Platte in IPTEST-10

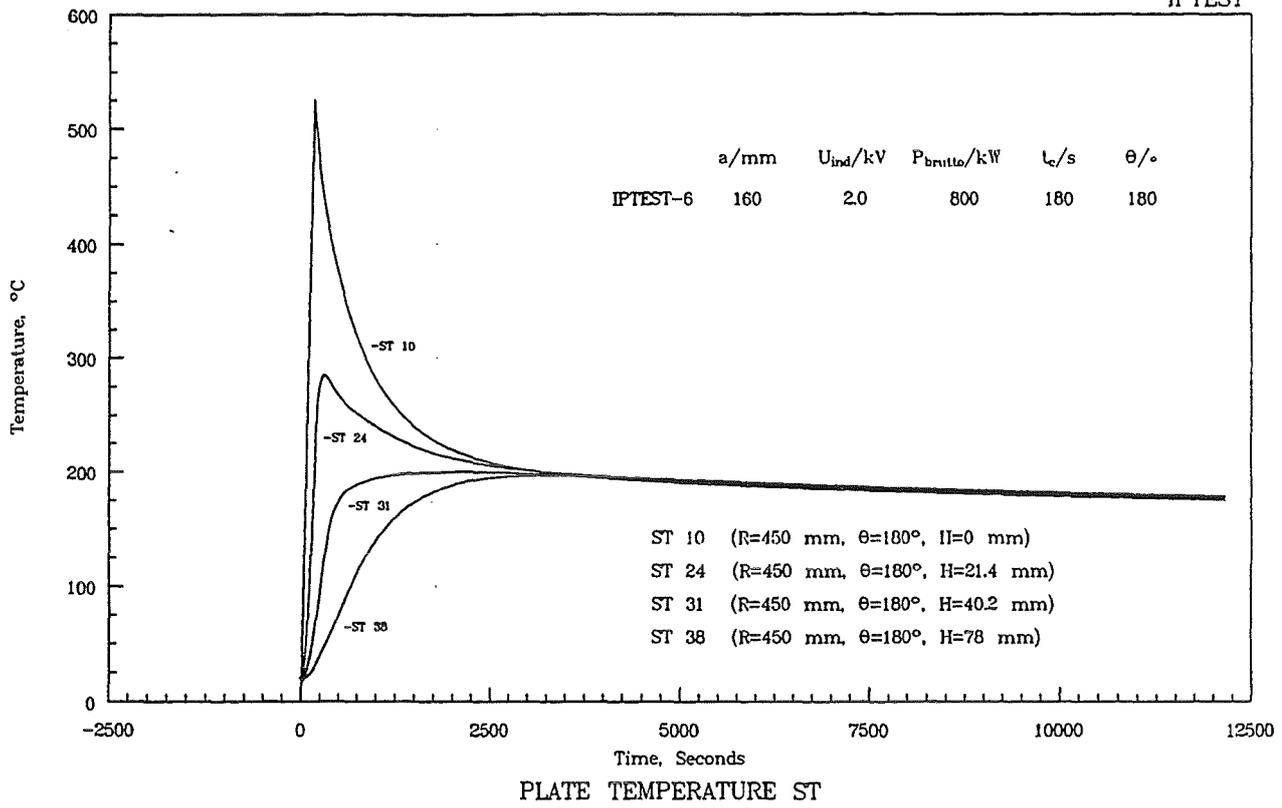


Bild 34: Temperaturverteilung über der Höhe im Plattenstapel in IPTEST-6

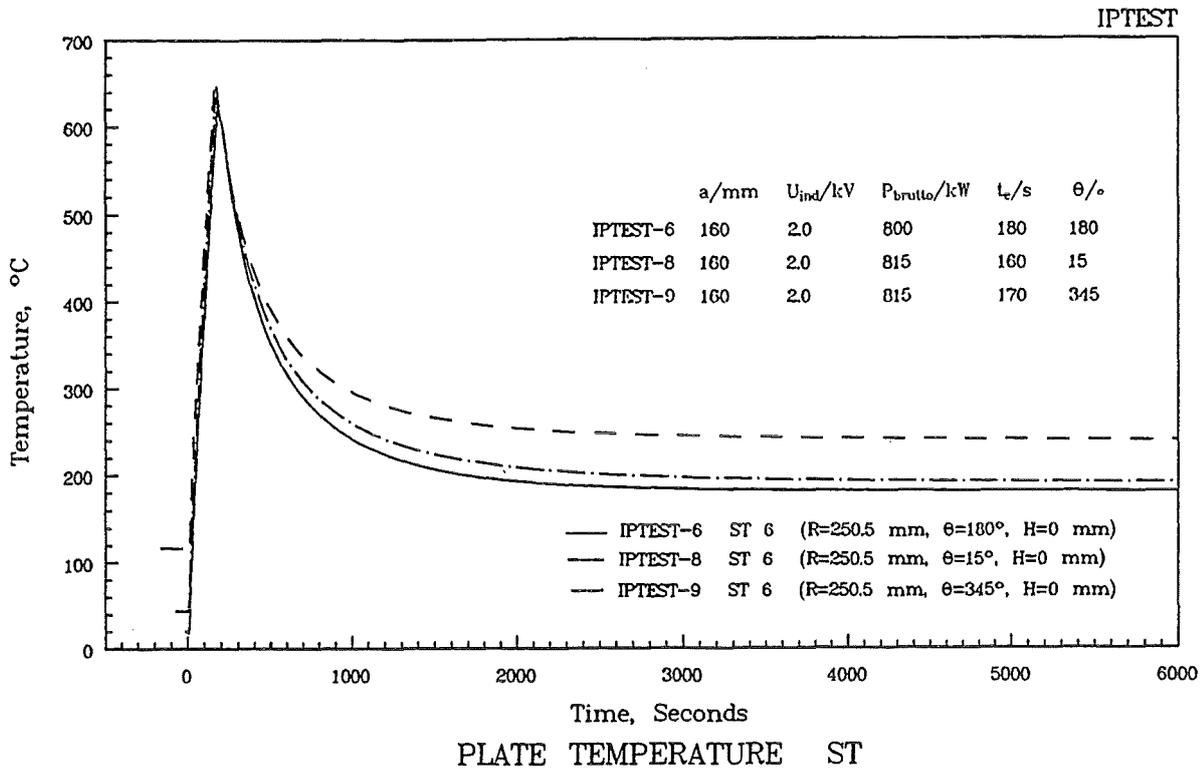


Bild 35: Homogenität der Aufheizung aus Temperaturverlauf in den VA-Platten bei verschiedenen Winkellagen der Temperaturmeßachse

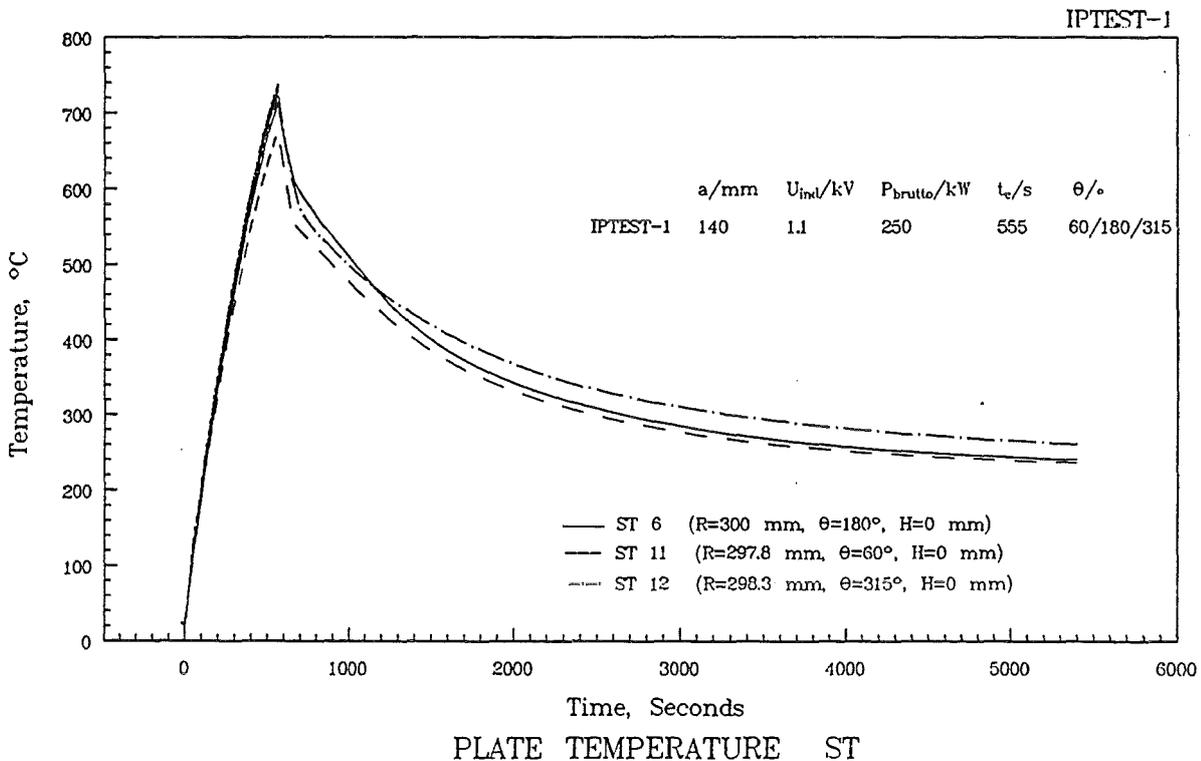


Bild 36: Homogenität der Aufheizung aus Temperaturverlauf in den VA-Platten bei unterschiedlichen Winkellagen der Temperaturmeßstellen

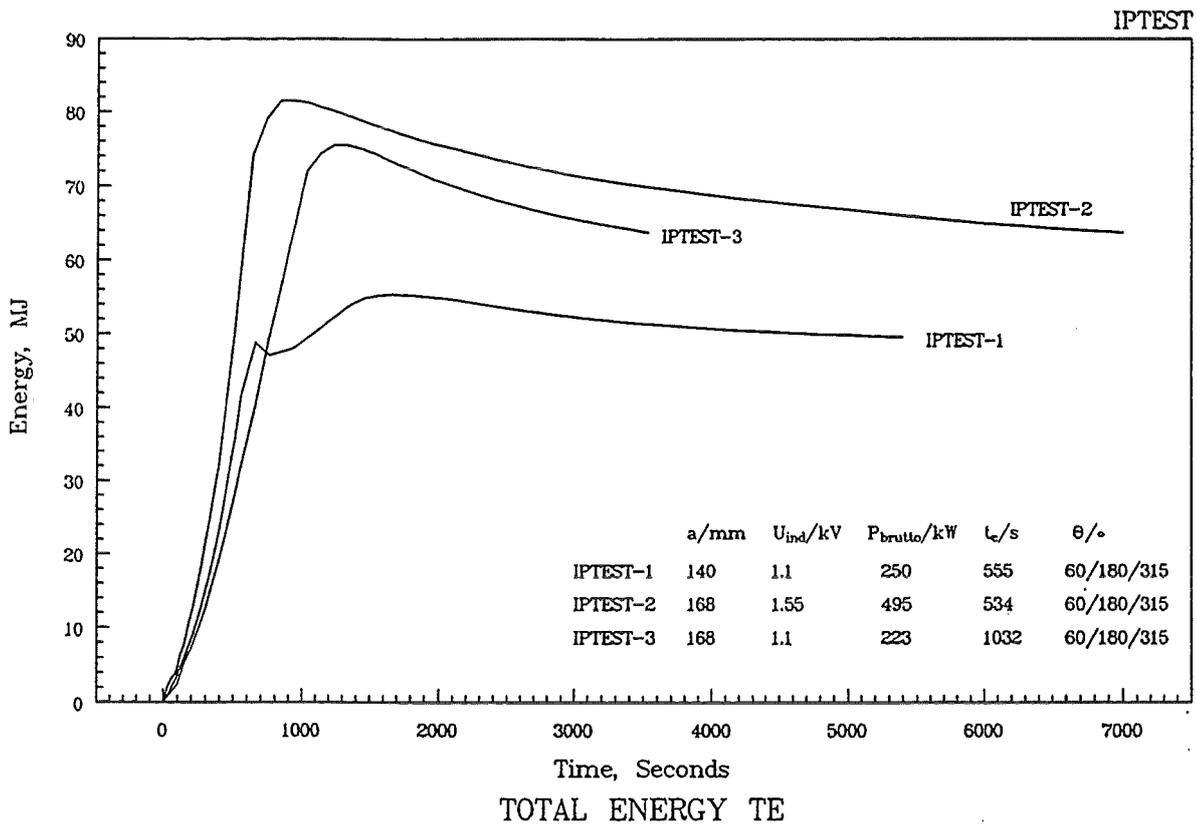


Bild 37: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-1, IPTEST-2, IPTEST-3

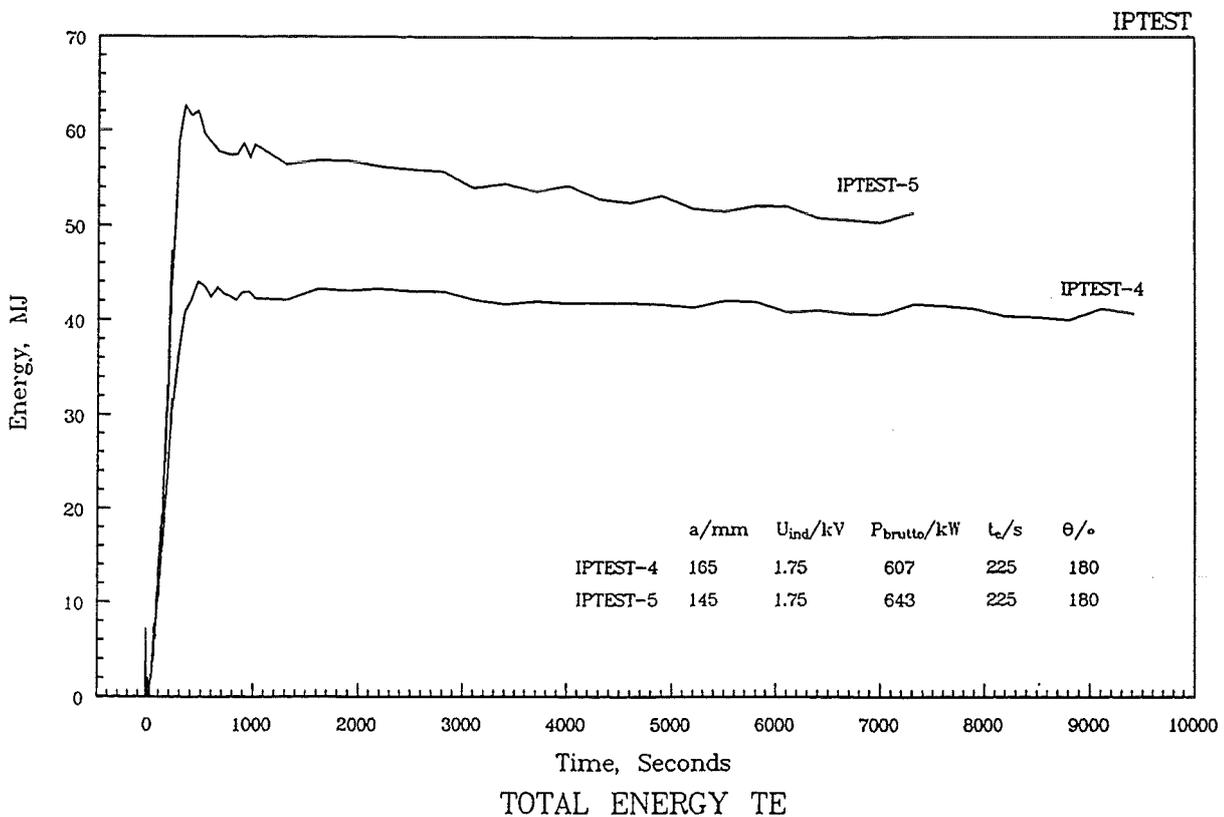


Bild 38: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-4, IPTEST-5

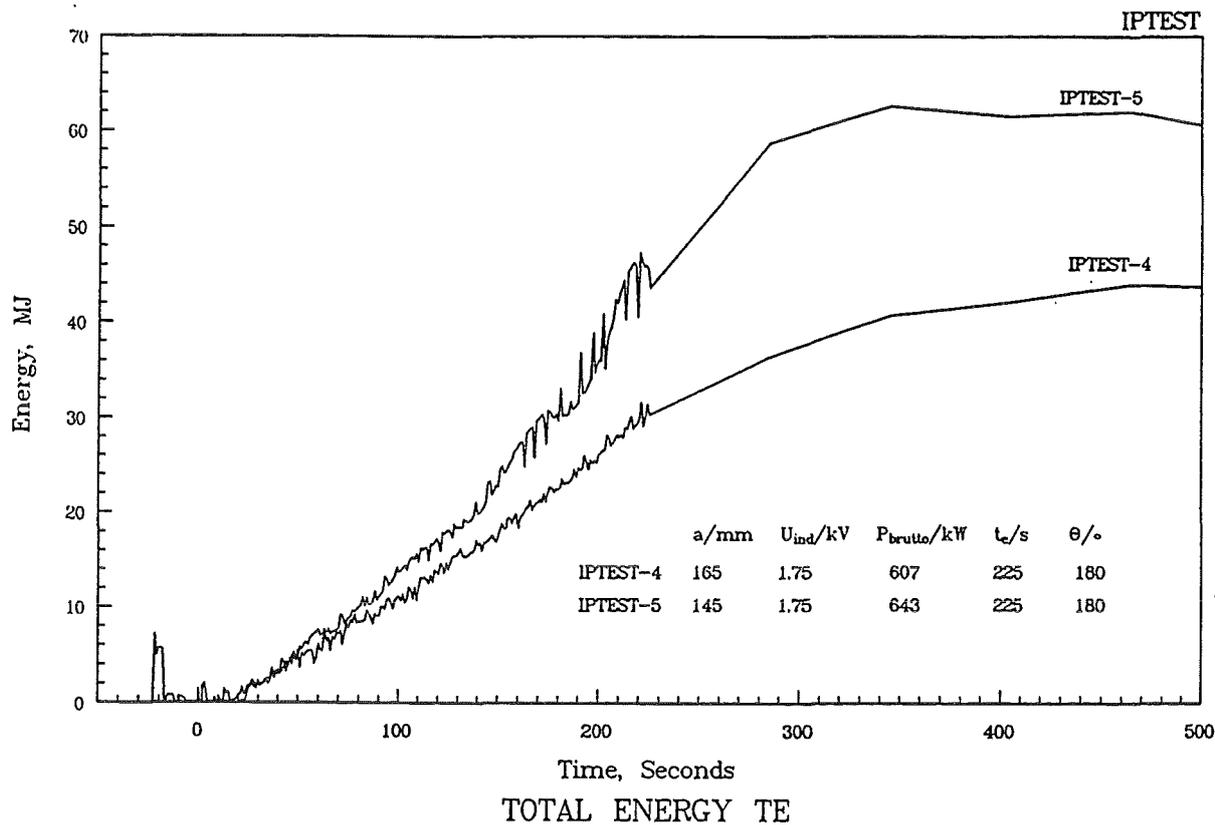


Bild 39: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTTEST-4, IPTTEST-5, 0 - 500 s

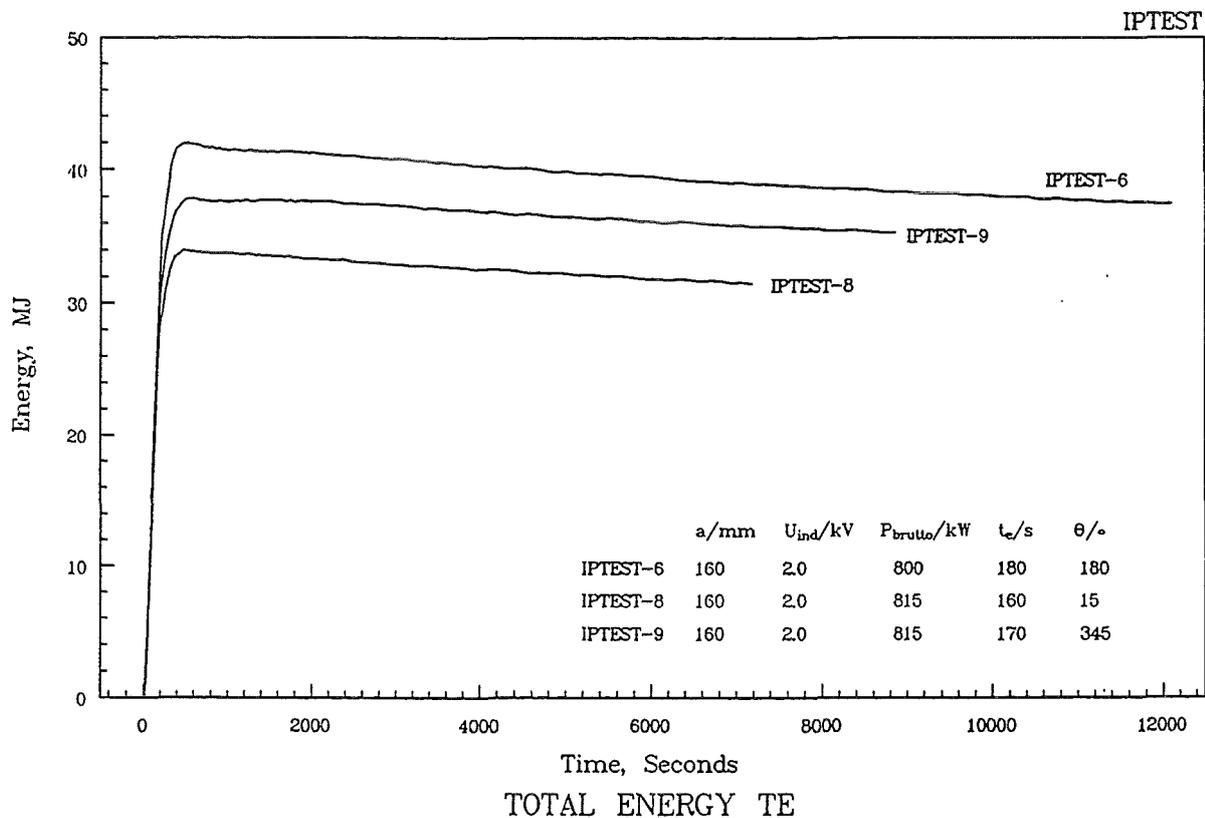


Bild 40: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTTEST-6, IPTTEST-8, IPTTEST-9

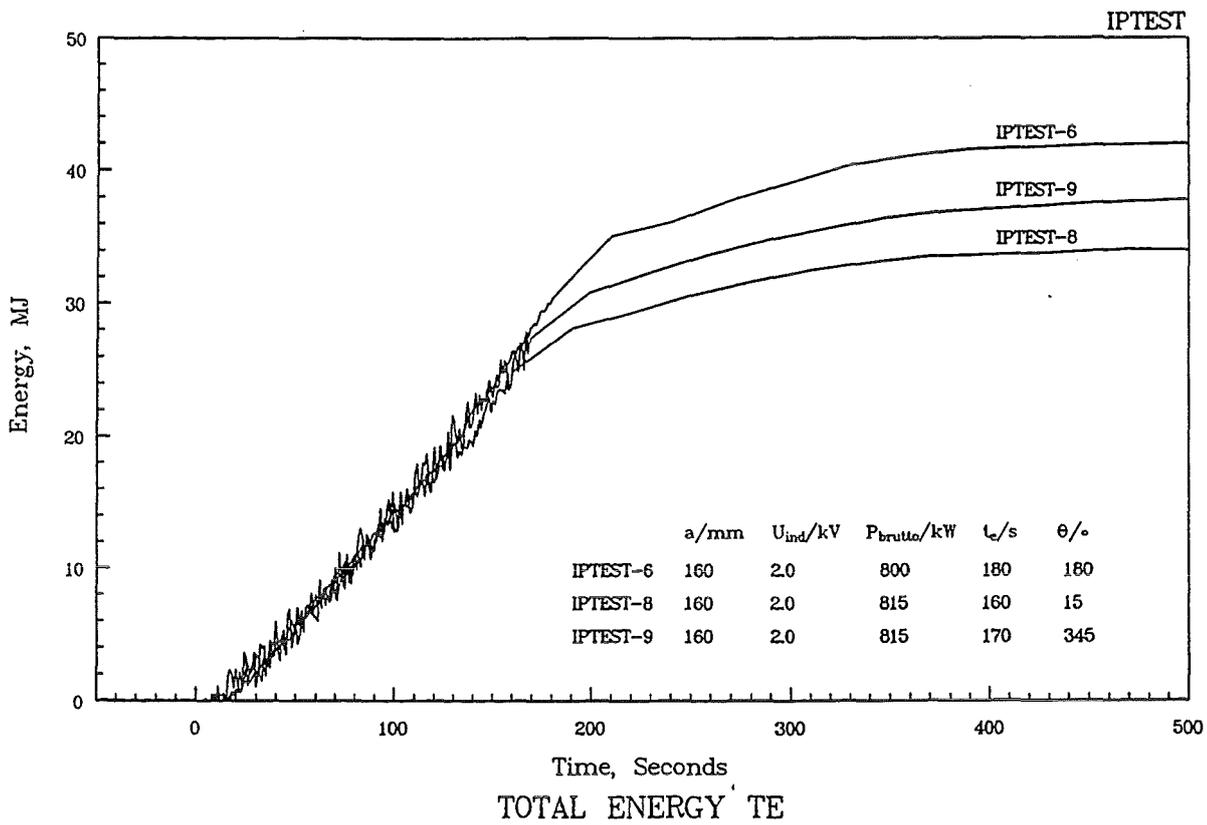


Bild 41: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-6, IPTEST-8, IPTEST-9, 0 - 500 s

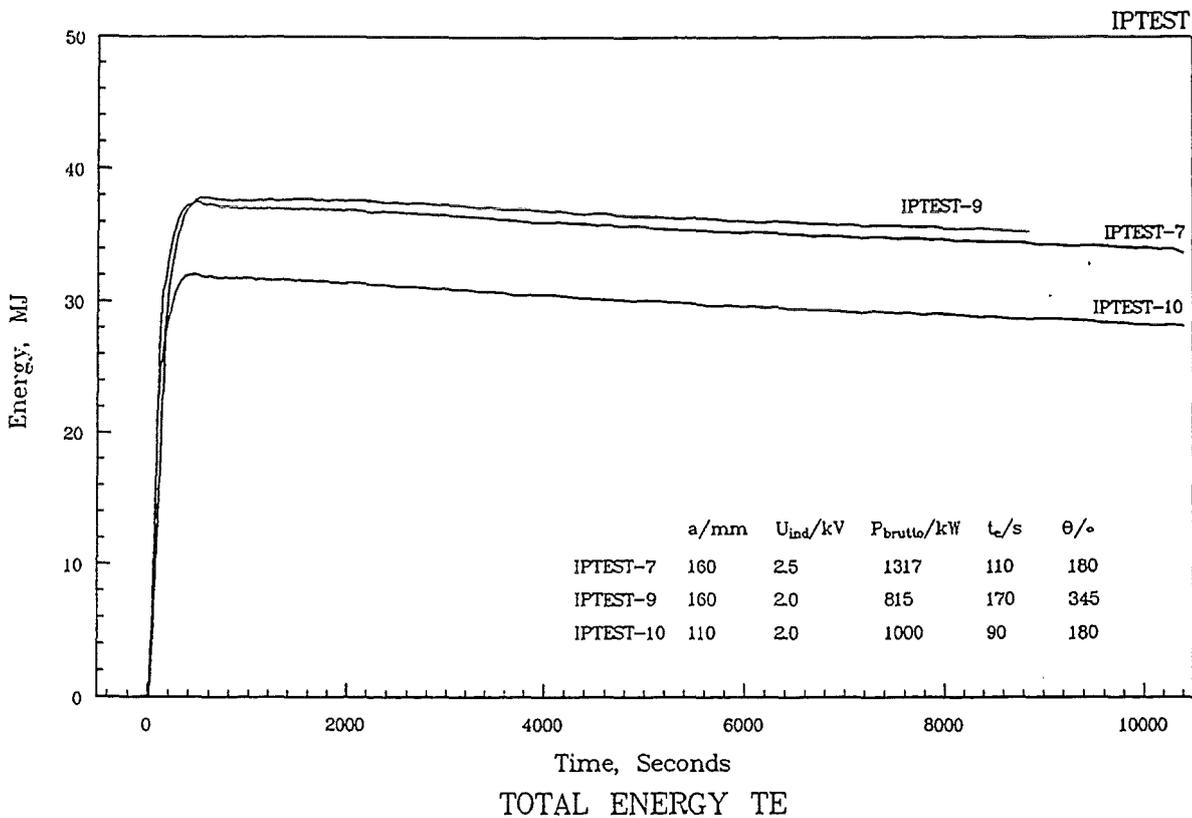


Bild 42 :Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-7, IPTEST-9, IPTEST-10

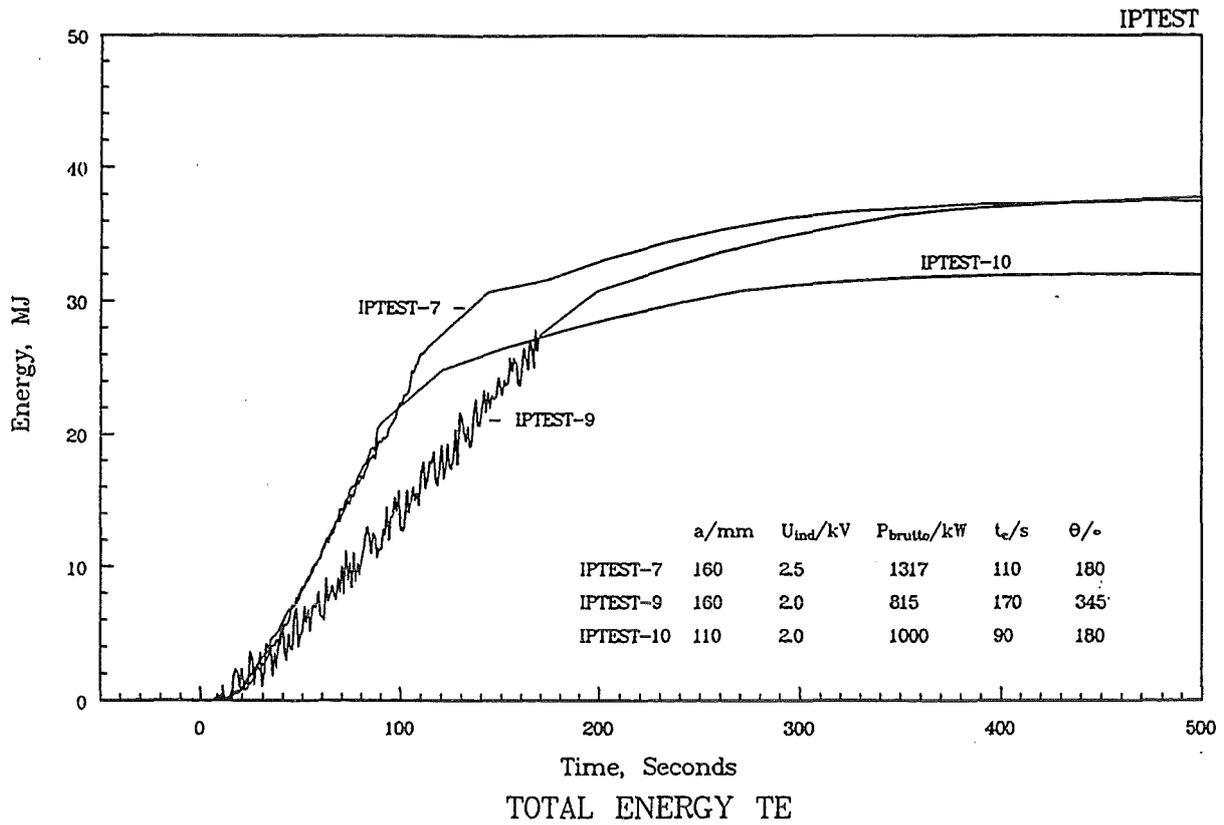


Bild 43: Zeitlicher Verlauf der in die VA-Platten eingekoppelten Energie in IPTEST-7, IPTEST-9, IPTEST-10, 0 - 500 s

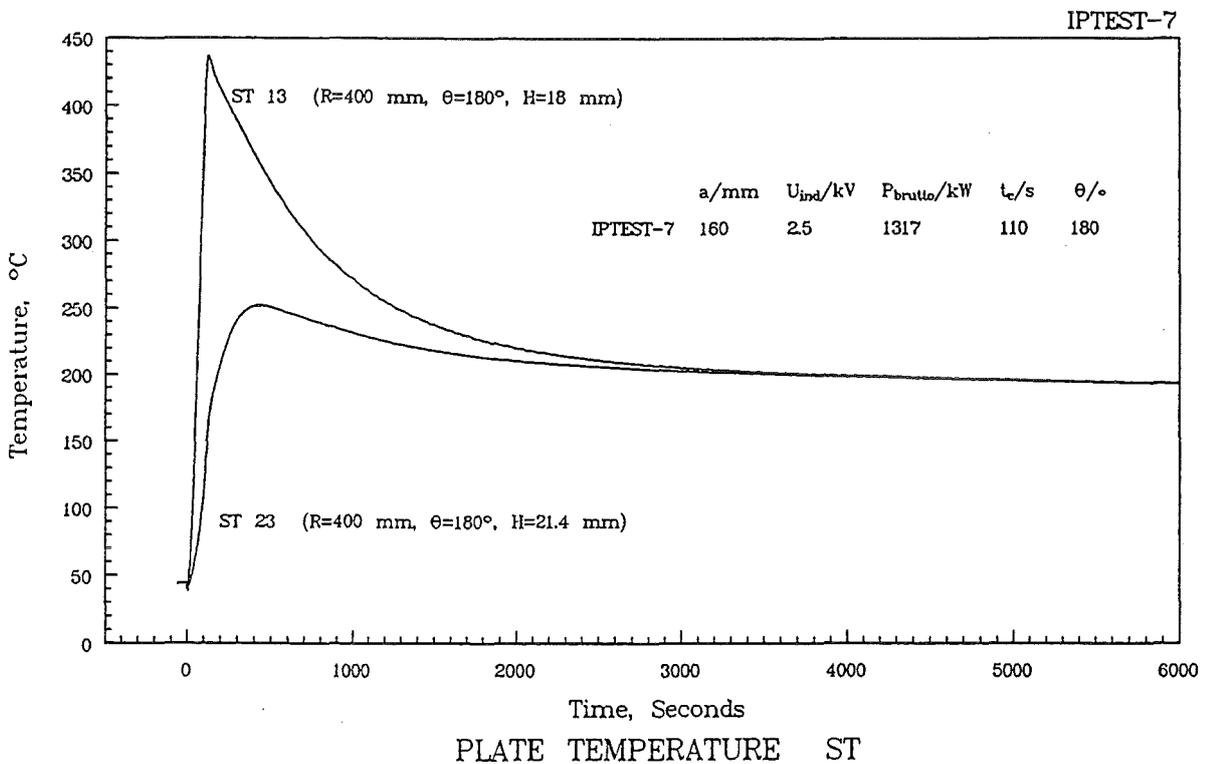


Bild 44: Temperaturmessung zweier Thermoelemente an der Kontaktfläche zwischen Platte 1 und 2 in IPTEST-7

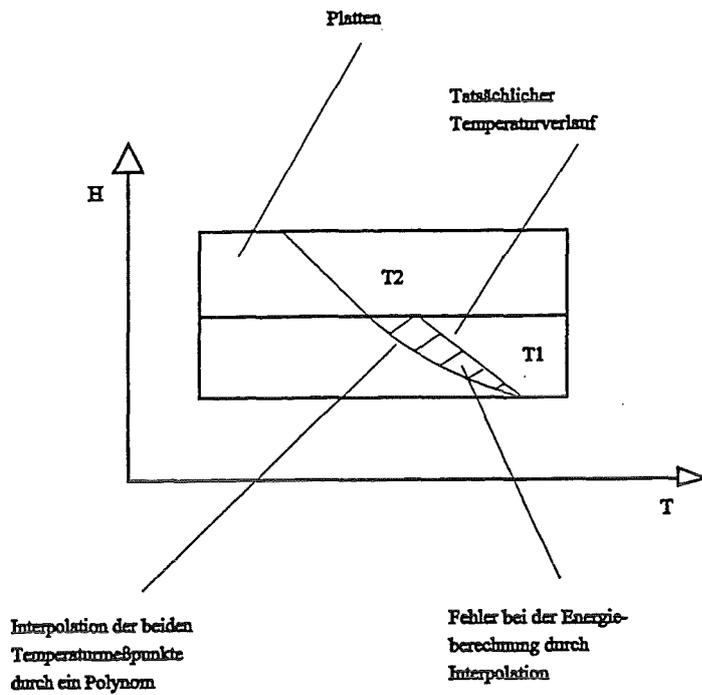


Bild 45: Skizze zur Diskrepanz in der Energieberechnung in den VA-Platten durch Interpolation der Temperaturmeßpunkte

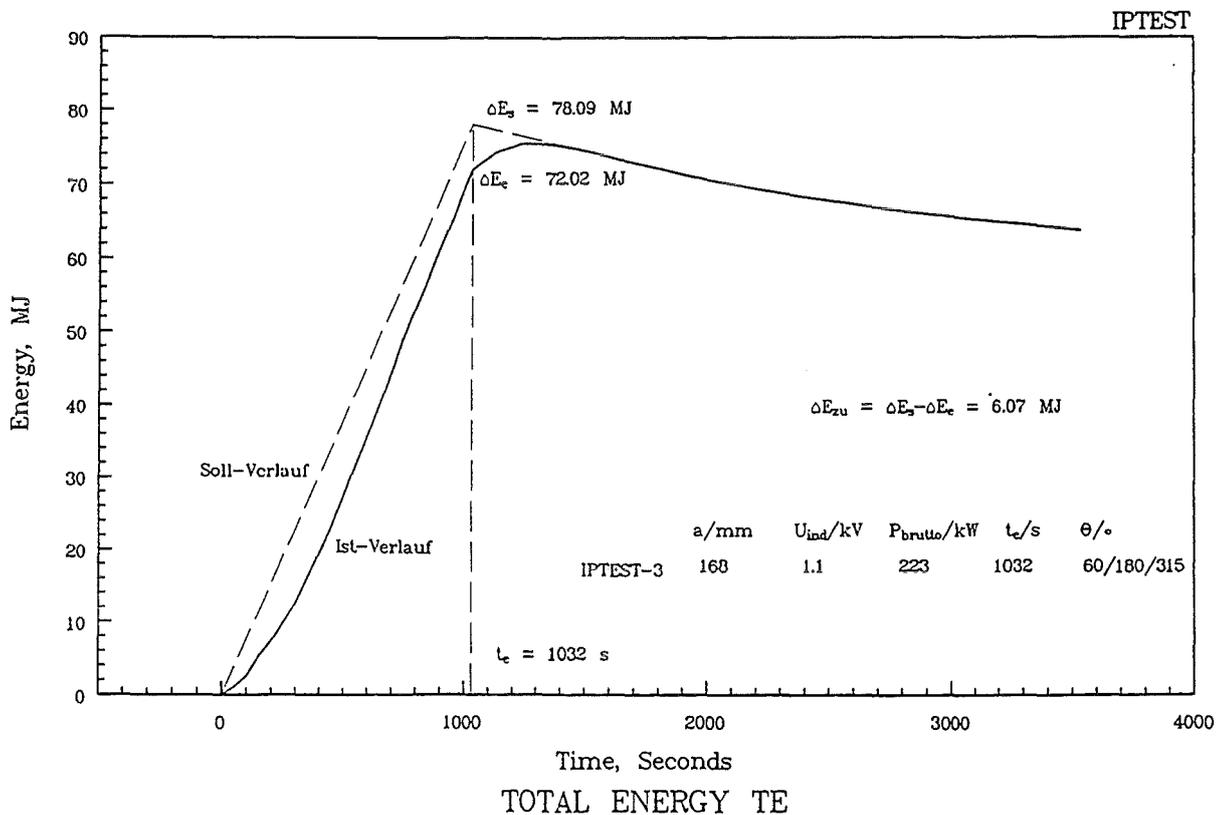


Bild 46: Korrektur des Energieverlaufs in den VA-Platten durch Zurücksetzen des Kurvenmaximums auf die Zeit des Induktorabschaltens

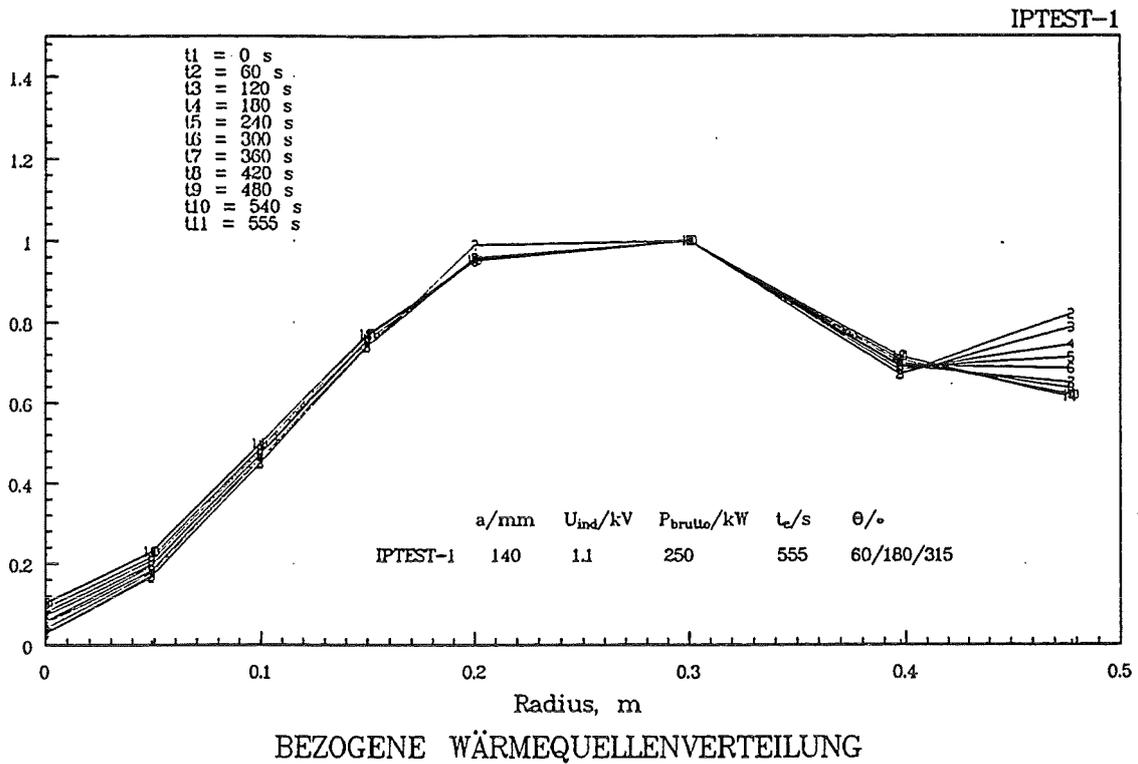


Bild 47: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-1

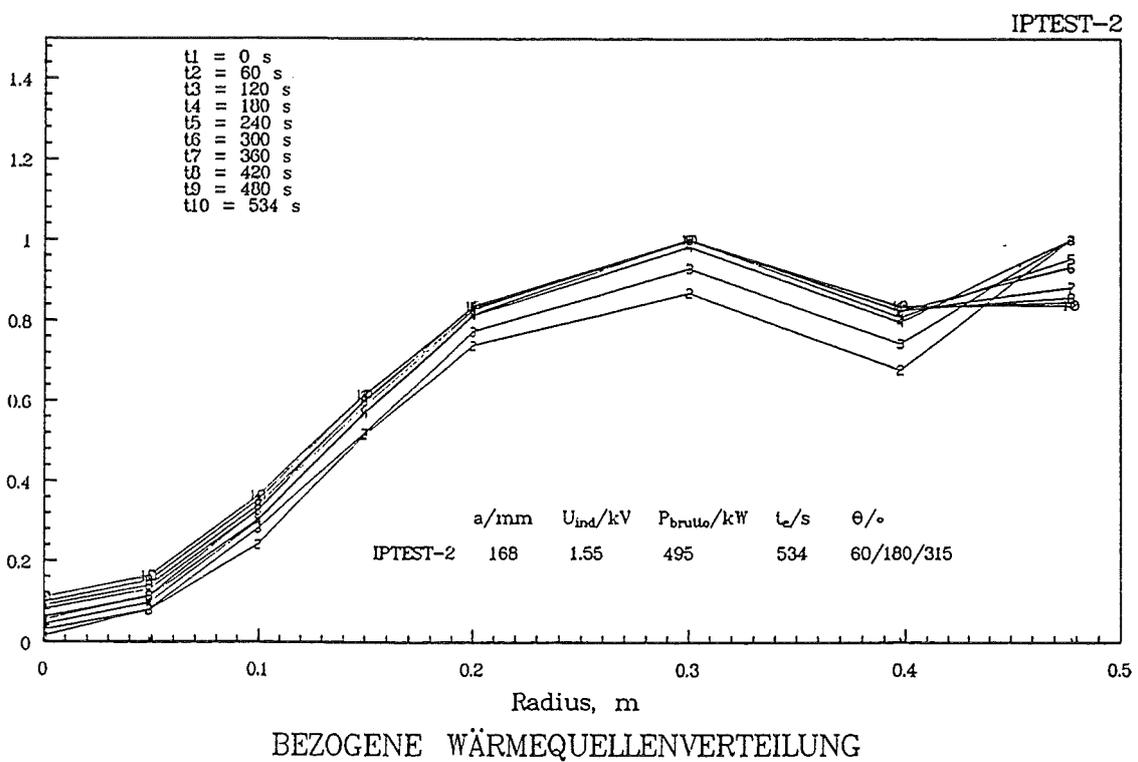


Bild 48: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-2

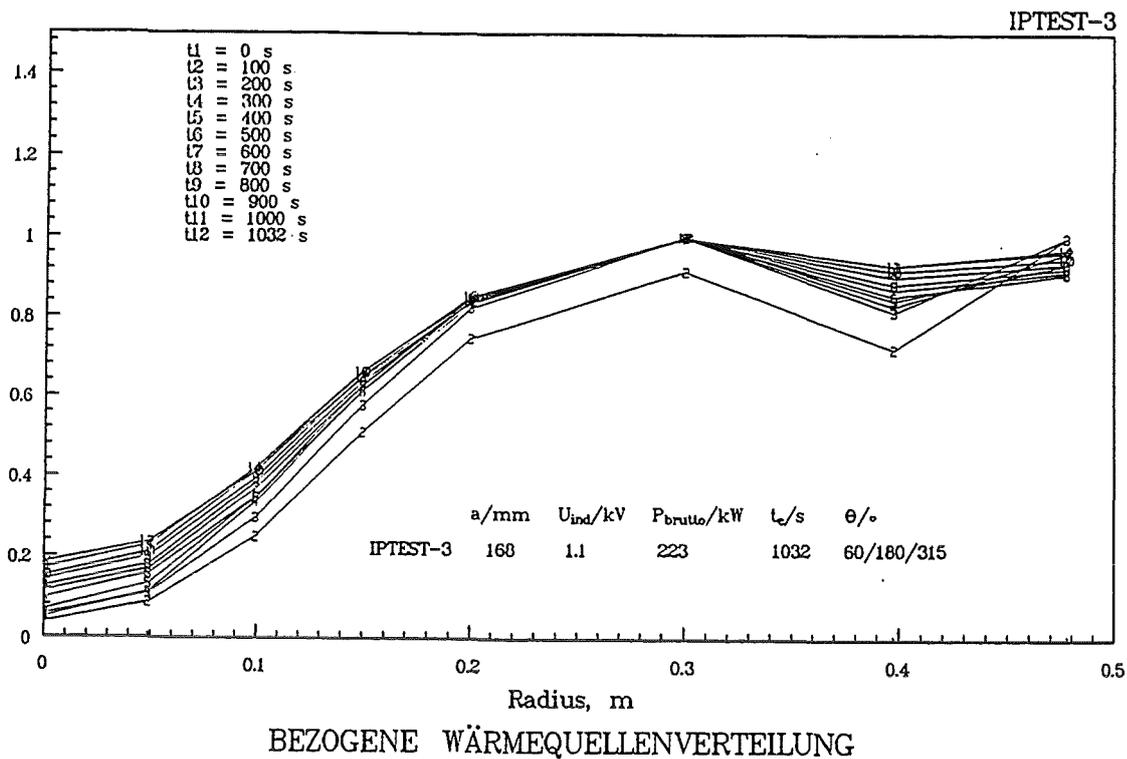


Bild 49: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-3

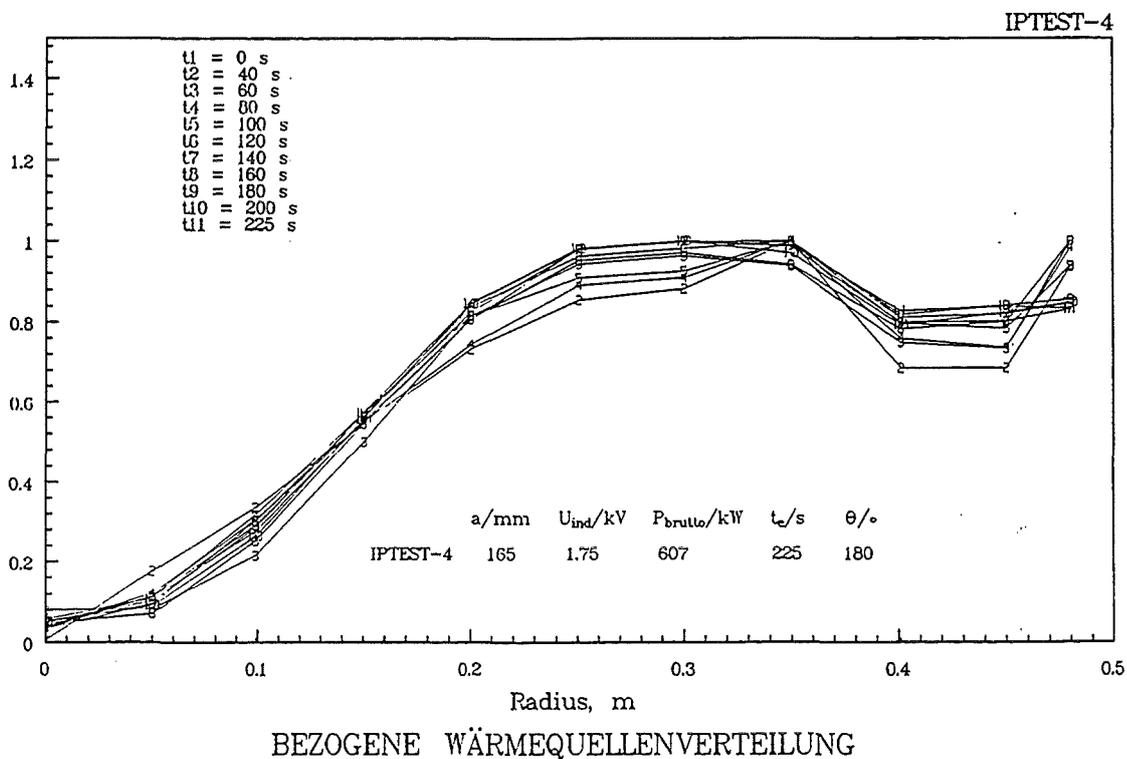


Bild 50: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-4

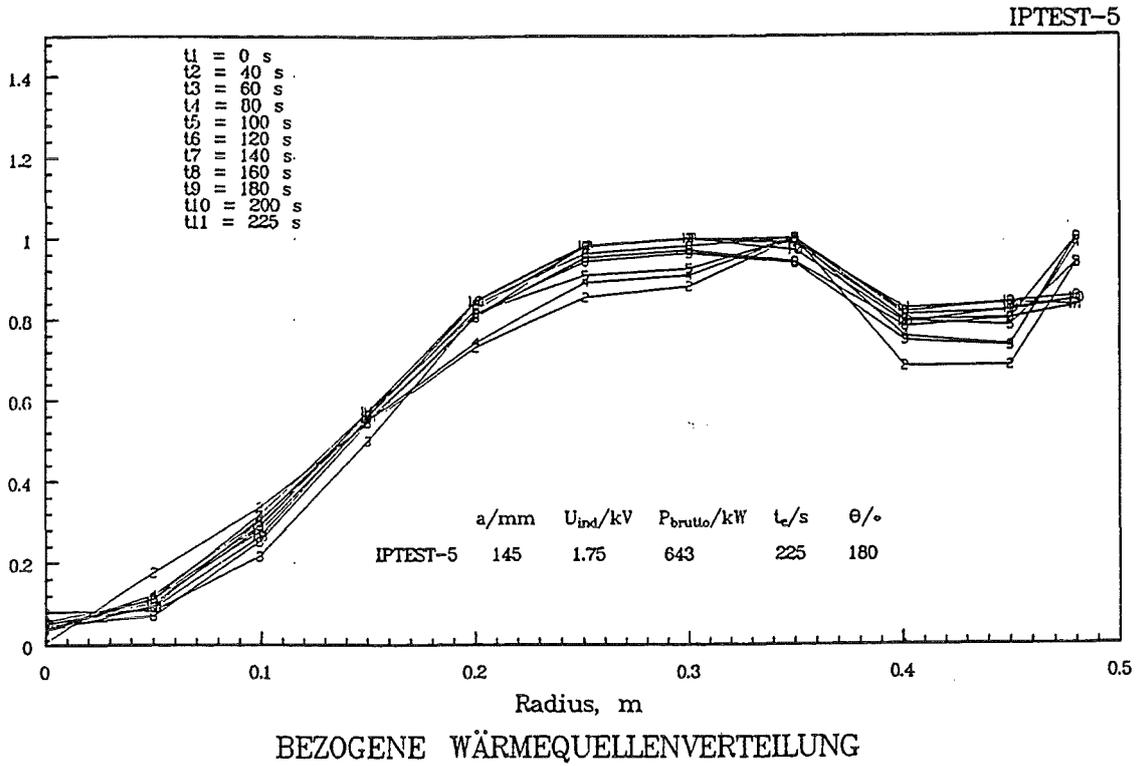


Bild 51: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-5

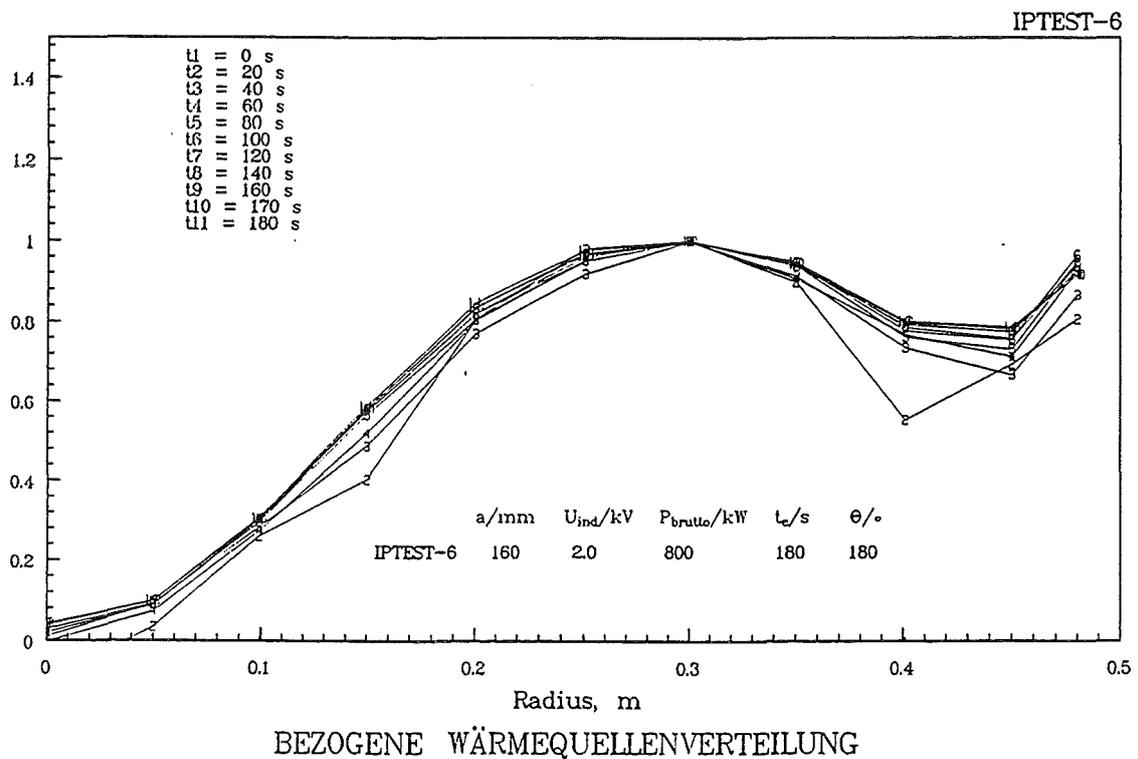


Bild 52: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-6

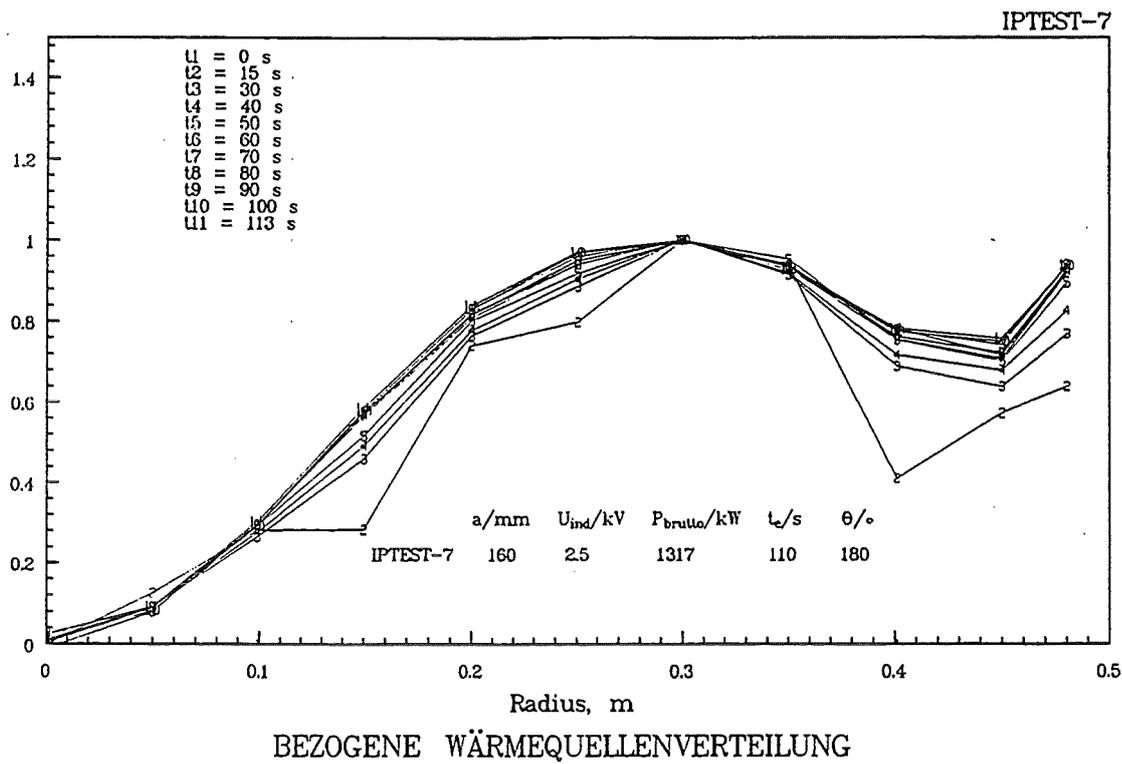


Bild 53: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-7

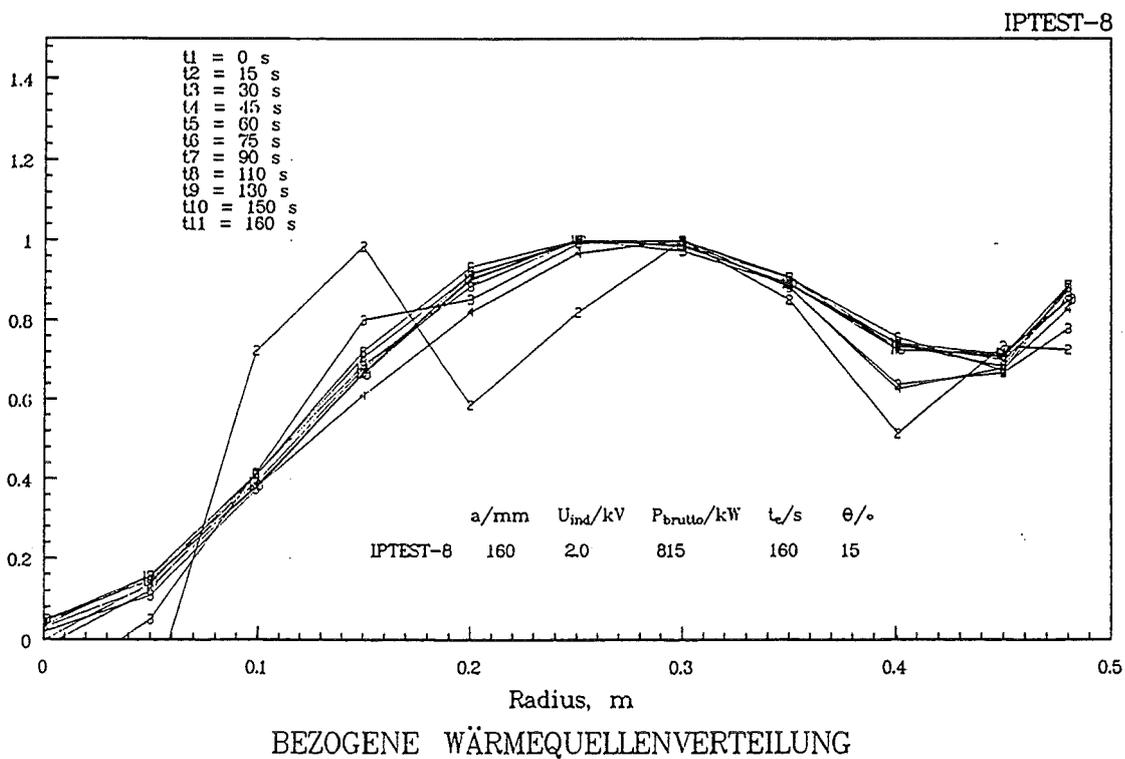


Bild 54: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-8

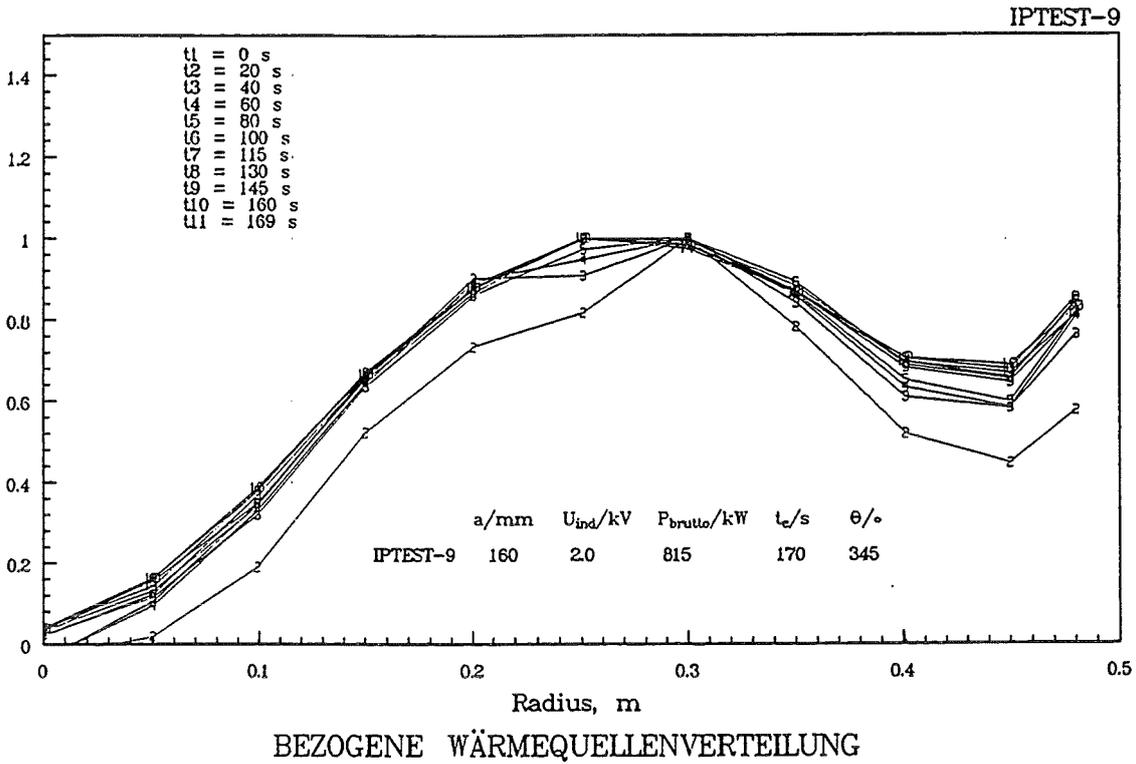


Bild 55: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-9

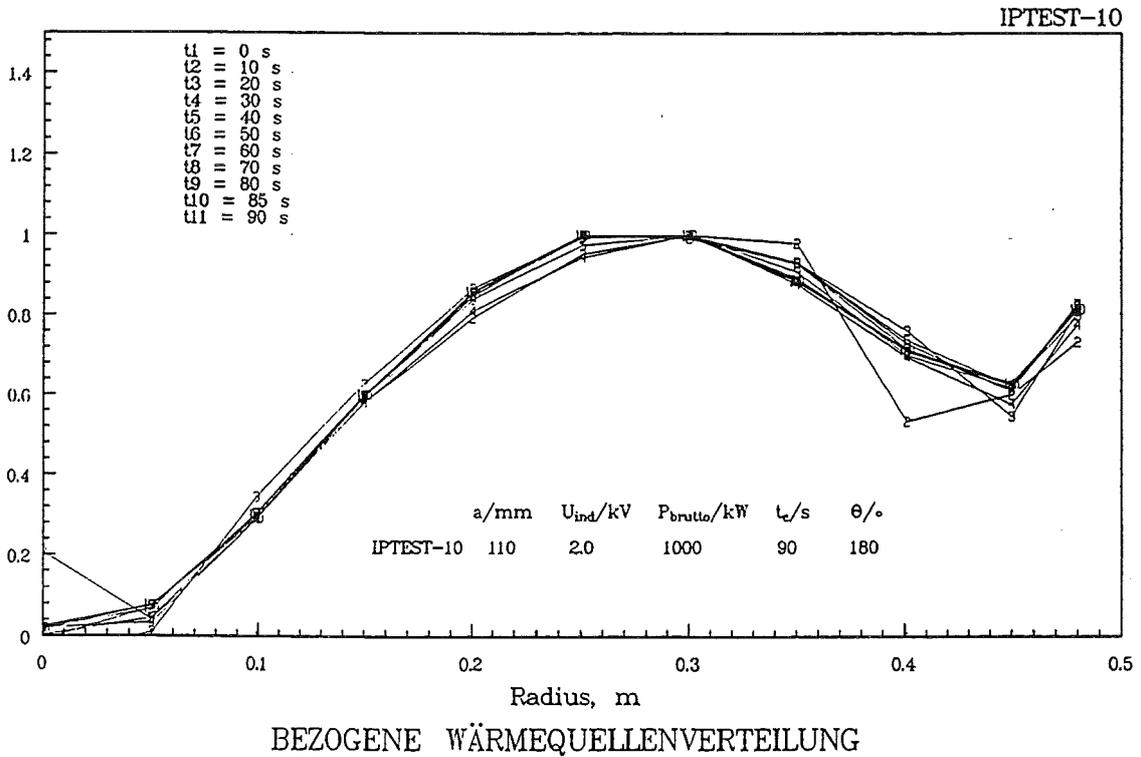


Bild 56: Bezogene Wärmequellenverteilung in der untersten Platte in IPTEST-10

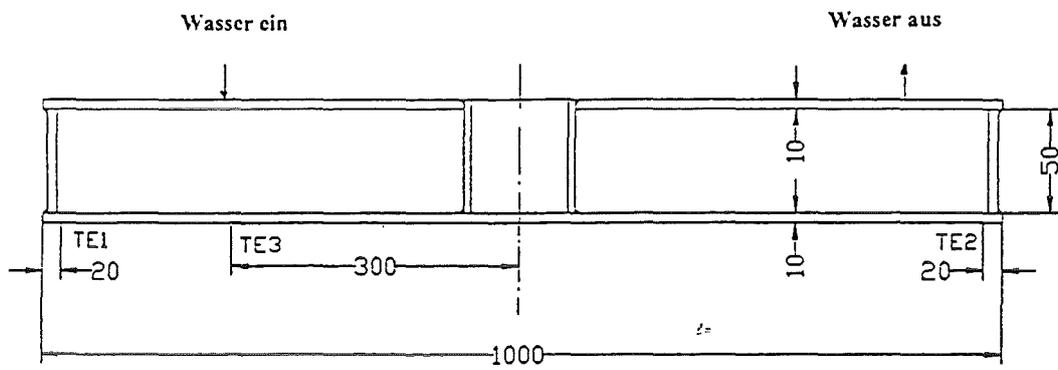


Bild 57: Wassergekühlte VA-Platte zur Umrichterkontrolle bei statischer Last

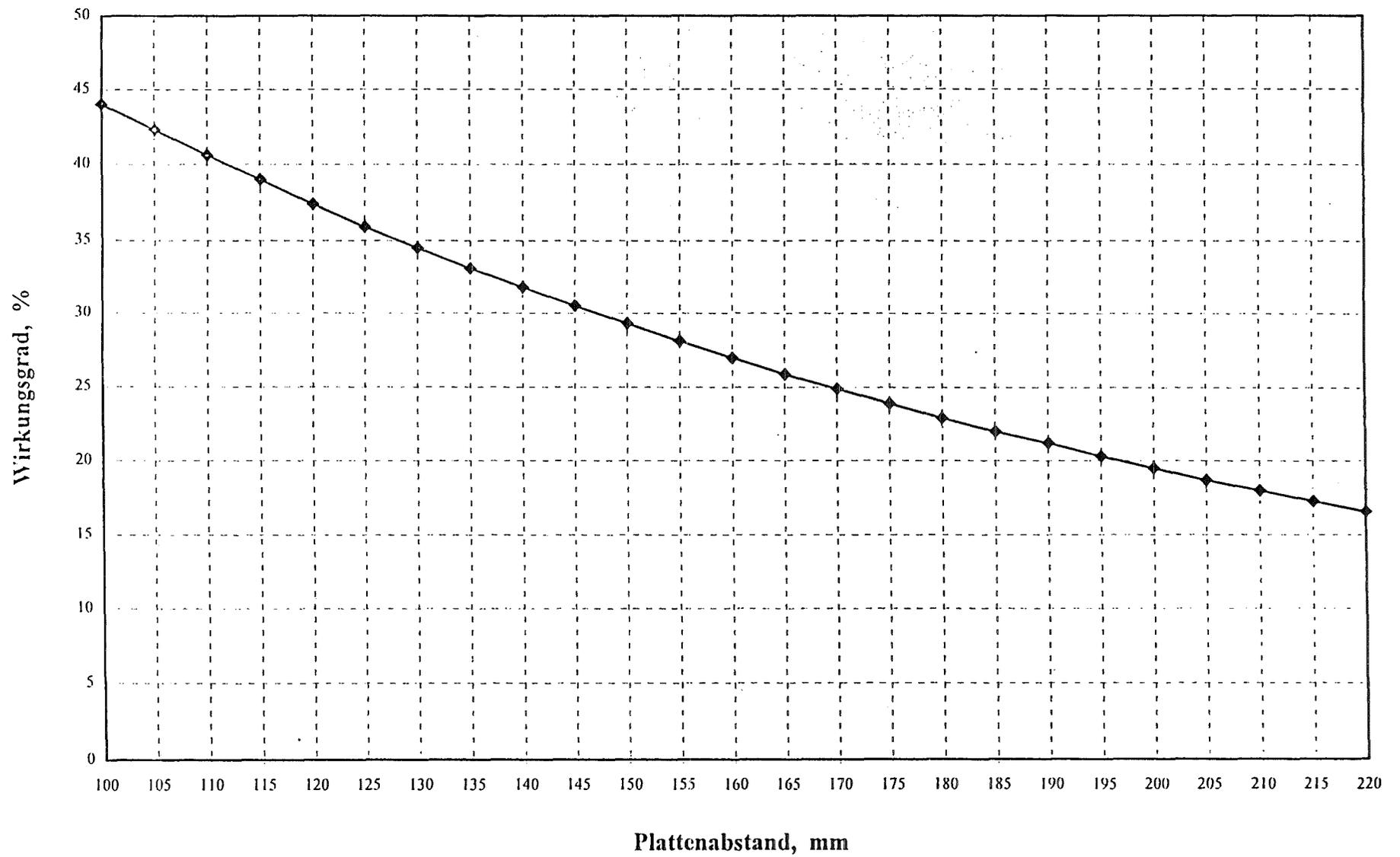


Bild 58: Induktorwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Plattenabstand von der Induktoroberkante

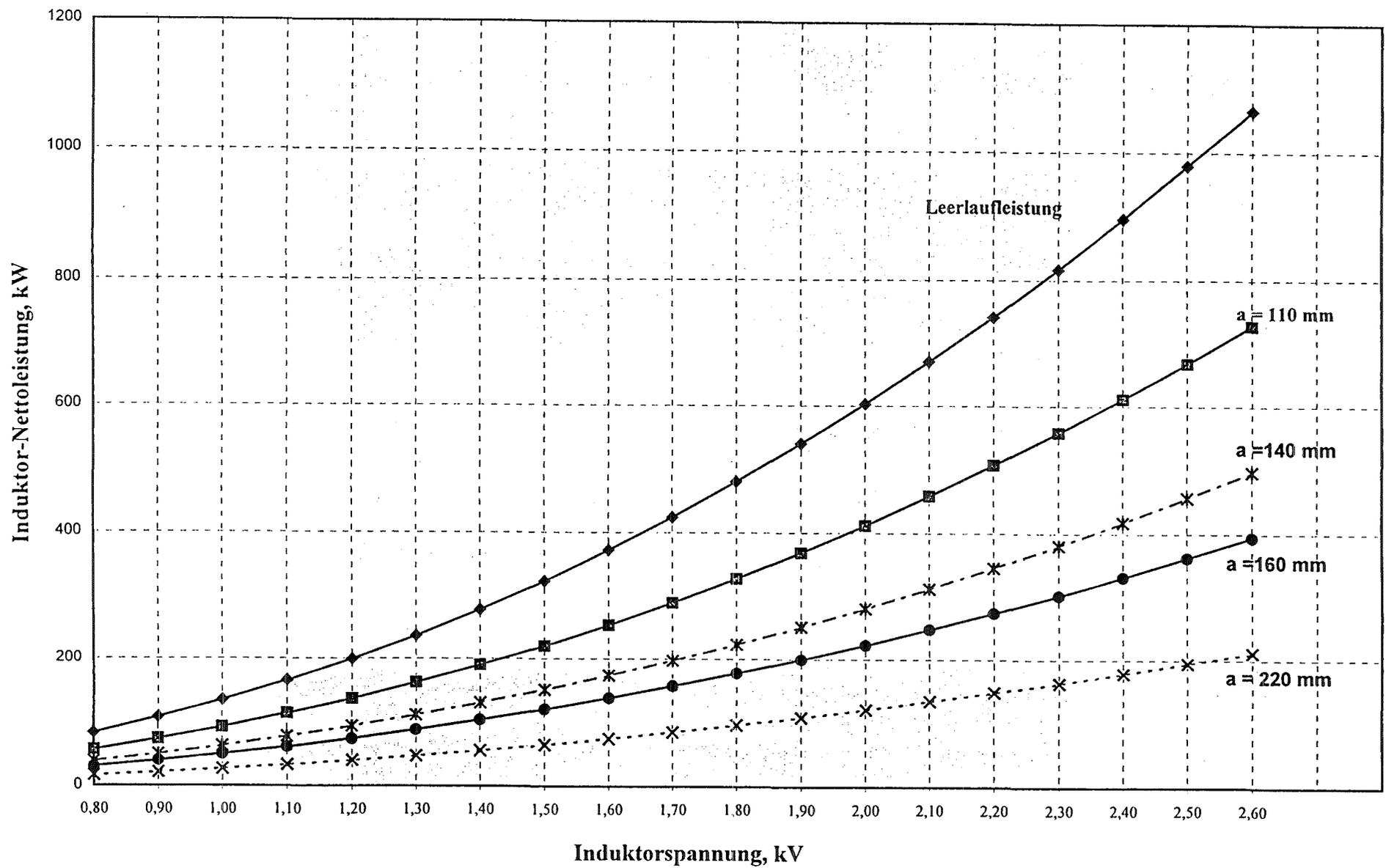


Bild 59: Induzierte Nettoleistungen in den VA-Platten bei verschiedenen Induktorspannungen und Plattenabständen von der Induktoroberkante