

6.2 Elektrostatische Simulation

Problemstellung: Gegeben ist das in Abbildung 6.3 dargestellte Gebiet mit Kante. Gesucht ist die Potenzialverteilung im Innern des Gebietes, die elektrische Feldstärke \vec{E} sowie deren Maximalwert.

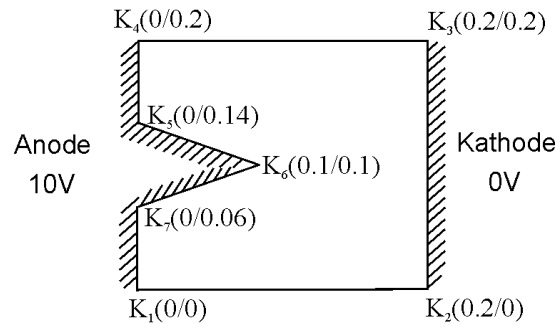


Abb. 6.3. Zwei-Elektroden-System mit Kante.

Preprocessor: Wir wählen für die Simulation den *Element Type Plane121*, welcher eine zweidimensionale, elektrostatische Berechnung ermöglicht. Das Berechnungsgebiet erzeugen wir, indem wir die in Abbildung 6.3 angegebenen charakteristischen Eckpunkte (*Keypoints*) spezifizieren. Aus den Keypoints 1, 2, 3 und 4 erzeugen wir ein Quadrat (Fläche A1), aus 5, 6, und 7 ein Dreieck (Fläche A2). Das Berechnungsgebiet ergibt sich dann aus der Subtraktion von Fläche A1 mit Fläche A2.

Wir öffnen den Preprocessor, legen zunächst den Element Type fest

```
/PREP7 Preprocessor↓
```

```
ET Element Type↓ Add↓
  ↳ Add↓ ↳ Electrostatic↓ 2D Quad 121 ok↓ close↓
```

und definieren als Materialkonstante die relative Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = 1$.

```
MP Material Props↓ Material Models↓
  ↳ Electromagnetics↓↓ Relat.Permittivity↓↓ Constant↓↓
  ↳ PERX = 1 eingegeben. ok↓ [x]↓
```

Nun legen wir die Keypoints fest, um darüber die Flächen A1 und A2 zu definieren:

```
K Modeling↓ Create↓ Keypoints↓ In Active CS↓
  ↳ Koordinaten eingeben: (jeweils mit Apply↓ bestätigen, zum Schluss ok↓ )
```

N	1	2	3	4	5	6	7
X	0	0.2	0.2	0	0	0.1	0
Y	0	0	0.2	0.2	0.14	0.1	0.06

Durch die Eingabe von KLIST in der Input-Zeile erhält man eine Liste aller definierten Keypoints mit den eingegebenen Koordinaten. Gegebenenfalls ruft man obigen Menüpunkt nochmals auf und überschreibt fälschlicherweise eingegebene Daten. Mit ↓ wird die Liste wieder geschlossen und wir definieren die Flächen:

```
Modeling↓ Areas↓ Arbitrary↓ Through KPs↓
... ↔ Für Fläche A1 die Keypoints 1, 2, 3, 4 anwählen Apply↓
... ↔ Für Fläche A2 die Keypoints 5, 6, 7 anwählen Apply↓ ok↓
```

Das Anwählen der Keypoints bedeutet entweder das Anklicken der Punkte über das \uparrow -Symbol im Graphik-Fenster (die angeklickten Keypoints werden eingekreist und die zugehörigen Verbindungslinien sichtbar gemacht) oder durch Spezifikation der Nummern der Keypoints in der vorgegebenen Eingabezeile. Alternativ hierzu kann man die Input-Zeile verwenden, um direkt den A-Befehl einzugeben:

```
A, 1,2,3,4 <return>
A, 5,6,7 <return>
```

Die zeilenweise Eingabe des A-Befehls muss durch das Drücken der Return-Taste bestätigt werden.

Um Flächen, Linien usw. farblich zu unterscheiden, kann man optional über das Utility-Menü PlotCtrls die Nummerierung inklusive der unterschiedlichen Färbung der Objekte aktivieren:

```
PlotCtrls ↓ Numbering ↔
Line (von off auf on setzen)
Area (von off auf on setzen) ok↓
```

Durch die Eingabe des ANSYS-Befehls APLOT in der Input-Zeile werden dann die Flächen nummeriert dargestellt.

Wir subtrahieren nun die Fläche A2 von der Fläche A1 und erhalten als Ergebnis die Fläche A3.

```
Modeling↓ Operate↓ Booleans↓ Subtract↓ Areas↓
↔ Fläche A1 anwählen Apply↓
↔ Fläche A2 anwählen Apply↓ ok↓
```

Bevor wir zur Vernetzung kommen, legen wir die Auflösung des Gitters in der Umgebung der Keypoints fest. Im Beispiel des Gebietes mit Kante erwarten wir, dass die Lösung nahe der Kante einen großen Gradienten besitzt, so dass wir hier eine höhere Auflösung wählen. Daher setzen wir die Maschenweite des Gitters so, dass sie bei allen Keypoints etwa 0.01 m beträgt; nur im Keypoint K6 wählen wir die Länge 0.002 m .

```
Meshing↓ Size Cntrl↓ ManualSize↓ Keypoints↓
... All KPs↓ ↔ 0.01 ok↓
... Picked KPs↓ ↔ Keypoint 6 anwählen Apply↓ ↔ Wert 0.002 eingeben ok↓
```

Mit

AMESH Meshing↓ Mesh↓ Areas↓ Free↓ ↔ Fläche 3 anwählen oder 3 spezifizieren ok↓

wird das Gitter generiert, wie es in Abb. 6.4 angegeben ist. Für die Spezifikation der Randbedingungen sind in der Abbildung auch die Liniennummern mit aufgenommen.

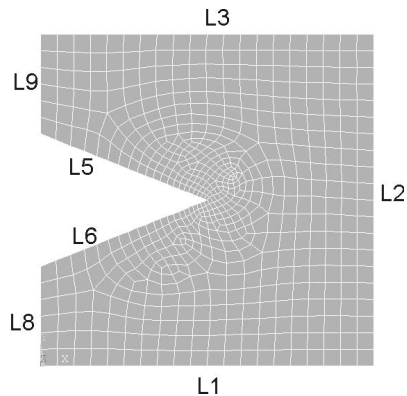


Abb. 6.4. Gitter für das Zwei-Elektroden-System.

Solution: Wir öffnen *Solution*, um zum Solution-Teil zu kommen. Hier legen wir die Randbedingungen fest: Am linken Rand setzen wir Dirichlet-Werte (10 Volt), am rechten Rand (0 Volt). Die obere und unteren Begrenzungslinien stellen Isolatoren dar; hier werden wir Neumann-Randbedingungen (Symmetrie) festlegen.

/SOL Solution↓

DL Define Loads↓ Apply↓ Electric↓ Boundary↓ Voltage↓ On Lines↓
 ... ↔ die Linien 8, 6, 5, 9 (links) anwählen Apply↓
 ... ↔ VOLT = 10 eingeben Apply↓
 ... ↔ die Linie 2 (rechts) anwählen Apply↓
 ... ↔ VOLT = 0 eingeben ok↓

Symmetrielinien müssen nicht explizit spezifiziert werden, denn bei einer elektrostatischen Simulation werden Linien ohne Angabe von Randbedingungen standardmäßig auf Symmetrie gesetzt. Der Vollständigkeit wegen legen wir die Symmetrie für den oberen und unteren Rand dennoch fest. Dazu ist es bequem, den Befehl DL direkt in die Input-Zeile einzugeben:

```
DL, 1, 3, symm <return>
DL, 3, 3, symm <return>
```

Anschließend wird die Lösung berechnet.

SOLVE Solve↓ Current LS↓

Postprocessor: Wir öffnen den *General Postprocessor*, um die auf den Knoten berechnete Lösung in Form von Äquipotenziallinien und das elektrische Feld in Form von Vektoren darzustellen. Die Ergebnisse der Rechnung sind in Abb. 6.5 zu sehen.

General Postproc ↓	/POST1
Plot Results ↓ Contour Plot ↓ Nodal Solu ↓ ok ↓ ... ↪ DOF Solution ↓ Electric potential ↓ ok ↓	PLNSOL
... ↪ Electric Field ↓ Electric field vector sum ↓ ok ↓	
Plot Results ↓ Vector Plot ↓ Predefined ↓ ... ↪ Elec field EF ↓ ok ↓	PLVECT

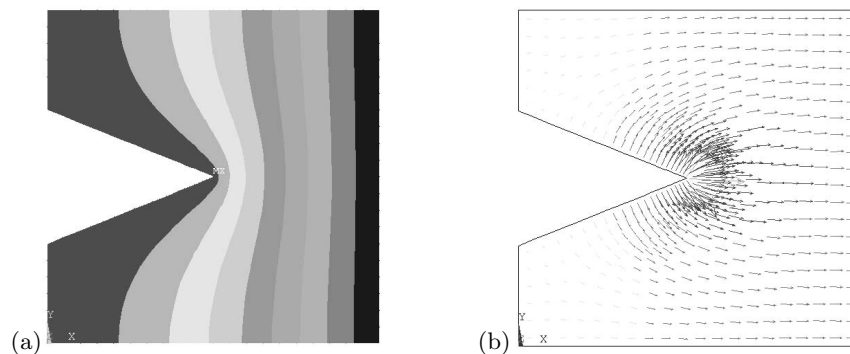


Abb. 6.5. ANSYS-Lösung des Problems: (a) Äquipotenziallinien, (b) elektrisches Feld.

Aus den Legenden der Darstellungen entnimmt man bei Abbildung 6.5 (a) die Werte der Äquipotenziallinien und aus (b) die Farbwerte für die Vektoren, die das elektrische Feld darstellen. Angegeben sind auch jeweils die Maximal- und Minimalwerte. Das maximale elektrische Feld beträgt 322 V/m . Hierbei muss beachtet werden, dass je nach gewählter Option des *Vector Plots* das elektrische Feld im Element oder auf den Knoten angegeben wird. Das maximale elektrische Feld beträgt auf den Knoten 396 V/m .

Hinweis: Durch die oben beschriebene Befehlsfolge hat man einen vollständigen Lauf von ANSYS realisiert. Möchte man nun weitere Simulationen mit geänderten Parametern durchführen, wie z.B. anderen Potenzialwerten am Rand oder einer Kante, die weniger ins Berechnungsgebiet hineinragt, oder mit einem anderen Dielektrikum ϵ_r , so muss man nicht mehr den gesamten Weg in ANSYS nochmals durchführen, sondern es genügt das Logfile (*file.log*) zu manipulieren. Denn ANSYS dokumentiert jeden Befehl im Logfile, das automatisch beim Start von ANSYS angelegt wird. Die Logfiles zu den grundlegenden ANSYS-Simulationen sind im Anhang C angegeben.

⚠ **Wichtig:** Man muss die beiden letzten Zeilen (*finish* und *exit*) im Logfile löschen und es unter einem anderen Namen abspeichern. Dann lässt es sich bei einem Neustart

über das Utility-Menü einlesen. Bei einem gewünschten Neustart können bereits durchgeführte Spezifikationen gelöscht werden.

/CLEAR >>

/INPUT (Datei Auswählen)

6.3 Thermische Simulation

Problemstellung: Gegeben ist das in Abschnitt 1.2.2 diskutierte thermische Problem, dessen geometrische Anordnung in Abbildung 6.6 (a) mit den physikalischen Umgebungsbedingungen dargestellt ist.

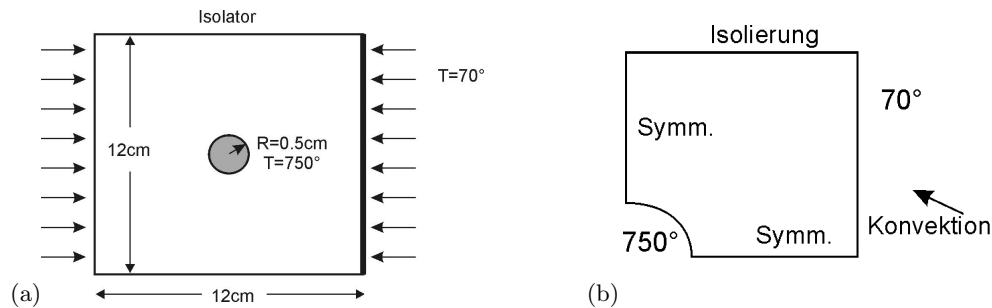


Abb. 6.6. Thermisches Problem.

Gesucht ist die Temperaturverteilung im Innern des Gebietes sowie das Temperaturprofil auf der sensitiven Schicht, das sich nach dem Erwärmungsprozess stationär ausgebildet (siehe Abschnitt 6.3.1). Gesucht ist weiterhin der zeitliche Verlauf der Erwärmung und die Zeit, die benötigt wird, bis sich das stationäre Profil einstellt (siehe Abschnitt 6.3.2).

Aufgrund der Symmetrien, die das Problem aufweist, wird nur ein Viertel des Gebietes als Berechnungsgebiet gewählt (siehe Abbildung 6.6 (b)) und mit ANSYS modelliert. Im Gegensatz zum Vorgehen beim elektrostatischen Problem werden wir im thermischen Fall das Berechnungsgebiet nicht über Keypoints definieren, sondern über vordefinierte Flächenelemente. Dabei ist zu beachten, dass durch die vordefinierten Flächen automatisch die zugehörigen Linien und Keypoints durch ANSYS definiert werden.

Da insbesondere bei der transienten Simulation die berechneten Daten auf mehrere Dateien verteilt abgespeichert werden, ist es übersichtlicher, wenn man den erzeugten Dateien einen gemeinsamen Namen gibt. Dies geschieht über das Utility-Menü

/FILNAM Name eingeben (z.B. tempTR)

6.3.1 Stationäre Simulation

Preprocessor: Durch die Wahl des Element Types **Plane77** wird eine zweidimensionale thermische Simulation festgelegt.

Preprocessor ↓ /PREP7

Element Typ ↓ Add ↓ ET
 ↪ Add ↓ ↪ Thermal Mass ↓ Solid ↓ 8node 77 ok ↓ close ↓

Als Materialkonstante wird die Wärmeleitfähigkeit des Materials $KXX = 46 \frac{W}{mK}$ eingegeben. Dies ist die Wärmeleitfähigkeit in x -Richtung. Möglich ist auch die Vorgabe von verschiedenen Materialkonstanten für die unterschiedlichen Raumrichtungen. Wird nur KXX spezifiziert, wird von einem isotropen Material ausgegangen. Bei den Materialparametern können temperaturabhängige Werte definiert werden. Dann ist c_i der Materialwert bei der vorgegebenen Temperatur T_i . Dazwischen wird ein linearer Verlauf angenommen. Gegebenenfalls muss dann das Feld *Add Temperature* im Folgenden aktiviert werden, wenn man eine solche temperaturabhängige Leitfähigkeit spezifizieren möchte.

Material Props ↓ Material Models ↓ MP
 ↪ Thermal ↓↓ Conductivity ↓↓ Isotropic ↓↓
 ↪ KXX = 46 eingeben ok ↓ ↓

Durch

Modeling ↓ Create ↓ Areas ↓ Rectangle ↓ By Dimensions ↓ RECTNG
 ↪ Eingabe der Koordinaten $x1 = 0, x2 = 0.06$ und $y1 = 0, y2 = 0.06$ ok ↓

öffnet sich ein Fenster, in das die Werte des Rechtecks eingegeben werden. Analog öffnet sich zur Erstellung des Kreises im Ursprung ein entsprechendes Fenster, in dem innerer und äußerer Radius sowie zwei Winkel spezifiziert werden, um ein Kreisabschnitt zu definieren.

... Circle ↓ By Dimensions ↓ PCIRC
 ↪ RAD1=0.005 ok ↓

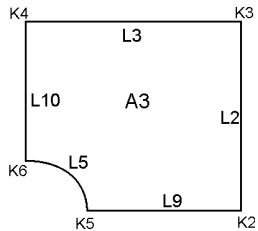
Hinweis: Ist der Kreismittelpunkt nicht im Ursprung, dann verschiebt man zuerst das aktive Koordinatensystem (*WorkPlane*) zum Kreismittelpunkt, definiert nun einen Kreis und verschiebt anschließend das Koordinatensystem wieder zurück. Hierzu verwendet man die Befehle aus dem Utility-Menü .

Um Flächen, Linien usw. farblich zu unterscheiden kann man optional über das Utility-Menü die Nummerierung inklusive der unterschiedlichen Färbung der Objekte aktivieren:

PlotCtrls ↓ Numbering ↪ Area (von off auf on setzen) ok ↓

Wir subtrahieren von der Fläche A1 die Fläche A2.

ASBA Modeling↓ Operate↓ Booleans↓ Subtract↓ Areas↓
 ↳ Fläche A1 anwählen Apply↓
 ↳ Fläche A2 anwählen Apply↓ ok↓



Das Ergebnis der Subtraktion ist in der nebenstehenden Abbildung gezeigt. Für die weiteren Spezifikationen benötigen wir die Nummern der Keypoints und der Linien, die in der Abbildung angegeben sind. Wir legen manuell die Gitterfeinheit fest, indem wir alle Keypoints mit dem Wert 0.006 belegen. Nur in den Keypoints 5 und 6, die den Anfang und das Ende des inneren Segments definieren, wählen wir ein feineres Gitter. Um diese beiden

Keypoints anzuwählen, nehmen wir den interaktiven Pick-Modus, bei dem wir die Punkte über das Symbol ↑ auf der Benutzeroberfläche anklicken.

KESIZE Meshing↓ Size Cntrls↓ Manuel Size↓ Keypoints↓
 ... All KP↓ ↳ 0.006 ok↓
 ... Picked KP↓ Keypoint 5 anwählen Apply↓ Wert 0.001 eingeben ok↓
 ... Picked KP↓ Keypoint 6 anwählen Apply↓ Wert 0.0005 eingeben ok↓

AMESH Meshing↓ Mesh↓ Areas↓ Free↓ Fläche 3 anwählen ok↓

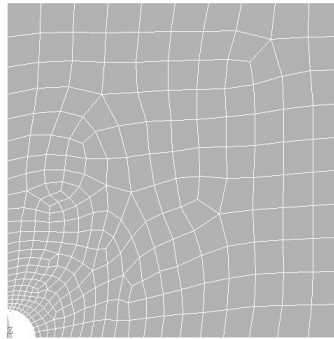


Abb. 6.7. Gitter für das thermische Problem.

Man erhält ein Berechnungsgitter, das in Abbildung 6.7 graphisch dargestellt ist.

Solution: Wir öffnen *Solution* und spezifizieren die Randbedingungen. Die linke, untere und obere Randlinien stellen Symmetrielinien dar: links und unten, da wir bei der Modellierung des Gebiets schon die Eigenschaft der Symmetrie der Lösung ausgenutzt haben; oben, da hier der Körper isoliert ist. Wird bei einer thermischen Simulation auf einem Rand keine Randbedingung explizit festgelegt, dann wird automatisch in der Rechnung Symmetrie angenommen. Am rechten Rand wird der Körper gekühlt. Daher muss an dieser Linie die Konvektion spezifiziert werden, indem der Wert der Außentemperatur (*Bulk Temp*) sowie der Wärmeübergangskoeffizient (*Film Coef*)

angegeben werden. Wir wählen für einen stark umströmten Körper den Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha = 290 \frac{W}{m^2 K}$.

```
Solution ↓ /SOL
```

```
Define Loads ↓ Apply ↓ Thermal ↓ SFL
... Convection ↓ On Lines ↓
  ↳ L2 anwählen Apply ↓
  ↳ VAL1 (Übergangskoeff.) = 290 und VAL2! (Umgebungstemp.) = 70 eingeben ok ↓
```

Auf der Kreislinie wird die konstante Temperatur $750^\circ C$ angenommen. Da die Endpunkte ebenfalls diesen Wert erhalten, wird die Option (*KEXPND*) auf *yes* gesetzt.

```
... Temperature ↓ On Lines ↓ L5 anwählen Apply ↓ DL
  ↳ TEMP = 750 eingeben und KEXPND auf yes setzen ok ↓
```

Damit sind die relevanten Randbedingungen gesetzt und die Lösung wird auf den Knoten berechnet

```
Solve ↓ Current LS ↓ SOLVE
```

Postprocessor: Wir öffnen den General Postprocessor, um die auf den Knoten berechnete Lösung in Form von Isothermen (= Linien gleicher Temperatur) darzustellen. Die Ergebnisse der Rechnung sind in Abbildung 6.11 zu sehen.

```
General Postproc ↓ /POST1
```

```
Plot Results ↓ Contour Plot ↓ Nodal Solu ↓ PLNSOL
... ↳ DOF Solution ↓ Nodal Temperature ok ↓
```

```
... ↳ DOF Solution ↓ Thermal Gradient ↓ Thermal gradient vector sum ok ↓
```

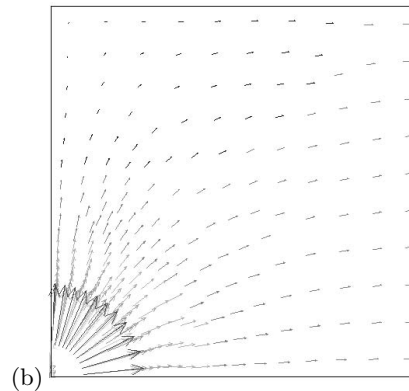
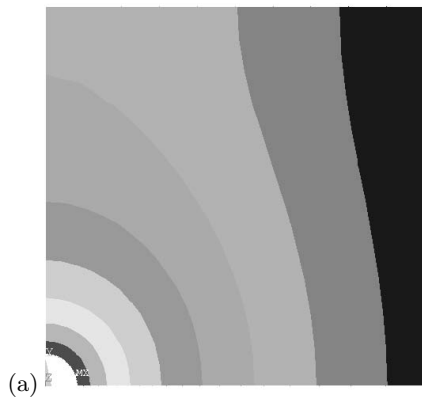


Abb. 6.8. ANSYS-Lösung des Problems: (a) Temperaturverlauf, (b) thermischer Fluss.


```
PLVECT Plot Results↓ Vector Plot↓ Predefined↓
... ↪ Thermal flux TF ok↓
```

Um den Temperaturverlauf auf der sensitiven Schicht (rechte Randlinie) zu erhalten, legen wir einen Pfad entlang dieser Linie fest, indem wir den Anfangs- und Endpunkt anwählen (PATH) sowie einen Pfadnamen angeben. Wir legen die zu interpolierende Größe fest (PDEF) und zeichnen anschließend den Pfad (PLPATH):

```
PATH Path Operations↓
PPATH ... Define Path↓ By Nodes↓
      ↪ Anfangs- und Endpunkt von Linie L2 anwählen Apply↓
      ↪ Name des Pfads festlegen (z.B. Weg1) ok↓
PDEF ... Map onto Path↓
      ↪ Pfadname eingeben, gewünschte Größe (z.B. Temperatur) wählen ok↓
PLPATH ... Plot Path Item↓ On Graph↓ ↪ Weg1 angeben ok↓
```

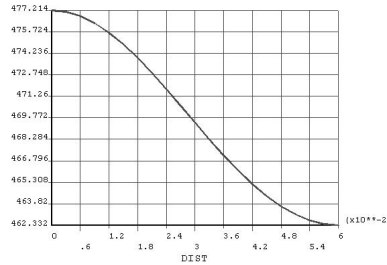


Abb. 6.9. Temperaturverlauf auf der sensitiven Schicht.

6.3.2 Zeitabhängige Simulation

Preprocessor: Bei der zeitabhängigen (transienten) Simulation ist das Vorgehen im Preprocessor wie im stationären Fall, mit der Ausnahme, dass nun neben der Wärmeleitfähigkeit des Materials $KXX = 46 \frac{W}{m \cdot K}$ auch die spezifische Wärmekapazität $C = 420 \frac{J}{kg \cdot K}$ und die Dichte $DENS = 7850 \frac{kg}{m^3}$ als Materialkonstanten angegeben werden müssen.

```
MP Propressor↓ Material Props↓ Material Models↓ ↪ Thermal↓↓
... Conductivity↓↓ Isotropic↓↓ ↪ KXX = 46 eingeben ok↓
... Specific Heat↓↓ ↪ C = 420 eingeben ok↓
... Density↓↓ ↪ DENS = 7850 eingeben ok↓
```

Solution: Wir beschreiben im Folgenden nur die Änderungen, die sich gegenüber der statischen Simulation ergeben. Die Diskussion und die Spezifikation der Randbedingungen werden wie im stationären Fall vorgenommen. Bei der transienten Simulation gehen wir davon aus, dass sich der Körper auf 20°C befindet und er sich unter dem Einfluss des auf 750°C befindlichen Heizungsdrahtes mit der Zeit erwärmt.