

Diplomarbeit an der HTL Mödling,
Kolleg für Energieplanung,
Gebäude- und Kältetechnik

Lehrgang 4 AKMIE Jahrgang 2007/2008

**Berechnung und Untersuchung eines
Schienenheizungssystems der Fa. HSA
Scharrenbroich**

Team Diplomanden:

Roland Ebner (Berechnung, Simulation)

Mario Mrkonjic (Wirtschaftlichkeit, Organisation)

Gernot Sammer (CAD, Praktische Arbeiten)

Interne Projektbetreuer:

Prof. Dipl. Ing. Michael Pichler

Fachoberlehrer Josef Trummer

Externer Projektbetreuer:

Fa. HSA Scharrenbroich GmbH, A-2000 Stockerau

Kurzbeschreibung:

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, ein vorgegebenes Konzept für eine Schienenheizung der Firma HSA Scharrenbroich detailliert durch Prüfstandversuche und sowohl technischen als auch wirtschaftlichen Berechnungen zu untersuchen. Diese umfangreiche Dokumentation soll unserem Kooperationspartner als technisches Prospekt für potentielle Neukunden (Gleisbetreiber) dienen.

Derzeit werden die Schienen im Bereich der Weichenanlagen im Winter zum Großteil manuell von Schnee und Eis befreit, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Diese Aufwände können in Zukunft durch eine automatische Heizung wegfallen. Hierzu wurde von der Fa. HSA Scharrenbroich ein Aluminiumheizkörper entwickelt, welcher seitlich im Bereich des Schienenstegs montiert wird. Die erforderlichen Wärmemengen können einerseits mittels Warmwasserheizung oder andererseits mittels Elektroheizstäben in das Wärmeabgabesystem eingebracht werden.

Für die diversen Versuchsreihen wurde zuerst ein zur Verfügung gestellter Prüfstand für den Betrieb mit Thermoöl verwendet, welcher in Folge demontiert und teilweise für den Betrieb mit Wasser-Glycol-Gemisch weiterverwendet wurde. Hierfür wurde der Schienenheizkörper über eine Gastherme versorgt. Für den elektrischen Testbetrieb wurde ein eigener Schaltschrank gefertigt. Die letzten beiden Messungen wurden mit einem 4-Kanal Datenlogger aufgezeichnet.

Zur Berechnung der thermischen Leitwerte wurde uns von Herrn Tomasz Kornicki die Software Antherm® zur Verfügung gestellt, ein Bauphysikprogramm, welches unter anderem die Berechnung von dreidimensionalen Wärmebrücken immens vereinfacht.

1. Berechnung mit Antherm®

1.1. Allgemeines

Das thermische Verhalten sowie die Leitwerte und damit der Leistungsbedarf pro Meter Schiene wurden mit der Bauphysiksoftware Antherm® berechnet. Obwohl dieses Programm grundsätzlich zur Verwendung bei Wärmebrückensimulationen im Hochbau konzipiert ist, konnte es in unserem speziellen Fall exzellent für oben genannte Berechnungen eingesetzt werden, da auch die Ermittlung der Wärmeströme durch ein Schienenprofil komplexe numerische Verfahren benötigt.

Um nun das Schienenprofil samt Heizkörper in Antherm® zu importieren, musste es zuvor in kleine rechteckige Teilelemente unterteilt werden, da das Programm in der aktuellen Version 3 noch keine Rundungen berechnen kann.

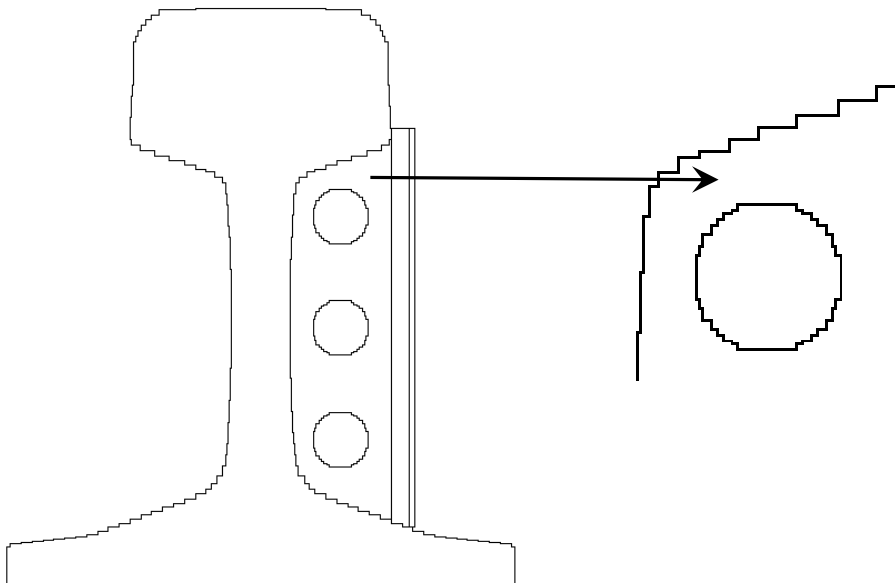


Bild 1.1a: CAD Zeichnung des Schienenprofils mit rechteckig abgestuften Rundungen

Die einzelnen Bauteile (Schiene, Aluminiumkörper, Isolierung, usw.) mussten für eine optimale Kompatibilität jeweils in geschlossene Polygonzüge konvertiert werden. Jedes dadurch entstandene Objekt erhielt danach eine eindeutige Layerbezeichnung, da diese von Antherm® beim Dateiimport als Baustoff erkannt werden.

Anschließend wurde das Profil in ACAD im Koordinatensystem zentriert und in eine DXF-Datei (Drawing Interchange Format) der Version ACAD R12/LT2 exportiert.

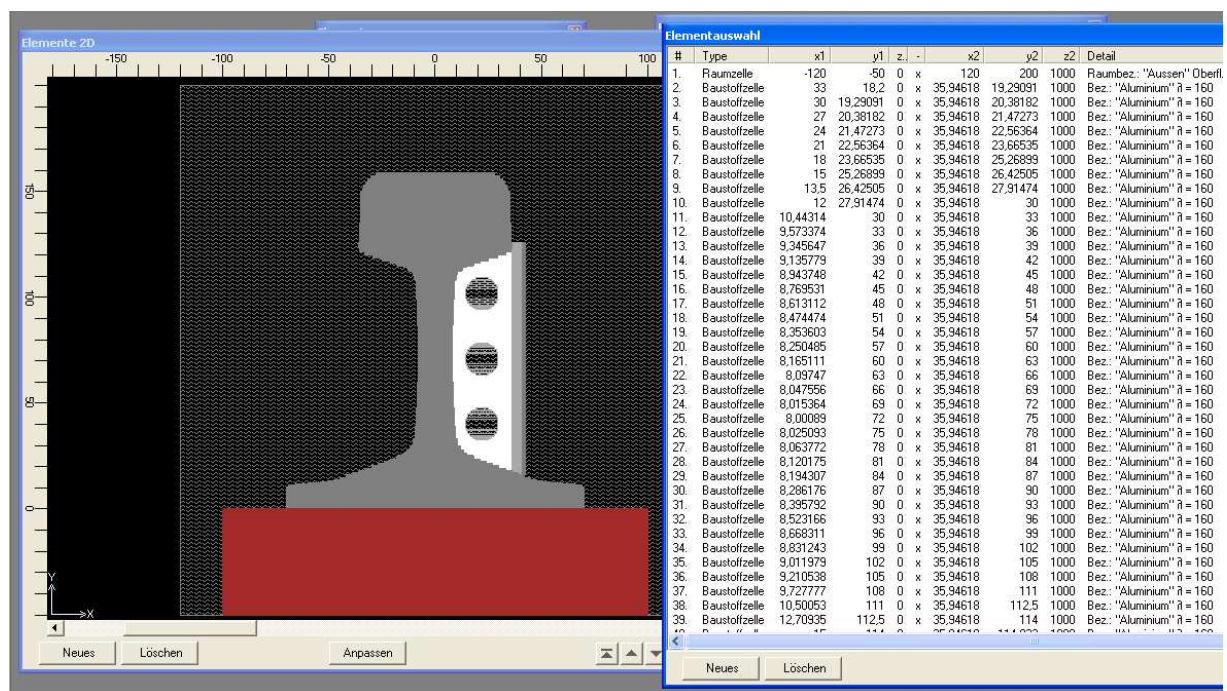
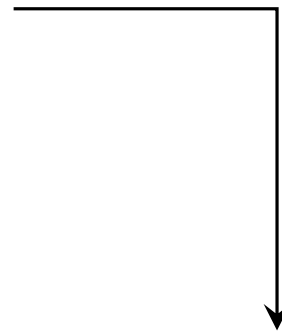
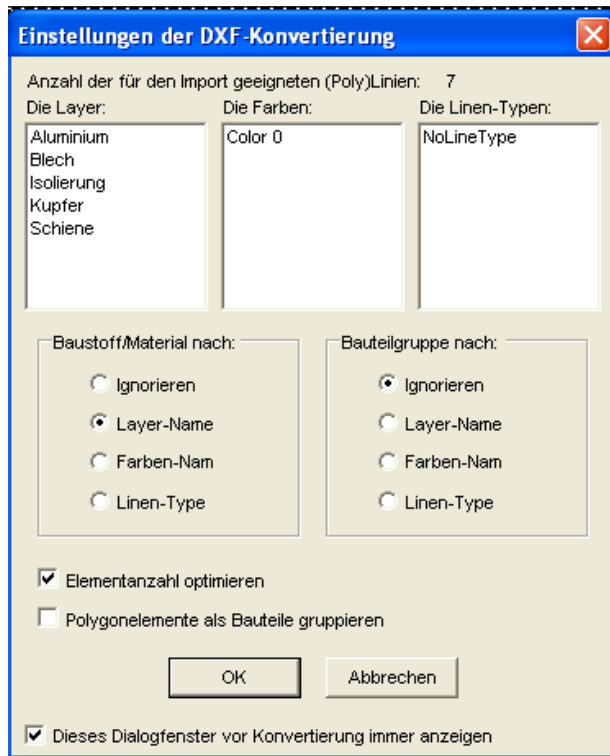
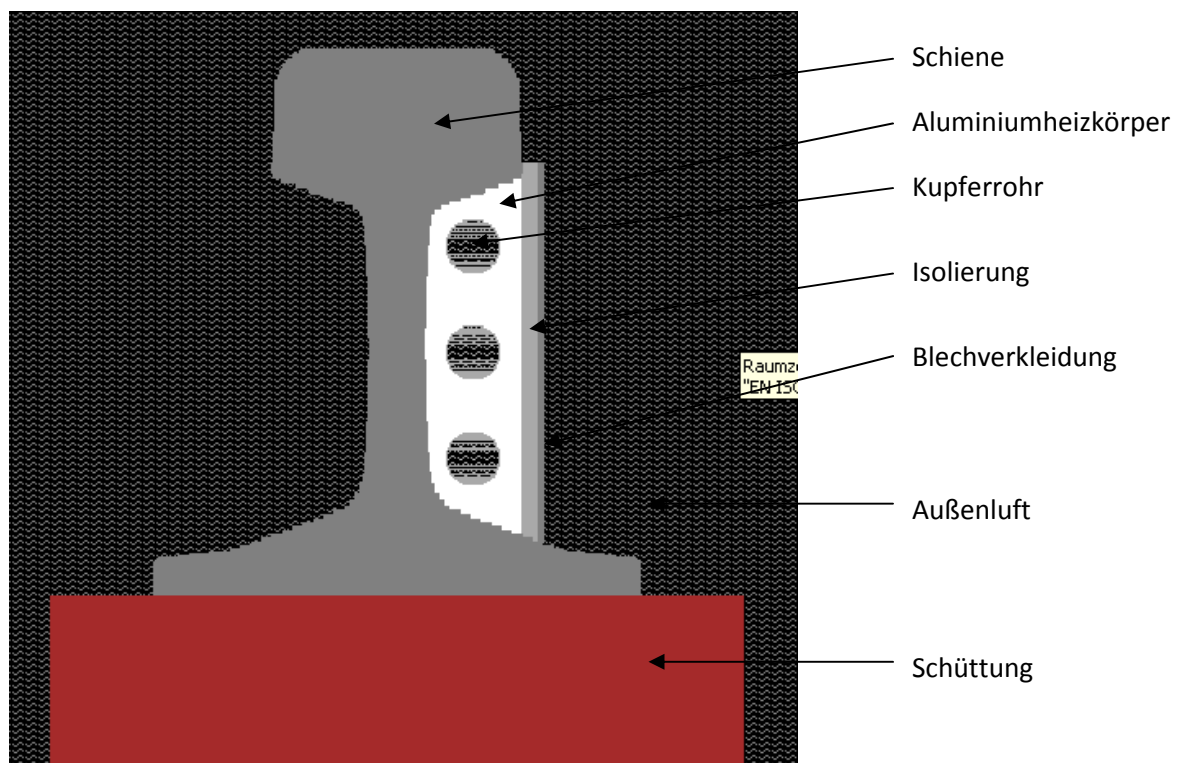
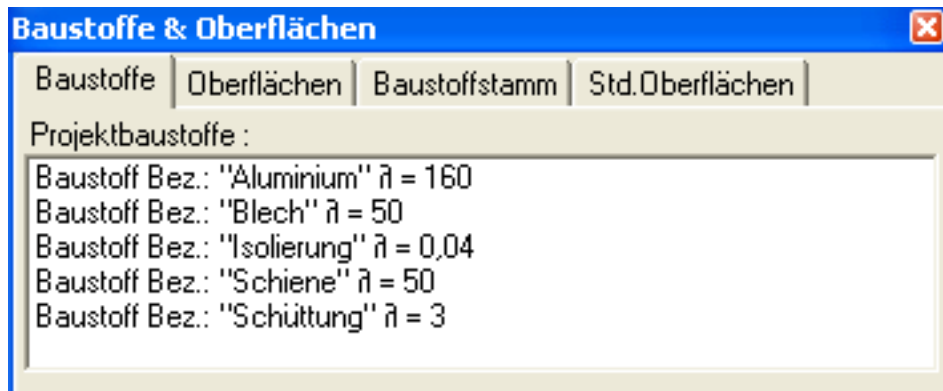


Bild 1.1b: Dateiimport in Antherm® und Definition der Baustoff- und Raumbedingungen

Wie aus Bild 1.1b ersichtlich musste weiters den einzelnen Elementen ein Baustoff mit zugehörigem λ -Wert zugeordnet werden. Das die Konstruktion umgebende Rechteck wurde als **Außenbereich** definiert, wobei ein aus dem Hochbau üblicher Wärmeübergangskoeffizient α von **25 W/m²K** angenommen wurde. Als **Untergrund**

wurde sowohl für die „Wasservariante“ als auch für die „Elektrovariante“ eine **Schüttung mit $\lambda = 3 \text{ W/mK}$ angenommen.**

Folgende Werte wurden für beide Varianten den Bauteilen zugeordnet:



1.2. Auswertung der Variante „Wasser“

Zu diesem Zweck wurde die entsprechende Konstruktion mit den eingelegten Heißwasserrohren in Antherm® importiert und wie zuvor beschrieben definiert.

Des Weiteren wurden die drei Kupferrohre als Räume definiert, nämlich:

- Oberes Rohr = Vorlauf
- Mittleres Rohr = Rücklauf
- Unteres Rohr = Vorlauf

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wurde dazu wie folgt ermittelt:

(Quellen für die verwendeten Formeln: Skriptum Mechanik)

Annahmen bzw. Begebenheiten:

- Geschwindigkeit im Rohr: $w = 1 \text{ m/s}$ (üblicher, wirtschaftlicher Grenzwert für Heizungsanlagen)
- Innendurchmesser der Kupferrohre: $d_i = 13 \text{ mm}$
- Wassertemperatur 60°C

Berechnung der Reynoldszahl (Re):

$$Re = \frac{w * L}{\nu} = \frac{1 \frac{m}{s} * 0,013m}{0,471 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 27600$$

w...Geschwindigkeit [m/s]

L...äquivalente Länge = d_i [m]

ν ...kinematische Zähigkeit [m²/s]

Stoffwerte ν (Eigenschaften bei $p = 0,1 \text{ MPa}$)

Stoff	t in $^\circ\text{C}$	ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	c_p in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	λ in $\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	$10^3\beta$ in $\frac{1}{\text{K}}$	$10^6\eta$ in $\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$	$10^6\nu$ in $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$10^6\alpha$ in $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr
Wasser	0	999,8	4,217	0,569	-0,0852	1750	1,75	0,135	13,0
	10	999,8	4,192	0,587	+0,0823	1300	1,30	0,140	9,28
	20	998,4	4,182	0,604	0,2067	1000	1,00	0,144	6,94
	30	995,8	4,178	0,618	0,3056	797	0,800	0,148	5,39
	40	992,3	4,179	0,632	0,3890	651	0,656	0,153	4,30
	50	988,1	4,181	0,643	0,4623	544	0,551	0,156	3,54
	60	983,2	4,185	0,654	0,5288	463	0,471	0,159	2,96
	70	977,7	4,190	0,662	0,5900	400	0,409	0,162	2,53
	80	971,6	4,196	0,670	0,6473	351	0,361	0,164	2,20
	90	965,2	4,205	0,676	0,7018	311	0,322	0,166	1,94
	*100	958,1	4,216	0,681	0,752	279	0,291	0,168	1,73
	*140	925,8	4,285	0,688	0,975	195	0,211	0,174	1,21
	*180	886,9	4,408	0,677	1,233	149	0,168	0,173	0,97
	*220	840,3	4,613	0,648	1,597	122	0,145	0,168	0,864
	*260	784,0	4,983	0,603	2,21	103	0,131	0,155	0,848
	*300	712,2	5,762	0,541	3,46	90,1	0,127	0,132	0,958
	*340	610,2	8,233	0,460	8,25	75,4	0,124	0,092	1,35
	*374	315,5		0,238		45,0	0,143	0	

Tabelle 1.2a: Stoffwerte von Wasser bei $p=0,1 \text{ MPa}$

(Quelle: Skriptum Mechanik)

Prantzahl (Pr) aus Tabelle 1.2a:

$$Pr = 2,96$$

Daraus lässt sich nun die Nusseltzahl (Nu) berechnen:

Die Nusseltzahl für Flüssigkeiten bei $Re > 10000$ und $0,7 < Pr < 100$ errechnet sich mit:

$$Nu = 0,024 * Re^{0,8} * Pr^{0,37} = 0,024 * 27600^{0,8} * 2,96^{0,37} = 128$$

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α_K errechnet sich damit zu:

$$Nu = \frac{\alpha_K * L}{\lambda}$$

$$\alpha_K = \frac{Nu * \lambda}{L} = \frac{128 * 0,654 \frac{W}{mK}}{0,013m} = 6439,38 \frac{W}{m^2K}$$

α_K ...konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]

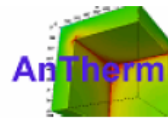
L...äquivalente Länge = di [m]

λ ...spezifische Leitfähigkeit [W/mK]

Dieser Wert wurde anschließend in Antherm® übernommen und somit sind alle erforderlichen Eingaben für die Leitwertberechnung vorhanden.

Folgender Leitwertbericht wird ausgegeben:

Diplomarbeit Roland Ebner
 HTL-Mödling/DI Michael Pichler
 Copyright (c) T.Kornicki, Dienstleistungen in EDV und IT
 email: tkornicki@chello.at



19.06.2008
 AnTherm (Code WALTER)
 Version 3.61 2008.05.28
 (c)T.Kornicki,all rights reserved

D:\Kolleg\Diplomarbeit\Pläne\Schienenprofil 54 E 1 feiner Raster 01.dxf
 Datei: D:\Kolleg\Diplomarbeit\Antherm\Schienenprofil 54 E 1 feiner Raster Wasser 06 08.antherm

Anzahl der bilanzierten Zellen: 16734

Thermische Leitwerte [W / K]

Raum/Raum	Aussen	mittleres	oberes Rohr	unteres Rohr
Aussen		2,582653	4,361325	5,779531
mittleres Rohr	2,583794		75,922448	75,643849
oberes Rohr	4,365322	75,924674		16,527296
unteres Rohr	5,782179	75,649243	16,549650	

Genauigkeitsangaben

	Schließfehler [W / K]	Leitwert Summe [W / K]	Leitwertbezogener Schließfehler
Aussen	7,78632e-003	12,731295	6,11589e-004
mittleres Rohr	6,47844e-003	154,156570	4,20251e-005
oberes Rohr	1,61312e-002	96,833423	1,66587e-004
unteres Rohr	-3,03959e-002	97,950676	-3,10319e-004

Aussage des obigen Berichts:

Da die Leitwerte der Rohre zueinander im System nicht berücksichtigt werden, interessiert nur die vorgehobene Spalte „Aussen“. Addiert man die Leitwerte von allen 3 Rohren zur Außenluft so erhält man den Gesamtleitwert in Watt pro Kelvin Temperaturdifferenz von Heizungstemperatur zu Außenluft pro Meter Schiene.

$$L_{ges} = 2,58379 + 4,365322 + 5,782179 = 12,731291 \frac{W}{K}$$

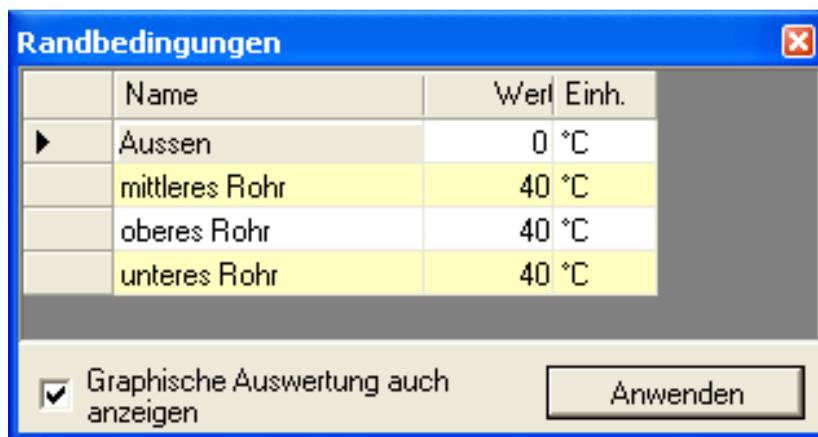


Bild 1.2a:
 Randbedingungen für die
 graphische Auswertung

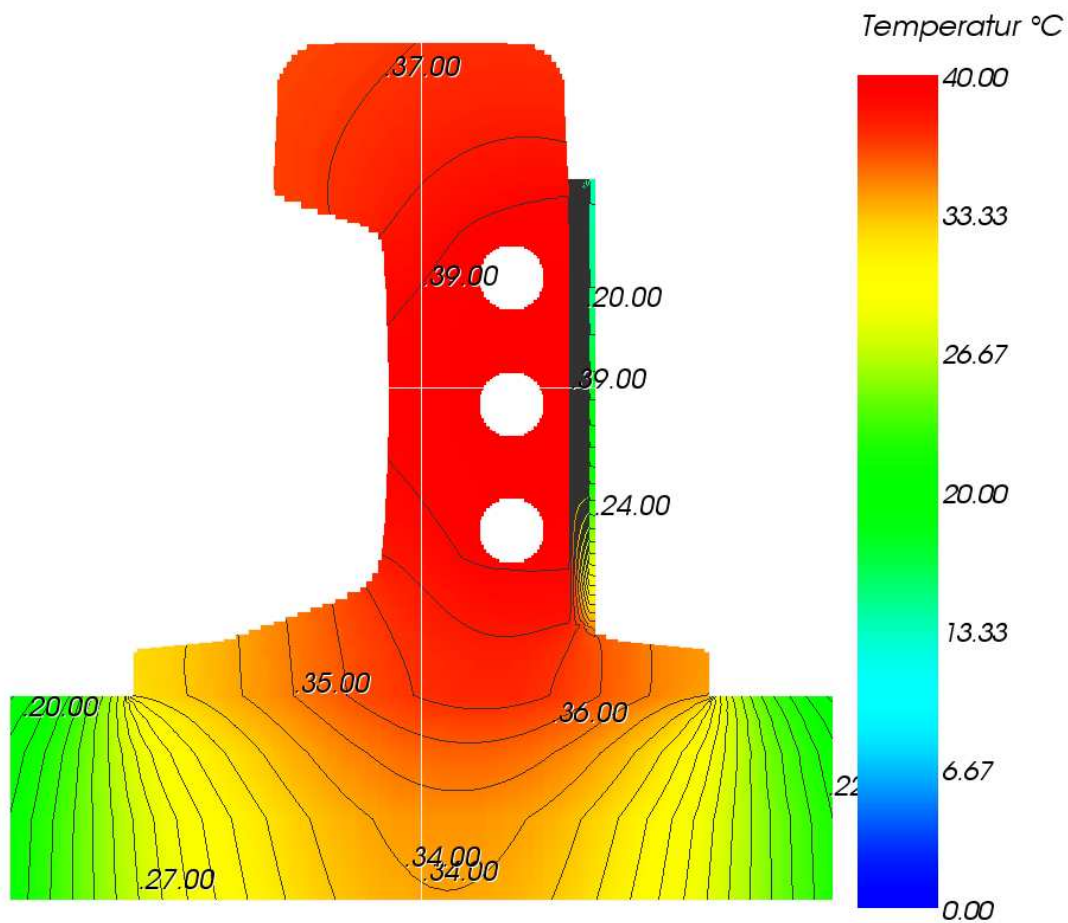


Bild 1.2b: Temperaturverteilung in der Schiene bei Heißwasserbetrieb $t_a=0^\circ\text{C}$, $t_m=40^\circ\text{C}$

Nach Eingeben der Randbedingungen (1.2a) wird die graphische Auswertung angezeigt.

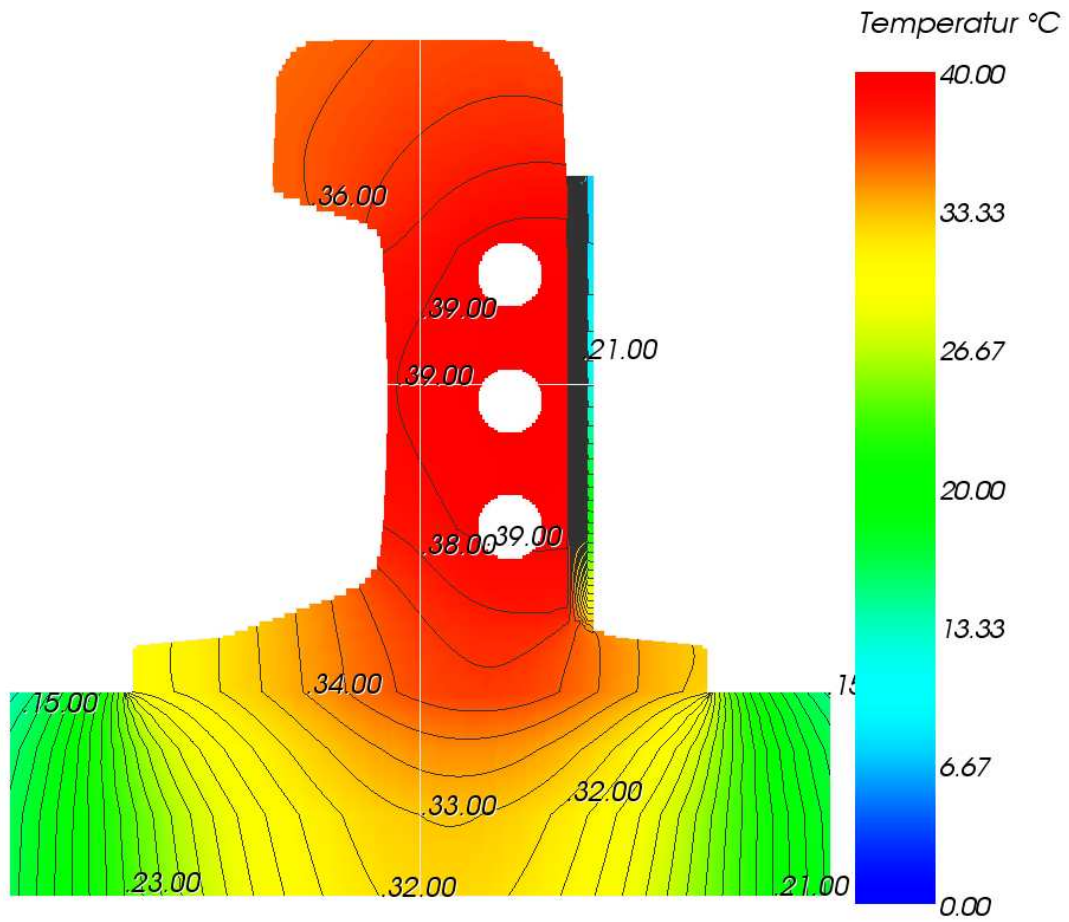
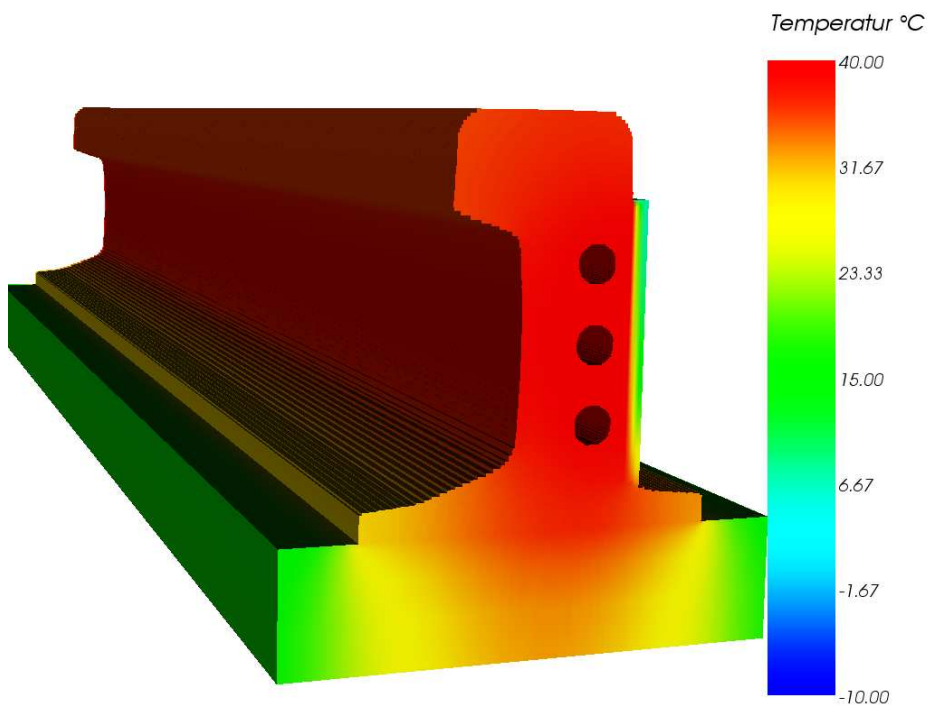


Bild 1.2c und d: Temperaturverteilung in der Schiene bei Heißwasserbetrieb $t_a = -10^\circ\text{C}$, $t_m = 40^\circ\text{C}$



Wie aus den Bildern 1.2b und 1.2c ersichtlich, genügt eine mittlere Heizmediumtemperatur von 40°C um auch bei einer Außentemperatur von -10°C den Schienenkopf konstant über 30°C zu halten.

Es handelt sich hierbei um einen statischen Zustand, ein Gleichgewicht, das sich nach einer gewissen Aufheizzeit einstellt. Unsere Versuche haben gezeigt, dass bei einer Mediumtemperatur von 60°C und einer Außentemperatur von etwa -5°C der Schienenkopf innerhalb von einer Stunde 30°C erreicht.

Für einen zügigen Aufheizvorgang empfehlen wir die mittlere Mediumtemperatur mit 70-80°C zu wählen. Nach dem Aufheizen kann die Regelung dann auf 40°C Vorlauftemperatur absenken. Da das Anbringen eines Temperaturfühlers am Schienenkopf nicht möglich ist, empfehlen wir die Regelung anhand der Vorlauftemperatur.

Die Ermittlung der so anfallenden Heizleistung lässt sich aus nachstehender Tabelle ablesen:

Heizleistung bei mittlerer Mediumtemperatur					
ta [°C]	80°C	70°C	60°C	50°C	40°C
-20	1273	1146	1019	891	764
-19	1260	1133	1006	878	751
-18	1248	1120	993	866	738
-17	1235	1108	980	853	726
-16	1222	1095	968	840	713
-15	1209	1082	955	828	700
-14	1197	1069	942	815	687
-13	1184	1057	929	802	675
-12	1171	1044	917	789	662
-11	1159	1031	904	777	649
-10	1146	1019	891	764	637
-9	1133	1006	878	751	624
-8	1120	993	866	738	611
-7	1108	980	853	726	598
-6	1095	968	840	713	586
-5	1082	955	828	700	573
-4	1069	942	815	687	560
-3	1057	929	802	675	547
-2	1044	917	789	662	535
-1	1031	904	777	649	522
0	1019	891	764	637	509
1	1006	878	751	624	497
2	993	866	738	611	484
3	980	853	726	598	471
4	968	840	713	586	458
5	955	828	700	573	446
6	942	815	687	560	433
7	929	802	675	547	420
8	917	789	662	535	407
9	904	777	649	522	395
10	891	764	637	509	382

Tabelle 1.2b: Heizleistungen pro Meter Schiene

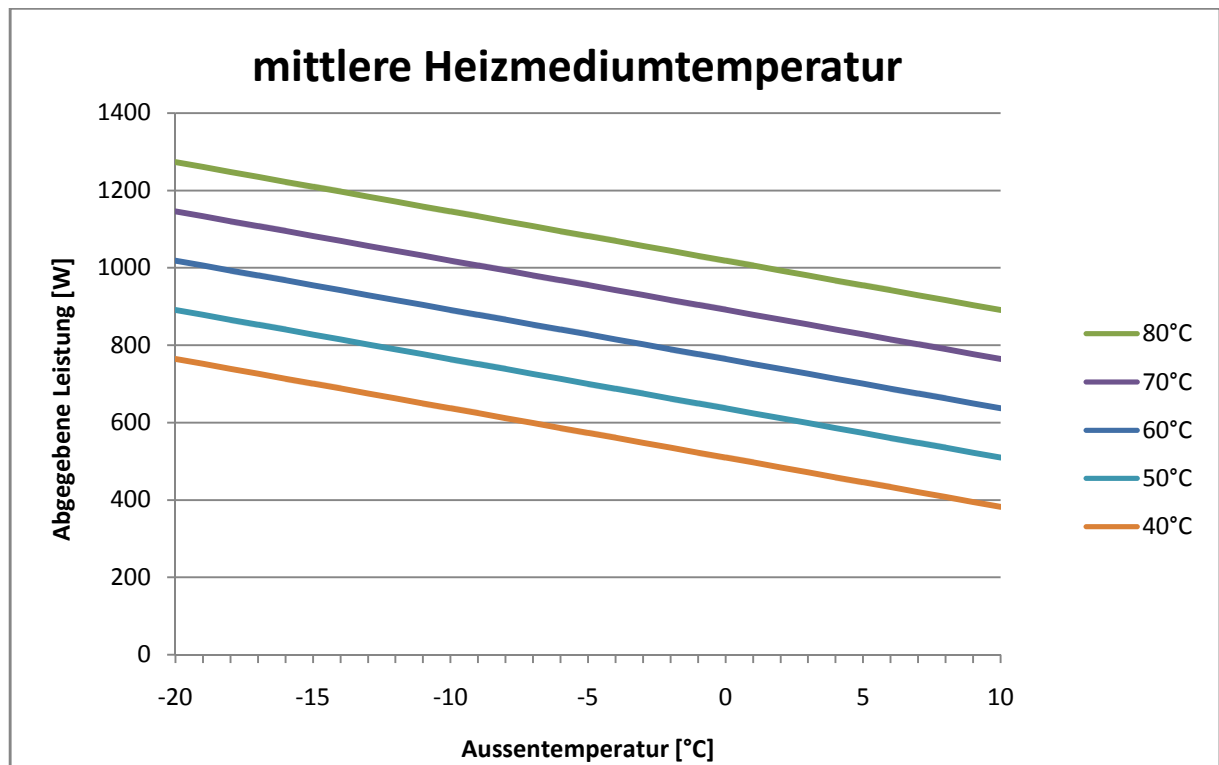


Bild 1.2e: Heizleistungen pro Meter Schiene, graphisch

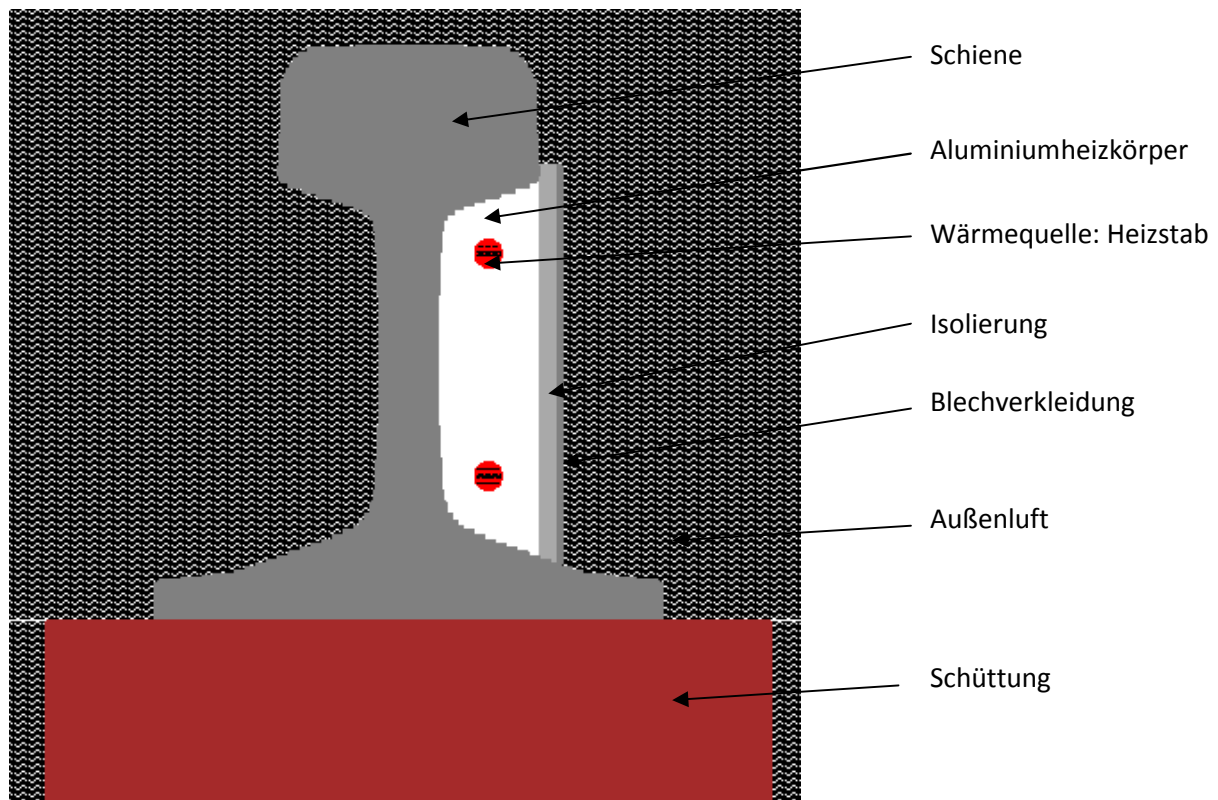
Für die Auslegung der Wärmequelle muss die Aufheizleistung herangezogen werden, um ein schnelles Aufheizen zu gewährleisten.

Bei einer Außentemperatur von -15°C und einer maximalen mittleren Mediumtemperatur von 80°C sind das rund 1210 Watt pro Meter Schiene.

Da in diesem speziellen Fall keine Gleichzeitigkeitsfaktoren auftreten ist dieser Wert direkt mit der Länge der zu beheizenden Schienen zu multiplizieren.

1.3. Auswertung der Variante „Elektro“

Zu diesem Zweck wurde die entsprechende Konstruktion mit dem entsprechenden Aluminiumprofil für die Elektroheizstäbe in Antherm® importiert und wie zuvor beschrieben definiert.



Des Weiteren wurden in diesem Fall die Heizstäbe nicht als Räume, sondern als Wärmequellen definiert.

Da das Programm jedoch mindestens 2 Räume benötigt, um eine Auswertung zu liefern, wurde der Außentemperaturbereich in 2 exakt gleich definierte Teile gesplittet.

Für die Definition der Wärmequelle ist eine Angabe der Leistung pro Kubikmeter Heizstab erforderlich. Diese wurde wie folgt ermittelt:

- Maximale Leistung der Heizstäbe pro Meter Schiene: $P = 1500 \text{ W}$
- Heizstabdurchmesser: $d = 8,5 \text{ mm}$
- Heizstablänge pro Meter Schiene: $l = 2 \text{ m}$

$$V = \frac{d^2 * \pi * l}{4} = \frac{0,0085^2 * \pi * 2}{4} = 0,00011349 m^3$$

$$p = \frac{P}{V} = \frac{1500}{0,00011349} = 13,217 * 10^6 W/m^3$$

V...Heizstabvolumen [m³]

d...Heizstabdurchmesser [m]

l...Heizstablänge [m]

P...Heizstableistung [W]

p...Volumen-spezifische Heizstableistung [W/m³]

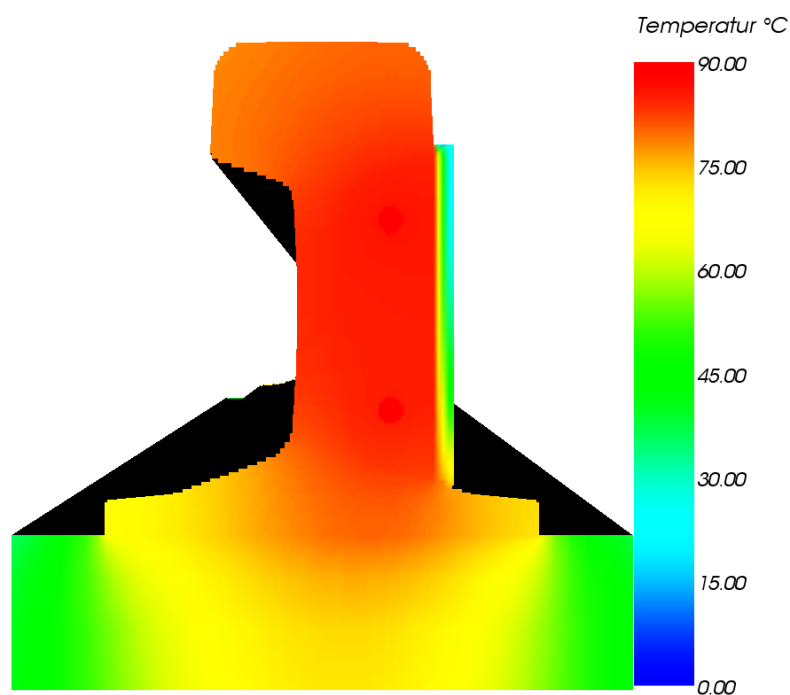


Bild 1.3a: Gleichgewichtszustand bei 1500 W Heizleistung und -10°C Außentemperatur

Wie aus Bild 1.3a ersichtlich würde eine konstante Beheizung mit 1500 W bei -10°C Außentemperatur zu einer Schienenkopftemperatur von annähernd 80°C führen.

Für einen raschen Aufheizvorgang empfehlen wir jedoch diese Heizleistung, da dadurch bei den zu erwartenden Einsatztemperaturen von $-10-0^{\circ}\text{C}$ eine Aufheizzeit von etwa $\frac{1}{2}$ h resultiert.

(Im Versuch kam ein Heizstab mit etwa 3000 W zum Einsatz, welcher die Schiene in 15 min auf die vorgegebene Schienenkopftemperatur von $\sim 30^{\circ}\text{C}$ brachte. Auf Grund der hohen Wärmeentwicklung (Heizstab ca. 500°C) empfehlen wir aber die Variante mit 1500 W pro Meter Schiene.)

Weitere graphische Auswertungen:

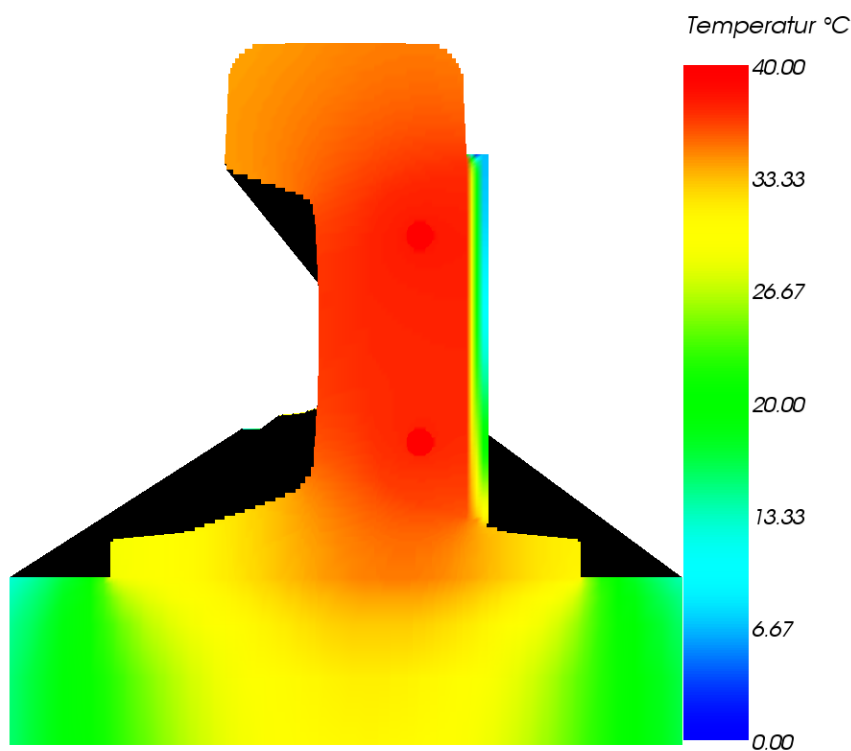


Bild 1.3b: Gleichgewichtszustand bei 750 W Heizleistung und -10°C Außentemperatur

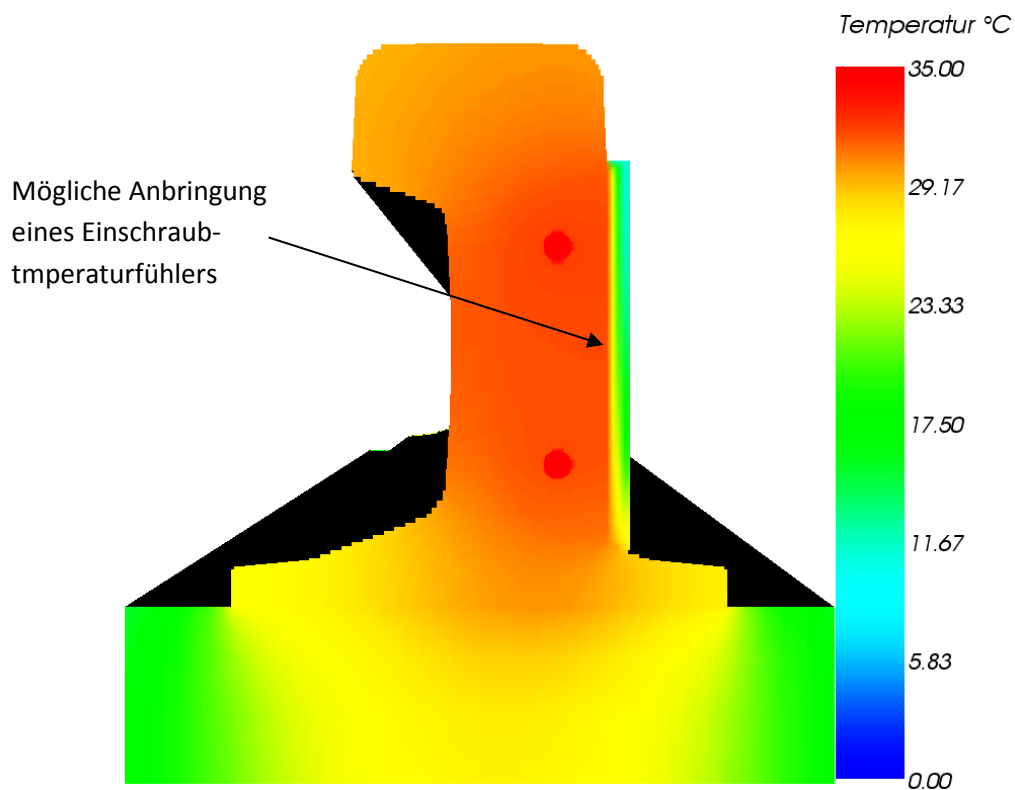


Bild 1.3c: Gleichgewichtszustand bei 500 W Heizleistung und 0°C Außentemperatur

Die beiden vorigen Auswertungen zeigen die theoretischen Betriebsleistungen bei 0°C bzw. -10°C. Vergleicht man diese Daten mit der Variante „Wasser“, stellt man fest, dass die Leistungen annähernd gleich hoch sind.

Anhand dieser Erkenntnis lässt sich sagen, dass die Variante „Elektro“ durch die „Erzeugung der Wärme“ direkt im Heizkörper einen sehr hohen Wirkungsgrad aufweist, während bei der Variante „Wasser“ der Wirkungsgrad durch den Wärmetransport vom Erzeuger zur Schiene deutlich abfällt.

Regelung:

In den Testversuchen wurde die Schienenkopftemperatur mit einem Anlegefühler direkt am Schienenkopf gemessen und mit einem digitalen PID-Regler geregelt. Da dies im Projektfall nicht möglich ist empfehlen wir 2 Varianten:

- Steuerung der Versorgungsspannung über einen verstellbaren Spannungsteiler (Potenziometer) durch das Betriebspersonal. Dies bedarf jedoch ständiger Kontrolle und führt möglicherweise zu unnötig hohen Schienentemperaturen und somit Energiekosten.
- Regelung der Temperatur im Bereich des Aluminiumheizkörpers (Bild 1.3c) anhand eines digitalen PID-Reglers. Hierzu bedarf es einer Bohrung mit Gewinde im markierten Bereich (Bild 1.3c). Wie aus den beiden vorigen Auswertungen ersichtlich sollte dabei der Regelwert ca. 5-10°C über der gewünschten Schienenkopf­temperatur eingestellt werden. Hierbei wird es vermutlich zu längeren Aufheizzeiten kommen, da der Temperaturfühler durch die Nähe zu den Heizstäben rasch erwärmt wird.