

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-310

Januar 2001

ISSN 1437-322X



Archiv-Ex.:

*Thomas Mössner, Eberhard Altstadt, Jürgen Böhmert und
Rainer Weiß*

**Erwärmung des Reaktordruckbehälters des
Blocks 8 des KKW Greifswald bei der
Zerlegung mittels Sägetechnik**

Herausgeber:
FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon +49 351 26 00
Telefax +49 351 2 69 04 61
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE



FZR-310

Januar 2001

*Thomas Mössner, Eberhard Altstadt, Jürgen Böhmert und
Rainer Weiß*

**Erwärmung des Reaktordruckbehälters des
Blocks 8 des KKW Greifswald bei der
Zerlegung mittels Sägetechnik**

Erwärmung des Reaktordruckbehälters des Blocks 8 des KKW Greifswald bei der Zerlegung mittels Sägetechnik

Th. Mössner, E. Altstadt, J. Böhmert, R. Weiß

Zusammenfassung:

Die Arbeit untersucht das Erwärmungsverhalten des Reaktordruckbehälters des Blockes 8 des KKW Greifswald bei der Zerlegung in Ringabschnitte mit einer Bandsäge. Mit dem Programm ANSYS wurde dazu ein thermisches Finite-Elemente-Modell erstellt. Dieses Modell ist an Hand vorhandener Temperaturmessdaten abgeglichen worden. Mit dem abgeglichenen Modell wurden abschließend die auftretenden Maximaltemperaturen für den Sägevorgang ermittelt. Diese liegen bei höchstens 200 °C.

Abkürzungen und Symbole

FE	Finite Elemente
RDB	Reaktordruckbehälter
TS	Temperatursensor
WWER	Reaktortyp
F	Schnittkraft
P	Leistung
T	Temperatur
c	Wärmekapazität
v	Schnittgeschwindigkeit
λ	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Dichte

1 Einleitung

Nachuntersuchungen am Material der Reaktordruckbehälter (RDB) des stillgelegten Kernkraftwerkes Greifswald können einen wertvollen Erfahrungsfluss aus dem Betriebsverhalten dieser hoch-sicherheits-relevanten Komponente liefern und Alterungseinflüsse an authentischen Materialproben dokumentieren. Beim Reaktortyp WWER-440 erwartet man eine deutliche Druckbehälterversprödung. Die Blöcke 1-4 des Kernkraftwerkes Greifswald entsprechen diesem Typ und haben bereits längere Betriebszeiten hinter sich. Deshalb ist Material aus diesen Blöcken besonders lukrativ und in nächster Zukunft auch unersetzbar.

Die Situation ist in der Fachwelt bekannt. Man trifft folglich bereits jetzt Vorbereitungen, um im geplanten Abbauprozess die Entnahme von Materialproben einzufügen. Vorbereitet ist eine Zerlegungstechnologie mit einer mechanischen Bandsäge. Sie wird gegenwärtig am RDB des Blockes 8 erprobt und soll später bei den Blöcken 1-4 mit den gleichen Parametern durchgeführt werden.

Die Technologie ist jedoch nur dann zur repräsentativen Probenahme von Materialproben geeignet, wenn die dabei auftretenden Temperaturen unter den Temperaturen bleiben, bei denen mit Gefügeänderungen zu rechnen ist. Für den besonders interessierenden Bereich des Reaktorkernes, der während des Betriebes Temperaturen um 270°C ausgesetzt war, ist diese Temperaturgrenze konservativ mit 250°C festzulegen.

Zur Überprüfung der beim Sägen auftretenden Erwärmung wurden während eines Schnittvorganges die Temperaturen punktuell mit Thermoelementen im Inneren der RDB-Wand und als flächige Verteilung mit Infrarotkameras an der Wandoberfläche gemessen.

Da eine Temperaturbestimmung direkt an der Trennstelle nicht möglich ist, erfolgte eine Nachrechnung mit einem thermischen Modell. Dieses Modell wurde an Hand der gewonnenen Messdaten justiert und die damit auftretenden Maximaltemperaturen an der Trennstelle bestimmt.

2 Messdaten

Bei den beiden durchgeführten Sägeschnitten am Block 8 des KKW Greifswald sind Temperaturmessungen mit zwei unterschiedlichen Verfahren durchgeführt worden. Zum einen wurden in der Nähe des Sägeschnittes drei Temperatursensoren (Thermoelemente Typ K Ni-CrNi), im weiteren mit TS 1 bis TS 3 bezeichnet, angebracht. **Abbildung 1** stellt die Sensorplatzierung dar. Zum anderen sind während der Säugung thermografische Aufnahmen der Sägeschnittumgebung angefertigt worden. Dazu wurde das Infrarot-Thermografiesystem VARIOSCAN VS3011 PC benutzt. Als Säge wurde eine Bandsäge mit geregelter Schnittkraft eingesetzt. **Tabelle 1** zeigt die technischen Daten der Bandsäge.

Tabelle 1: Technische Daten der Bandsäge nach /1/	
Sägebandbreite	67 mm
Sägebanddicke	1,6 mm
Antriebsleistung P	11 kW
Schnittkraft F	8,6 kN
Schnittgeschwindigkeit v	30 m/min

Die während des Sägens eingestellten Schnittwerte stellt **Tabelle 2** dar. Bei Säugung 1 klemmte bei einer Sägetiefe von 75 mm das Sägeblatt, was zum Abbruch des Sägevorganges führte. **Abbildung 2** stellt die gemessenen Temperaturen der Sensoren TS 1 bis TS 3 dar. Die aufgenommenen Temperaturen nach dem Wiederanfahren der Säge zeigt **Abbildung 3**. Eine zeitliche Synchronisation der Temperaturmessungen auf die in **Tabelle 2** angegebenen Schnittzeiten erfolgte nicht.

Abbildung 4 stellt den Temperatur-Zeit-Verlauf für die wärmsten Punkte der von /2/ aufgenommenen thermografischen Bilder dar. **Abbildung 5** zeigt ein Thermografiebild für den wärmsten Zeitpunkt. Die besonders heißen Punkte in dieser Darstellung sind Späne, die aus der Schnittfuge entfernt werden. Sie sind nicht repräsentativ für die RDB-Erwärmung. Sie werden deshalb im folgenden auch nicht für den Vergleich mit den Modellrechnungen berücksichtigt

Tabelle 2: Eingestellte Schnittparameter /1/

Start	Ende	Zeit [min]	Σ Zeit [min]	Vor- schub [mm/ min]	Pos. Anfang [mm]	Pos. Ende [mm]	Weg [mm]	Σ Weg [mm]
1. Säigung			0					0
11.00	11.15	15	15	5	138	226	88	88
11.15	11.19	4	19	4	226	235	9	97
11.19	11.20	1	20	3	235	238	3	100
11.20	11.22	2	22	2	238	243	5	105
11.22	11.27	5	27	1	243	270	27	132
2. Säigung			0					132
15.10	15.20	10	10	2	270	287	17	149
15.20	15.31	11	21	1	287	296,7	9,7	158,7
15.31	15.35	4	25	2	296,7	307,7	11	169,7
15.35	15.43	8	33	1	307,7	321,8	14,1	183,8
15.43	15.45	2	35	2	321,8	325	3,2	187

3 Finite-Elemente-Modell

Das FE-Modell beschreibt einen 180°-Ausschnitt des Reaktordruckbehälters (RDB). Für die thermischen Berechnungen wird die Wärmeleitung in der Struktur, der Wärmeübergang an der Oberfläche sowie der Wärmeeintrag an der Trennstelle berücksichtigt.

3.1 Materialeigenschaften

Für die Modellierung sind die temperaturabhängigen Materialdaten für den WWER-440 Grundwerkstoff aus [3] herangezogen worden. **Tabelle 3** gibt die Werte an.

Temperatur T	[°C]	20	50	100	200	300
Wärmeleitfähigkeit λ	[W/(m*K)]	34,7	35,6	36,7	37,4	36,9
Wärmekapazität c	[J/(kg*K)]	439,7	464,1	496,2	543,6	579,5
Dichte ρ	[g/cm ³]	7,80				

3.2 Geometrie und Vernetzung des RDB mit Finiten Elementen

Für die Vernetzung des RDB wurden thermische 8-Knoten Elemente (SOLID70) verwendet. Das Modell beschreibt unter Ausnutzung der Symmetrie ein Viertel des Sägeschnittes. Die Symmetrieebenen werden von den Mittelebenen des Sägeschnittes in horizontaler und vertikaler Richtung gebildet. Die zweite horizontale Begrenzung wurde in einem Abstand von 5000 mm von der Sägeschnittebene festgelegt. Die durch den Sägeschnitt vorhandene Stufe in der Schnittebene mit halber Schnitthöhe (0,8 mm) wurde für den Lasteintrag berücksichtigt. An den Stellen der vorhandenen Temperatursensoren TS 1 bis TS 3 sind Knoten für die Temperaturermittlung vorhanden. Es lassen sich mit dem Modell unterschiedliche Schnitttiefen analysieren. **Tabelle 4** stellt die wesentlichen geometrischen Größen dar.

Außendurchmesser	3840
Modellhöhe	5000
Wanddicke	149
halbe Sägeschnitthöhe	0,8
Sägeblattbreite	67
vertikaler Abstand Sensor TS 1 von Sägeschnittmittelebene	79,5
vertikaler Abstand Sensor TS 2 und TS 3 von Sägeschnittmittelebene	8,5
horizontaler Abstand TS 3 von Symmetrieachse	400
Sensortiefe TS 1 bis TS 3	67,5

3.3 Randbedingungen

Die horizontalen und vertikalen Modellschnittflächen mit den Symmetrieebenen und die Sägeschnittfläche werden als adiabat angenommen. Die Wärmeabfuhr kann somit nur über die innere und äußere RDB-Wand erfolgen. Dies geschieht durch freie Konvektion. Eine Wärmeabfuhr durch Temperaturstrahlung wurde nicht explizit zugelassen. Diese wird durch einen höheren Wert der Wärmeübergangszahl berücksichtigt. Als Wärmeübergangskennzahl werden in /4/ Werte zwischen 1 und 5 W/(m²*K) genannt. Unter Berücksichtigung der Temperaturstrahlung wurde für die Berechnungen der höhere Wert von 5 W/(m²*K) bei einer Umgebungstemperatur von 18°C verwendet.

3.4 Lasten

Als Belastung wurde die während des Sägevorganges eingetragene Wärmeleistung modelliert. Diese Leistung wird als Flächenlast aufgebracht. Da nur ein Viertel des Sägeschnittes modelliert ist, kann auch nur ein Viertel der Wärmeleistung in die Schnittfläche eingetragen werden. Da die Leistungsverteilung im Sägeschnitt nicht bekannt ist, wurde eine Gleichverteilung angenommen. Im Modell ist die Leistung über die halbe Schnitthöhe eingetragen worden. Die Schnittfläche ergibt sich dann aus halber Schnitthöhe und Schnittlänge. **Abbildung 6** zeigt diesen Lasteintrag. Die maximal zu induzierende Wärmeleistung P_{therm} wurde aus den bekannten Schnittdaten ermittelt:

$$P_{\text{therm}} = F \cdot v = 8,6 \text{ kN} \cdot 30 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 4,3 \text{ kW}$$

4 Thermische Analyse

Die thermischen Analysen sind als transiente Berechnungen durchgeführt worden und zwar nur für den Sägeprozess 1 bis zum Durchsägen der Wandstärke. Nur für diesen Prozess konnte auf Grund des markanten Temperatur-Zeit-Verlaufs eine Zuordnung der gemessenen Temperaturen zur Sägetiefe gefunden werden. **Tabelle 5** stellt diese Zuordnung dar. Ausgangspunkt war dabei der Abbruchzeitpunkt bei etwa 2770 Sek., von dem aus an Hand der gemessenen Abbruchtiefe und der Schnittwerte aus **Tabelle 2** zurückgerechnet wurde.

Tabelle 5: Zuordnung von Zeit und Schnitttiefe		
Σ Zeit Messung	Σ Zeit Rechnung	Schnitttiefe
[Sek.]	[Sek.]	[mm]
1566	420	7
1866	720	32
2166	1020	55
2466	1320	70
2766	1620	75
-	2820	95
-	4020	115
-	5220	135
-	5820	145
-	6420	155

Bis zu den in **Tabelle 5** festgelegten Zeitpunkten ist dann jeweils die transiente thermische Rechnung durchgeführt worden. Die dabei erreichte Schnitttiefe wurde als konstanter Wert für den Ort der Lasteintragung während des gesamten Rechenzeitraumes angenommen. So wird die induzierte Gesamtenergie im Modell korrekt abgebildet. Die Wärmeabfuhr durch das Sägeblatt wurde nicht berücksichtigt (konservative Annahme).

5 Ergebnisse

Mit der für den Abbruchzeitpunkt durchgeführten Rechnung wurde die induzierte Leistung mittels eines Wirkungsgradfaktors so angepasst, dass die berechneten Temperaturen für die Sensoren TS 1 bis TS 3 den gemessenen näherungsweise entsprachen. Der ermittelte Faktor für den Wirkungsgrad beträgt 0,33. Die anderen zwei Drittel der Schnitt-(Wärme-)leistung werden also vom durchlaufenden Sägeband und dem Kühlmittel, welche beide im Modell nicht berücksichtigt sind, abgeführt.

Mit dieser korrigierten Leistungsannahme sind dann die anderen Zeitpunkte berechnet worden. **Abbildung 7** stellt den Temperatur-Zeit-Verlauf der drei Sensoren TS 1 bis TS 3 für das Modell im Vergleich zur Messung dar. Das Modell liefert für die Anfangszeitpunkte eine zu hohe Sensortemperatur. Dies läßt sich mit höheren Anlaufverlusten zum Beispiel durch ein kaltes Sägeband erklären. Wahrscheinlich ist auch anzunehmen, dass zu Schnittbeginn mit einer niedrigeren Schnittkraft gearbeitet wird.

In den **Abbildungen 8 bis 17** sind die RDB-Temperaturen am Sägeschnitt zu den berechneten Zeitpunkten für das Modell dargestellt. Spalte 2 in **Tabelle 6** gibt die maximalen Temperaturen für diese Zeitpunkte an.

In den **Abbildungen 18 bis 27** sind jeweils die durch /5/ thermografisch erfassten Oberflächentemperaturen auf der Außenseite des RDB und die berechneten Werte zu gleichen Zeitpunkten dargestellt. Die Unterkante der Bilder entspricht der Oberkante des Sägeschnittes. Die rechte Begrenzung bildet die vertikale Symmetrieachse. Für die Vergleichbarkeit der Darstellungen sind also die Bilder der Rechenergebnisse horizontal und vertikal gespiegelt (zu den **Abbildungen 8 bis 17**) dargestellt. Die Abbildungen weisen eine gute Übereinstimmung im qualitativen Verlauf der Isothermen auf. Die Spalten 3 und 4 in **Tabelle 6** geben die Maximaltemperaturen dieser Bilder an.

Die mit dem Modell berechneten Maximaltemperaturen liegen deutlich über den thermografisch erfassten Oberflächentemperaturen. Mit Ausnahme der starken Überhöhung bei Zeitpunkt 1 sind die Rechenwerte etwa ein Drittel höher. Die im Modell getroffenen Annahmen sind also konservativ. Trotzdem liegen die berechneten Maximaltemperaturen aber immer noch weit unter den Werten, bei denen Gefügeänderungen zu erwarten sind.

Für die gewählten Schnittparameter kann folglich die Technologie als geeignet für die Entnahme von Materialproben eingeschätzt werden.

Tabelle 6: Maximaltemperaturen in °C			
Zeit [Sek.]	am Sägeschnitt berechnet	an Außenfläche berechnet	an Außenfläche gemessen /6/
420	158,8	126,1	42,0
720	75,1	65,0	42,0
1020	61,9	47,2	32,2
1320	64,9	43,5	30,4
1720	58,3	43,5	30,0
2820	57,5	-	-
4020	56,6	-	-
5220	60,3	-	-
5820	70,4	-	-
6420	58,1	-	-

6 Literatur

- /1/ EWN: Persönliche Mitteilung; Schnittwerte und Technische Daten zur Probezersägung
- /2/ InfraTec GmbH Dresden: Protokoll der IR-Falschfarbaufnahmen
- /3/ Bewertung der wesentlichen Aspekte der Integrität der druckführenden Komponenten in Reaktoren vom Typ WWER-440/W-230; GRS-A-2004
- /4/ Freudenstein: 2D Temperaturverteilung von RDB-Stützen/Steuerstabantriebsgehäuserohr bei Nennlast und RESA. Berechnungen mit STINT2-Code; KWU NDS2/98/3513
- /5/ N. Rost, InfraTec GmbH Dresden: Persönliche Mitteilung; Thermografieauswertung
- /6/ N. Rost, InfraTec GmbH Dresden: Persönliche Mitteilung; Isothermendarstellung

7 Anhang

Abbildungen 1 bis 27

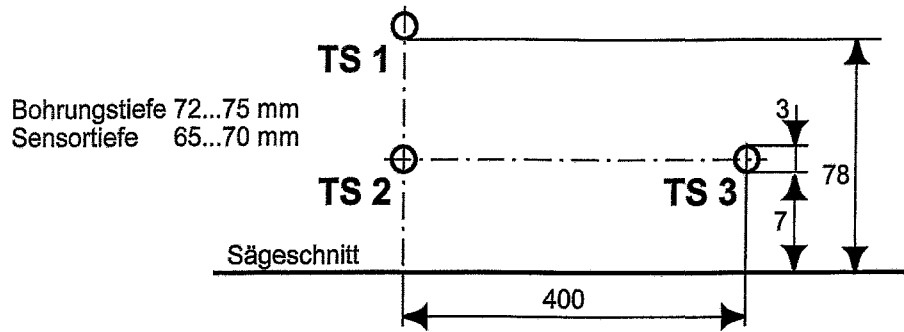


Abbildung 1: Lage der Sensoren TS 1 bis TS 3 zum Sägeschnitt

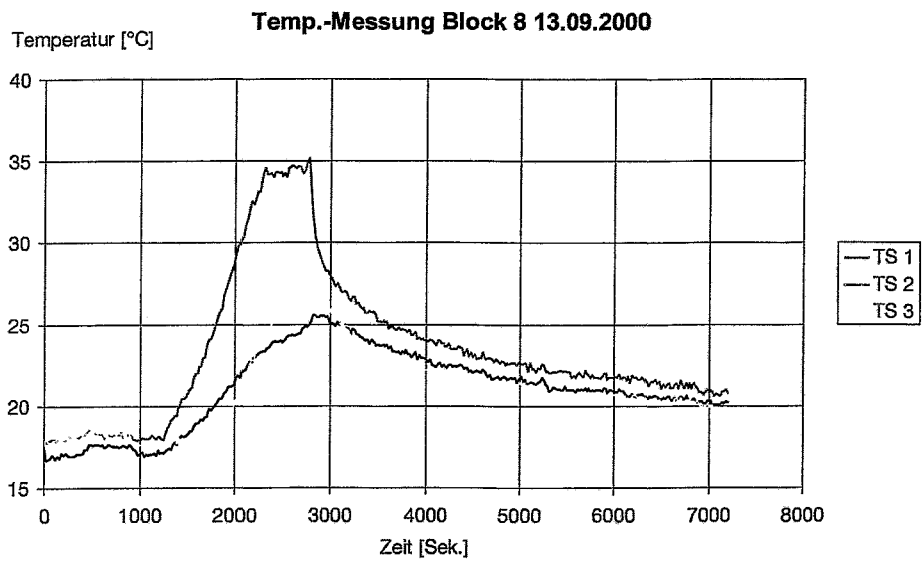


Abbildung 2: Sägung 1, Temperaturmessung

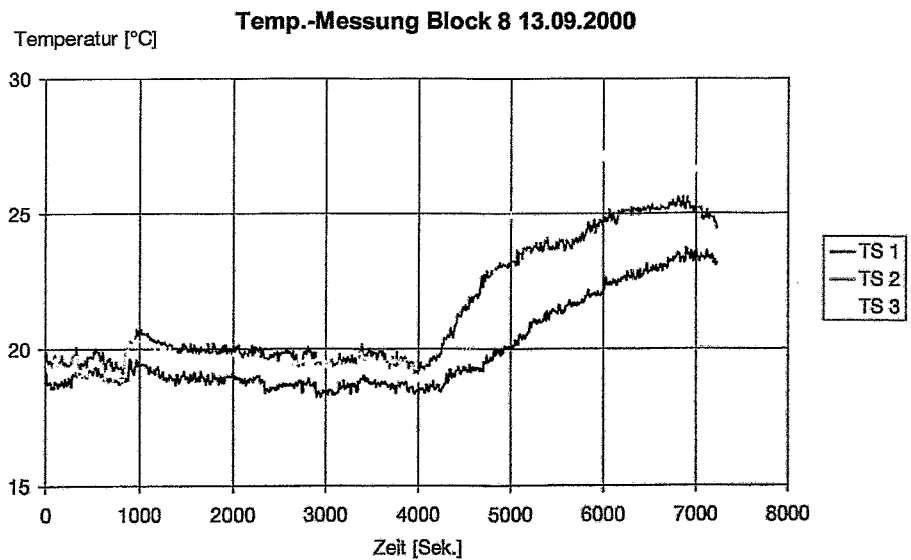


Abbildung 3: Sägung 2, Temperaturmessung

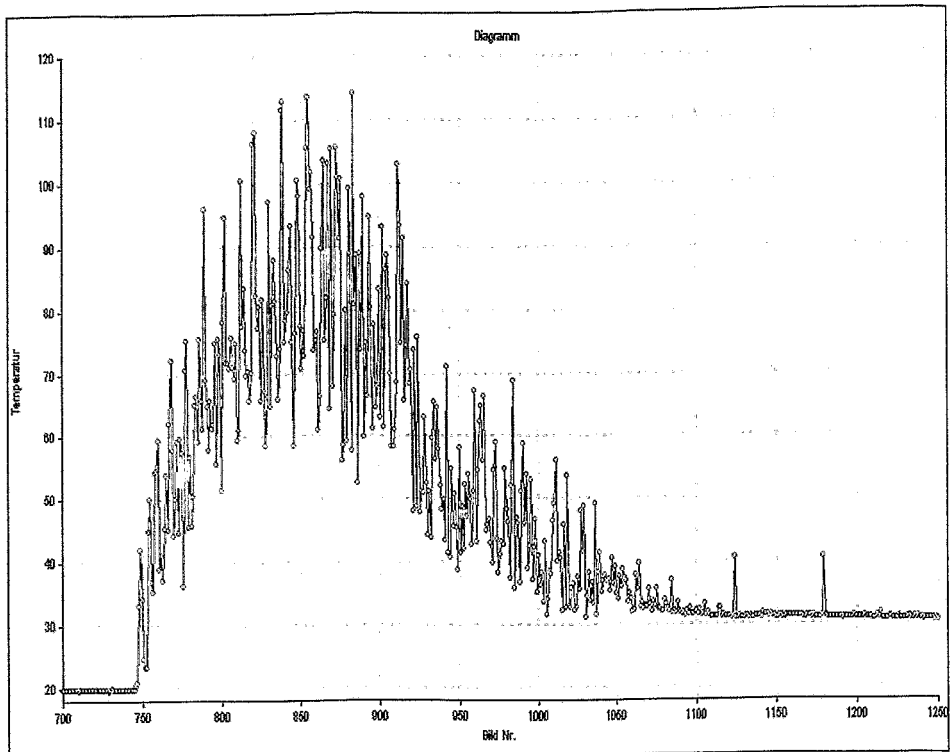


Abbildung 4: Temperatur-Zeit-Verlauf für die wärmsten Bildpunkte

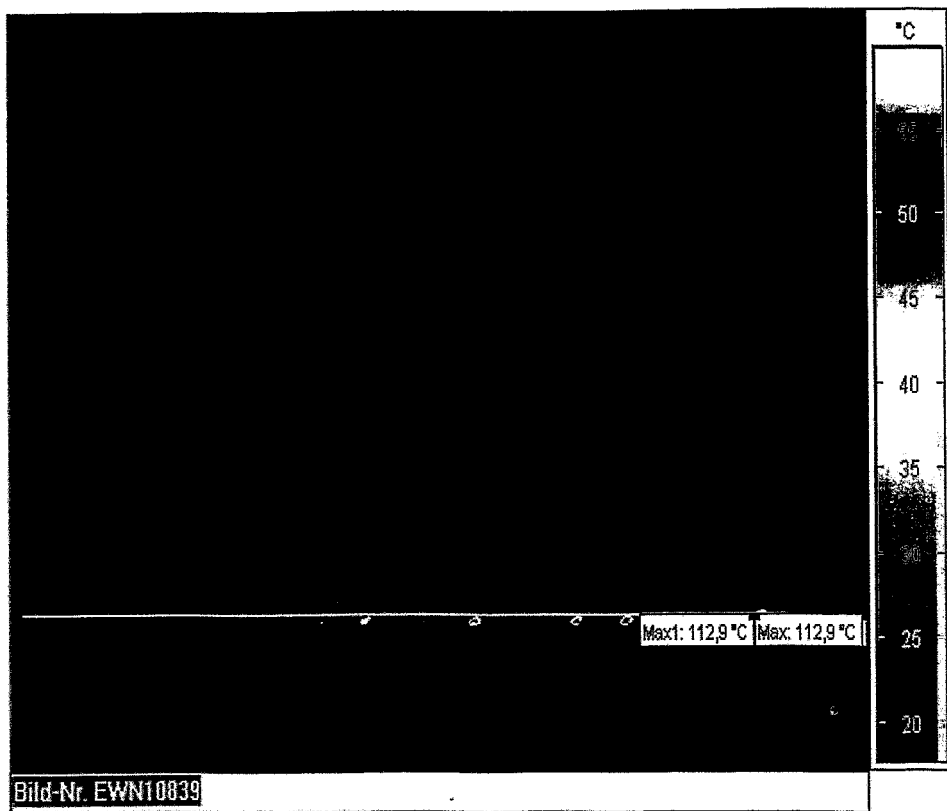


Abbildung 5: Thermografiebild für den wärmsten Zeitpunkt

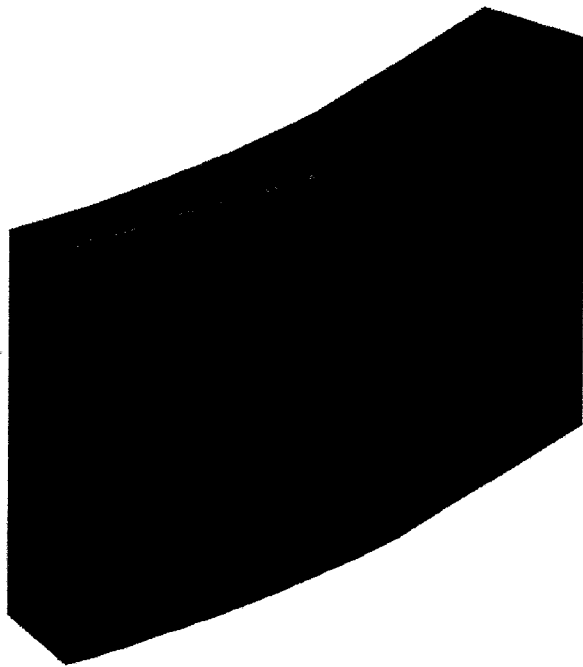


Abbildung 6: Wärmeeintrag im Modell

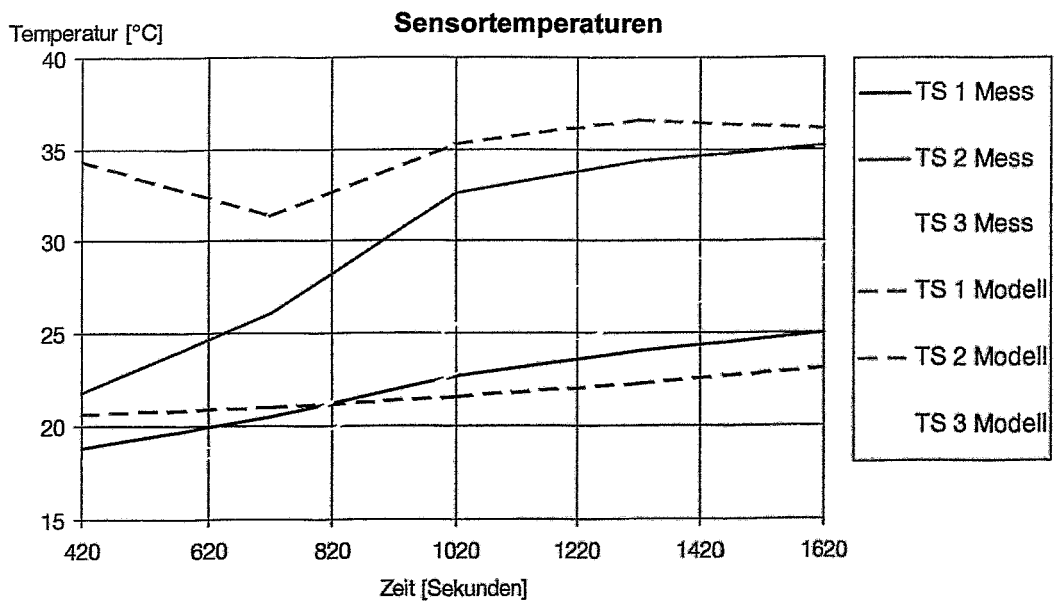
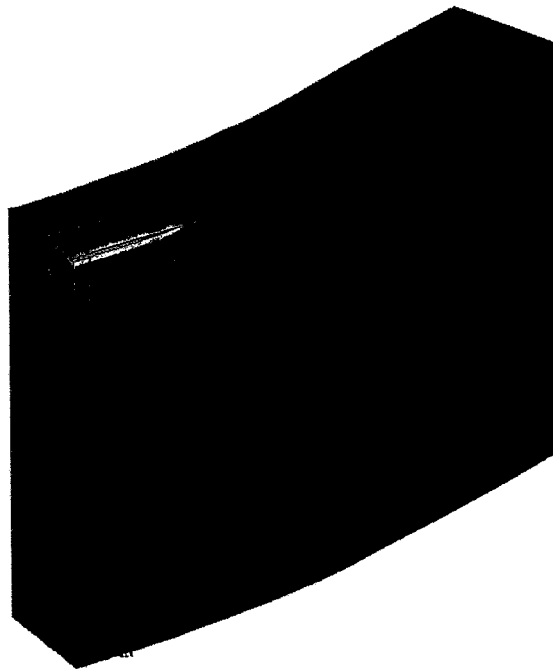


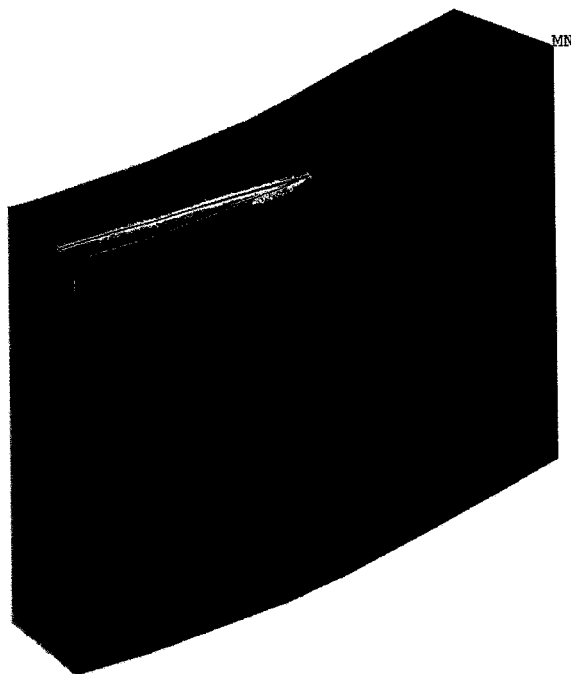
Abbildung 7: Temperatur-Zeit-Verlauf Messung und Rechnung



ANSYS 5.6
 NOV 1 2000
 13:47:52
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =9
 TIME=420
 TEMP
 TEPC=33.407
 SMN =17.804
 SMX =158.764

█	17.804
█	33.466
█	49.128
█	64.791
█	80.453
█	96.115
█	111.777
█	127.44
█	143.102
█	158.764

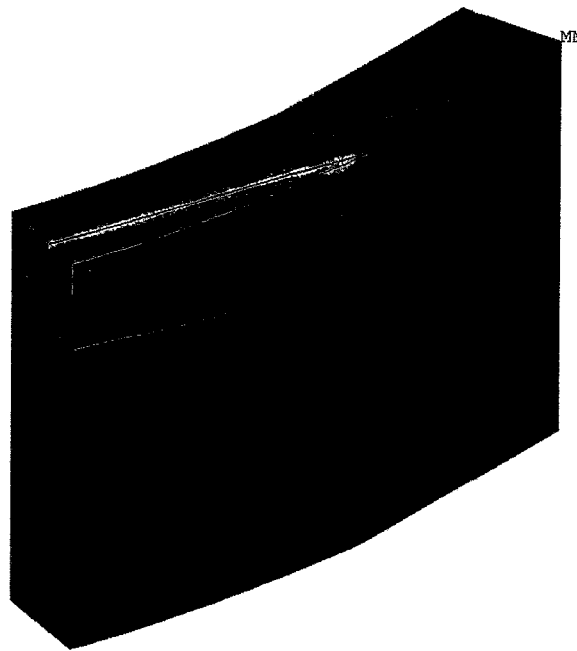
Abbildung 8: Temperaturverteilung bei Schnitttiefe 7 mm, Zeit 420 Sek., Farbskala in °C



ANSYS 5.6
 NOV 1 2000
 14:10:58
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =8
 TIME=720
 TEMP
 TEPC=27.119
 SMN =17.762
 SMX =75.089

█	17.762
█	24.132
█	30.502
█	36.871
█	43.241
█	49.611
█	55.98
█	62.35
█	68.72
█	75.089

Abbildung 9: Temperaturverteilung bei Schnitttiefe 32 mm, Zeit 720 Sek., Farbskala in °C



ANSYS 5.6
 NOV 1 2000
 14:17:18
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =8
 TIME=1020
 TEMP
 TEPC=25.368
 SMN =16.351
 SMX =61.942

■	16.351
■	21.416
■	26.482
■	31.548
■	36.614
■	41.679
■	46.745
■	51.811
■	56.876
■	61.942

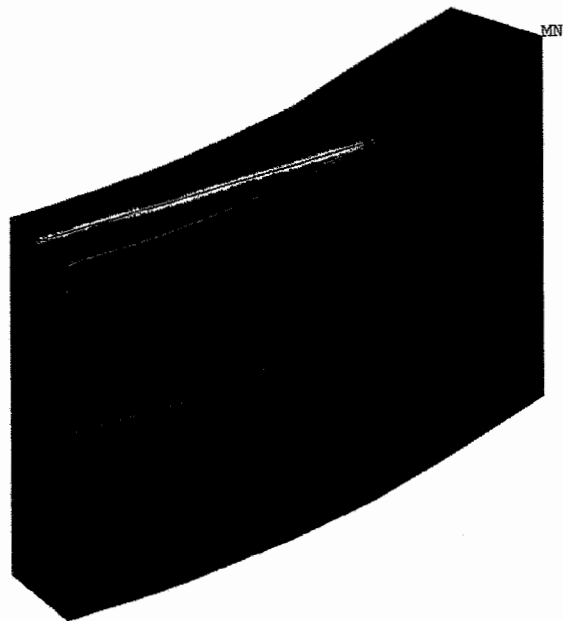
Abbildung 10: Temperaturverteilung bei Schnitttiefe 55 mm, Zeit 1020 Sek., Farbskala in °C



ANSYS 5.6
 NOV 1 2000
 14:22:30
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =8
 TIME=1320
 TEMP
 TEPC=28.164
 SMN =16.429
 SMX =64.874

■	16.429
■	21.812
■	27.194
■	32.577
■	37.96
■	43.343
■	48.726
■	54.109
■	59.491
■	64.874

Abbildung 11: Temperaturverteilung bei Schnitttiefe 70 mm, Zeit 1320 Sek., Farbskala in °C

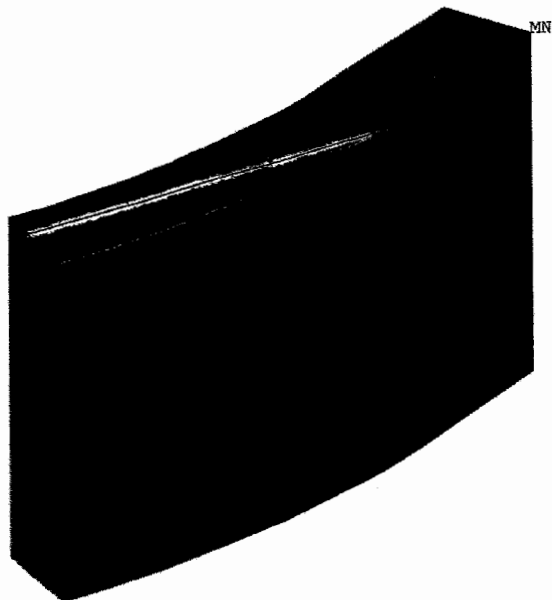


```

ANSYS 5.6
NOV 1 2000
14:30:00
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =8
TIME=1620
TEMP
TEPC=25.861
SMN =16.461
SMX =58.28
16.461
21.108
25.754
30.401
35.047
39.694
44.341
48.987
53.634
58.28

```

Abbildung 12: Temperaturverteilung bei Schnitttiefe 75 mm, Zeit 1620 Sek., Farbskala in °C

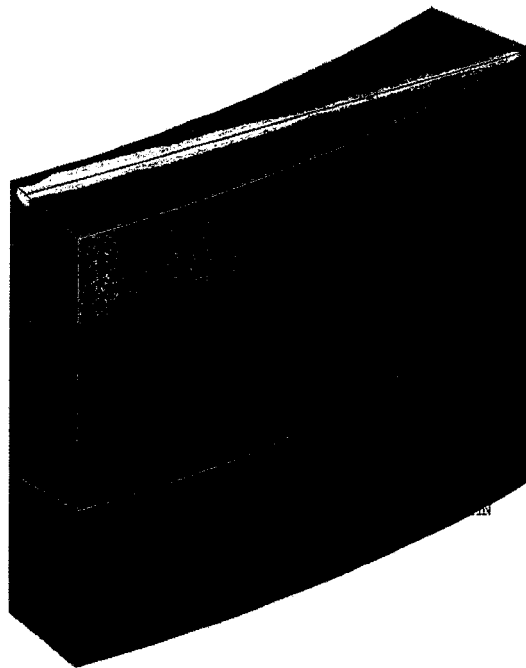


```

ANSYS 5.6
NOV 15 2000
10:32:58
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =8
TIME=2820
TEMP
TEPC=54.677
SMN =16.717
SMX =57.523
16.717
21.251
25.785
30.319
34.853
39.387
43.921
48.455
52.989
57.523

```

Abbildung 13: Temperaturverteilung bei Schnitttiefe 95 mm, Zeit 2820 Sek., Farbskala in °C

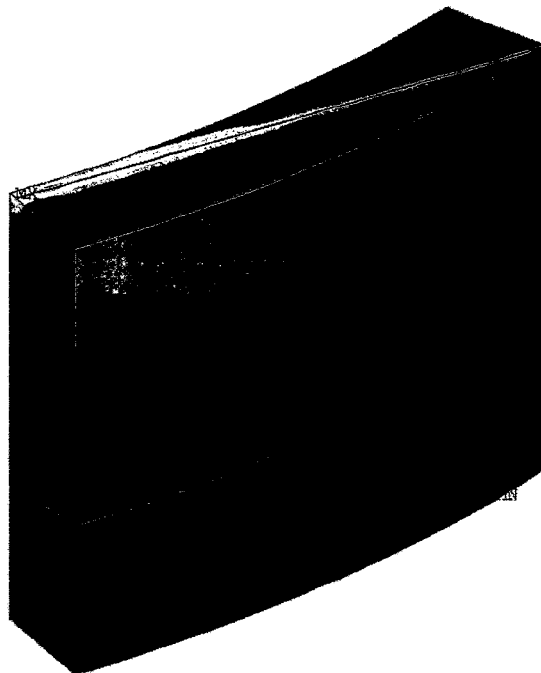


```

ANSYS 5.6
NOV 15 2000
10:38:53
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =8
TIME=4020
TEMP
TEPC=53.173
SMN =18.28
SMX =56.55
18.28
22.532
26.785
31.037
35.289
39.541
43.793
48.045
52.298
56.55

```

Abbildung 14: Temperaturverteilung bei Schnitttiefe 115 mm, Zeit 4020 Sek., Farbskala in °C

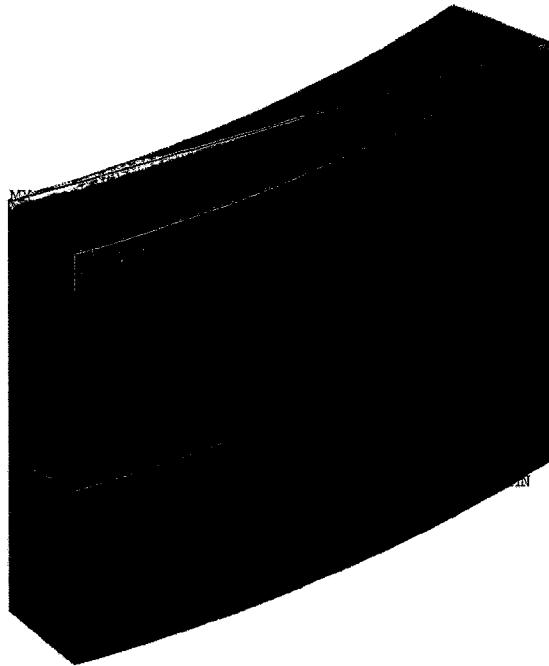


```

ANSYS 5.6
NOV 15 2000
10:43:11
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =8
TIME=5220
TEMP
TEPC=51.014
SMN =18.524
SMX =60.314
18.524
23.167
27.81
32.454
37.097
41.741
46.384
51.027
55.671
60.314

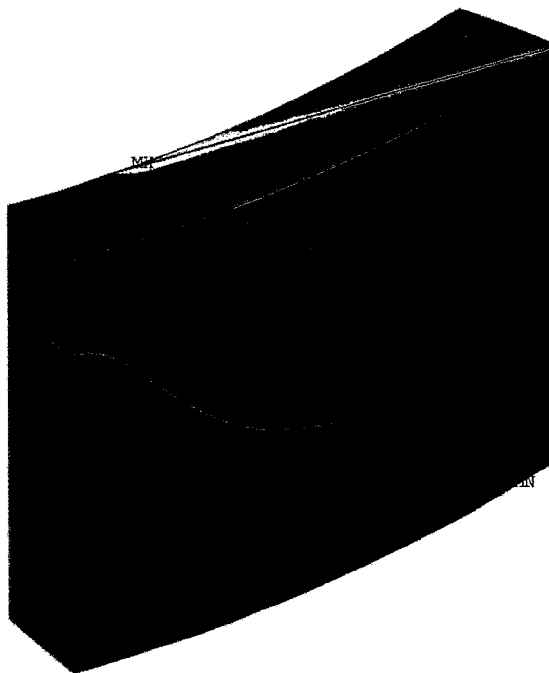
```

Abbildung 15: Temperaturverteilung bei Schnitttiefe 135 mm, Zeit 5220 Sek., Farbskala in °C



ANSYS 5.6
 NOV 15 2000
 10:47:39
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =8
 TIME=5820
 TEMP
 TEPC=56.824
 SMN =18.647
 SMX =70.382
 18.647
 24.396
 30.144
 35.892
 41.641
 47.389
 53.137
 58.886
 64.634
 70.382

Abbildung 16: Temperaturverteilung bei Schnitttiefe 145 mm, Zeit 5820 Sek., Farbskala in °C



ANSYS 5.6
 NOV 15 2000
 10:53:06
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =8
 TIME=6420
 TEMP
 TEPC=54.567
 SMN =18.812
 SMX =68.068
 18.812
 24.285
 29.758
 35.231
 40.704
 46.176
 51.649
 57.122
 62.595
 68.068

Abbildung 17: Temperaturverteilung bei Schnitttiefe 155 mm, Zeit 6420 Sek., Farbskala in °C



Abbildung 18: thermografisch bestimmte Temperaturverteilung auf der Außenwand bei Schnitttiefe 7 mm, Zeit 420 Sek.(aus Bild 782), Farbskala in °C



Abbildung 19: berechnete Temperaturverteilung auf der Außenwand bei Schnitttiefe 7 mm, Zeit 420 Sek., Farbskala in °C

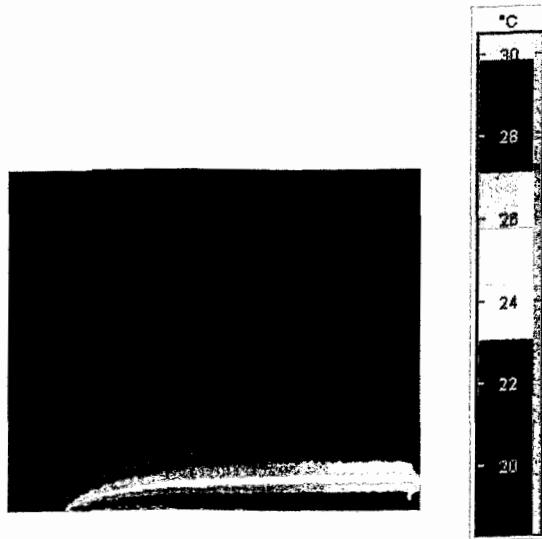


Abbildung 20: thermografisch bestimmte Temperaturverteilung auf der Außenwand bei Schnitttiefe 32 mm, Zeit 720 Sek.(aus Bild 932), Farbskala in °C

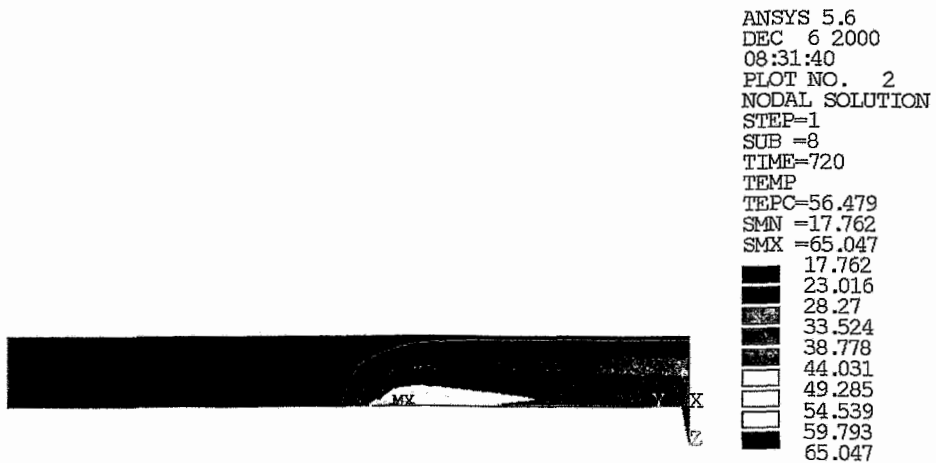


Abbildung 21: berechnete Temperaturverteilung auf der Außenwand bei Schnitttiefe 32 mm, Zeit 720 Sek., Farbskala in °C

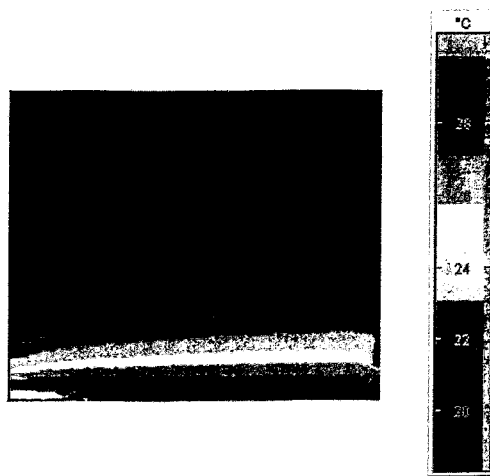


Abbildung 22: thermografisch bestimmte Temperaturverteilung auf der Außenwand bei Schnitttiefe 55 mm, Zeit 1020 Sek.(aus Bild 1082), Farbskala in °C

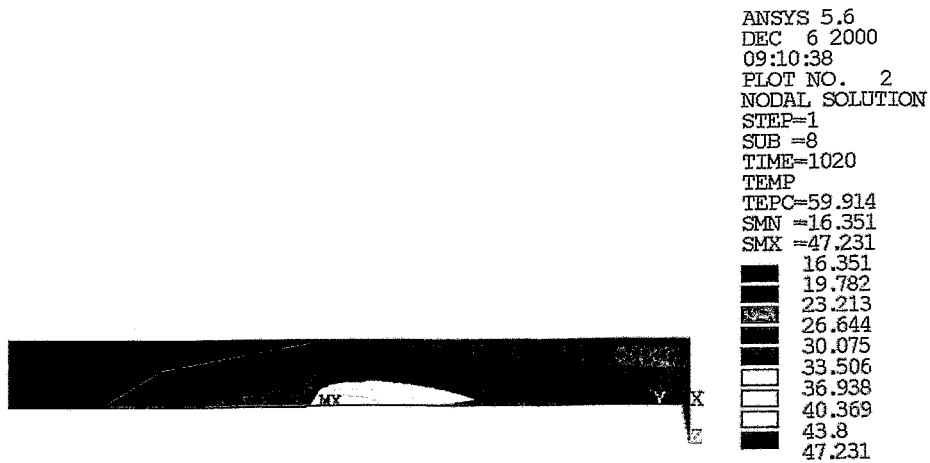


Abbildung 23: berechnete Temperaturverteilung auf der Außenwand bei Schnitttiefe 55 mm, Zeit 1020 Sek., Farbskala in °C

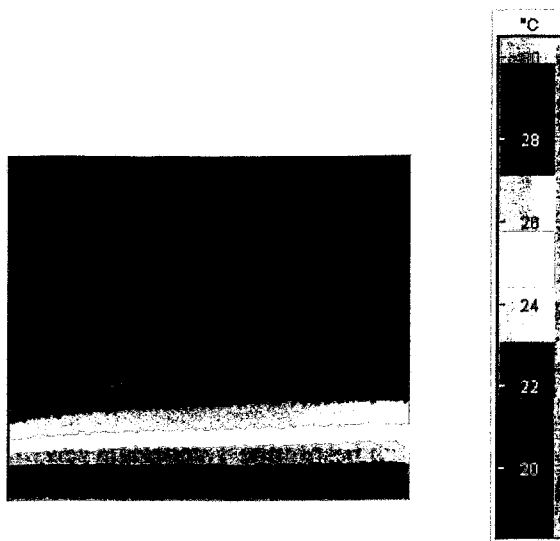


Abbildung 24: thermografisch bestimmte Temperaturverteilung auf der Außenwand bei Schnitttiefe 70 mm, Zeit 1320 Sek.(aus Bild 1232), Farbskala in °C

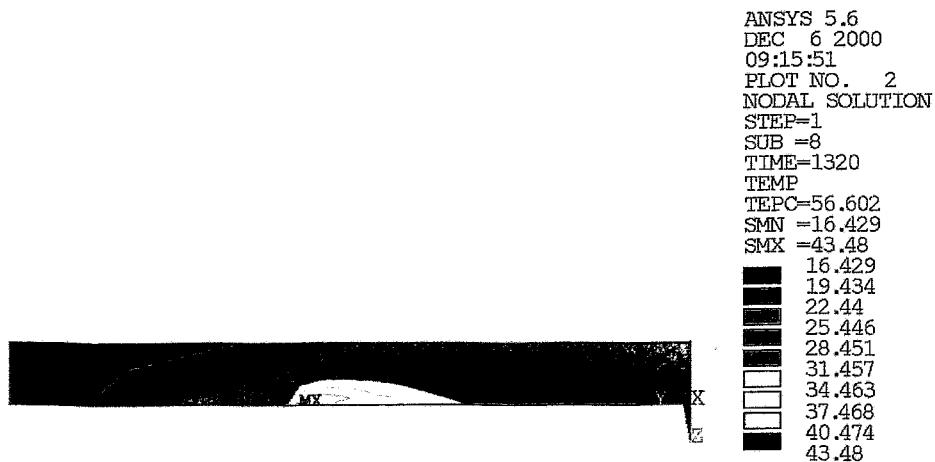


Abbildung 25: berechnete Temperaturverteilung auf der Außenwand bei Schnitttiefe 70 mm, Zeit 1320 Sek., Farbskala in °C

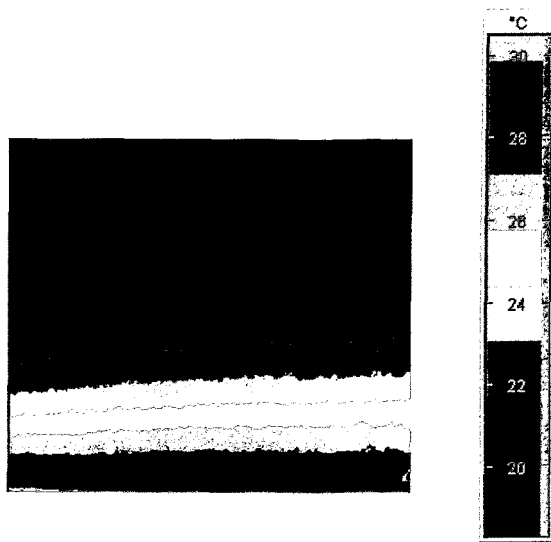


Abbildung 26: thermografisch bestimmte Temperaturverteilung auf der Außenwand bei Schnitttiefe 75 mm, Zeit 1620 Sek.(aus Bild 1382), Farbskala in °C

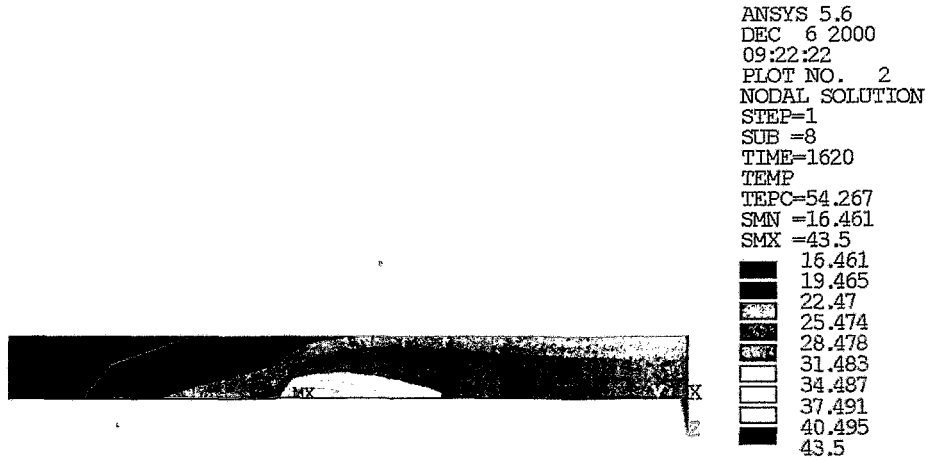


Abbildung 27: berechnete Temperaturverteilung auf der Außenwand bei Schnitttiefe 75 mm, Zeit 1620 Sek., Farbskala in °C