

## **ABSCHLUSSBERICHT HH 01/15**

### **Europoint - Untersuchungen zur Erwärmung einer beheizten Weichenanlage**

Auftraggeber	SBB AG Kompetenzzentrum Weichenheizung Zentralstrasse 1 6003 Luzern Schweiz
Auftragnehmer	Technische Universität Dresden Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik Lehrstuhl für Hochspannungs- und Hochstromtechnik 01062 Dresden
Auftrag	Vertrag vom 29.10.2015 Auftrag Nr. 4700240630 vom 19.04.2016
Projektzeitraum	14.12.2015 bis 31.12.2019
Berichtsdatum	03.03.2020
Berichtsumfang	65 Seiten, 15 Anlage(n)
Ansprechpartner beim Auftraggeber	Daniel Föhn
Bearbeiter beim Auftragnehmer	Markus Schladitz
durchgesehen	Robert Adam
bestätigt	Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann
Verteiler:	1 x Auftraggeber (deutsch; gedruckt und digital (PDF)) 1 x Auftraggeber (englisch; gedruckt und digital (PDF)) 1 x Institut 1 x Bearbeiter

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Definition des Projektgegenstands „Euroweiche“	5
2.1	Begriffe und Definitionen für das thermische Modell	6
2.2	Auswahl der Komponenten für EuroPoint	8
2.3	Anwendungsbedingungen der Weichenheizung	9
3	Berechnen der Erwärmung mit Wärmenetzen	10
4	Aufbau der einzelnen Wärmenetze	14
4.1	Aufbau des Wärmenetzes einer Backenschiene mit Heizstab	14
4.2	Aufbau des Wärmenetzes der Zungenschiene	23
4.3	Aufbau des Wärmenetzes von Rippenplatte und Gleitstuhl	28
4.4	Aufbau des Wärmenetzes einer Schwelle	32
4.5	Zusammenfügen der Teilnetze zu einem Wärmenetz der gesamten Weiche	35
5	Verifikation des Wärmenetzes an einer Modellweiche	39
6	Implementierung der Umgebungsfaktoren in das Wärmenetz	43
6.1	Windgeschwindigkeit und Windrichtung	43
6.2	Himmelsstrahlung	44
6.3	Regen	45
6.4	Schneefall	47
7	Verifikation des Wärmenetzes mit einer Weiche unter Freiluftbedingungen	48
7.1	Vergleich der X-Seite der Weiche	50
7.2	Vergleich der Y-Seite der Weiche	51
8	Berechnungsszenarien der Bahnunternehmen	53
8.1	Berechnung der ÖBB-Szenarien	55
8.2	Berechnung der SBB-Szenarien	56
8.3	Berechnung der ProRail-Szenarien	56
8.4	Zusammenfassung	57
9	Untersuchung der Wärmeströme	57

9.1	Wärmeströme an der X-Seite	58
9.2	Wärmeströme an der Y-Seite	60
9.3	Zusammenfassung der Analyse der Wärmeströme	62
10	Zusammenfassung und Ausblick	63
11	Literatur	65

## 1 Einleitung

Um die Funktionssicherheit von Bahnstrecken und Bahnhofsgleisen zu gewährleisten und einen sicheren und pünktlichen Zugbetrieb zu ermöglichen, müssen die Weichen von Bahnanlagen beheizt werden. Zu diesem Zweck haben sich bei den Bahnunternehmen im Laufe der Geschichte viele unterschiedliche Arten von Weichenheizungen etabliert. Sie unterscheiden sich z. B. bei der verwendeten Energiequelle (Elektroenergie, Gas oder Geothermie), der Konstruktion der Heizelemente, der Installation im Gleis sowie bei der Steuerung und Regelung der Weichenheizungssysteme. Die für Weichenheizungen eingesetzte Energie ist bei der Vielzahl von Weichen in den Bahnanlagen der einzelnen Betreiber enorm groß und stellt somit einen wesentlichen Kostenfaktor für den Betrieb dar. Kenntnisse über die erforderliche Wärmemenge, deren zeitlicher Verlauf und die räumliche Verteilung sind bei Herstellern und Betreibern nur begrenzt vorhanden und meist nur empirisch entstanden. Aussagen zur Zuverlässigkeit der Weichenheizungsanlagen unter Einfluss bestimmter Umweltbedingungen können bisher nicht getroffen werden. Um die Effizienz und die Effektivität von Weichenheizungen beurteilen zu können, ist es notwendig ein thermisches Modell zu entwickeln, mit dem

- die Erwärmung von beheizten Weichenanlagen berechnet,
- die Vorgänge der Wärmeerzeugung und des Wärmetransportes verstanden,
- die Mengen der Wärmeflüsse dargestellt und analysiert und
- die Temperaturverteilung der Weichenanlagen abgebildet

werden können. Durch systematische Untersuchung der thermischen Verhältnisse von Weichenheizungen und das Anwenden dieser Erkenntnisse bei der Gestaltung von Komponenten sowie deren Betrieb soll die für die Weichenheizung erforderliche Energiemenge deutlich reduziert und die Funktionssicherheit erhöht werden. Dafür müssen die Vorgänge der Wärmeerzeugung, der Wärmespeicherung und des Wärmetransportes beschrieben werden können. Weichenheizungen sind Betriebsmittel unter Freiluftbedingungen. Im Zusammenhang mit der Anwendung von Erwärmungsberechnungen für Bahnanlagen sind die Parameter der Wärmeübertragung und der Wärmespeicherung bisher unbekannt. Für den Einsatz von thermischen Modellen zur Berechnung der Erwärmung von Weichenanlagen müssen die Vorgänge der Wärmeübertragung und der Wärmespeicherung untersucht werden.

Das Bestreben die Effizienz und die Effektivität von Weichenheizungen beurteilen zu können den Einsatz von Energie zu optimieren und die Funktionssicherheit zu erhöhen, ist die gemeinsame Motivation verschiedener Bahnunternehmen. Auf dieser Basis haben sich die europäischen Bahnunternehmen (SNCF, ÖBB, SBB, Infrabel und ProRail), das Institut für Verkehrsinfrastruktur (i-vis) und das Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) der TU DRESDEN zu einer Forschungskooperation „EuroPoint / Euroweiche“, zusammengeschlossen. Ziel des

Forschungsvorhabens ist es ein gemeinsames thermisches Modell einer Weiche „Euroweiche“ in Form eines Wärmenetzes zu entwickeln. Das Wärmenetz der Euroweiche soll als Basiswerkzeug und Referenzmodell zur thermischen Berechnung von Weichenanlagen dienen.

## 2 Definition des Projektgegenstands „Euroweiche“

Bei den europäischen Bahnunternehmen haben sich im Laufe der Zeit unterschiedliche technische Lösungen für den Bau von Gleisanlagen entwickelt. Für das Beheizen von Weichen bedeutete dies eine hohe Vielfalt an Varianten verschiedenster Systeme (**Bild 1**).

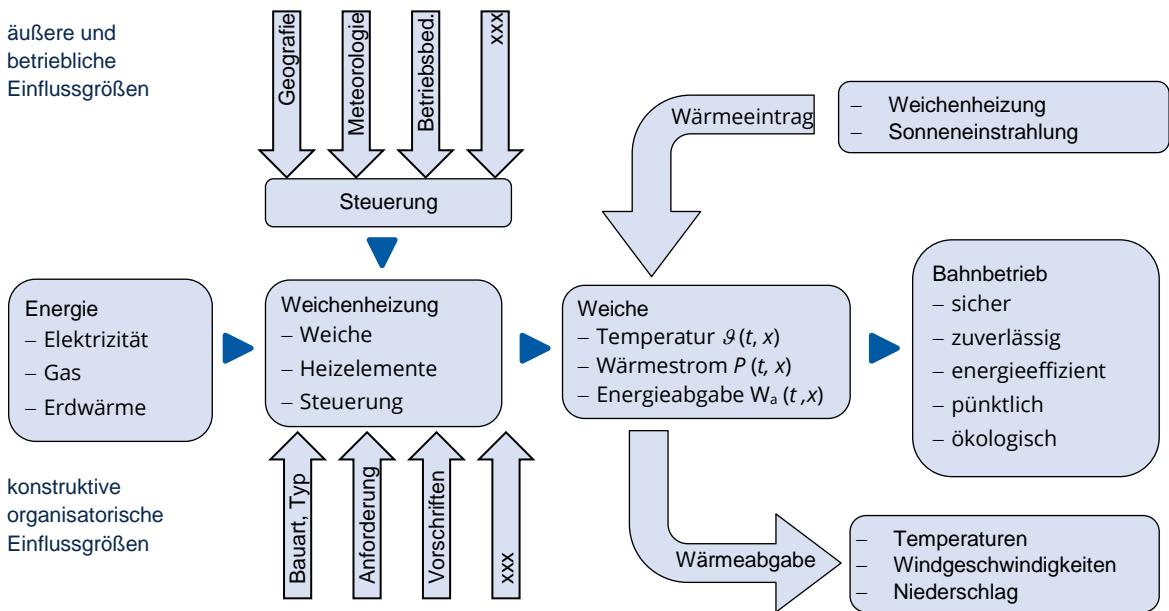


Bild 1: System Weichenheizung und dessen Einflussfaktoren

Dabei unterscheiden sich die Weichenheizungen allein schon anhand der Konstruktion der Weiche. Unterschiedliche Schienenprofile, Schwellen und Gleisbetten werden in abwechselnden Möglichkeiten miteinander kombiniert. Abhängig davon sind die Heizelemente selbst und deren Befestigung auf die gegebene Weichenkonstruktion anzupassen. Als Energiequellen stehen Elektro-, Gas- oder Erdwärme zur Verfügung. Die Anforderungen an den Betrieb der Heizungsanlagen werden abhängig von den äußeren Einflussgrößen und dem angestrebten Betrieb der Bahn von Unternehmen verschieden festgelegt. Es ergeben sich daher abweichende Steuer- und Regelungen für den Betrieb der Weichenheizungen. Trotz dieser hohen Diversität in den Systemen von Weichenheizungen können die grundlegenden Vorgänge der Erwärmung sowie die

Verteilung von Wärmeflüssen und Temperaturen mit Hilfe von thermischen Modellen, z. B. Wärmenetzen, beschrieben und abgebildet werden. Dazu ist es notwendig, aus der großen Menge an unterschiedlichen Weichenheizungen ein gemeinsames Modell einer beheizten Weichenanlage der Euroweiche zu entwickeln. Solch ein gemeinsames Modell muss verschiedene Anforderungen erfüllen. Es sollte eine möglichst große Zahl der in den Streckennetzen der teilnehmenden Bahnunternehmen verwendeten Weichen repräsentieren. Für die experimentellen Untersuchungen ist es dabei von vorteilhaft, eine Kombination der einzelnen Komponenten zu wählen, die tatsächlich in den Streckennetzen verbaut ist. Die Weichenheizung selbst sollte eine standardisierte Lösung darstellen, die bei jedem Bahnunternehmen eingesetzt werden kann.

## 2.1 Begriffe und Definitionen für das thermische Modell

Um die Kommunikation zwischen den beteiligten Bahnunternehmen sowie zum IEEH und i-vis zu erleichtern, sollen zunächst einige Begriffe der Weiche erläutert werden. Dabei sollen hauptsächlich die Komponente berücksichtigt werden die für die Berechnung der Erwärmung der Weiche notwendig sind.

Für die Erwärmung der Weiche und deren Berechnung sind zunächst die allgemeinen geometrischen Parameter notwendig. Die Geometrie wird dominant durch den Weichtyp (z. B. einfache Weiche EW, Doppelkreuzungsweiche DKW) und durch das eingesetzte Schienenprofil (z. B. UIC 60, S49) bestimmt (**Bild 2**).

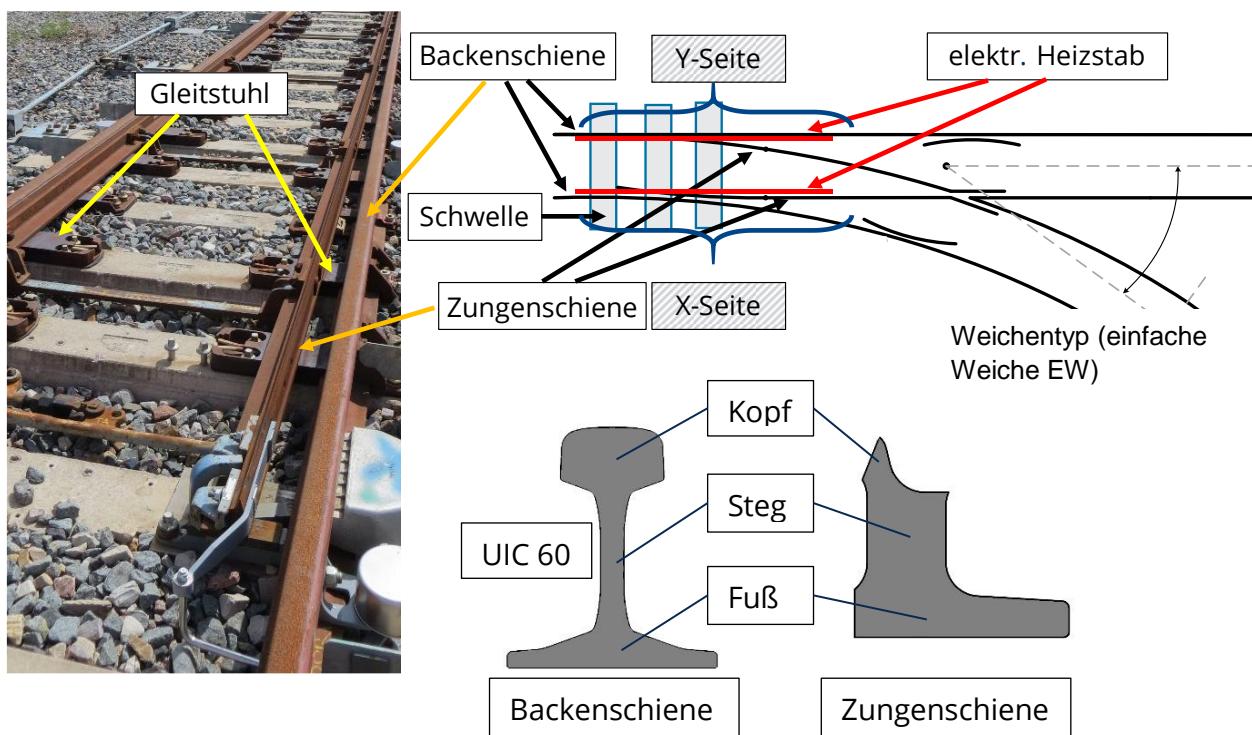


Bild 2: Begriffe zum System Weiche

Die Länge der Weichen wird durch den Radius  $R$  der abzweigenden Strecke und den Weichenwinkel  $\alpha$  bemessen. Damit sind die allgemeinen Parameter der Geometrie berücksichtigt.

Wärmeübertragung findet durch die physikalischen Effekte der Wärmeleitung der Wärmestrahlung und der Konvektion statt. Für die Wärmeleitung in den Komponenten der Weichen müssen die Querschnittsflächen und die Stoffkenngrößen der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bekannt sein. Für die Wärmeleitung in den Backen- und Zungenschienen sind die Querschnittsflächen durch das Schienenprofil (z. B. UIC 60) und durch die Art der eingesetzten Zungenschiene (z. B. Federzunge) festgelegt. Zwischen Backen- und Zungenschien kann Wärme durch Wärmeleitung über die eingesetzten Gleitstühle und über Wärmestrahlung der gegenüberliegenden Flächen übertragen werden. Für die Wärmestrahlung ist die Größe und Anordnung der beteiligten Oberflächen maßgebend.

Die Wärmeleitung von den Schienen ins Gleisbett hinein erfolgt über die Gleitstühle und Schwellen (z. B. Stahl, Beton). Hier ist von allem entscheidend wie die Gleitstühle auf den Schwellen montiert sind (Verspannung zwischen Backenschiene und Gleitstuhl, Befestigung des Gleitstuhls auf der Rippenplatte und Schwelle). Die Geometrien, die Materialien und die Positionierung entlang der Weiche sind maßgebend für den Wärmestrom ins Gleisbett. Weiterhin kann durch das verwendete Verschlussystem zum einen Wärme zwischen den Backen- und Zungenschienen der beiden Gleisseiten und zum andern ins Gleisbett geleitet werden. Der Kontakt für die Wärmeleitung zwischen der Zungenschiene und den Gleitstühlen kann durch den Einsatz von zusätzlichen Rollensystemen beeinflusst sein.

Für das Beheizen der Weichen muss Wärmeleistung in das System eingespeist werden. Entscheidend dabei ist, welche Art von Heizelementen (z. B. elektrische Heizstäbe, Gasbrenner) eingesetzt werden. Hier spielen vor allem die Heizleistung, die Geometrie und die Position der Heizelemente eine Rolle. Der Kontakt zwischen den elektrischen Heizelementen und den Schienen wird durch die Art der Montage festgelegt. Die Auswahl der verwendeten Befestigungselemente (z. B. Klammer) und deren Verteilung entlang der Heizelemente sind hier entscheidend.

Um eine zeitliche Änderung der Temperaturverteilung in der Weiche berechnen zu können, müssen die thermischen Kapazitäten aller Komponenten berücksichtigt werden. Dafür werden die Materialeigenschaft der spezifischen Wärmekapazität  $c_s$  und der Dichte  $\delta$  sowie die Volumina benötigt. Diese sind aus den allgemeinen geometrischen Parametern der Komponenten zu ermitteln.

## 2.2 Auswahl der Komponenten für EuroPoint

Jedes der am Projekt beteiligten Bahnunternehmen setzt für die beschriebenen Komponenten der Weiche unterschiedliche Produkte und Ausführungsformen ein. Eine gemeinsame Kombination dieser Komponenten stellt das Modell der Euroweiche / EuroPoint dar. In gegenseitiger Absprache wurden die Modelle für die Komponenten gewählt die zum einen häufig Anwendung finden und zum anderen von den Bahnunternehmen auch für experimentelle Untersuchungen zur Verfügung gestellt werden können (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Zuordnung der Modelle für die Komponenten der Euroweiche

Komponente	Modell
Backenschiene	Schienenprofil UIC 60
Zungenschiene	Flexible Federzunge mit dem Profil UIC 60
Rippenplatte	Kombinierte Komponente RPG50-60
Gleitstuhl	
Schwelle	WS:601200 KOMPL

Für die eingesetzten Schienen haben sich in Europa Standards herausgebildet. Eine der am weitest verbreiteten Schienenprofile ist das UIC 60 Profil (**Bild 3**), welches für die Euroweiche genutzt werden soll. Die Zungenschiene soll als Federzunge ausgeführt werden.

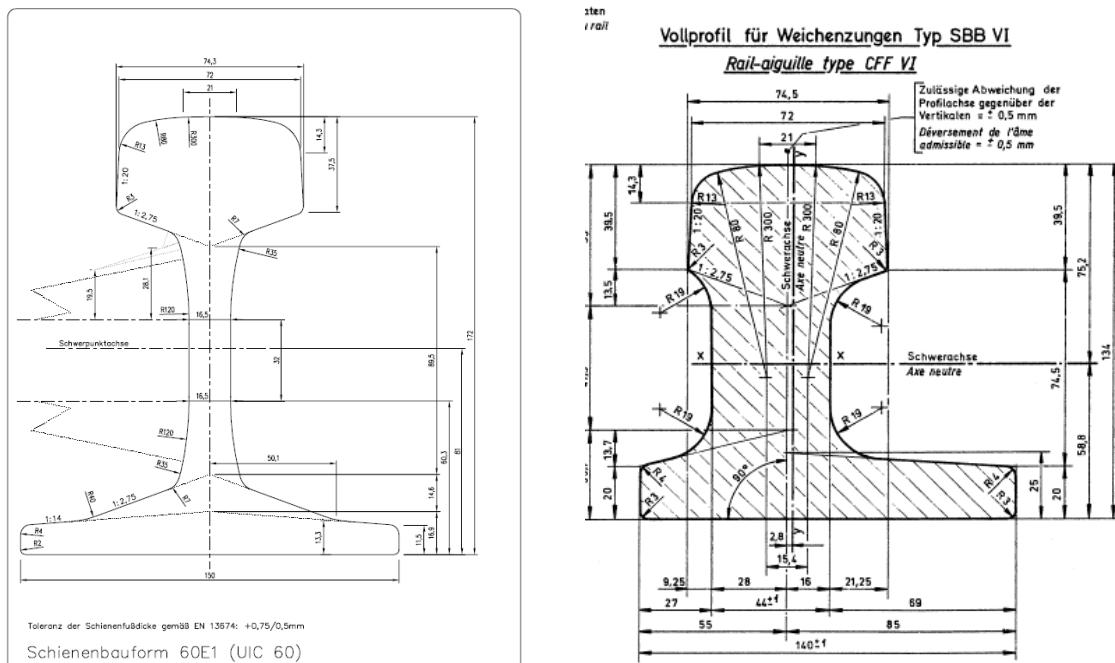


Bild 3: Schienenprofil UIC 60 für Backen- und Zungenschiene (Federzunge)

Backen- und Zungenschiene sind gemeinsam auf den Gleitstühlen gelagert. Die Backenschiene ist dabei fest mit dem Gleitstuhl verspannt. Die Bewegung der Zungenschiene wird entweder durch Gleitplatten oder durch in die Gleitplatten integrierte Rollenvorrichtungen sichergestellt. Gleitstühle mit integrierten Rollen sind bisher nur im geringen Umfang in den Streckennetzen der europäischen Bahnunternehmen eingesetzt. Für das Euroweichenmodell wird daher ein einfacher Gleitstuhl mit Gleitplatten (SCHWIHAG BGL 606) und innerer Backenschiienenspannung (IBAV) ausgewählt.

Die Mehrheit der heute verwendeten Schwellen bestehen aus Beton. Der Mittenabstand der einzelnen Schwellen beträgt 600 mm. Um die Zungenschiene in ihrer Endlage zu arretieren, kommen Weichenverschlüsse zum Einsatz. Eine häufig verwendete Art ist der Kammerspitzenverschluss. Für das Modell der Euroweiche wird ein Kammerspitzenverschluss des Typs WKV 50-2 (BHARAT FORGE CDP GmbH) ausgewählt. Eines der am weitesten verbreiteten Möglichkeiten Heizleistung in die Weiche einzuspeisen, sind elektrische Heizstäbe. Als Wärmequelle für die Euroweiche sollen daher Heizstäbe des Typs RKW (TÜRK+HILLINGER GmbH) genutzt werden. Die Heizstäbe sind mit den entsprechenden Anschlusskopfbefestigungen und Klemmbügeln, desselben Herstellers, an den Schienen der Weiche zu montieren (**Bild 4**). Dabei wird ein Klemmbügel im Abstand von 30 cm genutzt.

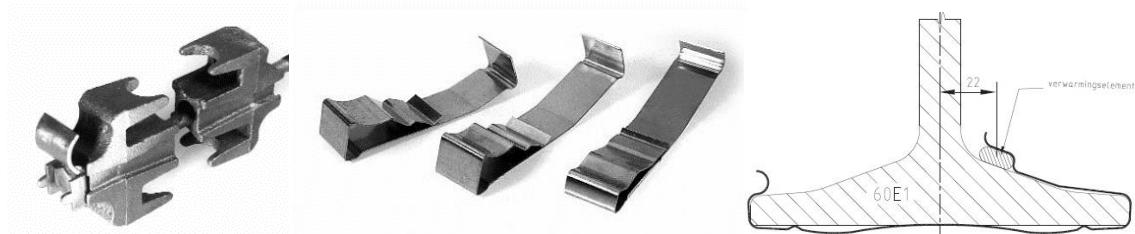


Bild 4: Befestigungsklemmen und Montageposition des Heizstabs

### 2.3 Anwendungsbedingungen der Weichenheizung

Die meisten Weichenheizungen werden heutzutage mittels einer automatischen Steuerung von Ferne betrieben. Als Kriterien für das Ein- und Ausschalten gelten die Lufttemperatur und das Auftreten von Niederschlag. Mit dem thermischen Modell (Wärmenetz) der Euroweiche soll überprüft werden, ob und in welchem Umfang die von den Bahnen definierten Anforderungen an ein Heizsystem erfüllt werden können. Dafür müssen neben diesen beiden Regelparametern noch weitere Umgebungsbedingungen betrachtet werden. Dazu gehören Windgeschwindigkeit, -richtung und Globalstrahlung. Für diese Parameter müssen Implementierungsmöglichkeiten in das thermische Modell gefunden werden. Sowohl die thermische Auswirkung der Umgebungsbedingungen separat voneinander als auch in Kombination ist für die Berechnung der Erwärmung von

großem Interesse. Niederschlag kann in Form von Regen oder Schneefall auftreten. Es bestehen bei beiden Arten noch keine Erfahrungen bzgl. der Berücksichtigung im Wärmenetz. Somit ist es hierfür wichtig, dass die theoretischen Erkenntnisse von praktischen Untersuchungen gestützt werden.

### 3 Berechnen der Erwärmung mit Wärmenetzen

Neben der Wärmenetzmethode ist auch eine Berechnung mit FEM-Modellen möglich, die häufig für Erwärmungsberechnungen angewendet wird. Eine Berechnung mithilfe des Wärmenetzes ist für die Berechnung der Erwärmung einer Weiche jedoch vorteilhaft, da sich dabei einzelne Teilnetzwerke problemfrei verknüpfen lassen. Weiterhin ist die Rechenzeit relativ gering und somit können effektiv Parameterstudien durchgeführt werden.

Betrachtet man die physikalischen Größen des elektrischen Feldes und vergleicht diese mit dem thermischen, so erkennt man eine deutliche Analogie (**Tabelle 2**). Die Flussgröße ist im elektrischen Feld als der Strom / bekannt. Im thermischen Feld entspricht dies dem Wärmefluss  $P$ .

Tabelle 2: Größen des elektrischen und thermischen Strömungsfeldes

Größe	elektrisch	thermisch
Strom / Fluss	$I$	$P$
Potentialdifferenz	$\Delta\varphi = U = I \cdot R_{el}$	$\Delta\vartheta = P \cdot R_{th}$
Widerstand	$R_{el} = I \cdot \kappa^{-1} A^{-1}$	$R_{th} = I \cdot \lambda^{-1} A^{-1}$
Kapazität	$C_{el} = \varepsilon \cdot A \cdot l^{-1}$	$C_{th} = c \cdot \delta \cdot V$
Zeitkonstante	$\tau_{el} = C_{el} \cdot R_{el}$	$\tau_{th} = C_{th} \cdot R_{th}$

Die Potentialdifferenz des elektrischen Feldes ist die Spannung  $U$ . Im thermischen Feld ist die Potentialdifferenz die Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$ . Es liegt daher nahe, die Vorgänge der Wärmeübertragung mit ähnlichen Methoden wie im elektrischen Feld zu beschreiben. Dies wird als Wärmenetzmethode bezeichnet. In einem Wärmenetz werden die Wärmeübertragungsvorgänge mit Hilfe von Wärmestromquellen, Temperaturquellen, Wärmewiderständen und Wärmekapazitäten nachgebildet [1]. Das Verfahren wird bereits erfolgreich zur Berechnung der Erwärmung von Anlagen und Geräten der Elektroenergietechnik eingesetzt. Einen Überblick über die physikalischen Größen der Erwärmung findet sich in [1][2].

Wärmeleistungen werden durch Wärmeleitung, durch Wärmestrahlung und Konvektion von den Wärmequellen (z. B. Heizungen) zu den Wärmesenken (z. B. Umgebung) abgegeben. Im Wärmenetz werden diese Wärmeübertragungsvorgänge durch Widerstände symbolisiert. Ähnlich einem elektrischen Netzwerk ergibt sich im

thermischen Netzwerk der transportierte Wärmestrom  $P(\vartheta)$  aus dem Quotienten der Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  und des thermischen Widerstandes  $R_{th}(\vartheta)$ .

$$P(\vartheta) = \frac{\Delta\vartheta}{R_{th}} \quad (1)$$

Die durch Wärmeleitung übertragene Wärmeleistung ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Mediums  $\lambda$ , dem Querschnitt  $A$  senkrecht zur Richtung des Wärmestromes und der Temperaturgradienten  $\text{grad } \vartheta$ .

$$P_L(\vartheta) = -\lambda A \text{grad } \vartheta \quad (2)$$

Der für das Wärmenetz benötigte Wärmeleitungswiderstand berechnet sich aus der Geometrie der Anordnung und der Wärmeleitfähigkeit. So ergibt sich z. B. für die Wärmeleitung durch einen rechteckigen Körper der Wärmeleitungswiderstand aus der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda(\vartheta)$ , die temperaturabhängig sein kann, der Wegstrecke  $d$  in Wärmestromrichtung sowie der Höhe  $h$  und der Breite  $b$  der senkrechten Fläche.

$$R_L(\vartheta) = \frac{d}{\lambda(\vartheta) h b} \quad (3)$$

Um die Wärmeleitungswiderstände berechnen zu können, müssen daher die zur Wärmeleitung zur Verfügung stehenden Querschnittsflächen bestimmt werden. Die durch Wärmestrahlung und Konvektion abgegebene Wärmeleistung ist abhängig vom Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha(\vartheta)$ , der Oberfläche  $O$  des wärmeabgebenden Körpers und der Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$ .

$$P(\vartheta) = \alpha(\vartheta) O \Delta\vartheta \quad (4)$$

Vergleicht man diesen Zusammenhang mit Gl. (1), so ergibt sich daraus der allgemeine Wiederstand für den Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion.

$$R(\vartheta) = \frac{1}{\alpha(\vartheta) O} \quad (5)$$

Im Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha(\vartheta)$  sind alle Einflussfaktoren des entsprechenden Wärmeüberganges zusammengefasst.

Die Beschreibung der physikalischen Vorgänge des konvektiven Wärmeüberganges erfolgt durch die Ähnlichkeitstheorie. Mit den daraus hervorgehenden

Ähnlichkeitskriterien lässt sich der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_k(\vartheta)$  beschreiben.

$$\alpha_k(\vartheta) = Nu \frac{\lambda_{\text{med}}}{l_w} \quad (6)$$

Dabei wird die Nusselt-Zahl aus dem Produkt von Grashof-Zahl und Prandtl-Zahl und den entsprechenden Ähnlichkeitsparametern  $c_1$  und  $n_1$  berechnet (Gl. (7)).

$$Nu = c_1 \cdot (Gr \cdot Pr)^{n_1} \quad (7)$$

Diese Gleichung der Nusselt-Zahl gilt für Anordnungen mit freier Konvektion, d.h. der Antrieb des Konvektionsmediums sind allein Dichteunterschiede. Wird das Konvektionsmedium zusätzlich mit Lüftern oder Pumpen in Bewegung versetzt tritt eine erzwungene Konvektion auf, die die freie Konvektion überlagert. In diesem Fall müssen andere Ähnlichkeitsparameter verwendet werden (Gl. (8)).

$$Nu = c_2 \cdot Re^{n_2} \quad (8)$$

Die in der Nusselt-Zahl enthaltenen Ähnlichkeitskriterien wurden für eine Vielzahl technischer Anordnungen experimentell bestimmt und sind der Literatur zu entnehmen [1] [2]. Wendet man Gl. (1) und Gl. (4) nur für die Wärmeübertragung durch Konvektion an erhält man den Wärmeübergangswiderstand der Konvektion.

$$R_k(\vartheta) = \frac{1}{\alpha_k(\vartheta) O_k} \quad (9)$$

Die Bestimmung der Wärmeübergangswiderstände der Konvektion erfolgte also in der Bestimmung der für den Wärmeübergang entscheidenden Ähnlichkeitskriterien und Oberflächen.

Die durch Wärmestrahlung übertragene Wärmeleistung  $P_s(\vartheta)$  wird durch das STEFAN-BOLTZMANN'sche Gesetz beschrieben.

$$P_s = \varepsilon_{12} \sigma_s O_s [T_1^4 - T_2^4] \quad (10)$$

Bezieht man die allgemeine Wärmeübergangsgleichung **Gl. (4)** nur auf den Strahlungsanteil und setzt diese mit dem STEFAN-BOLTZMANN'schen Gesetz gleich erhält man den Wärmeübergangskoeffizienten der Wärmestrahlung  $\alpha_s(\vartheta)$ .

$$\alpha_s(\vartheta) = \frac{\varepsilon_{12} \sigma_s [T_1^4 - T_2^4]}{\Delta \vartheta_{12}} \quad (11)$$

Für den Wärmeübergangskoeffizienten der Strahlung benötigt man die resultierende Emissionszahl  $\varepsilon_{12}$ , STEFAN-BOLTZMANN Konstante  $\sigma_s$  und die absoluten Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  der am Wärmestrahlungsaustausch beteiligten Körper. Die resultierende Emissionszahl  $\varepsilon_{12}$  ergibt sich aus dem Verhältnis der Oberflächen  $O_1$  und  $O_2$  sowie der Emissionszahlen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  der beiden Körper.

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{O_1}{O_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (12)$$

Die Emissionszahl  $\varepsilon$  gibt das Strahlungsvermögen einer Körperoberfläche im Verhältnis zum Strahlungsvermögen des ideal schwarzen Körpers an. Sie ist vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers abhängig. Die Emissionszahlen verschiedener Materialien können aus der Literatur entnommen [1] und [2] oder durch Messung mit einem Pyrometer bestimmt werden. Äquivalent zur Gl. (9) ergibt sich der Wärmewiderstand der Strahlung.

$$R_s(\vartheta) = \frac{1}{\alpha_s(\vartheta) O_s} \quad (13)$$

$$P_s = F_{12} \cdot P_{s,ges} \quad (14)$$

Die Bestimmung der Wärmeübergangswiderstände der Wärmestrahlung erfolgte also in der Bestimmung der für die Wärmestrahlung entscheidenden Oberflächen und deren Strahlungsvermögen.

Die Wärmekapazität eines Körpers ist das Maß, wie gut er thermische Energie speichern kann. Umso größer die Wärmekapazität ist, desto mehr Zeit benötigt ein Körper für eine definierte Temperaturänderung bei gleicher eingespeister thermischer Leistung (Gl. (15)).

$$\Delta \vartheta = \frac{P \cdot t}{V \cdot \delta \cdot c_p} \quad (15)$$

Dabei ist  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität,  $\delta$  die Dichte des Materials und  $V$  das Volumen des Körpers. Die Wärmekapazität wird benötigt, um die zeitabhängige Erwärmung eines Körpers zu berechnen. Die Wärmekapazitäten werden im Wärmenetz zwischen den thermischen Knoten und Nullpotential implementiert.

Eine Zusammenfassung der thermischen Größen mit den zugehörigen Einheiten kann in **Anlage 1** gefunden werden. Das Wärmenetzmodell wird mit dem Programm „Orcad Capture CIS“ aufgebaut.

## 4 Aufbau der einzelnen Wärmenetze

Die Wärmenetze der Hauptkomponenten müssen separat voneinander aufgebaut und mit einem jeweiligen Erwärmungsversuch verifiziert werden. Nur wenn die Einzelnetzwerke die Erwärmung der Komponenten richtig berechnen ist es möglich, sie zu verknüpfen und somit auch die Erwärmung der gesamten Weiche richtig zu berechnen. Die Vorgehensweise beim Aufbau der einzelnen thermischen Netzwerke lautet wie folgt:

- Approximation der Geometrie der Komponente
- Thermisches Nachbilden der approximierten Geometrie mit Widerständen für Wärmeleitung
- Implementieren von Widerständen für Konvektion und Strahlung an der Schnittstelle zur Umgebung
- Durchführen eines Erwärmungsversuchs unter Laborbedingungen
- Vergleich berechneter und gemessener Temperaturen → Anpassen einzelner thermischer Parameter

### 4.1 Aufbau des Wärmenetzes einer Backenschiene mit Heizstab

Für den Aufbau werden Wärmeleitungswiderstände für quaderförmige Geometrien mit rechteckigen Grundflächen verwendet. Das bedeutet, die Original-Geometrie des Querschnitts eines UIC 60-Schienenprofils einer Backenschiene muss zunächst approximiert werden (**Bild 5**). Das Ziel der Approximation ist es, die komplexe UIC 60 Geometrie in einfache geometrische Formen zu überführen. Dabei dürfen jedoch keine signifikanten Unterschiede in der Größe von Volumen und Oberfläche zwischen originaler und approximierter Geometrie auftreten. Eine Änderung des Volumens beeinflusst die interne Wärmeleitung und die Wärmespeicherung der Backenschiene. Hingegen besitzt die Größe der Oberfläche Auswirkungen auf die wärmeabgebenden Prozesse Konvektion

und Strahlung (**Gl. (5)**). Folglich wurden im Querschnitt Flächeninhalt und Umfang beider Geometrien verglichen (

Tabelle 3).

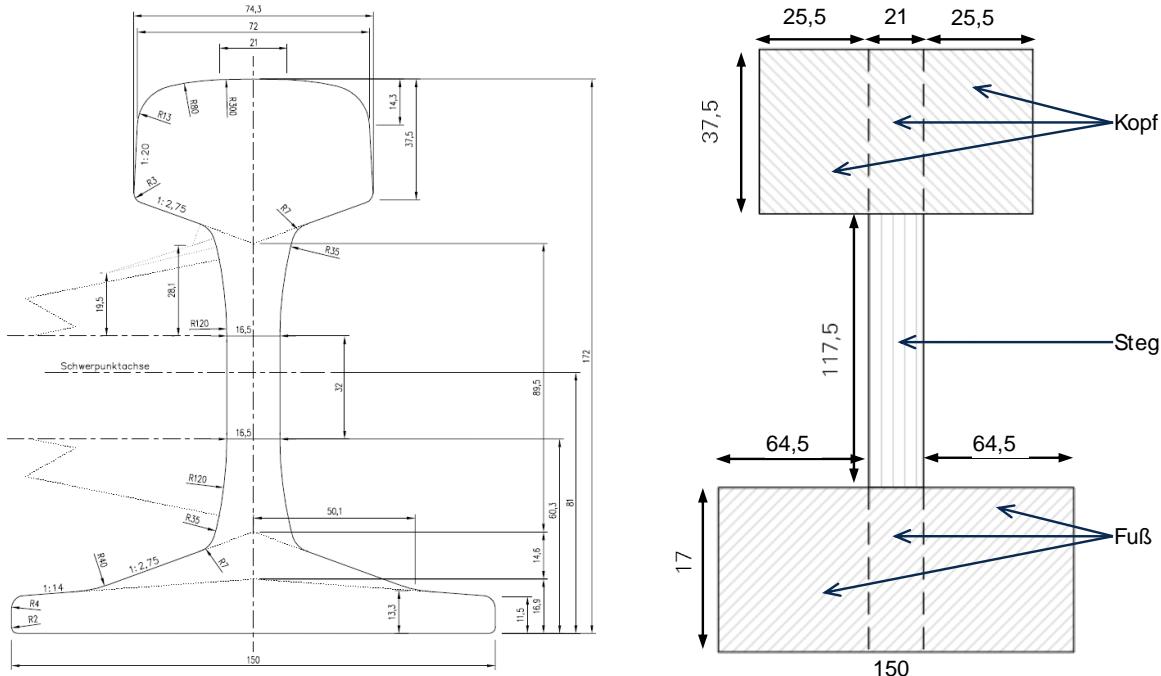


Bild 5: Originale und approximierte Geometrie eines UIC 60 Querschnitts einer Backenschiene

Tabelle 3: Vergleich originaler und approximierter Geometrie der Backenschiene

	Originale Geometrie	Approximierte Geometrie	Verhältnis
Flächeninhalt	7617 mm <sup>2</sup>	7718 mm <sup>2</sup>	1,013
Umfang	678 mm	746 mm	1,100

Die geometrischen Unterschiede sind gering und somit kann die approximierte Geometrie verwendet werden, um das Wärmenetz der Backenschiene aufzubauen. Ein entscheidendes Kriterium für die Genauigkeit mit der ein Wärmenetz die Temperaturen berechnet ist die Netzdichte. Je höher die Anzahl an thermischen Knoten ist, desto höher kann die Temperaturverteilung aufgelöst und desto genauer kann die Erwärmung berechnet werden. Allerdings erhöht sich damit auch wesentlich der Aufwand für die Implementierung und die Rechenzeit. Eine Erwärmungsberechnung mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) führt bei einzelnen Komponenten, bei entsprechender Vernetzung, zu sehr guten Auflösungen der Temperaturverteilungen. So können die Ergebnisse einer thermischen Berechnung mittels FEM mit den Ergebnissen des Wärmenetzes verglichen werden, um eine Aussage zu treffen, ob die Auflösung des

Wärmenetzes ausreichend hoch genug gewählt ist. Dafür werden die gleichen Parameter für die Wärmeabgabe an den Oberflächen in beiden Modellen genutzt, damit auftretende Temperaturdifferenzen einer statischen Berechnung allein auf die Wärmeleitung zurückzuführen sind. Der Vergleich zeigt eine ausreichend hohe Netzdichte aufgrund geringer Temperaturdifferenzen (**Bild 6**).

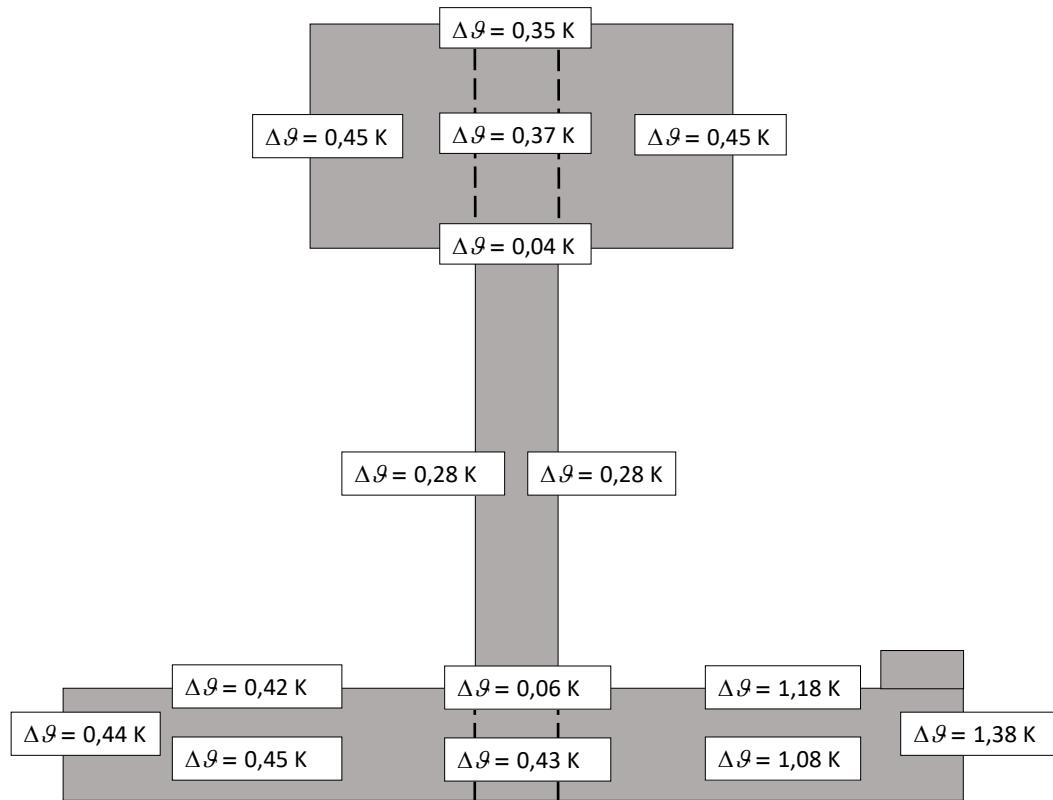


Bild 6: Abweichung der berechneten stationären Temperatur zwischen Wärmenetzmodell und FEM-Berechnung an ausgewählten Messpunkten

Im Anschluss müssen die Parameter für die Wärmeeinspeisung in die Schiene und die Wärmeabgabe über Konvektion und Strahlung experimentell bestimmt werden. Erste Erwärmungsversuche zeigen, dass es nicht möglich ist, die Wärmeleistung des Heizstabs unter Nutzung einer einzelnen Wärmeleistungsquelle im Wärmenetz einzuspeisen. Zum einen würden so Strahlung und Konvektion an der Oberfläche des Heizstabs nicht berücksichtigt und zum anderen erfolgt die Wärmeeinspeisung nicht präzise über die komplette Kontaktfläche zwischen dem Fuß der Backenschiene und dem Heizstab. Stattdessen wird der Heizstab als separater Körper aufgebaut. 15 Wärmeleistungsquellen generieren den Wärmestrom und fünf thermische Knoten realisieren den Kontakt zur Backenschiene (Bild 7).

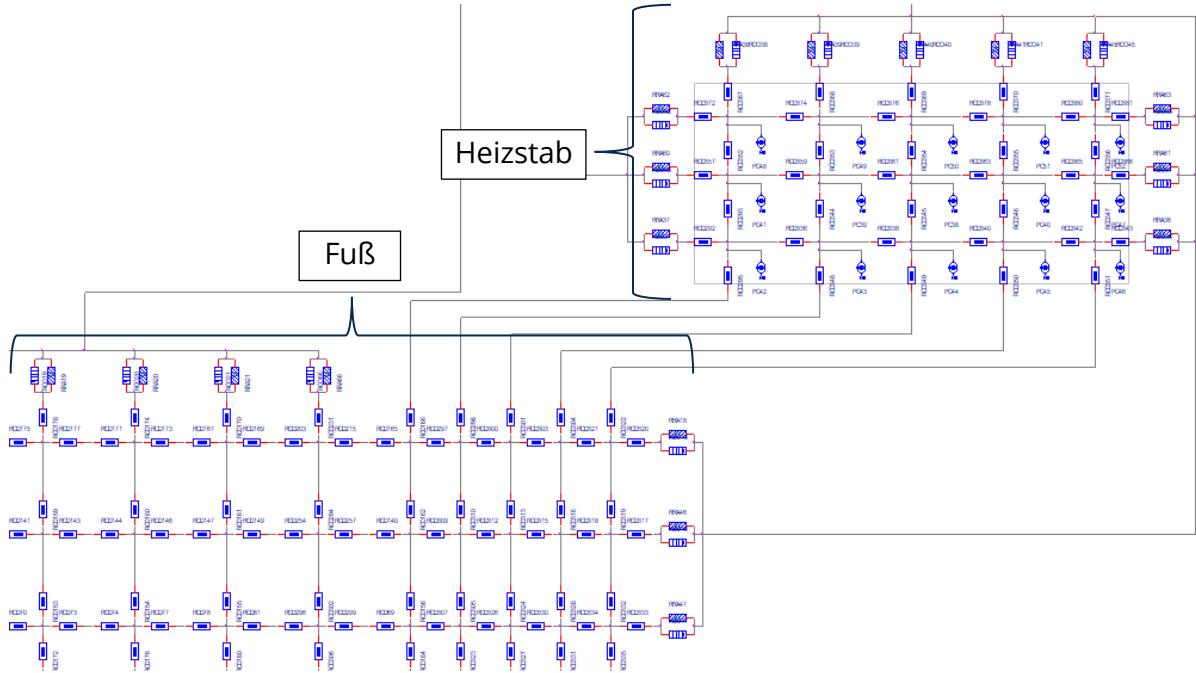


Bild 7: Verknüpfung des Wärmenetzes des Heizstabs mit dem Fuß der Backenschiene

Für die experimentelle Untersuchung wird der Heizstab zunächst mit den vorhandenen Klemmen an der Backenschiene befestigt. Dabei wird der Heizstab mittig in Längsrichtung zur Backenschiene montiert ( $l_{\text{Schiene}} = 3,63 \text{ m}$ ;  $l_{\text{Stab}} = 2,90 \text{ m}$ ). Um eine möglichst geringe Wärmeabgabe von der Schiene zum Boden zu erreichen, liegt die Backenschiene auf einer 12 cm dicken Styroporschicht auf. Die Temperaturen werden verteilt über den Umfang der Schiene in drei Bereichen gemessen (Bild 8). Ein Messbereich befindet sich in Längsrichtung mittig zur Backenschiene und zum Heizstab. Die anderen beiden Messbereiche sind im Abstand von 0,5 m jeweils links und rechts davon angeordnet.

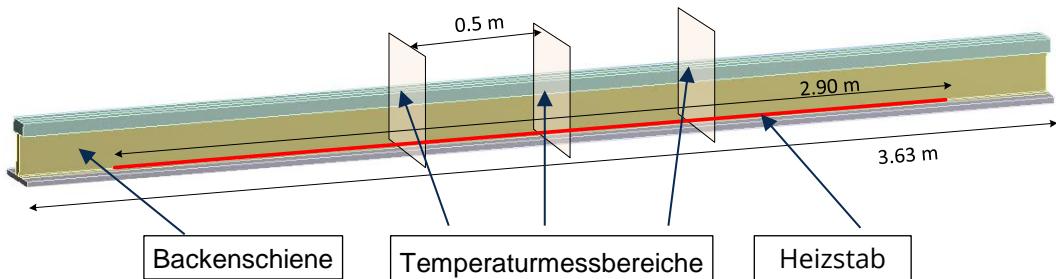


Bild 8: Prüfaufbau von Backenschiene und Heizstab zur experimentellen Verifikation des WNM-Modells

Die drei verschiedenen Messbereiche sollen zum Mitteln der gemessenen Temperaturen dienen, damit die Auswirkung von Messfehlern verringert wird. Die Position der Klemmen

zum Befestigen des Heizstabs und damit auch deren thermische Auswirkung auf die Wärmeübertragung sind in thermografischen Aufnahmen des Versuchs deutlich sichtbar (**Bild 9**). Jedoch werden sie im Wärmenetz nicht berücksichtigt. Stattdessen kalkuliert die Berechnung im Wärmenetz einen Mittelwert der Wärmeübertragung von den Positionen an einer Heizstabklemme und dem Zwischenraum.

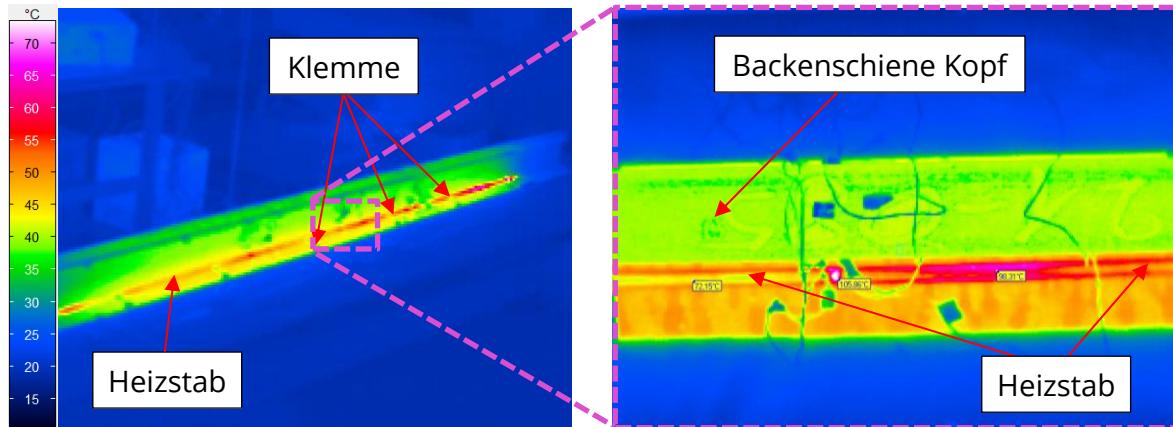


Bild 9: Temperaturverteilung am Heizstab in Längsrichtung, gemessen mit einer Wärmebildkamera

Innerhalb eines Messbereichs wird die Temperatur an neun Positionen auf der Oberfläche der Backenschiene gemessen (**Bild 10**). Eine zusätzliche Messung auf der Oberfläche des Heizstabs konnte nicht durchgeführt werden, da aufgrund der hohen Temperaturen ( $\vartheta > 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) die Lötverbindung am Thermoelement aufschmilzt.

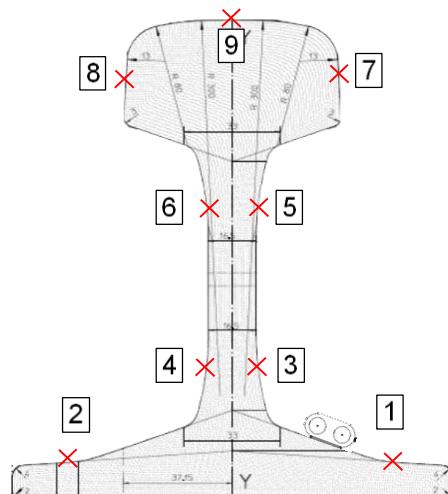


Bild 10: Nummerierung der Temperaturmessstellen innerhalb eines Messbereichs

Die Temperaturmessstellen sind über dem Umfang der Backenschiene verteilt und symmetrisch zur vertikalen Achse der Schiene angeordnet. Diese Anordnung ermöglicht es, einen möglichen Temperaturunterschied zwischen der Innenseite und der Außenseite der Schiene zu detektieren. Die Temperaturmessung selbst erfolgt mit Thermoelementen des Typs K (NiCr-Ni). Die Thermoelemente sind auf Kupferblättchen mit einer Fläche von

ca.  $1,3 \text{ cm}^2$  aufgelötet, die an den entsprechenden Positionen der Schiene festgeklebt werden (**Bild 11**).



Bild 11: Befestigung der Thermoelemente an Kupferblättchen und der Backenschiene

Fehlende thermische Parameter wie der Emissionsgrad für die Wärmestrahlung, Ähnlichkeitsparameter für die Konvektion und der Wärmeübergangswiderstand zwischen Heizstab und Fuß der Backenschiene können nun ermittelt werden. Für die Bestimmung des Emissionsgrads werden die Messergebnisse einer Wärmebildkamera mit den von den Thermoelementen gemessenen Temperaturen verglichen. Konvektionsparameter werden durch eine Visualisierung der Luftströmung an der Schiene bestimmt und der Wärmeübergangswiderstand zwischen Heizstab und Schiene wird durch eine Parameterstudie bestimmt. Ein detaillierter Ablauf dieser Vorgehen ist im 4. Zwischenbericht dokumentiert [4]. Zusätzlich sind alle verwendeten Parameter für die Wärmenetze von Backenschiene und Heizstab dem Bericht beigelegt (**Anlage 2**). Bei einer Heizleistung von  $P = 900 \text{ W}$  und einer Umgebungstemperatur von  $\vartheta_u = 17,1 \text{ }^\circ\text{C}$  konnten unter Nutzung der ermittelten Parameter geringe Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen festgestellt werden (**Bild 12**).

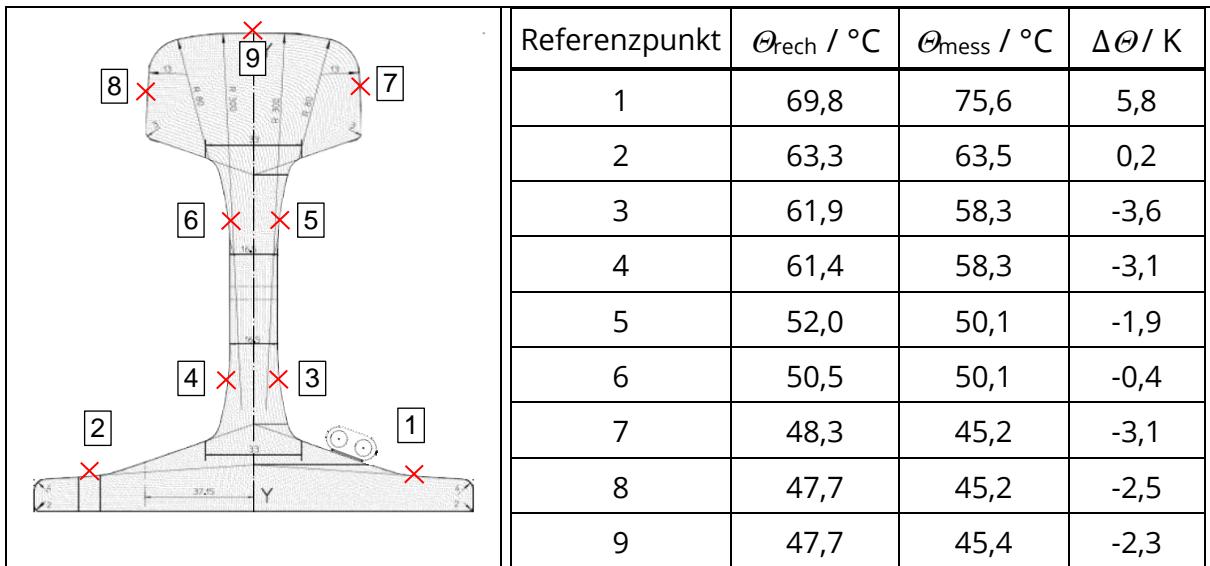


Bild 12: Vergleich der gemessenen und berechneten Übertemperaturen bei einer elektrischen Leistung  $P = 900 \text{ W}$  und einer Umgebungstemperatur  $\vartheta_u = 17,1 \text{ }^\circ\text{C}$

Mit dem vollständigen Wärmenetz der Weiche soll es auch möglich sein die Erwärmung zeitabhängig (dynamisch) zu berechnen. Dafür müssen thermische Kapazitäten in das Wärmenetz implementiert werden. Die größtmögliche Genauigkeit wird dabei erreicht, wenn jeder thermische Knoten mit einer thermischen Kapazität verbunden wird. Aufgrund des hohen Implementierungsaufwands und der relativ hohen Wärmeleitfähigkeit des Schienenmaterials ist das jedoch nicht notwendig. Über den Querschnitt der Backenschiene werden spezielle thermische Knoten selektiert, die stellvertretend die Wärmespeicherung für ganze Abschnitte repräsentieren. Das betrifft fünf Knoten im Fuß der Backenschiene, zwei im Steg und drei Knoten im Kopf der Backenschiene. Die Parameter für die Dichte und die spezifische Wärmekapazität des Schienenmaterials entstammen einer Recherche nach dem Stahl „R350 HT“. Eine dynamische Berechnung der Erwärmung wurde exemplarisch am Steg (**Bild 13**), am Kopf und am Fuß der Backenschiene durchgeführt. Vergleicht man die gemessenen und berechneten Temperaturen erkennt man nur geringe Differenzen sodass die Anzahl an thermischen Kapazitäten im Modell als ausreichend hoch betrachtet werden kann. Die Verifizierung der dynamischen Erwärmungsberechnung kann ausführlicher im 5. Zwischenbericht nachgelesen werden [**5**].

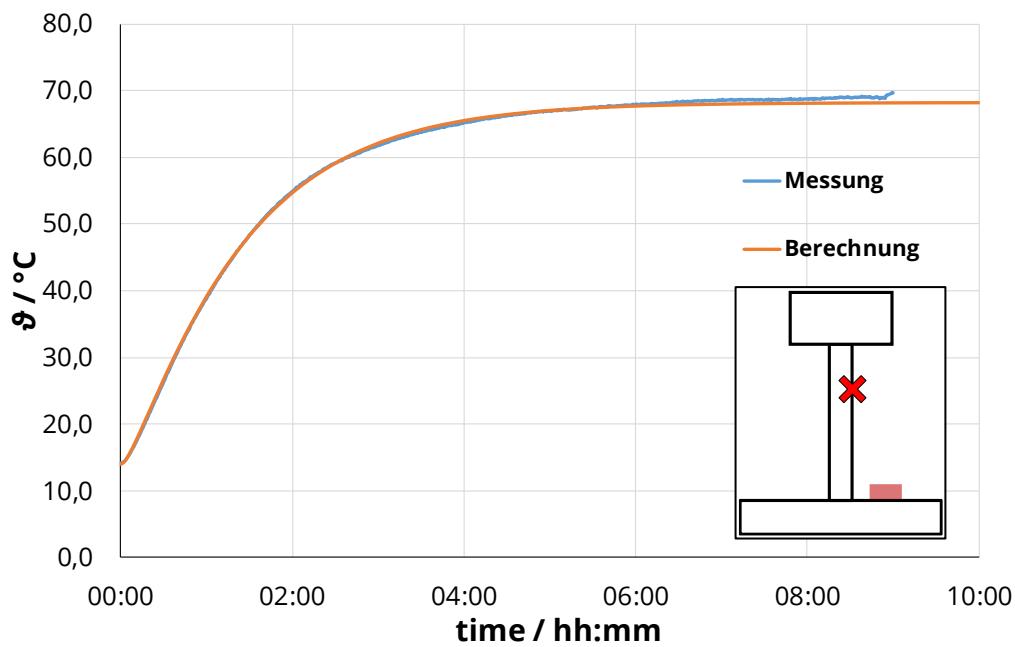


Bild 13: Gemessener und berechneter Temperaturverlauf am Steg der Backenschiene

Das Wärmenetz der Backenschiene ist aktuell in der Lage, einen zweidimensionalen Wärmetransport zu berechnen. An einer Weiche wird allerdings selbst bei homogener Wärmeeinspeisung durch einen Heizstab ein dreidimensionaler Wärmeefluss in der Backenschiene auftreten. Ursache hierfür sind Rippenplatten, die als Lagerpunkte der Backenschiene mit einem Mittenabstand von 60 cm dienen. Das Wärmenetz muss somit in Längsrichtung erweitert werden, um einen longitudinalen Wärmeefluss berechnen zu können. Die Methode mit der höchsten Genauigkeit wäre auch hier dafür jeden thermischen Knoten aus dem Wärmenetz des Querschnitts zu verwenden. Analog zur Implementierung der thermischen Kapazitäten werden repräsentative thermische Knoten bestimmt, die die Verknüpfung in Längsrichtung realisieren. Somit wird das bereits existierende Wärmenetz der Backenschiene mehrmals dupliziert und die gleichen (repräsentativen) Knoten werden über Wärmeleitungswiderstände miteinander verbunden (**Bild 14**). Dafür werden fünf thermische Knoten im Fuß, vier Knoten im Steg und zwei Knoten im Kopf ausgewählt.

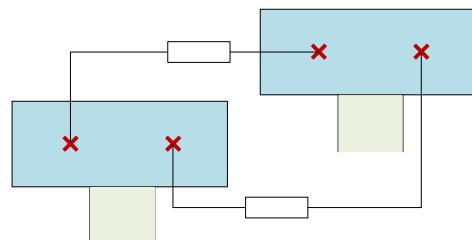


Bild 14: Verknüpfung des Wärmenetzes der Backenschiene in Längsrichtung (exemplarisch am Kopf)

Im Bereich der Weiche ändert sich die Kopfform der Backenschiene, um einen formschlüssigen Kontakt mit dem Kopf der Zungenschiene zu gewährleisten. Diese Geometrieveränderung wird im thermischen Modell nicht berücksichtigt, da der Einfluss auf den Wärmetransport als sehr gering betrachtet wird. Für die Erwärmungsberechnungen, die mit dem thermischen Modell schließlich ausgeführt werden sollen, ist besonders der Bereich um die Weichenspitze thermisch interessant. Deshalb wurde für das Wärmenetz eine Länge von insgesamt 5,639 m des Weichenbereichs thermisch abgebildet. Davon liegen 1,80 m vor der Weichenspitze (also dem Beginn der Zungenschiene) und 3,839 m dahinter. Es ist wichtig, auch den Bereich vor der Weichenspitze zu betrachten. Dort wird sich die Erwärmung aufgrund der fehlenden Zungenschiene anders als im Bereich der Weiche einstellen. Der Bereich vor der Weichenspitze beeinflusst daher deutlich die Erwärmung der Weiche. Im Wärmenetzmodell werden die ersten 90 cm nicht beheizt. Im Bereich der zweiten 90 cm, die an die Weichenspitze grenzen, ist ein Heizstab angeschlossen. Der Bereich vor der Weichenspitze wird als Abschnitt V bezeichnet. Die restliche Geometrie der Backenschiene wird mit den Abschnitten A bis D definiert (**Bild 15**).

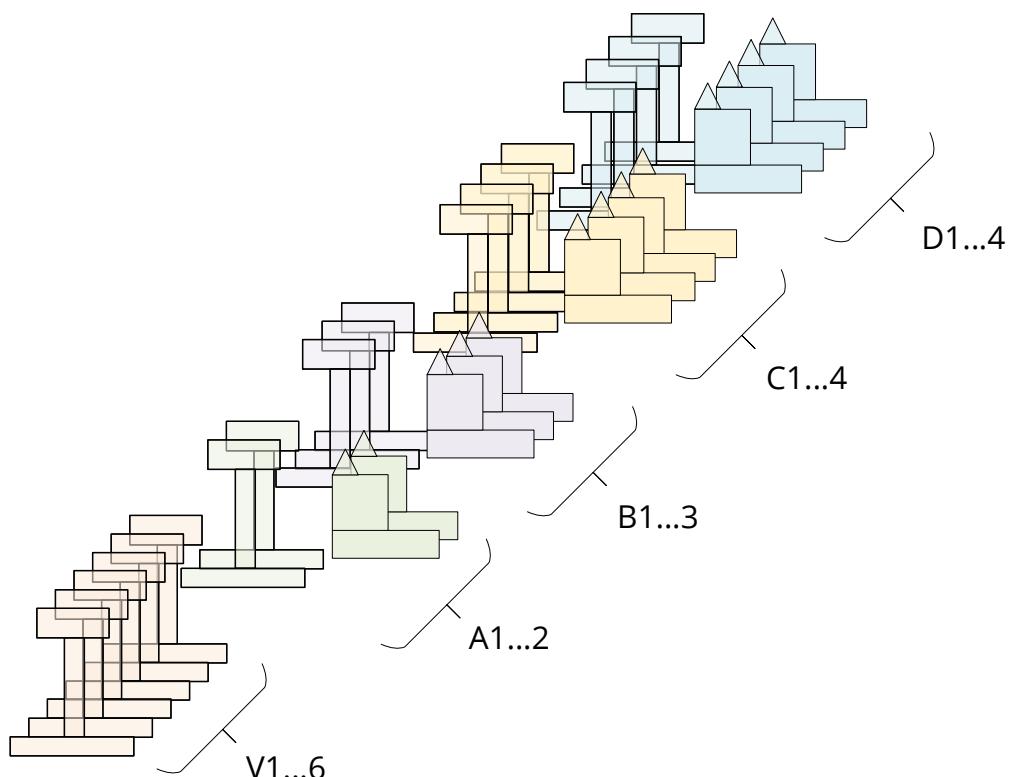


Bild 15: Unterteilung der Backenschiene in Abschnitte und Unterabschnitte

Die Abschnitte werden wiederrum in Unterabschnitte geteilt und mit einer Zahl gekennzeichnet. Abhängig von der Geometrie variiert die Anzahl an Unterabschnitten von zwei bis sechs (**Tabelle 4**). Die endgültige Bezeichnung eines Unterabschnitts setzt sich aus dem Buchstaben des Abschnitts und der jeweiligen Zahl zusammen. Beispielsweise beschreibt der Unterabschnitt „B2“ den mittleren Unterabschnitt im Abschnitt B. Die

aufgeführte Länge der Abschnitte und Unterabschnitte resultiert aus den Geometrien der Zungenschiene und gilt für eine Weiche mit einem Radius  $R = 500$  m (siehe Kap. 4.2).

Tabelle 4: Länge von Abschnitten und Unterabschnitten der Backenschiene

Abschnitt	Länge	Anzahl Unterabschnitte	Länge eines Unterabschnitts
V	1800 mm	6	300 mm
A	250 mm	2	125,0 mm
B	880 mm	3	293,3 mm
C	1400 mm	4	350,0 mm
D	1309 mm	4	327,3 mm

## 4.2 Aufbau des Wärmenetzes der Zungenschiene

Der Aufbau des Wärmenetzes der Zungenschiene erfolgt prinzipiell sehr ähnlich wie bei der Backenschiene. Allerdings ändert sich die Querschnittsgeometrie der Zungenschiene in Längsrichtung teils quantitativ und qualitativ. Die bereitgestellte technische Zeichnung unterteilt die Geometrie einer Zungenschiene für einen Weichenradius  $R = 500$  m in die Abschnitte A bis J (**Anlage 3**). Wie schon bei der Backenschiene, ist aus thermischer Sicht vorrangig der Bereich um die Spitze der Weiche von Interesse. Deshalb wurden im thermischen Modell auch nur die Abschnitte A bis D verwendet (weitere Abschnitte der Zungenschiene können falls nötig hinzugefügt werden). Die Abschnitte der Zungenschiene sind in Unterabschnitte gegliedert. Die Abschnitte, Unterabschnitte, deren Längen und Positionen entsprechen denen der Backenschiene (**Bild 15, Tabelle 4**). Das bedeutet, dass die Unterteilung von Backenschiene und Zungenschiene auf der technischen Zeichnung der Zungenschiene basieren. Die Unterteilung in Unterabschnitte wurde durchgeführt, um eine feinere Auflösung des Wärmenetzes in Längsrichtung der Schiene zu erhalten.

Die originale Geometrie der Zungenschiene muss zunächst approximiert werden, damit sie in das Wärmenetz implementiert werden kann. Dabei ist die Geometrie für die Abschnitte A, B und C ähnlich, sodass sie durch jeweils ein Rechteck im Fuß und Steg und ein Dreieck im Kopf vereinfacht werden kann (jeweils auf den Querschnitt bezogen; **Bild 16**). Im Abschnitt D werden Fuß und Steg mit denselben Formen approximiert, aber der Kopf wird durch ein Trapez angenähert.

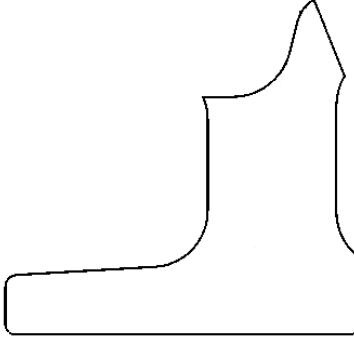
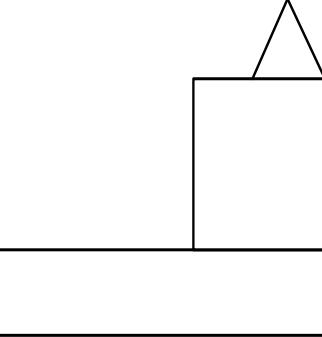
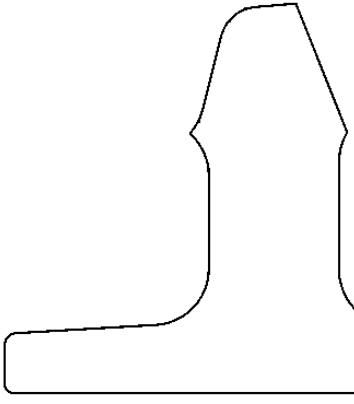
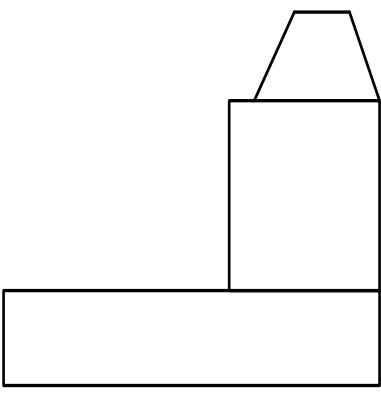
Abschnitt	originale Geometrie	approximierte Geometrie
A, B, C		
D		

Bild 16: Form der originalen und approximierten Geometrie für die Abschnitte A, B, C, D der Zungenschiene

Ein Vergleich von Umfang und Flächeninhalt zwischen originalen und approximierten Querschnitten zeigt nur geringe Unterschiede (**Tabelle 5**).

Tabelle 5: Vergleich der Geometrie von originalen und approximierten Querschnitten der Zungenschiene

Querschnitt	$A_a / A_o$	$O_a / O_o$
A	0,963	1,026
B	0,961	1,026
C	0,958	1,041
D	0,976	1,053

Im Resultat ist auch die Differenz der Volumina und Oberflächen gering. Der Einfluss der Approximation auf Wärmeleitung und Wärmeabgabe ist vernachlässigbar. Die approximierten Geometrien werden mit Widerständen für Wärmeleitung aufgebaut. An der Schnittstelle zur Umgebung werden Widerstände für Wärmestrahlung und

Konvektion gesetzt. Ein erster Vergleich einer Erwärmungsberechnung zwischen Wärmenetz und FEM zeigte eine maximale Temperaturdifferenz von 1,6 K bei einer Temperaturdifferenz von 100 K zwischen Wärmeeinspeisung und Umgebung (siehe 4. Zwischenbericht [4]). Der geringe Temperaturunterschied beider Berechnungsvarianten bestätigt eine ausreichend hohe Netzdichte des Wärmenetzes.

Die Unterabschnitte der Zungenschiene werden in longitudinaler Richtung mit Wärmeleitungswiderständen verknüpft. Hierfür werden erneut repräsentative thermische Knoten in den Teilstücken bestimmt. Anhand der geometrischen Maße der Zungenschiene werden vier Knoten im Fuß, vier Knoten im Steg und ein Knoten im Kopf dafür festgelegt (**Bild 17**).

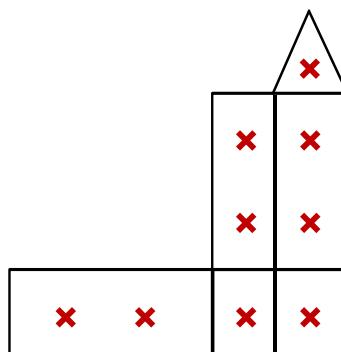


Bild 17: Repräsentative thermische Knoten zum Verknüpfen zweier Unterabschnitte der Zungenschiene in Längsrichtung

Für die experimentelle Verifikation des Wärmenetzmodells der Zungenschiene steht eine Schiene der Firma „Tensol Rail AG“ des Typs „EW VI-500 TOZ-S –LR“ mit einer Länge von 3,00 m zur Verfügung. Dafür muss zunächst das vorhandene Wärmenetz der gesamten Zungenschiene bis auf eine Länge von 3 m (gemessen von der Spitze) reduziert werden. Das entspricht Unterabschnitt A1 bis D2. Am Unterabschnitt D2 werden an den repräsentativen thermischen Knoten Widerstände für Konvektion und Strahlung statt den Widerständen für Wärmeleitung angeschlossen. Damit können die realen Bedingungen der Wärmeabgabe am Ende der Modellschiene nachgebildet werden.

Die Wärmeeinspeisung erfolgt durch einen Weichenheizstab mit einer Länge  $l = 2,90$  m und eine Heizleistung von  $P = 900$  W bei einer Spannung von  $U = 230$  V. Die Wärmeabgabe über den Fuß an den Boden wird durch eine 12 cm dicke Styroporschicht weitestgehend eingeschränkt. Die Temperaturen wurden in drei Bereichen entlang der Länge der Zungenschiene gemessen. Der mittlere Messbereich besaß einen Abstand von 1,50 m zu beiden Enden der Zungenschiene. Die anderen beiden Messbereiche wurden jeweils 6 cm davor und dahinter positioniert (**Bild 18**).

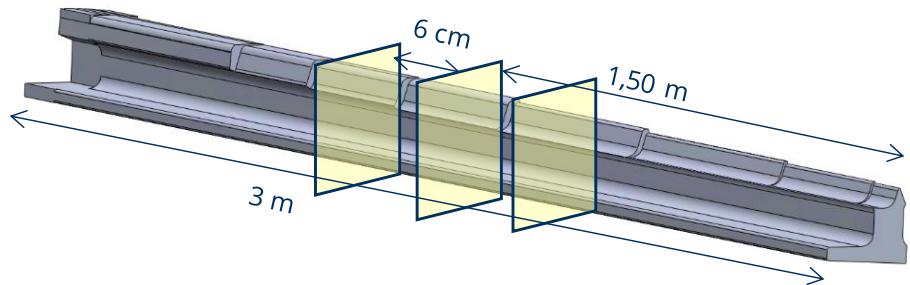


Bild 18: Position der Temperaturmessbereiche an der Zungenschiene

Um den Einfluss zufälliger Messfehler zu verringern, sollen die gemessenen Temperaturen jeweiliger Messstellen in den verschiedenen Bereichen gemittelt werden. Dafür soll sich die Größe der Oberfläche, die für die Wärmeabgabe genutzt wird, so wenig wie möglich ändern. Deshalb wird ein relativ geringer Abstand zwischen den Messbereichen gewählt. Die Geometrie ändert sich in diesem Längenabschnitt nur sehr geringfügig und besitzt somit keinen Einfluss auf die Erwärmung. Die Messbereiche entsprechen dem Unterabschnitt C1 im thermischen Modell.

In jedem Messbereich werden sieben Positionen für die Temperaturmessung ausgewählt (**Bild 19**).

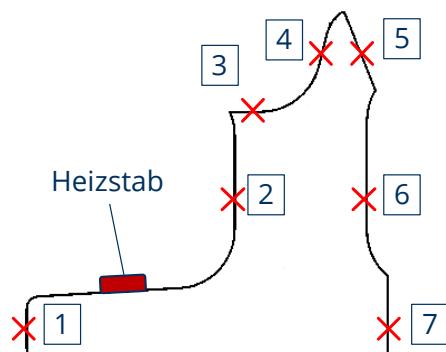


Bild 19: Temperaturmessstellen innerhalb eines Messbereichs der Zungenschiene

Die Temperaturen werden mit Thermoelementen des Typs K gemessen. Die eingespeiste Leistung beträgt  $P = 400 \text{ W}$  und die Temperaturen werden bei einer Umgebungstemperatur von  $\vartheta_u = 33,9 \text{ }^\circ\text{C}$  aufgenommen (**Tabelle 6**).

Tabelle 6: Vergleich berechneter und gemessener Temperaturen an der Zungenschiene

Temperaturmessstelle	$\vartheta_{\text{WNM}} / ^\circ\text{C}$	$\vartheta_{\text{Exp}} / ^\circ\text{C}$	$\Delta\vartheta / \text{K}$
1	77,3	75,5	1,8
2	72,9	70,9	2,0
3	72,3	70,5	1,8
4	71,4	69,4	2,0
5	71,4	68,8	1,6
6	72,8	71,1	1,7
7	74,1	71,5	2,6

Im thermisch stationären Zustand sind nur geringfügige Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen an der Zungenschiene zu erkennen. Die Parameter für die thermischen Elemente des sind gut gewählt. Die eingesetzten Parameter der Zungenschiene sind im Anhang zu finden (**Anlage 4**). Die experimentelle Verifizierung kann detailliert im 5. Zwischenbericht nachgelesen werden [5].

Um eine zeitabhängige Erwärmung der Zungenschiene berechnen zu können, werden thermische Kapazitäten eingefügt. In jedem Unterabschnitt gibt es jeweils vier Kapazitäten im Fuß, vier Kapazitäten im Steg und eine Kapazität im Kopf des Querschnitts. Die Parameter für die Dichte und der spezifischen Wärmekapazität wurden gleich der Backenschiene gesetzt.

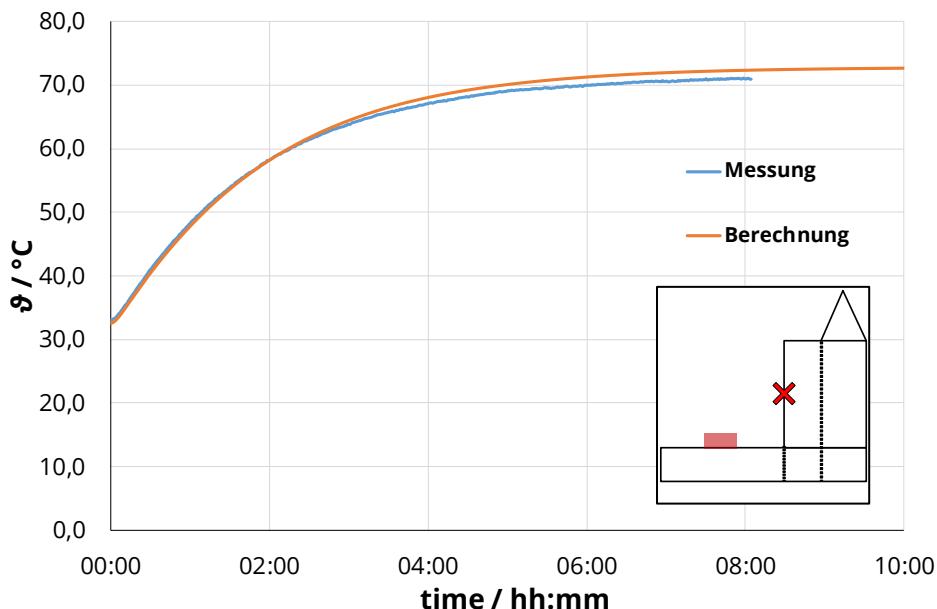


Bild 20: Gemessener und berechneter Temperaturverlauf am Steg der Zungenschiene

Der geringe Unterschied zwischen den berechneten und den gemessenen Temperaturen bestätigt die Genauigkeit des aufgestellten Wärmenetzes, eine zeitabhängige Erwärmung der Zungenschiene zu berechnen (**Bild 20**). Es sind genügend thermische Kapazitäten implementiert worden.

#### 4.3 Aufbau des Wärmenetzes von Rippenplatte und Gleitstuhl

Rippenplatte und Gleitstuhl können prinzipiell als ein Bauteil betrachtet werden. Dabei dient die Rippenplatte als Lagerung der Backenschiene und Befestigung der Schienen auf der Schwelle. Der Gleitstuhl ist die Auflagefläche der Zungenschiene, die je nach Stellung der Weiche ihre Position variiert (**Bild 21**).



Bild 21: Rippenplatte mit Gleitstuhl auf einer Betonschwelle

Aufgrund einer relativ guten Wärmeleitfähigkeit von Stahl (ca.  $(15 \dots 70) \text{ W} / (\text{m K})^{-1}$  [1]) wird ein Teil der Wärme von Backenschiene zur Zungenschiene oder umgekehrt über Rippenplatte und Gleitstuhl geleitet werden können, ohne dass sich beide Komponenten direkt berühren. Deshalb ist es für das Wärmenetz der gesamten Weiche wichtig, dass auch Rippenplatte und Gleitstuhl modelliert werden.

Die Geometriedaten von Rippenplatte und Gleitstuhl wurden von der ÖBB anhand einer technischen Zeichnung bereitgestellt (**Anlage 5**). Die Vorgehensweise zum Aufbau des Wärmenetzes erfolgt analog zu den Komponenten Backenschiene und Zungenschiene. Zunächst wird die originale Geometrie des Bauteils approximiert, um sie mit geringem Aufwand im Wärmenetz aufbauen zu können (**Bild 22**).

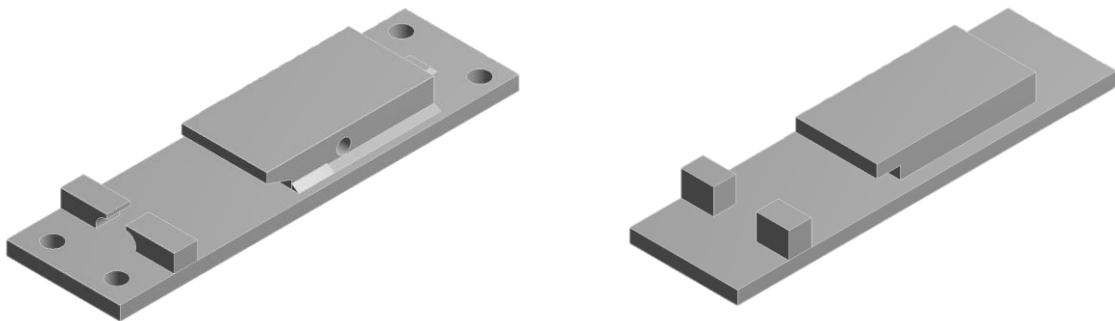


Bild 22: Originale (links) und approximierte Geometrie (rechts) von Rippenplatte und Gleitstuhl

Dazu werden die vier Löcher zur Verschraubung mit der Schwelle, die Aussparung im Gleitstuhl und die Schweißnähte des Gleitstuhls entfernt. Die beiden Sockel der Rippenplatte werden durch einfache Quadere ersetzt und deren Länge und Höhe angepasst. Um die Auswirkung der approximierten Geometrie auf die Erwärmung in erster Näherung beurteilen zu können, werden die Größe der Oberfläche und des Volumens von originaler und approximierter Geometrie miteinander verglichen (**Tabelle 7**).

Tabelle 7: Vergleich von Oberfläche und Volumen zwischen originaler und approximierter Geometrie von Rippenplatte und Gleitstuhl

	originale Geometrie	approximierte Geometrie	prozentuale Abweichung
Oberfläche	0,193 m <sup>2</sup>	0,196 m <sup>2</sup>	1,6 %
Volumen	2,59 dm <sup>3</sup>	2,66 dm <sup>3</sup>	2,7 %

Es ergeben sich nur geringe Abweichungen zwischen den Oberflächen und den Volumina der originalen und der approximierten Geometrie. Die Wärmeleitung im Bauteil als auch die Wärmeabgabe an die Umgebung wird durch die Approximation der Geometrie nicht signifikant beeinflusst.

Um diese Vermutung zu bestätigen, wird eine FEM-Berechnung durchgeführt. Dafür wird eine Temperatur von  $\vartheta_q = 50^\circ\text{C}$  auf der Oberfläche des Gleitstuhls und eine Umgebungstemperatur von  $\vartheta_u = 0^\circ\text{C}$  definiert. Die berechneten Temperaturen des FEM-Modells werden den Berechnungsergebnissen des Wärmenetzes verglichen (**Bild 23**). Das Wärmenetz besteht aus Wärmeleitungswiderständen, die die approximierte Geometrie nachbilden und Widerstände für Konvektion und Strahlung an der Schnittstelle zur Umgebung. Konvektion und Strahlung wurde für beide Modelle identisch implementiert.

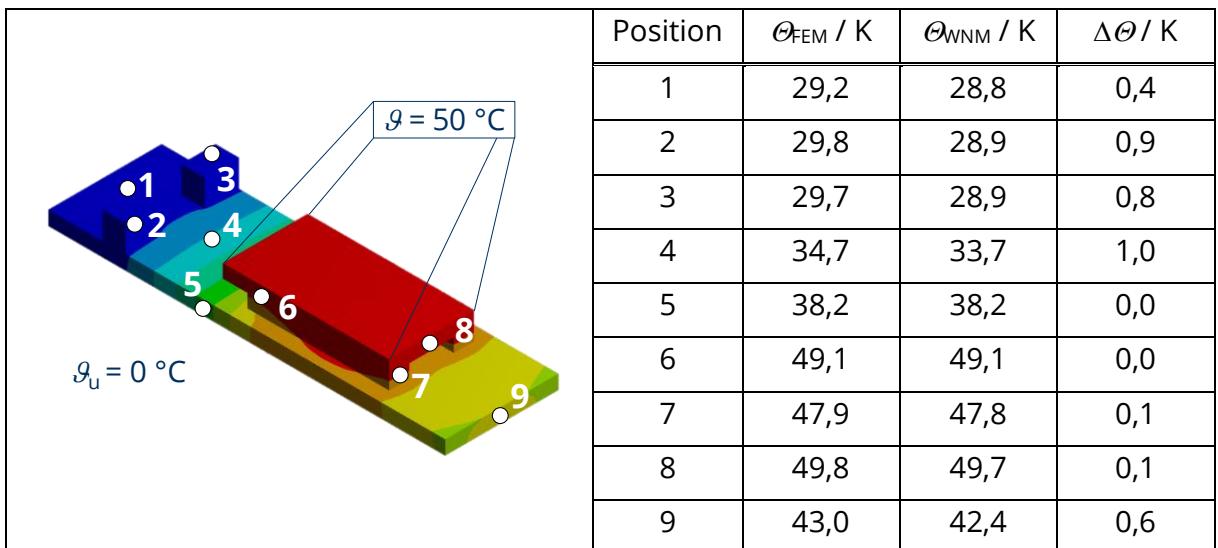


Bild 23: Mit dem FEM-Modell und mit dem Wärmenetz berechnete Übertemperaturen im Vergleich

Die geringen Temperaturunterschiede zwischen den Erwärmungsberechnungen mit dem Wärmenetz und dem FEM-Modell bestätigen eine ausreichend hohe Anzahl an thermischen Elementen im Wärmenetz. Im nächsten Schritt müssen die gewählten Parameter für Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung experimentell verifiziert werden. Um für die experimentelle Untersuchung die thermische Energie in das Bauteil zu führen, wird eine Heizplatte verwendet. Die Heizplatte ist ein Aluminiumquader mit den Maßen 120 mm x 63 mm x 20 mm. In diesem Quader befinden sich zwei symmetrische, parallele Bohrungen, in denen sich Heizpatronen befinden. In den Heizpatronen wird die thermische Energie erzeugt und aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium (ca. 223 W / (m K)<sup>1</sup> [1]) gleichmäßig entlang der Oberfläche der Heizplatte verteilt. Die Heizplatte liegt auf dem Gleitstuhl bzw. der Rippenplatte auf. Eine Isolierung aus Steinwolle verhindert eine große Wärmeabgabe von der Heizplatte an die Umgebung. Zwei verschiedene, separat untersuchte Wärmeeinspeisungen helfen, die notwendige Netzdichte zu ermitteln und ermöglichen, den Wärmestrom in zwei verschiedene Richtungen zu untersuchen. Weiterhin lässt sich so auch der Emissionsgrad der jeweiligen Fläche bestimmen, die von Heizplatte und Isolierung verdeckt wird (**Bild 24**).

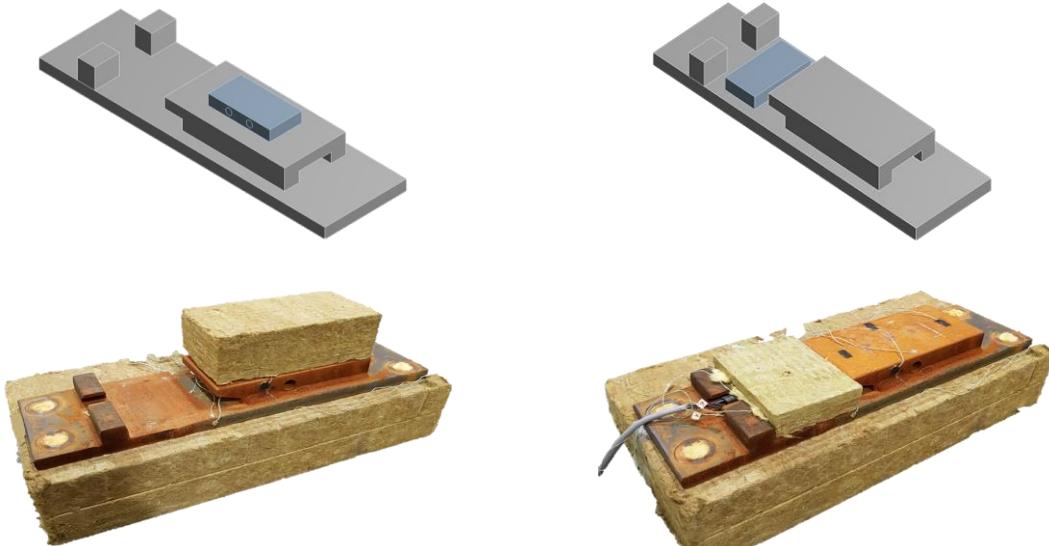


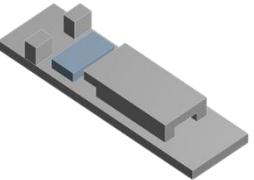
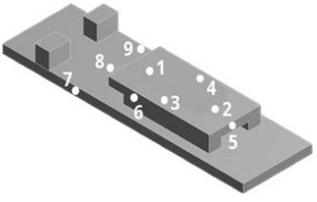
Bild 24: Beide Positionen der Wärmeeinspeisung schematisch (oben) und im Experiment (unten)

Um eine möglichst geringe Wärmeabgabe an den Boden zu erreichen, liegt die Rippenplatte auf einer 12 cm dicken Schicht aus Steinwolle. Die Parameter für das Wärmenetz sind für Rippenplatte und Gleitstuhl vollständig unter **Anlage 6** angegeben. Für diese Parameterwahl konnte die größte Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen für eine statische Erwärmung ermittelt werden (**Tabelle 8**, **Tabelle 9**).

Tabelle 8: Gemessene und berechnete Übertemperaturen bei der Wärmeeinspeisung auf dem Gleitstuhl

	Position	$\Theta_{\text{mess}} / \text{K}$	$\Theta_{\text{rechn}} / \text{K}$	$\Delta\Theta / \text{K}$
	1	62,8	63,4	0,6
	2	62,8	62,8	0,0
	3	63,8	62,3	-1,5
	4	63,1	62,3	-0,8
	5	59,5	61,4	1,9
	6	58,9	60,5	1,6
	7	44,2	45	0,8
	8	45,5	45,2	-0,3
	9	43,7	45	1,3

Tabelle 9: Gemessene und berechnete Übertemperaturen bei der Wärmeeinspeisung auf der Rippenplatte

	Position	$\Theta_{\text{mess}} / \text{K}$	$\Theta_{\text{rechn}} / \text{K}$	$\Delta\Theta / \text{K}$
	1	42,2	40,5	-1,7
	2	34,4	35,3	0,9
	3	40	40	0
	4	39,8	39,6	-0,2
	5	34,1	35	0,9
	6	42,7	42,1	-0,6
	7	61,8	63,6	1,8
	8	65,0	65,0	0,0
	9	62,4	63,6	1,2

Die Differenzen zwischen den berechneten und den gemessenen Temperaturen im thermisch stationären Zustand sind für beide Positionen des Heizelements an allen Messpositionen kleiner als 2 K. Die geringen Temperaturunterschiede bestätigen die Genauigkeit des Wärmenetzes von Rippenplatte und Gleitstuhl für thermisch stationäre Berechnungen. Die Verifizierung ist detailliert im 5. Zwischenbericht nachzulesen [5].

Für die Berechnung zeitabhängiger Erwärmung werden dem Wärmenetz thermische Kapazitäten hinzugefügt. Ursprünglich werden ca. 60 Kapazitäten für die Verifizierung implementiert. Die Temperatur- bzw. Zeitunterschiede bleiben beim Vergleich gering. Für das finale Modell werden die thermischen Kapazitäten zu Gunsten der Rechenzeit auf acht Kapazitäten in der Rippenplatte und vier Kapazitäten im Gleitstuhl reduziert. Dabei kann kein wesentliches Verringern der Genauigkeit beobachtet werden.

#### 4.4 Aufbau des Wärmenetzes einer Schwelle

Die Schwelle ist das Bindeglied zwischen dem beheizten Teil einer Weiche und dem Gleisbett. Somit gibt ein Wärmenetz der Schwelle Aufschluss darüber, wie viel Heizleistung von den Schienen in das Gleisbett abgegeben wird. Aufgrund der annähernd quaderförmigen Form der Betonschwelle müssen wenige Änderungen an der originalen Geometrie für die Approximation vorgenommen werden. Es werden lediglich die Bohrlöcher zum Befestigen der Rippenplatten, die Fasen an den Kanten und Unebenheiten auf der Oberfläche vernachlässigt (**Bild 25**). Für den Aufbau des Wärmenetzes wird die Stahlbewehrung vernachlässigt.

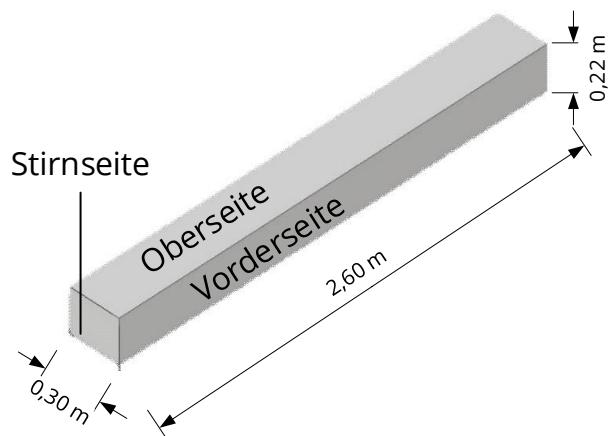


Bild 25: Maße der approximierten Geometrie der Betonschwelle

Die homogene Form der Geometrie ermöglicht einen unkomplizierten Aufbau des Wärmenetzes aus Widerständen für Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Mit einer experimentellen Untersuchung können die thermischen Parameter für die Wärmetransportprozesse bestimmt werden. Die thermische Leistung wird dafür über eine Heizplatte mit den Maßen 300 mm x 260 mm x 20 mm eingespeist. Die Heizplatte liefert eine maximale Leistung von  $P_H = 200 \text{ W}$ . Eine Unterlage aus Steinwolle mit einer Dicke von 12 cm isoliert die Schwelle thermisch gegen den Untergrund (**Bild 26**).

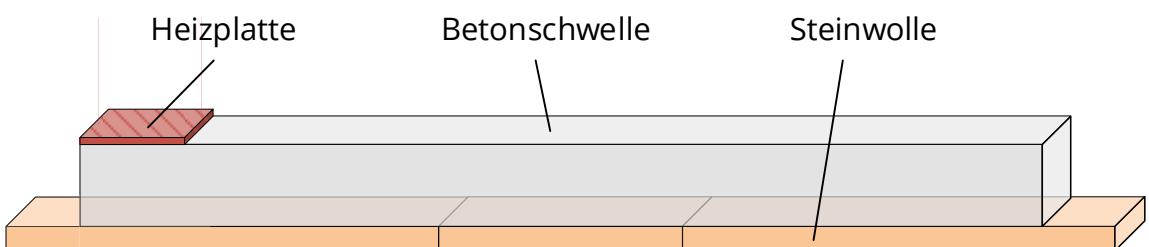


Bild 26: Experimenteller Versuchsaufbau zur Verifizierung des Wärmenetzes der Schwelle

Die Heizplatte wird zu den Seiten und nach oben mit einer 12 cm dicken Schicht Steinwolle umhüllt, um eine möglichst große Wärmeeinspeisung in die Schwelle zu garantieren. Zum Messen der Temperatur kommen Thermoelemente des Typs K zum Einsatz. Für den Erwärmungsversuch wird die Heizplatte auf der Oberseite der Schwelle positioniert (**Bild 26**). Die Temperaturen werden jeweils sechs Positionen der Oberseite und der Stirnseite und an acht Positionen der Vorderseite der Schwelle gemessen (**Bild 27**).

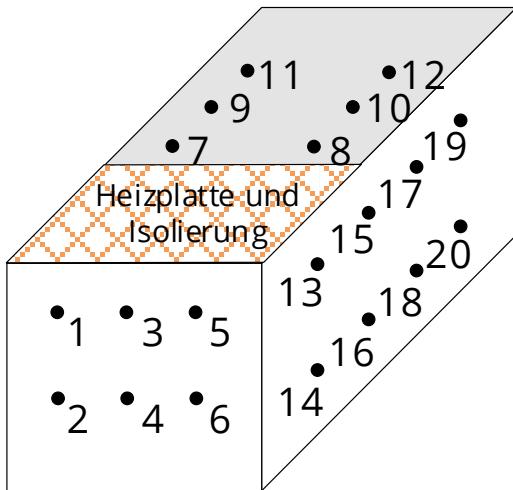


Bild 27: Position der Temperaturmessstellen an der Betonschwelle

Tabelle 10: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturen an der Schwelle

Pos.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\vartheta_{\text{Exp}} / ^\circ\text{C}$	56,1	43,6	64,7	48,5	56,6	44,9	43,2	45,4	31,4	31,5
$\vartheta_{\text{WNM}} / ^\circ\text{C}$	57,0	42,8	60,2	47,5	57,0	42,7	37,0	37,2	28,5	28,6
$\Delta \vartheta / \text{K}$	0,9	-0,8	-4,5	-1,0	0,4	-2,2	-6,2	-8,2	-2,9	-2,9
Pos.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\vartheta_{\text{Exp}} / ^\circ\text{C}$	26,1	26,5	61,6	47,4	46,5	40,7	31,4	31,3	26,4	26,7
$\vartheta_{\text{WNM}} / ^\circ\text{C}$	25,3	25,3	74,0	51,7	37,1	37,0	28,5	29,4	25,3	25,6
$\Delta \vartheta / \text{K}$	-0,8	-1,2	12,4	4,3	-8,4	-3,7	-2,9	-2,9	-1,1	-1,1

Bei einer eingespeisten thermischen Leistung von  $P = 100 \text{ W}$  treten bei einer Umgebungstemperatur von  $\vartheta_u = 23,5 \text{ }^\circ\text{C}$  teils deutliche Unterschiede (max. 12 K Pos. 13) zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen auf (**Tabelle 10**).

Neben Abweichungen im Wärmenetzmodell ist auch eine fehlerbehaftete Messung der Temperatur auf der thermisch schlecht leitfähigen Oberfläche des Betons möglich. Auf eine aufwendige Optimierung des Wärmenetzes der Schwelle oder der Temperaturmessung an der Schwelle wird verzichtet, da die Genauigkeit des Wärmenetzes der Schwelle eine geringere Priorität als die Wärmenetze von Backen- und

Zungenschiene, sowie Rippenplatte und Gleitstuhl besitzt. Die Parameter für das Wärmenetz der Schwelle sind in **Anlage 7** nachzulesen.

#### 4.5 Zusammenfügen der Teilnetze zu einem Wärmenetz der gesamten Weiche

Ein wesentlicher Vorteil der Wärmenetzmethode ist die Möglichkeit, eine Teilnetzwerke unkompliziert miteinander zu verknüpfen. Dafür werden die thermischen Knoten verschiedener Komponenten über Wärmeleitung oder Strahlung miteinander verbunden. Übergangswiderstände können an dieser Stelle beliebig angepasst werden. Die separaten Teilnetze besitzen im Vergleich eine unterschiedlich hohe Netzdichte. Es muss beim Verbinden der Netzwerke darauf geachtet werden, dass die Netzdichten im Verbindungsbereich aneinander angepasst werden. Das passiert durch Kurzschließen der thermischen Knoten des Bauteils mit der höheren Auflösung. Exemplarisch ist diese Methode am Übergang vom Fuß der Backenschiene zur Rippenplatte dargestellt (**Bild 28**).

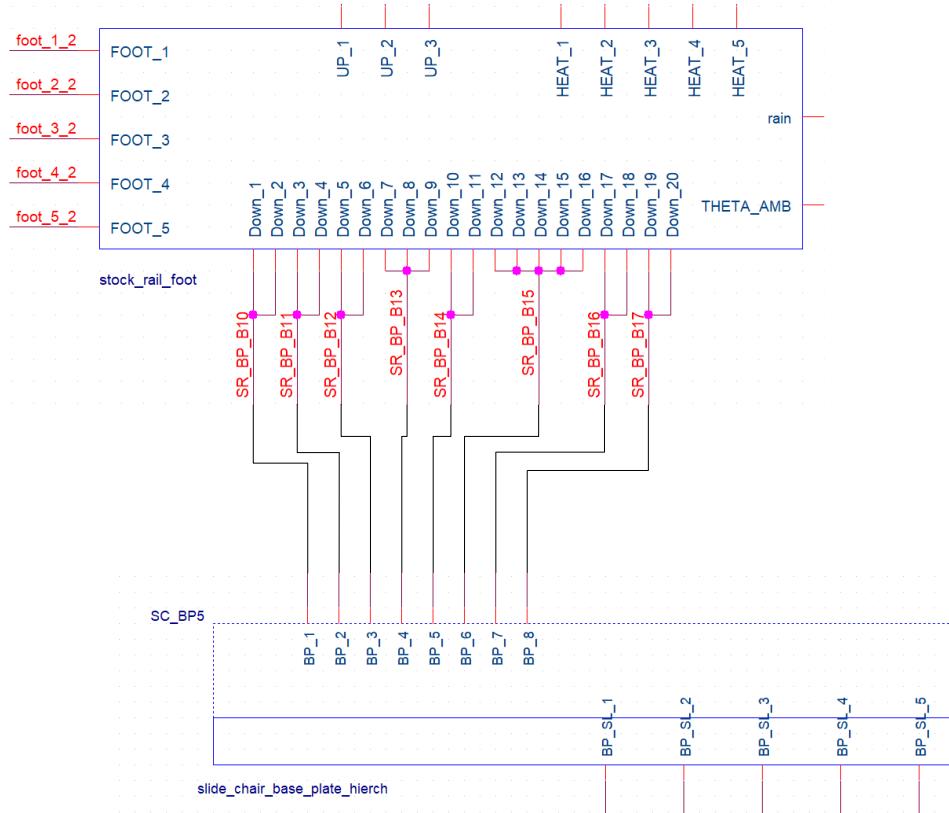


Bild 28: Verknüpfung von zwei Komponenten unterschiedlicher Netzdichte am Beispiel von Backenschiene und Rippenplatte (vereinfacht dargestellt)

Für die Kontaktfläche werden am Fuß der Backenschiene 20 und an der Rippenplatte nur acht thermische Knoten verwendet. Die 20 Knoten der Backenschiene müssen also zu insgesamt acht neuen Knoten gruppiert werden. Dabei muss aber der jeweilige räumliche

Abstand der Gruppen berücksichtigt werden und mit dem Abstand der Knoten an der Rippenplatte übereinstimmen. Aus diesem Grund wurden an der Backenschiene entweder zwei, drei oder fünf thermische Knoten zu einer Gruppe zusammengefasst.

Diese Methode wird neben der Verbindungsstelle von Backenschiene und Rippenplatte noch für die Verknüpfung von Zungenschiene und Gleitstuhl, Rippenplatte und Schwelle sowie Backenschiene und Zungenschiene (per Strahlung bzw. Strahlung und Wärmeleitung; je nach Weichenseite).

Zusätzlich werden thermische Widerstände am Übergang von Backenschiene zu Rippenplatte, von Gleitstuhl zu Zungenschiene, von Rippenplatte zu Schwelle und von Backenschiene zu Zungenschiene implementiert. Zwischen der Unterseite der Rippenplatte und der Betonschwelle befindet sich eine elastische Zwischenplatte mit einer Dicke von 4,0 mm. Für die spezifische Wärmeleitfähigkeit wurde sich an einem durchschnittlichen Wert für Elastomere orientiert und  $\lambda = 0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  gewählt [2]. Aufgrund der geringen Leitfähigkeit des Betons der Schwellen muss nicht die komplette Schwelle thermisch modelliert werden, sondern nur der Bereich in dem noch Wärmeleitung stattfindet. Daher wird lediglich eine Hälfte der Schwelle an der jeweiligen Position im Wärmenetz berücksichtigt. Für die Erwärmung unter Laborbedingungen werden Widerstände für Konvektion und Strahlung an die thermischen Knoten an der kompletten Oberfläche der Betonschwelle, die nicht von der Rippenplatte bedeckt wird angeschlossen. Für die Erwärmungsberechnung der realen Weiche wurde davon ausgegangen, dass die Schwellen bis zur Hälfte der Höhe im Gleisbett verlegt werden. Die obere Hälfte der Schwelle wird mit Wärmewiderständen für Konvektion und Strahlung verknüpft und an die thermischen Knoten der unteren Hälfte werden Temperaturquellen, auf Potential der Umgebungstemperatur, angeschlossen.

Eine weitere wichtige Überlegung ist die Anordnung der Komponenten in Längsrichtung der Weiche. Wie schon in **Bild 15** gezeigt, sind Backen- und Zungenschiene in Unterabschnitte in Längsrichtung unterteilt. Die Schwellen und auch die Rippenplatten und Gleitstühle haben jeweils einen Mitte-Mitte-Abstand von 60 cm. Das bedeutet nicht jeder Unterabschnitt kann mit Rippenplatte, Gleitstuhl und Schwelle verknüpft werden. Somit müssen diese Komponenten den Unterabschnitten zugeordnet werden, die an der korrekten Position liegen (**Anlage 8**). Dabei wurde festgelegt, dass sich der Unterabschnitt A1 auf Höhe einer Schwelle befindet.

Die Anzahl an modellierten Komponenten im Wärmenetz und die jeweilige Netzdichte verringern die Übersichtlichkeit des Weichenmodells. Eine Variante, um diesen Umstand zu beheben, ist ein hierarchischer Aufbau des Wärmenetzes. Das Wärmenetz der Weiche in drei hierarchischen Ebenen aufgebaut (**Tabelle 11**).

Tabelle 11: Zuordnung des hierarchischen Aufbaus des thermischen Modells der Weiche

Ebene 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Übersicht aller Komponenten</li> <li>▪ Implementierung globaler Parameter, die abhängig von der Umgebungsbedingung angepasst werden können</li> <li>▪ Abschnitte der Schienen werden dargestellt</li> </ul>
Ebene 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Übersicht der einzelnen Unterabschnitte der Schienen</li> <li>▪ Übersicht über Rippenplatte und Gleitstuhl</li> <li>▪ Implementierung lokaler Parameter einzelner Komponenten oder Abschnitte und globaler Parameter, die nicht geändert werden müssen</li> <li>▪ Feinauflösung der Weichenschwelle</li> </ul>
Ebene 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Feinauflösung von Fuß, Steg und Kopf von Backenschiene bzw. Zungenschiene</li> <li>▪ Feinauflösung von Rippenplatte und Gleitstuhl</li> </ul>

Um einen hierarchischen Aufbau zu ermöglichen, musste für jede Komponente ein Bauteil aus dem jeweiligen Wärmenetz erzeugt werden. Diese Bauteile sind in verschiedenen Bibliotheken gespeichert (**Anlage 9**).

Für die Erwärmungsberechnung der X-Seite der Weiche existiert ein Wärmeaustausch über Strahlung zwischen der Backen- und der Zungenschiene. Da eine Fläche die andere jedoch nicht vollständig umhüllt, erreicht nicht der vollständige Teil der emittierten Strahlung die andere Komponente. Um die tatsächlich am Wärmeaustausch von Backen- und Zungenschiene beteiligte Wärmestrahlung zu berechnen muss ein Sichtfaktor bestimmt werden. Der Sichtfaktor gibt an, wie groß der Anteil der ausgetauschten Wärmestrahlung zur abgestrahlten Wärme ist (**Gl. (14), [6]**).

Zur Vereinfachung werden der innenliegende Steg und die Innenseite des Kopfes der Backenschiene, sowie Kopf, Steg und Fuß der Zungenschiene auf der Innenseite für den gegenseitigen Strahlungsaustausch bestimmt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die sich anstrahlenden Flächen parallel verlaufen und unendlich lang seien. Unter diesen Voraussetzungen kann der Sichtfaktor vereinfacht berechnet werden (**Gl. (16)**).

$$F_{12} = \frac{1}{2x} \left[ \sqrt{(x+y)^2 + 4} - \sqrt{(y-x)^2 + 4} \right] \quad (16)$$

mit  $x = \frac{h_{Ba}}{s}$  und  $y = \frac{h_{Zu}}{s}$ ; wobei  $h_{Ba}$  bzw.  $h_{Zu}$  die Höhe der Strahlungsfläche von Backenschiene bzw. Zungenschiene und  $s$  der Abstand beider Flächen ist. Die Berechnung des Sichtfaktors zwischen Backenschiene und Zungenschiene wurde aufgrund der geometrischen Änderungen der Zungenschiene für jeden Abschnitt separat durchgeführt (**Tabelle 12**). Der Abstand beider Flächen beträgt  $s = 180,5$  mm.

Tabelle 12: Sichtfaktoren für die X-Seite bei einem Schienenabstand  $s = 180,5$  mm

Abschnitt	$h_{Ba}$	$h_{Zu}$	$F_{12}$
A	155 mm	108 mm	0,266
B	155 mm	111 mm	0,273
C	155 mm	118 mm	0,290
D	155 mm	125,5 mm	0,306

Bei der Erwärmungsberechnung der Y-Seite der Weiche wird davon ausgegangen, dass sich Kopf von Backen- und Zungenschiene in den Unterabschnitten A1, A2, B1 und B2 direkt berühren. Ab dem Unterabschnitt B3 existiert ein schmaler Spalt zwischen dem jeweiligen Kopf der beiden Komponenten. Für die Unterabschnitte A1 ... B2 findet Wärmeleitung jeweils über den Kopf und Wärmestrahlung jeweils über den Steg von Backen- und Zungenschiene statt. Hier werden die Sichtfaktoren vereinfacht mit  $F_{12} = 1$  angenommen. Für die Unterabschnitte B3 ... D4 ist der Spalt zwischen dem Kopf von Backenschiene und Zungenschiene sehr klein. Die von der einen auf die andere Komponente übertragene Wärmestrahlung wird auf die Verknüpfung Steg-Steg und Kopf-Kopf aufgeteilt. Der Sichtfaktor zwischen den Stegen wird wieder vereinfacht mit  $F_{12} = 1$  angenommen. Die Sichtfaktoren für die Verknüpfung Kopf-Kopf wurden abhängig von der jeweiligen Geometrie des Unterabschnitts und der Spaltbreite berechnet (**Tabelle 13**). Die Werte für die Spaltbreite entstammen exemplarisch Messungen an der Modellweiche unter Freiluftbedingungen in Chelles.

Tabelle 13: Sichtfaktoren für Kopf von Backen- und Zungenschiene an Y-Seite

Abschnitt	$s$	$h_{K, Ba}$	$h_{K, Zu}$	$F_{12}$
A	0,00 mm	Wärmeleitung		
B1; B2	0,00 mm	Wärmeleitung		
B3	0,05 mm	31,95 mm	31,95 mm	0,998
C	0,50 mm	38,75 mm	38,75 mm	0,987
D	1,00 mm	44,26 mm	44,26 mm	0,978

Für den Strahlungsaustausch zweier Komponenten wird im thermischen Modell ein einfacher Strahlungswiderstand verwendet. Der Strahlungswiderstand wird mit den Emissionsgraden beider Oberflächen und dem Produkt aus beteiligter Oberfläche mit zugehörigem Sichtfaktor parametert.

## 5 Verifikation des Wärmenetzes an einer Modellweiche

Die experimentelle Untersuchung an einer Modellweiche im Labor bietet die Möglichkeit, das zusammengesetzte Wärmenetz ohne den Einfluss von verschiedenen Umgebungsbedingungen (sich ändernde Umgebungstemperatur, Sonnenstrahlung, Wind, Niederschlag) zu verifizieren. Dafür steht eine Modellweiche eines Zulieferers des Bahnunternehmens Infrabel mit einer Länge von 1,86 m zur Verfügung (**Tabelle 14**). Die Modellweiche unterscheidet sich in einigen Punkten von der Definition der Euroweiche. Ein wesentlicher Unterschied ist das Vorhandensein einer Trogschwelle mit der Stellvorrichtung der Weiche. Die Trogschwelle ist aus Metall gefertigt. Ob sich aufgrund der Trogschwelle ein anderer Wärmetransport zwischen beiden Seiten der Weiche oder zum Boden einstellt, müssen die experimentellen Untersuchungen zeigen.

Tabelle 14: Liste der Komponenten der Modellweiche für die Erwärmung unter Laborbedingungen

Bauteil	Typ	Anzahl	Länge / mm
Backenschiene	UIC 60	2	1860
Zungenschiene	UIC 60 Federzunge geformte Teil von der Spitze	2	1550
Verschluss	CDP Klamverschluss WKV 50-2 Bharat Forge CDP GmbH ohne Motorantrieb	1	
Trogschwelle	Trogschwelle für WKV 50-2 Verschluss (zum Beispiel VS-BF)	1	
Schwellen	Beton (Mittenabstand ca. 600 mm) entsprechend ÖBB	2	
Gleitstuhl und Platte	Schwhag BGL 606 mit IBAV und isolierten Schrauben	4	
Rippenplatte	Rippenplatte mit isolierten Schrauben (entsprechend Infrabel)	2	
Rollensystem	Schwhag/CDP	4	

Die Heizleistung wird mittels elektrischer Weichenheizstäbe von Türk Hillinger mit einer bezogenen Leistung von 300 W/m in die Weiche eingebracht. Dabei werden beide Weichenseiten (X-Seite und Y-Seite, s. **Bild 2**) separat und gemeinsam beheizt. Thermoelemente vom Typ T messen die Temperaturen. Die Temperaturmessung an ausgewählten Stellen zeigt, dass kein nennenswerter Wärmetransport von einer Weichenseite zur anderen auftritt (**Tabelle 15, Tabelle 16**).

Tabelle 15: Gemessene Temperaturen im thermisch stationären Zustand an Infrabel-Weiche bei beheizter X-Seite ( $\vartheta_u = 24,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

	Messposition	Temperatur	Übertemperatur
X-Seite	Backenschiene Kopf oben	54,5 $\text{ } ^\circ\text{C}$	30,5 K
	Backenschiene Fuß innen	70,5 $\text{ } ^\circ\text{C}$	56,5 K
	Zungenschiene Steg (zu BaSch)	30,5 $\text{ } ^\circ\text{C}$	6,5 K
	Trogschwelle – Mitte	23,3 $\text{ } ^\circ\text{C}$	-0,7 K
Y-Seite	Backenschiene Kopf oben	23,1 $\text{ } ^\circ\text{C}$	-0,9 K
	Zungenschiene Steg (zu BaSch)	23,2 $\text{ } ^\circ\text{C}$	-0,8 K

Tabelle 16: Gemessene Temperaturen im thermisch stationären Zustand an Infrabel-Weiche bei beheizter Y-Seite ( $\vartheta_u = 22,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

	Messposition	Temperatur	Übertemperatur
Y-Seite	Backenschiene Kopf oben	57,1 $\text{ } ^\circ\text{C}$	34,8 K
	Zungenschiene Fuß (zu Mitte)	42,4 $\text{ } ^\circ\text{C}$	20,1 K
	Zungenschiene Steg (zu BaSch)	45,5 $\text{ } ^\circ\text{C}$	23,2 K
	Trogschwelle – Mitte	23,5 $\text{ } ^\circ\text{C}$	1,2 K
X-Seite	Backenschiene Kopf oben	22,9 $\text{ } ^\circ\text{C}$	0,6 K
	Zungenschiene Steg (zu BaSch)	23,3 $\text{ } ^\circ\text{C}$	1,0 K

Es zeigt sich, dass schon in der Mitte der Schwelle keine nennenswerte Übertemperatur auftritt. Außerdem nehmen die Komponenten auf der nicht beheizten Weichenseite Umgebungstemperatur an. Beim Verwenden einer Betonschwelle anstelle einer Trogschwelle aus Metall existiert eine größere Querschnittsfläche aber eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit, sodass ein ähnliches Ergebnis zu erwarten wäre. Beide Weichenseiten sind thermisch als entkoppelt zu betrachten. Damit kann das thermische Modell in zwei verschiedene Modelle, je eins für eine Weichenseite, aufgeteilt werden. Im Resultat entstehen zwei Modelle mit höherer Übersichtlichkeit und geringerer Rechenzeit.

Weiterhin fällt auf, dass die Wärmeübertragung von der Backenschiene zur Zungenschiene an der Y-Seite der Weiche deutlich größer ist als an der X-Seite. An der Y-Seite wird der Wärmetransport durch Wärmeleitung und größere Sichtfaktoren der

Wärmestrahlung begünstigt. Weitere Erkenntnisse sind detailliert im 5. Zwischenbericht nachzulesen [5].

Anschließend können die Temperaturmessungen mit den Berechnungen des Wärmenetzes verglichen werden. Dabei wird die Messung mit beheizter X-Seite verwendet, um die Temperaturen an der X-Seite zu vergleichen und analog die Messung bei beheizter Y-Seite für den Vergleich mit der Y-Seite. Für die X-Seite stehen acht Positionen für den Vergleich zur Verfügung (**Bild 29**).

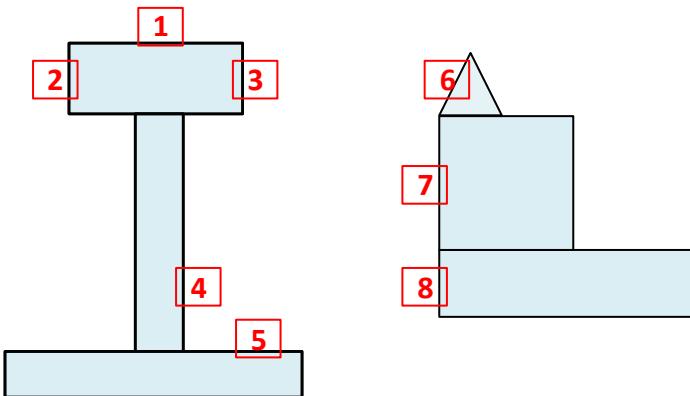


Bild 29: Vergleichsstellen gemessener und berechneter Temperaturen an der X-Seite der Infrabel Weiche

Mit der gemessenen Umgebungstemperatur  $\vartheta_u = 24^\circ\text{C}$  wird auch die thermische Berechnung durchgeführt. Der thermische Widerstand zwischen dem Fuß der Backenschiene und der Rippenplatte bzw. zwischen dem Fuß der Zungenschiene und dem Gleitstuhl werden experimentell zu  $R_{th, BR} = 0,375 \text{ K/W}$  bzw.  $R_{th, ZG} = 0,833 \text{ K/W}$  bestimmt. Als Näherung werden die Widerstände mit diesen Werten einheitlich für alle beteiligten Unterabschnitte parametrisiert. Der Vergleich zeigt eine relativ gute Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Temperaturen (**Tabelle 17**).

Tabelle 17: Vergleich berechneter und gemessener Temperaturen an der X-Seite der Infrabel Weiche

Pos.	1	2	3	4	5	6	7	8
$\vartheta_{\text{mess}}$ in $^\circ\text{C}$	54,5	54,2	54,9	62,8	70,5	30,5	30,5	30,3
$\vartheta_{\text{rech}}$ in $^\circ\text{C}$	56,4	56,3	56,4	61,4	69,0	32,4	32,2	32,7
$\Delta\vartheta$ in K	1,9	2,1	1,5	- 1,4	- 1,5	1,9	1,7	2,4

Für die Y-Seite der Weiche werden andere Vergleichspositionen an den Schienen gewählt (**Bild 30**).

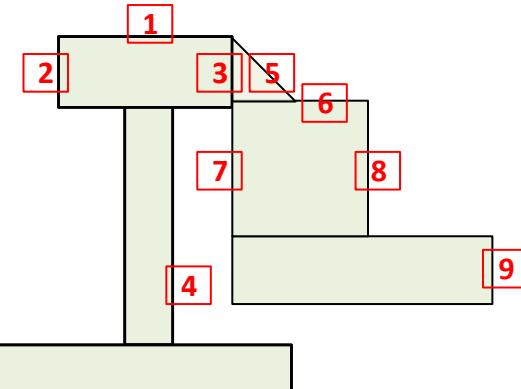


Bild 30: Vergleichsstellen gemessener und berechneter Temperaturen an der Y-Seite der Infrabel Weiche

Die Messung der Temperaturen und die Berechnung werden bei einer Umgebungstemperatur von  $\vartheta_u = 23,1 \text{ } ^\circ\text{C}$  durchgeführt (**Tabelle 18**).

Tabelle 18: Vergleich berechneter und gemessener Temperaturen an der Y-Seite der Infrabel Weiche

Pos.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\vartheta_{\text{mess}}$ in $^\circ\text{C}$	57,1	56,3	53,1	68,0	44,6	43,8	45,5	43,8	42,4
$\vartheta_{\text{rech}}$ in $^\circ\text{C}$	58,6	58,4	58,6	64,8	44,2	44,1	44,4	44,1	43,0
$\Delta\vartheta$ in K	- 1,5	- 2,1	- 5,5	3,2	0,4	- 0,3	1,1	- 0,3	- 0,6

Auffällig ist hierbei der relativ große Temperaturunterschied an der Berührungsstelle vom Kopf der Backenschiene und dem Kopf der Zungenschiene. Diese Abweichungen können sowohl durch die Messung als auch die Berechnung aufgetreten sein. Aufgrund von Unebenheiten der Oberflächen berühren sich die Köpfe von Backen- und Zungenschiene nicht ideal flächig. Außerdem verändert das montierte Thermoelement aufgrund seiner geometrischen Dimensionen die Spaltbreite und damit auch den Wärmeübergang zwischen den beiden Komponenten der Weiche. Die im Versuch an dieser Stelle gemessenen Temperaturen werden durch diese beiden Faktoren signifikant beeinflusst und können sich daher von den berechneten Temperaturen deutlich unterscheiden.

Auch für zeitabhängige Erwärmungsberechnungen ist besitzt das Wärmenetzmodelle eine hohe Genauigkeit (nachzulesen im 5. Zwischenbericht [5]). In das Wärmenetz können nun Umgebungsparameter implementiert werden, um in auch in der Lage zu sein, Erwärmungsvorgänge unter Freiluftbedingungen zu berechnen.

## 6 Implementierung der Umgebungs faktoren in das Wärmenetz

Für das Berechnen der Erwärmung unter Freiluftbedingungen muss der Einfluss der Umgebungsparameter Lufttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, Niederschlag in Form von Regen oder Schnee. Mit dem vollständigen Modell der Weiche ist es am Ende sinnvoll, von kritischeren Bedingungen für die Berechnung auszugehen. So kann eine gewisse Reserve für Implementierungsfehler beibehalten werden, wenn die Effektivität des Heizsystems eingeschätzt werden soll. Der Parameter Globalstrahlung kann theoretisch die Temperaturen an der Weiche erhöhen. Dennoch ist es wichtig, seinen Einfluss im Vorhinein mit abzuschätzen, um die Genauigkeit der Verifizierung des Wärmenetzes unter Freiluftbedingungen zu erhöhen.

Die Umgebungstemperatur ist bereits in allen Elementen im Wärmenetzmodell hinterlegt und kann über einen globalen Parameter „theta\_amb“ beliebig angepasst werden. Für die Windgeschwindigkeit ist bereits auch ein Feld in der Parametrierung der Widerstände für Konvektion vorgesehen. Allerdings müssen vorher noch die Parameter  $c_2$  und  $n_2$  bestimmt werden (**Gl. (8)**). Den Bauteilen werden Ähnlichkeitsparameter adäquater Anordnungen aus der Literatur zugeordnet.

### 6.1 Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Die Luft bewegt sich aufgrund der Reibung mit dem Erdboden in niedrigerer Höhe langsamer als in größerer Höhe. Die Windgeschwindigkeit  $v_2$  lässt sich höhenabhängig berechnen, wenn ein Messwert mit zugehöriger Messhöhe  $h_1$  bekannt ist (**Gl. (17)**) [7].

$$v_2 = v_1 \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^g \quad (17)$$

Die Größe des Exponenten  $g$  ist abhängig vom umgebenden Gelände [8]. Im Erwärmungsversuch unter Freiluftbedingungen (s. nächstes Kapitel) wurde die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von  $h_1 = 1,60$  m gemessen. Die thermischen Knoten der Weichenkomponenten Backen-, Zungenschiene, Rippenplatte und Gleitstuhl befinden sich im Mittel etwa auf einer Höhe von  $h_2 = 0,15$  m. Bei einem Geländeexponenten von  $g = 0,28$  für ein Gelände mit kleineren Hindernissen ergibt sich:

$$v_2 \approx 0,5 v_1 \quad (18)$$

Weiterhin ist die konvektive Wirkung des Windes abhängig vom Anströmwinkel der Luft. Wird eine Achse mit dem Winkel  $0^\circ$  entlang des Gleises gelegt, entsteht die größte konvektive Wirkung bei einem Anströmwinkel  $\phi = 90^\circ$  bzw.  $\phi = 270^\circ$ . Abhängig vom jeweiligen Strömungswinkel wird die Größe der Nusselt-Zahl reduziert (**Gl. (19)**) [9]. Der Reduktionsfaktor  $k$  wird dem Wärmenetz als globaler Parameter „angle\_corr“ hinzugefügt.

$$Nu_\phi = Nu \cdot k = Nu \cdot [0,75 + 0,25 \cos(2\phi + 180) + 0,06 |\sin(2\phi)|] \quad (19)$$

Die Windgeschwindigkeit im Zwischenraum von Backenschiene und Zungenschiene an der Y-Seite der Weiche wird mit 5 % der eigentlichen Windgeschwindigkeit angenommen. Hierfür wird der Parameter „wind\_inside“ verwendet. Für die restlichen Konvektionswiderstände wird Wind mit dem Parameter „wind\_speed“ beschrieben.

## 6.2 Himmelsstrahlung

Bei bewölktem Himmel kann vereinfacht davon ausgegangen werden, dass die Temperatur für den Strahlungsaustausch zwischen Komponente und Umgebung gleich der Temperatur der umgebenden Luft ist. Bei wolkenfreiem Himmel unterscheiden sich diese Temperaturen hingegen. Der Strahlungsaustausch findet zwischen den Weichenkomponenten und den höheren atmosphärischen Schichten statt. Die Temperatur der höheren Schichten kann aus der Umgebungstemperatur  $\vartheta_u$  berechnet werden (**Gl. (20)**) [10].

$$\vartheta_{atmos} = 0,0561(K)^{-1} (\vartheta_u + 273,15 K)^{1,5} - 273,15 K \quad (20)$$

Somit ist es möglich, dass bei wolkenfreiem Himmel bei Nacht eine unbeheizte Schiene eine geringere Temperatur als die Umgebungstemperatur annimmt. Soll dieses Szenario berechnet werden, muss der Parameter „theta\_atmos“ verwendet werden.

Am Tag wird Wärmeleistung durch Strahlung von der Sonne in die Weiche eingebracht. Die Höhe der eingebrachten Leistung ist unter anderem abhängig von der Bewölkung, der Elevation der Sonne, dem Azimut bezogen auf die Komponenten der Weiche und dem Absorptionsgrad der Komponenten. Die im Feldversuch gemessene Globalstrahlung

musste mit dem Faktor 0,15 multipliziert werden, um den Wärmeeintrag korrekt zu parametrieren. Das kann ausführlicher im 6. Zwischenbericht nachgelesen werden [11]. Die gemessene Globalstrahlung wird im Wärmenetzmodell mit dem Parameter „global rad“ beschrieben.

### 6.3 Regen

Niederschlag in Form von Regen kann die Komponenten einer Weiche zum einen direkt abkühlen durch Wärmeleitprozesse. Zum anderen können die Weichenteile aber auch durch die Verdunstung des Wassers thermische Energie abgeben. Bei Schneefall wird zusätzlich noch thermische Energie für die Erwärmung und den Schmelzvorgang des Schnees benötigt. Es kann nicht ermittelt werden, um welche Temperatur das Wasser auf der Schiene erwärmt wird, bevor es verdunstet oder von der Schiene herunterläuft. Weiterhin ist auch das Verhältnis zwischen ablaufendem und verdunstendem Wasser unbekannt. Die notwendige thermische Energie für den Verdunstungsvorgang kann von der Weiche oder der Umgebungsluft stammen. Auch hier ist nicht bekannt, in welchem Verhältnis beide Quellmedien zueinanderstehen. Aufgrund dieser Überlegungen und der Überlagerung der verschiedenen Prozesse ist die Implementierung in das Wärmenetz äußerst kompliziert. Ziel ist es eine Näherung zu finden, mit der Regen wie auch Schneefall im Wärmenetz berücksichtigt werden kann.

Dafür wird zunächst ein Regenversuch unter Laborbedingungen durchgeführt. Die Weiche erwärmt sich vorerst auf die statische Endtemperatur. Dann werden beide Weichenseiten, jeweils einzeln in separaten Versuchen, mit einer Anlage beregnet und die Temperaturen werden ausgewertet. Es wird nur eine Niederschlagsmenge von ca.  $5 \text{ l} (\text{m}^2 \text{ h})^{-1}$  betrachtet, was einem starken Regen entspricht. Die Wassertemperatur entspricht bei beiden Teilversuchen  $20,5^\circ\text{C}$ .

Tabelle 19: Temperaturverringerung beim Beregnen der X-Seite der Weiche

		Backenschiene			Zungenschiene		
	$\vartheta_u / ^\circ\text{C}$	Kopf	Steg unten	Fuß	Kopf	Steg	Fuß
$\vartheta_{trocken} / ^\circ\text{C}$	28,2	57,2	65,4	73,1	34,9	35,1	33,7
$\vartheta_{nass} / ^\circ\text{C}$	27,8	27,6	36,4	42,4	21,9	22,5	21,7

Tabelle 20: Temperaturverringerung beim Beregnen der Y-Seite der Weiche

		Backenschiene	Zungenschiene

	$\vartheta_u / ^\circ C$	Kopf	Steg unten	Steg oben	Steg innen	Fuß
$\vartheta_{trocken} / ^\circ C$	28,2	59,5	69,9	33,3	47,6	45,1
$\vartheta_{nass} / ^\circ C$	28,4	27,6	36,9	22,3	26,7	24,8

Die Temperatur der nassen Weiche wird nach ca. fünf Stunden Berechnung gemessen. Es zeigt sich, dass die Temperatur am Kopf der Backenschiene durch die Berechnung etwa auf Umgebungstemperatur reduziert wird. An der Zungenschiene treten noch geringere Temperaturen auf, da die Wassertemperatur auch etwa 8 K unter der Lufttemperatur liegt. Es existieren bisher keine thermischen Elemente für die Berechnung der Abkühlung durch Niederschlag oder Verdunstung. Jedoch erinnert der Vorgang an einen offenen Kühlkreislauf als technische Realisierung. Dieser wird mithilfe eines Master- und eines Slave-Widerstands im Orcad-Capture implementiert. Im Master-Widerstand sind die Querschnittsfläche des Kühlmediums, die Durchflussmenge und die Temperatur des Kühlmediums parametrisiert. Im Slave-Widerstand wird generell der zugehörige Master-Widerstand definiert. Die Parameter Querschnittsfläche und Durchflussmenge sind für den Anwendungsfall einer berechneten Weiche nicht bekannt und müssen in Parameterstudien bestimmt werden (**Tabelle 21**). Dabei werden die Parameter für die Berechnung der X-Seite der Weiche bestimmt und für die Y-Seite übernommen.

Tabelle 21: Vergleich berechneter und gemessener Temperaturen an der X-Seite bei Berechnung der Weiche

		Backenschiene			Zungenschiene		
		Kopf	Steg	Fuß	Kopf	Steg	Fuß
trocken	$\vartheta_{mess} / ^\circ C$	57,2	65,4	73,1	34,9	35,1	33,7
	$\vartheta_{rech} / ^\circ C$	58,5	61,3	65,1	35,1	35,2	35,6
nass	$\vartheta_{mess} / ^\circ C$	27,6	36,4	42,4	21,9	22,5	21,7
	$\vartheta_{rech} / ^\circ C$	27,6	36,9	43,4	21,3	21,2	21,9

Die Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen sind relativ gering. Demnach ist die Parameterwahl geeignet, um die thermische Wirkung von Regen auf der Weiche anzunähern. Regen kann im Wärmennetz in der Übersichtsebene als globaler Parameter „rain“ ein (= 1) oder ausgeschaltet (= 0) werden.

## 6.4 Schneefall

Für einen effektiven Betrieb einer Weichenheizung müssen Temperaturen größer als 0 °C an Backenschiene, Zungenschiene und Gleitstuhl vorhanden sein. Schnee, der auf diese Komponenten fällt, muss aufgeschmolzen werden. Dieser Vorgang kann in drei Teilprozesse aufgeteilt werden:

1. Erwärmung des Schnees auf die Schmelztemperatur
2. Schmelzvorgang
3. Kühlung durch das Wasser auf der Schiene

Es wird angenommen, dass der Schnee zunächst Umgebungstemperatur besitzt. Das heißt eine Temperatur  $\vartheta_u < 0$  °C muss Energie aufgewendet werden, um eine Masse an Schnee bis auf 0 °C zu erwärmen. Der Energiebedarf wird mit der spezifischen thermischen Kapazität  $c_p$  von Eis berechnet (**Gl. (21)**).

$$E_{\text{heiz}} = c \cdot m \cdot \Delta \vartheta \quad (21)$$

Für den Schmelzvorgang selbst wird der Energiebedarf unter Nutzung der Schmelzenthalpie  $\Delta H$  berechnet (**Gl. (22)**).

$$E_{\text{schmelz}} = m \cdot \Delta H \quad (22)$$

Die Schneefallmenge wird generell in der Einheit Höhe pro Zeit (cm h<sup>-1</sup>) angegeben. Aufgrund der Zeitangabe lässt sich der jeweilige Energiebedarf in einen Leistungsbedarf umrechnen. Die Masse an Schnee wird aus Volumen und der Dichte des Schnees ermittelt. Als Dichte wird ein mittlerer Wert  $\rho = 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  gewählt. Das Volumen berechnet sich aus der Höhe und der Oberfläche der Schienen oder des Gleitstuhls bei der angenommen wird, dass sich Schnee anlagert.

Im Wärmenetz werden der Erwärmungs- und der Schmelzvorgang von Schnee durch Wärmeleistungsquellen abgebildet, die Wärme aus dem Weichensystem herausführen. Die Parametrierung erfolgt auf der Übersichtsseite als globaler Parameter („melting\_power\_stock“, „melting\_power\_tongue“, „melting\_power\_slide“). Die Parameter können dem entsprechenden Excel-Dokument jeweils für Backenschiene, Zungenschiene und Gleitstuhl bestimmt werden.

Der dritte Teilprozess des Schnees auf der Weiche ist die Kühlwirkung des Wassers nach dem Schmelzvorgang. Das wird ähnlich zur thermischen Wirkung von Regen

berücksichtigt. Dabei muss allerdings noch die Menge des Schnees zur Menge des untersuchten Regens ins Verhältnis gesetzt werden. Das wird jeweils über die Masse an Wasser realisiert. Der Kühlkreislauf wurde in Kapitel 6.3 mit einer Regenmenge von ca.  $5 \text{ l} (\text{m}^2 \text{ h})^{-1}$  verifiziert. Das entspricht aufgrund des Dichteunterschieds einer Schneemenge von  $50 \text{ l} (\text{m}^2 \text{ h})^{-1}$  und somit einem Schneefall von  $5 \text{ cm (h)}^{-1}$ . Abhängig von der tatsächlichen Schneefallmenge wird Parameter „rain“ im Wärmenetz skaliert. Der entsprechende Wert wird ebenfalls von der Excel Tabelle berechnet. Die Kühlwassertemperatur wird mit  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  parametriert.

Unter bestimmten Umgebungsparametern können Probleme bei dieser Methode entstehen. Wenn die Temperatur an Schienen oder Gleitstuhl geringer als  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  ist, werden die Komponenten durch den Kühlwasserkreislauf erwärmt statt abgekühlt, da das Kühlwasser eine höhere Temperatur besitzt. Deshalb muss für jedes Rechenszenario je eine Variante mit aktiviertem und mit deaktiviertem Kühlwasserkreislauf berechnet werden, wobei die niedrigere Temperatur an der jeweiligen Stelle als korrekt angesehen wird.

## 7 Verifikation des Wärmenetzes mit einer Weiche unter Freiluftbedingungen

Für die experimentellen Untersuchungen unter Freiluftbedingungen steht eine Weiche der SNCF im Testfeld Chelles in der Metropolregion Paris zur Verfügung. Der Aufbau der Weiche orientiert sich stark an der Definition der Euroweiche [3]. Am Fuß der Backenschienen werden Türk Hillinger Heizstäbe mit einer Leistung  $P' = 300 \text{ W m}^{-1}$  und einer Länge  $l = 3,00 \text{ m}$  installiert. Es werden drei Heizstäbe bündig aneinandergesetzt. Damit wird die Schiene im Messbereich wie auch in den angrenzenden Bereichen weitestgehend gleichmäßig beheizt. Die Temperaturen werden im Bereich der Schwelle und des Gleitstuhls mit einem Abstand von  $0,85 \text{ m}$  zur Spitze der Weiche gemessen. Die Versorgungsspannung ist geringer als  $230 \text{ V}$  und so kann eine Leistung  $900 \text{ W}$  pro Heizstab nicht erreicht werden.

Thermoelementen vom Typ T zeichnen an neun verschiedenen Positionen die Temperaturen auf (**Bild 31**).

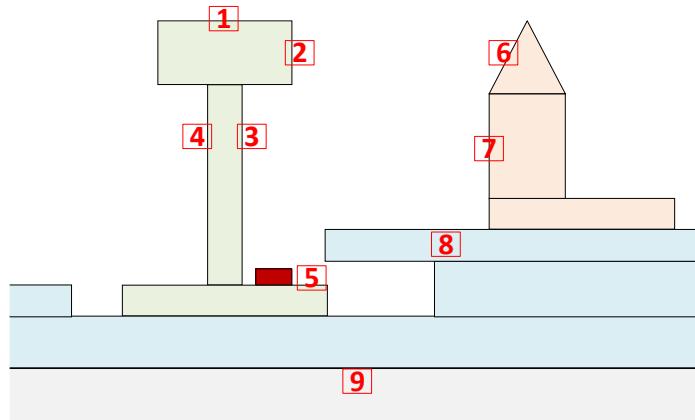


Bild 31: Temperaturmessstellen an der Weiche unter Freiluftbedingungen

Die Umgebungsparameter werden mit einer Wettermessstation aufgezeichnet. Die Wettermessstation detektiert die Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Niederschlagsmenge und Globalstrahlung.

Insgesamt werden vier Erwärmungsversuche durchgeführt jeweils zwei auf der X-Seite und zwei auf der Y-Seite der Weiche (je Messung 1, Messung 2). Damit besteht die Möglichkeit die Erwärmung für verschiedene Umgebungsbedingungen zu untersuchen und so die Genauigkeit des thermischen Modells zu verbessern. Da sich die Umgebungsbedingungen stetig ändern, ist es äußerst schwierig das dynamische Erwärmungsverhalten zu untersuchen. Deutlich einfacher und genauer ist es, einen Zeitbereich mit möglichst konstanten Umgebungsparametern im aufgezeichneten Messintervall zu finden, in dem die Temperaturen annähernd als statisch betrachtet werden können. Weiterhin werden im Wärmenetz als Umgebungsparameter jeweils die Mittelwerte der Größen über zwei Stunden vor dem eigentlichen Messpunkt verwendet (**Tabelle 22**). Damit können kleinere Änderungen der Umgebungsbedingungen kompensiert werden. Bei allen Messungen für die statische Verifizierung tritt kein Niederschlag auf.

## 7.1 Vergleich der X-Seite der Weiche

Tabelle 22: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen an der X-Seite unter Freiluftbedingungen, Messung 1

Modell Eingabewerte		Ergebnisse			
Parameter	Wert	Messstelle	$\vartheta_{\text{mess}} / ^\circ\text{C}$	$\vartheta_{\text{rech}} / ^\circ\text{C}$	$\Delta\vartheta / \text{K}$
$\vartheta_u$	12,8 °C	1	33,4	35,4	-2,0
$P_{\text{elektr}}$	278 W/m	2	32,4	35,4	-3,0
Globalstrahlung	250 W/m <sup>2</sup>	3	34,4	37,0	-2,6
Wind	1,2 m/s	4	38,8	36,9	1,4
k-Faktor	0,93	5	42,1	46,7	-4,6
$R_{\text{th,BR}}$	0,375 K/W	6	21,4	18,8	2,6
$R_{\text{th,ZG}}$	0,833 K/W	7	21,0	18,8	2,2
		8	23,3	25,6	-2,3
		9	13,9	14,5	-0,6

Die Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen sind gering. Die größte Abweichung ergibt sich am Fuß der Backenschiene (Messstelle 5). Das Thermoelement konnte dort nur aufgrund des schmalen Spalts zwischen Backenschiene und Gleitstuhl in Längsrichtung versetzt montiert werden. Der Heizstab wird aller 30 cm mit einer Klemme am Fuß der Backenschiene befestigt. In den Bereichen dieser Klemmen ist die Anpresskraft des Heizstabs größer und es liegt ein besserer Wärmeübergang in die Backenschiene vor. Es stellt sich eine inhomogene Temperaturverteilung entlang des Oberfläche des Fußes der Backenschiene in Längsrichtung ein. Die Messstelle 5 liegt näher an einer Klemme. Das wäre eine Erklärung für die relativ hohe Temperaturabweichung an dieser Position.

Die Messung 2 wird über Nacht durchgeführt. Das erklärt den sehr geringen Betrag der Globalstrahlung (**Tabelle 23**).

Tabelle 23: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen an der X-Seite unter Freiluftbedingungen, Messung 2

Modell Eingabewerte		Ergebnisse			
Parameter	Wert	Messstelle	$\vartheta_{\text{mess}} / ^\circ\text{C}$	$\vartheta_{\text{rech}} / ^\circ\text{C}$	$\Delta \vartheta / \text{K}$
$\vartheta_u$	9,2 °C	1	27,1	25,5	1,6
$P_{\text{elektr}}$	278 W/m	2	26,3	25,5	0,8
Globalstrahlung	2,3 W/m²	3	28,3	27,1	1,2
Wind	1,7 m/s	4	31,1	27,1	4,0
k-Faktor	0,85	5	36,5	37,4	-0,9
$R_{\text{th, BR}}$	0,375 K/W	6	13,0	11,2	1,8
$R_{\text{th, ZG}}$	0,833 K/W	7	13,0	11,2	1,8
		8	21,1	18,9	2,2
		9	9,5	10,3	-0,8

Die Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen sind relativ gering. Die größte Temperaturdifferenz tritt auf der Außenseite des Stegs der Backenschiene (Messstelle 4) auf. Die gemessene Temperatur ist dort auch ca. 3 K höher als auf der Innenseite des Stegs (Messstelle 3). Konstruktiv bedingt ist die die Messstelle 4 um einige Zentimeter zur Messstelle 3 in Längsrichtung verschoben. Die Messung zeigt, dass dieser Längenunterschied thermisch deutlich bemerkbar ist. Im Gegensatz dazu zeigen die mit dem Wärmenetz berechneten Temperaturen fast keine Unterschiede zwischen Innen- und Außenseite im oberen Bereich des Stegs der Backenschiene.

## 7.2 Vergleich der Y-Seite der Weiche

Für die Untersuchung der Y-Seite wird die Weiche einmal gestellt, sodass keine zusätzlichen Thermoelemente angebracht werden müssen. Bei der Messung 1 ergibt sich wieder die größte Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen an der Außenseite des Stegs der Backenschiene (Messstelle 4, **Tabelle 24**).

Tabelle 24: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen an der Y-Seite unter Freiluftbedingungen, Messung 1

Modell Eingabewerte		Ergebnisse			
Parameter	Wert	Messstelle	$\vartheta_{\text{mess}} / ^\circ\text{C}$	$\vartheta_{\text{rech}} / ^\circ\text{C}$	$\Delta\vartheta / \text{K}$
$\vartheta_u$	11,6 °C	1	33,4	30,5	2,9
$P_{\text{elektr}}$	270 W/m	2	28,2	29,6	-1,4
Globalstrahlung	70,5 W/m <sup>2</sup>	3	36,0	34,1	1,9
Wind	1,3 m/s	4	39,1	34,0	5,1
k-Faktor	1,00	5	46,2	46,6	-0,4
$R_{\text{th},\text{BR}}$	0,313 K/W	6	31,1	29,6	1,5
$R_{\text{th},\text{ZG}}$	0,417 K/W	7	26,2	27,9	-1,7
		8	25,1	27,1	-2,0
		9	12,1	13,6	-1,5

An den restlichen Temperaturmessstellen ist die Differenz gering  $\Delta\vartheta < 2,9 \text{ K}$ . Im Vergleich zur X-Seite der Weiche wurden die thermischen Übergangswiderstände von der Backenschiene zur Rippenplatte  $R_{\text{th},\text{BR}}$  und von dem Gleitstuhl zur Zungenschiene  $R_{\text{th},\text{ZG}}$  geringfügig verändert. Ursache dafür ist, dass durch die Bewegung der Zungenschiene sich die Kontaktfläche zwischen den Komponenten verändert. Gleichzeitig ist es möglich, dass sich durch die Anpresskraft der Zungenschiene an die Backenschiene die Neigung des Fußes der Backenschiene leicht verändert und so den Wärmeübergang beeinflusst.

Auch bei der zweiten Messung zeigen sich nur geringfügige Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen ( $\Delta\vartheta < 2,3 \text{ K}$ ; **Tabelle 25**).

Tabelle 25: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen an der Y-Seite unter Freiluftbedingungen, Messung 2

Modell Eingabewerte		Ergebnisse			
Parameter	Wert	Messstelle	$\vartheta_{\text{mess}} / ^\circ\text{C}$	$\vartheta_{\text{rech}} / ^\circ\text{C}$	$\Delta\vartheta / \text{K}$
$\vartheta_u$	10,7 °C	1	26,8	26,1	0,7
$P_{\text{elektr}}$	273 W/m	2	25,9	25,3	0,6
Globalstrahlung	355 W/m <sup>2</sup>	3	28,5	29,7	-1,2
Wind	4,4 m/s	4	31,5	29,7	1,8
k-Faktor	0,80	5	40,3	42,5	-2,2
$R_{\text{th},\text{BR}}$	0,313 K/W	6	27,4	25,3	2,1
$R_{\text{th},\text{ZG}}$	0,417 K/W	7	26,1	23,8	2,3
		8	22,6	23,5	-0,9
		9	14,2	11,9	2,3

Auffällig ist, dass die Temperatur an der Verbindung von beiden Schienen am Kopf der Backenschiene (Messstelle 2) niedriger ist als am Kopf der Zungenschiene (Messstelle 6). Der Wärmetransport führt vom Heizstab zur Messstelle 2 nur über Wärmeleitung innerhalb einer Komponente. Zur Messstelle 6 existiert zusätzlich noch ein Wärmeübergang. Deswegen würde erwartet werden, dass die Temperatur am Kopf der Zungenschiene geringer als am Kopf der Backenschiene ist. Es ist anzunehmen, dass die Messung einer oder beider Temperaturen fehlerhaft ist. Aufgrund der Montagetechnik der Thermoelemente liegt z. B. bei Messstelle 2 das eigentliche Thermoelement näher an der Zungenschiene und nur das Kupferblättchen nah an der Backenschiene. Somit könnte die Temperatur der Zungenschiene das Messsignal dominieren.

Generell kann das Wärmenetzmodell beider Weichenseiten unter Freiluftbedingungen als verifiziert betrachtet werden.

## 8 Berechnungsszenarien der Bahnunternehmen

Bestandteil des Projekts EuroPoint war die Berechnung verschiedener Szenarien an Umgebungsbedingungen basierend auf den Interessen der beteiligten Bahnunternehmen. In gegenseitiger Rücksprache wurden Berechnungsszenarien der ÖBB, SBB und von ProRail untersucht (**Tabelle 26**). Dabei werden die Temperaturen in den Schienen jeweils im Unterabschnitt B2 ermittelt.

Tabelle 26: Mit dem Wärmenetz berechnete Szenarien der beteiligten Bahnunternehmen  
 (Szenarien mit Backenschieneisolierung **fett** gekennzeichnet)

	Variante Nr.	Umgebungstemperatur	Windgeschw.	Schneefall
ÖBB mit 330 W m <sup>-1</sup>	1	0 °C	24 km h <sup>-1</sup>	30 cm in 12 h
	2	0 °C	30 km h <sup>-1</sup>	40 cm in 12 h
	3	0 °C	30 km h <sup>-1</sup>	30 cm in 12 h
	4	0 °C	30 km h <sup>-1</sup>	50 cm in 12 h
	5	-5 °C	50 km h <sup>-1</sup>	10 cm in 12 h
	6	-5 °C	10 km h <sup>-1</sup>	50 cm in 12 h
	<b>7</b>	<b>-5 °C</b>	<b>10 km h<sup>-1</sup></b>	<b>50 cm in 12 h</b>
	8	-5 °C	24 km h <sup>-1</sup>	10 cm in 12 h
	<b>9</b>	<b>-5 °C</b>	<b>24 km h<sup>-1</sup></b>	<b>10 cm in 12 h</b>
	10	-10 °C	24 km h <sup>-1</sup>	-
	<b>11</b>	<b>-10 °C</b>	<b>24 km h<sup>-1</sup></b>	-
SBB mit 300 W m <sup>-1</sup>	1	0 °C	-	-
	2	0 °C	-	starker Regen
	3	0 °C	-	30 cm in 12 h
	4	0 °C	15 km / h	30 cm in 12 h
	5	0 °C	30 km / h	30 cm in 12 h
	6	-5 °C	-	-
	7	-5 °C	-	30 cm in 12 h
	8	-5 °C	15 km / h	30 cm in 12 h
	9	-5 °C	30 km / h	30 cm in 12 h
	10	-10 °C	-	-
	11	-10 °C	-	30 cm in 12 h
	12	-10 °C	15 km / h	30 cm in 12 h
	13	-10 °C	30 km / h	30 cm in 12 h
ProRail mit 500 W m <sup>-1</sup>	1	0 °C	19.4 km / h	10 cm in 10 h
	2	-5 °C	28.4 km / h	-
	3	-10 °C	38.5 km / h	-
	4	-10 °C	38.5 km / h	10 cm in 10 h

Für jedes Szenario wurde jeweils die Temperaturverteilung an der X-Seite und der Y-Seite der Weiche berechnet.

## 8.1 Berechnung der ÖBB-Szenarien

Die Berechnungen der Erwärmung werden für eine Wärmeeinspeisung von 330 W/m durchgeführt. Drei der verschiedenen elf Berechnungen werden unter Berücksichtigung einer Backenschieneisolierung durchgeführt. Diese Isolierung bedeckt Teile von Fuß und Steg auf der äußeren Seite der Backenschiene. Die Isolierung muss als separates Bauteil erstellt, um zweidimensionale Wärmeflüsse innerhalb der Isolierung abbilden zu können. Auf eine Verknüpfung in longitudinaler Richtung wird verzichtet, da die Wärmeflüsse in Längsrichtung aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit als vernachlässigbar eingeschätzt werden. Die Maße der Isolierung liegen als technische Zeichnung vor. Zunächst muss die Geometrie der Isolierung approximiert werden (**Bild 32**).

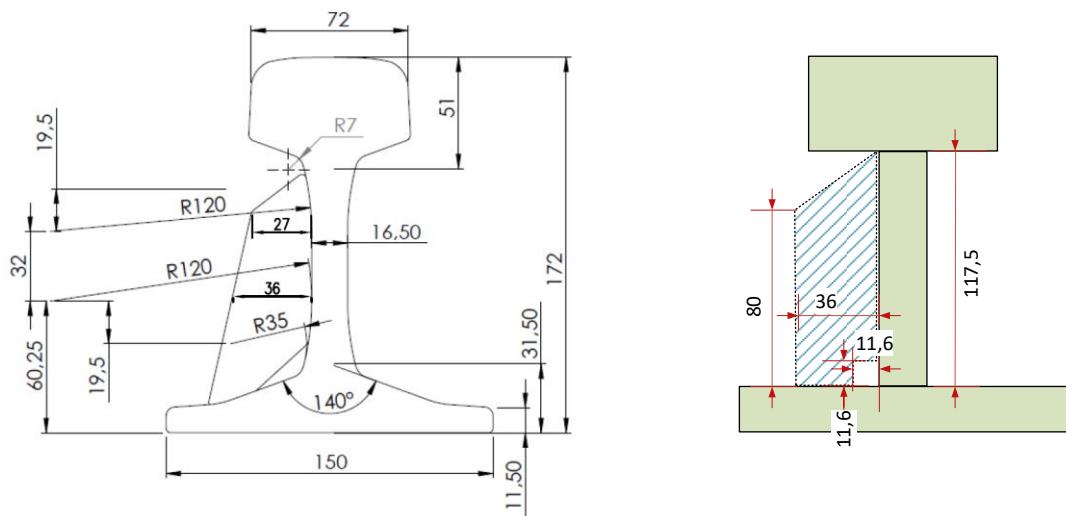


Bild 32: Originale (links) und approximierte (rechts) Geometrie der Backenschieneisolierung

Beim Vergleich beider Weichenseiten können generell niedrigere Temperaturen an der X-Seite festgestellt werden (**Anlage 10, Anlage 11**). An der X-Seite können an der Zungenschiene bei allen Szenarien so gut wie keine Übertemperaturen festgestellt werden. Generell verringern Wind sowie Schneefall die Temperaturen an der Weiche deutlich. Für jedes Rechenszenario sind die Temperaturen an der Zungenschiene und am Gleitstuhl kleiner als 1 °C. Demnach kann für die X-Seite unter keinem der untersuchten Szenarien ein weiteres fehlerfreies Stellen der Weiche garantiert werden. Die Isolierung der Backenschiene sorgt für geringfügig höhere Temperaturen. Allerdings erhöht sich die Übertemperatur um nicht mehr als ca. 30 %. Der Einfluss der Isolierung ist in der Nähe des Stegs der Backenschiene deutlicher zu erkennen als an Positionen mit größerer Entfernung dazu. Je weiter die Messposition von der Backenschieneisolierung entfernt ist, desto geringer ist der Einfluss auf die Temperaturerhöhung.

An der Y-Seite liegt die Temperatur an der Zungenschiene für alle berechneten Szenarien durchschnittlich bei ca. 0 °C und ist damit deutlich größer als an der X-Seite. Dennoch wird

nur bei Szenario 9 an allen Messpositionen eine Mindesttemperatur von 1 °C erreicht. Nur hierbei kann unter Beachtung einer geringen Reserve davon ausgegangen werden, dass das Stellen der Weiche uneingeschränkt möglich ist. Auch hier bewirkt das Verwenden einer Backenschieneisolierung nur eine geringe Erhöhung der Temperatur.

## 8.2 Berechnung der SBB-Szenarien

Im Vergleich zu den vorherigen Szenarien werden hier Heizstäbe mit einer Leistung von 300 W/m verwendet. Bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C ist Niederschlag prinzipiell in Form von Schnee oder Regen möglich. Die Wirkung auf die Erwärmung beider Varianten (starker Regen und Schneefall) wurden miteinander verglichen (**Anlage 12, Anlage 13**). An der X-Seite sind die Temperaturen an der Backenschiene bei Regen etwa 1 K niedriger als bei Schneefall. An der Zungenschiene zeigt sich kein signifikanter Unterschied in den resultierenden Temperaturen. Die Menge an Wasser ist bei starkem Regen deutlich größer als bei der untersuchten Menge an Schnee (30 cm in 12 h) und somit dominiert die Menge an Wasser die Schmelzenthalpie bezogen auf den thermischen Einfluss. An der Y-Seite zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Hier ist die Differenz an der Backenschiene 0,5 K und damit geringer, da bei sich berührender Backen- und Zungenschiene nur ein geringerer Teil der Schienenoberfläche vom Niederschlag beeinflusst werden kann als an der X-Achse.

An der X-Achse zeigt sich bei Schneefall keine nennenswerte Übertemperatur an der Zungenschiene auch ohne zusätzlichem Einfluss von Wind. An der Backenschiene verringern sich die Übertemperaturen etwa auf die Hälfte, wenn sich zusätzlich zum Schneefall die Windgeschwindigkeit um 15 km/h erhöht. Nur bei Szenario 1 kann mit Sicherheit ein weiteres fehlerfreies Stellen der Weiche garantiert werden.

An der Y-Seite kann auch bei 0 °C Umgebungstemperatur und Schneefall eine Temperatur über 1 °C an allen betrachteten Positionen erreicht werden. Auch bei der Umgebungstemperatur von – 5 °C und Schneefall sind die Temperaturen an der Weiche nicht wesentlich geringer. Eine Windgeschwindigkeit von 30 km/h bewirkt nur äußerst geringe Übertemperaturen an der Zungenschiene.

## 8.3 Berechnung der ProRail-Szenarien

Hier wird eine deutlich höhere Heizleistung als bisher betrachtet (500 W/m). Auf der X-Seite liegen die Temperaturen an der Zungenschiene unter dem Einfluss von 1 cm Schneefall pro Stunde und Wind mit 19,4 km/h ca. bei 0 °C (**Anlage 14**). Bei den Berechnungsfällen 2 und 3 wird allein Wind, jedoch aber kein Schneefall berücksichtigt. An der Zungenschiene ist dennoch keine wesentliche Übertemperatur erkennbar. Vergleicht man Szenario 3 mit 4 wird deutlich, dass bei gleichem Wind und gleicher Umgebungstemperatur durch zusätzlichem Schneefall keine wesentliche Verringerung

der Temperaturen an der Weiche verursacht wird. An der X-Seite kann bei keinem Szenario ein weiteres fehlerfreies Stellen der Weiche garantiert werden.

Anders ist das an der Y-Seite. Hier treten bei Szenario 1 und 2 an allen betrachteten Positionen Temperaturen, die deutlich größer als 0 °C sind, auf (**Anlage 15**). Nur für die Szenarien mit einer Umgebungstemperatur von – 10 °C kann kein fehlerfreier Betrieb der Weiche garantiert werden.

#### 8.4 Zusammenfassung

Insgesamt lässt sich erkennen, dass kritischere Temperaturen stets an der X-Seite der Weiche auftreten. Der Einfluss von Wind und Schneefall bzw. Regen reduziert die Übertemperaturen erheblich. Bei keinem der untersuchten Szenarien konnte unter Einfluss von Wind oder Niederschlag die Funktionstüchtigkeit weiterhin garantiert werden. In diesen Fällen liegen die Temperaturen des Gleitstuhls und der Zungenschiene unter 0 °C bzw. niedriger als 1 °C. Das bedeutet, potentieller Niederschlag kann sich als Schnee anlagern oder an der Oberfläche gefrieren und so den Stellvorgang der Weiche beeinträchtigen, falls die Ansammlung von Schnee und Eis nicht entfernt werden kann. Im Temperaturbereich zwischen 0 °C bis 1 °C gefriert Wasser unter Normaldruck nicht und Schnee würde schmelzen. Der Temperaturbereich dient hier als Sicherheitsreserve für Abweichungen in der Berechnung.

### 9 Untersuchung der Wärmeströme

Eine Analyse der Wärmeströme bietet die Möglichkeit, Wärmeleitung innerhalb der Komponenten und die Wärmeabgabe zur Umgebung zu beurteilen. Im vorherigen Kapitel zeigte sich, dass vor allem die Temperaturen an der Zungenschiene und auf dem Gleitstuhl gering waren und somit sich auch an diesen Stellen zuerst Schnee und Eis ansammeln kann. Ziel der Untersuchung der Wärmeströme ist es, die Gründe für die niedrigen Temperaturen in den Bereichen zu finden und Optimierungspotentiale zu erkennen. Dafür werden zunächst an beiden Weichenseiten die Wärmeströme ermittelt, die zwischen Komponenten bzw. Subkomponenten auftreten. Dabei werden Umgebungsbedingungen und die im vorherigen Kapitel bereits erwähnte Backenschienenisolierung berücksichtigt (**Tabelle 27**).

Tabelle 27: Randbedingungen für die Analyse der Wärmeströme

Umgebungstemp.	Wind	Niederschlag	Isolierung
-10 °C	-	-	-
-10 -°C	15 km/h	-	-
-10 °C	-	-	ja
-10 -°C	15 km/h	-	ja

Die Wärmeströme werden im Unterabschnitt B2 ermittelt. Der Unterabschnitt besitzt eine Länge von 29,3 cm und ist mit Rippenplatte, Gleitstuhl und Schwelle verbunden. An der Y-Seite berühren sich Zungenschiene und Backenschiene direkt. Differenzen an hinein- und herausgeleiteten Wärmeleistungen entstehen in den folgenden Erläuterungen durch longitudinale Wärmeleitung in Backen- und Zungenschiene. Diese werden aufgrund der Übersichtlichkeit und der geringen Relevanz im Folgenden vernachlässigt.

## 9.1 Wärmeströme an der X-Seite

Bei windstillen Verhältnissen wird ein hoher Anteil an thermischer Leistung (ca. 89 %) vom Heizstab in die Backenschiene transportiert (**Bild 33**). Der Großteil der Leistung wird vom Fuß der Backenschiene in die Rippenplatte geleitet. Etwa die Hälfte der Wärme, die in die Rippenplatte transportiert wird, wird an die Schwelle abgegeben und steht so nicht mehr zur Erwärmung der anderen Weichenkomponenten zur Verfügung. Der Strahlungsaustausch zwischen Backen- und Zungenschiene ist mit ca. 1,5 % sehr gering. So erreicht nur ca. 9 % der Gesamtwärme die Zungenschiene.

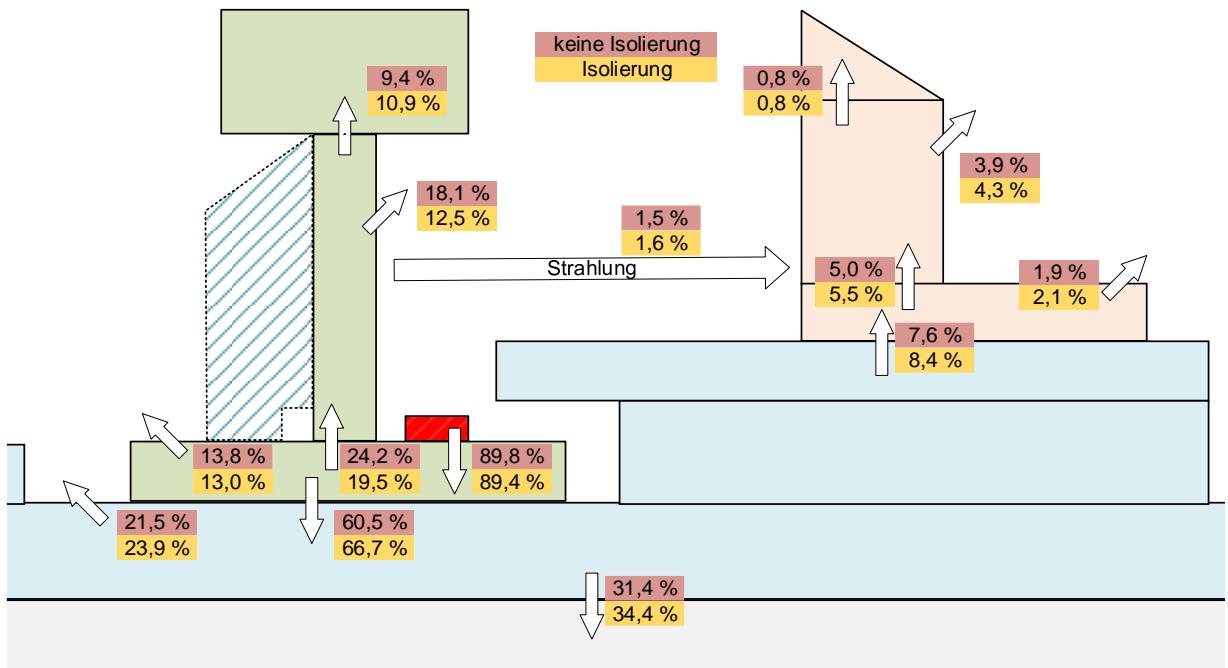


Bild 33: Prozentuale Anteile der Wärmeflüsse zur gesamten thermischen Leistung bei  $\vartheta_u = -10^\circ\text{C}$ ;  $P = 300 \text{ W/m}$ ; kein Wind; kein Niederschlag; an X-Seite mit und ohne Backenschienenisolierung (gerade Pfeile kennzeichnen den Wärmeübergang zw. Komponenten; schräge Pfeile die Wärmeabgabe)

Wird zusätzlich eine Backenschienenisolierung an der Außenseite des Stegs angebracht verändern sich die Wärmeströme quantitativ, nicht jedoch qualitativ. Aufgrund der geringeren Wärmeabgabe vom Steg der Backenschiene, wird auch insgesamt weniger Wärme in den Steg und stattdessen in die Rippenplatte geleitet. Den Fuß der Zungenschiene erreicht nur ein sehr geringer Teil dieser zusätzlichen Wärme. Der Großteil wird von Rippenplatte und Gleitstuhl entweder an die Umgebung abgegeben oder in die Schwelle geleitet. Das erklärt warum eine zusätzliche Isolierung am Steg der Backenschiene die Temperaturen kaum beeinflussen.

Bei Wind mit einer Geschwindigkeit von 15 km/h ändern sich die Wärmeströme deutlich (**Bild 34**). Weniger als etwa 70 % der erzeugten Wärme werden vom Heizstab in den Fuß der Backenschiene transportiert. Verglichen mit windstillen Verhältnissen, wird weniger als die Hälfte der Wärme vom Fuß der Backenschiene zur Rippenplatte geleitet. Auch die Wärmeübertragung von der Rippenplatte in die Schwelle ist deutlich geringer. Nur 4 %... 5% der bereitgestellten Wärmeleistung des Heizstabes gelangen zur Zungenschiene.

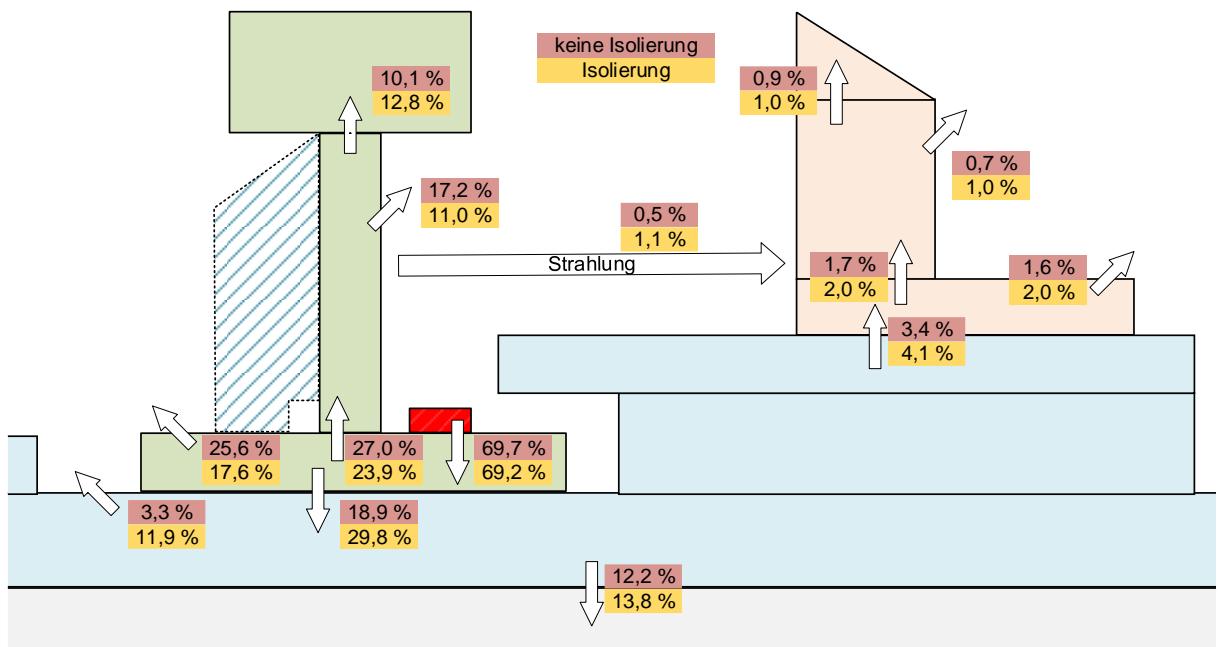


Bild 34: Prozentuale Anteile der Wärmeflüsse zur gesamten thermischen Leistung bei  $\vartheta_u = -10^\circ\text{C}$ ;  $P = 300 \text{ W/m}$ ; 15 km/h Wind; kein Niederschlag; an X-Seite mit und ohne Backenschieneisolierung(gerade Pfeile kennzeichnen den Wärmeübergang zw. Komponenten; schräge Pfeile die Wärmeabgabe)

Die Backenschieneisolierung hat hier einen ähnlichen Effekt wie bei der Untersuchung ohne Windeinfluss. Ein etwas geringerer Anteil der Wärme wird in den Steg der Backenschiene geleitet. Dafür ist der Prozentsatz der Wärme größer, die vom Fuß der Backenschiene in die Rippenplatte transportiert wird. Aufgrund der Wärmeabgabe an die Umgebung und an die Schwelle unterscheidet sich die Wärmemenge, die die Zungenschiene erreicht nur unmerklich von der Anordnung ohne Backenschieneisolierung.

## 9.2 Wärmeströme an der Y-Seite

An der Y-Seite der Weiche unterscheiden sich die Wärmeströme zu denen von der X-Seite deutlich. Bei windstillen Verhältnissen wird jedoch zunächst ein ähnlich hoher Anteil Wärme (ca. 90 %) vom Heizstab in den Fuß der Backenschiene geleitet (**Bild 35**). Bei der Variante ohne Isolierung wird mehr Wärme in den Steg der Backenschiene geführt als auf der X-Seite. Am Kopf der Backenschiene findet Wärmeleitung zum Kopf der Zungenschiene statt. Auf diesem Weg werden ca. 22 % der generierten Leistung übertragen. Die Wärmeübertragung von der Rippenplatte in die Schwelle ist mit ca. 35 % ähnlich wie an der X-Seite. Auf der X-Seite war der Kopf der Zungenschiene die Wärmesenke der wesentlichen Komponenten der Weiche. Bei diesem Szenario ist es die Rippenplatte mit Gleitstuhl. Das bedeutet, dort treten die geringsten Temperaturen an

der Weiche auf (abgesehen von der Schwelle) und die Wärmeströme sind dorthin gerichtet. Der Anteil der Strahlung am Wärmeaustausch zwischen Backenschiene und Zungenschiene liegt wieder etwa bei 1 %, ist somit in diesem Fall gegenüber der Wärmeleitung beinahe vernachlässigbar.

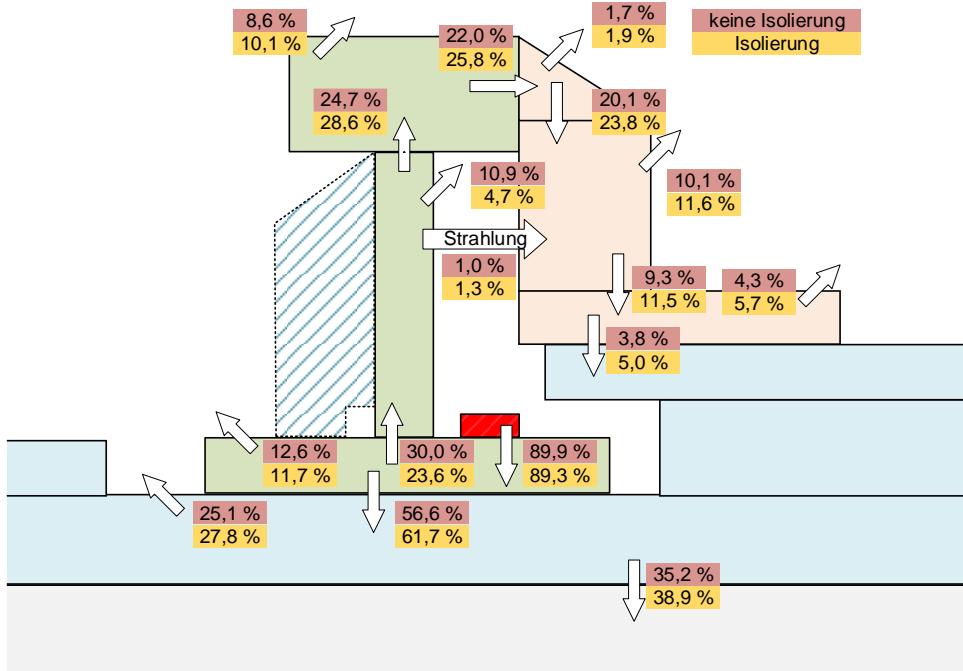


Bild 35: Prozentuale Anteile der Wärmeflüsse zur gesamten thermischen Leistung bei  $\vartheta_u = -10^\circ\text{C}$ ;  $P = 300 \text{ W/m}$ ; kein Wind; kein Niederschlag; an Y-Seite mit und ohne Backenschienenisolierung (gerade Pfeile kennzeichnen den Wärmeübergang zw. Komponenten; schräge Pfeile die Wärmeabgabe)

Die Backenschienenisolierung verringert die Wärmeabgabe von Fuß und Steg der Backenschiene. Die zusätzliche Wärme wird auf die anderen Teilkomponenten übertragen. In der Zungenschiene unterscheiden sie die Wärmeflüsse aber nur noch geringfügig.

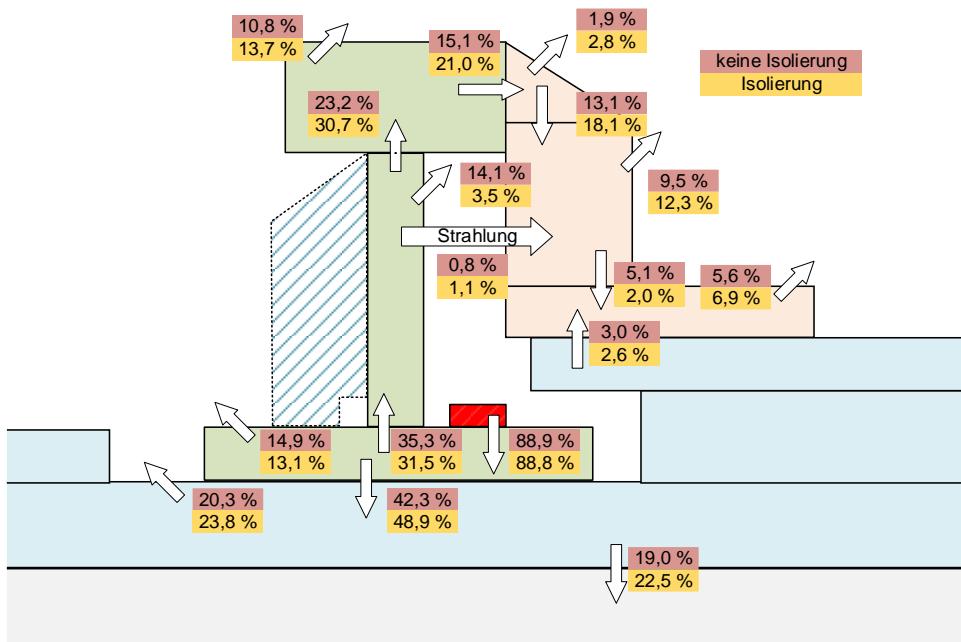


Bild 36: Prozentuale Anteile der Wärmeffüsse zur gesamten thermischen Leistung bei  $\vartheta_u = -10^\circ\text{C}$ ;  $P = 300 \text{ W/m}$ ; 15 km/h; kein Niederschlag; an Y-Seite mit und ohne Backenschienenisolierung (gerade Pfeile kennzeichnen den Wärmeübergang zw. Komponenten; schräge Pfeile die Wärmeabgabe)

Bei einer Windgeschwindigkeit von 15 km/h wird fast genau so viel Wärme in den Fuß der Backenschiene eingespeist wie bei windstillen Bedingungen (**Bild 36**). Das liegt daran, dass im Rechenmodell im Zwischenraum von Backen- und Zungenschiene eine geringere Windgeschwindigkeit aufgrund der geschützten Lage berücksichtigt wird. An der X-Seite ist der Zwischenraum größer und nach oben deutlich geöffnet, sodass im Zwischenraum dieselbe Windgeschwindigkeit wie an den Außenseiten angenommen wird. Aufgrund der erzwungenen Konvektion geben die Oberflächen der Komponenten mehr Wärme an die Umgebung ab. Dadurch ändern sich die Wärmeströme auch qualitativ. Der Fuß der Zungenschiene ist in diesem Fall eine Wärmesenke der Komponenten. Im Vergleich zur X-Seite unterscheiden sie die Wärmeströme zwischen Backenschiene mit und ohne Isolierung hier stärker.

### 9.3 Zusammenfassung der Analyse der Wärmeströme

Die Analyse der Wärmeströme zeigt, dass in fast allen Fällen nur ein sehr geringer Teil der vom Heizstab bereitgestellten Wärme die Zungenschiene erreicht. Eine Isolierung des Stegs der Backenschiene verringert die Wärmeabgabe des Stegs deutlich. Allerdings wird der thermische Einfluss der Isolierung umso geringer, je weiter man sich von ihr entfernt. Das liegt daran, dass Wärmeabgabe in benachbarten Teilkomponenten größer bei vorhandener Backenschienenisolierung ist. Bereits bei der Analyse der

Berechnungsszenarien zeigte sich, dass die Isolierung die Temperaturverteilung nur unwesentlich verbessert. Grund dafür ist, dass die von der Isolierung bedeckte Oberfläche im Vergleich zur gesamten Oberfläche der Weichenkomponenten relativ gering ist. Ein möglicher Lösungsansatz wäre es, Isolierungen auf zusätzlichen Flächen anzubringen, sofern dies für den Betrieb und das Stellen der Weiche keine Einschränkungen hervorruft (z. B. Innenseite Steg von Backenschiene bzw. Zungenschiene).

Die Berechnungen ohne des Einflusses von Wind zeigen einen großen Anteil an Wärme, der von der Rippenplatte in die Schwelle geleitet wird. Die Wärme in der Schwelle wird ins Gleisbett abgeführt, steht also zur Erwärmung von Zungenschiene und Gleitstuhl nicht mehr zur Verfügung. Aus thermischer Sicht ist es jedoch das Ziel, einen möglichst geringen Wärmeübergang in die Schwelle zu erhalten. In dem Wärmenetzmodell wird bereits eine Kunststoffmatte zwischen Rippenplatte und Schwelle berücksichtigt. Eine Vergrößerung der Dicke dieser Matte erhöht den thermischen Widerstand und verringert somit die Wärmeleitung zur Schwelle.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt EuroPoint wurde unter Berücksichtigung der Interessen aller Projektpartner ein gemeinsames Modell einer Weiche definiert. Die Komponenten wurden als Wärmenetzmodelle aufgebaut und diese wiederum experimentell verifiziert. Die separaten Wärmenetze wurden verknüpft und das gesamte Modell wurde unter Laborbedingungen und unter Freiluftbedingungen verifiziert. Dabei wurde besonderen Wert auf die Implementierung der Umgebungsbedingungen für den realen Anwendungsfall bei unterschiedlichen Wetterbedingungen gelegt. Das vollständige Weichenmodell ist in der Lage, statische und dynamische Erwärmungsvorgänge zu berechnen und Temperaturen sowie Wärmeströme hochauflöst auszugeben.

Bei den Berechnungen der Erwärmung zeigte sich, dass kein Wärmestrom zwischen beiden Seiten der Weiche auftritt. Somit können beide Weichenseiten auch separat voneinander betrachtet werden. Der thermisch kritischere Fall tritt auf der Weichenseite auf, wo sich Backenschiene und Zungenschiene nicht berühren. Die Berechnungen verschiedener Anwendungsszenarien der Bahnunternehmen ergaben, dass für keinen untersuchten Fall, bei dem Wind oder Niederschlag auftrat, ein fehlerfreier Betrieb der Weiche garantiert werden kann. Die Ursache dafür sind die niedrigen Temperaturen an der Zungenschiene und auf dem Gleitstuhl. Auch eine Isolierung des Stegs der Backenschiene verbessert die Temperaturverteilung nicht wesentlich. Eine Analyse der Wärmeströme bestätigte den geringen Effekt der Backenschienenisolierung und zeigte, dass ein großer Teil der generierten Wärme von der Rippenplatte in die Schwelle abgeleitet wird.

Das vollständig, verifizierte Wärmenetz der Weiche kann zukünftig als grundlegendes Werkzeug zur Berechnung für Optimierungsansätze dienen. Der Großteil des Aufwands

liegt im Aufbau des Wärmenetzes. Weitere Anpassung bzw. Modifikationen sind meist recht unkompliziert implementierbar. Daher ist es von deutlichem Vorteil, das Wärmenetz der Weiche weiterhin zu nutzen, um die Weiche weiter thermisch zu verbessern.

Da nur eine geringe Wärmeübertragung von der Backenschiene zur Zungenschiene festgestellt werden konnte, sollten Möglichkeiten bedacht werden, bei denen die Wärme direkt in die Zungenschiene eingespeist wird. Denkbar wäre z. B. ein zusätzlicher Heizstab, der am Steg der Zungenschiene montiert wird.

Der gesamte Energiebedarf elektrischer Weichenheizungen ist keine unwesentliche Größe für ein Bahnunternehmen. Zum Einstsparen von Kosten ist deshalb ein möglichst effizienter Betrieb anzustreben. Eine Möglichkeit wäre eine intelligente Steuerung der Weichenheizung, die abhängig der Umgebungsbedingungen nicht nur die Weichenheizung ein- und ausschaltet, sondern auch in der Leistung anpasst. So könnten wesentlich leistungsstärkere Weichenheizungen verbaut werden. Durch die Steuerung können zum einen thermisch kritischere Situationen abfangen und zum anderen im normalen Betrieb der Heizleistungsbedarf niedrig gehalten werden.

## 11 Literatur

- [1] Böhme, H. A.: Mittelspannungstechnik - Schaltanlagen berechnen und entwerfen. 2. stark bearb. Aufl. Berlin, Paris, London: HUSS-MEDIEN GmbH Verlag Technik 2005. ISBN 3-341-01495-0.
- [2] Verein Deutscher Ingenieure: VDI Wärmeatlas – Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 8. überarb. und erw. Auflage Berlin, Heidelberg, u.a.: Springer 1997. ISBN 3-540-62719-7.
- [3] Adam R.; Schladitz M; Döring N.: 3. Zwischenbericht Europoint HH 01/15
- [4] Schladitz M, Adam R; Döring N.: 4. Zwischenbericht Europoint HH 01/15
- [5] Schladitz M, Adam R; Döring N.: 5. Zwischenbericht Europoint HH 01/15
- [6] Baehr, H.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. 2. Auflage; Springer-Verlag Berlin
- [7] <http://scienceblogs.de/frischer-wind/2009/10/12/wie-berechnet-man-die-hohenabhangige-windgeschwindigkeit/> (Stand: 11.07.19)
- [8] Kleemann, M.; Meliß, M.: Regenerative Energiequellen, 2. Auflage: Springer-Verlag 1993
- [9] Berg, I: Untersuchungen zur Strombelastbarkeit der Geräte der Elektroenergieübertragung unter Freiluftatmosphäre
- [10] Kasten, F.: Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen und Atmosphäre, VDI-Berichte Nr. 721, VDI Verlag, 1989
- [11] Schladitz M, Adam R; Döring N.: 6. Zwischenbericht Europoint HH 01/15

## Anlagen

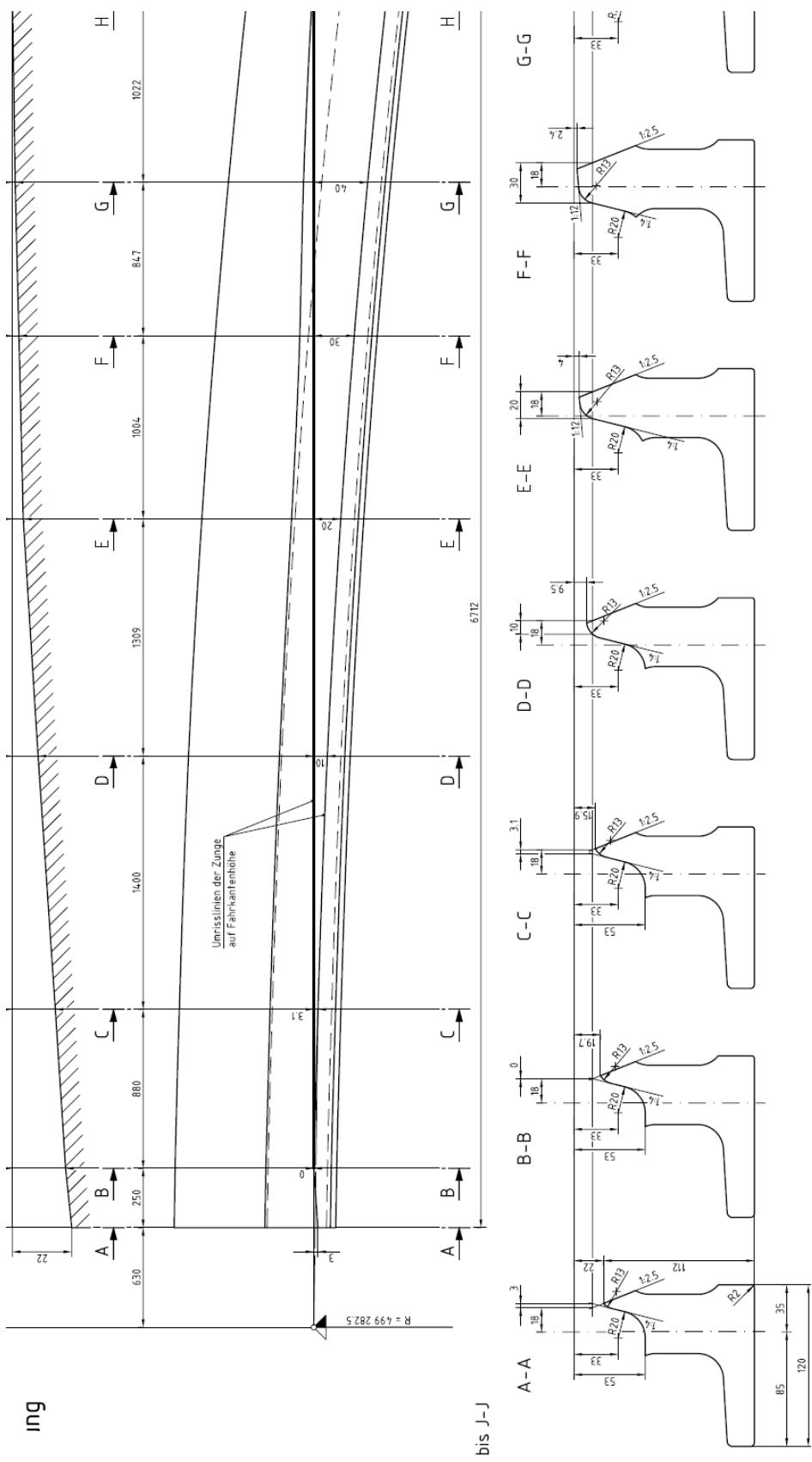
### Anlage 1: Größen der Erwärmung

Wärmegröße	Symbol	Einheit, z. B.
Temperatur	$\vartheta$	°C
Temperaturdifferenz	$\Delta\vartheta$	K
Übertemperatur	$Q$	K
Wärmestrom, Wärmeleistung	$P, \dot{Q}$	W
Wärmeffussdichte	$\dot{q}$	W m <sup>-2</sup>
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Wärmekapazität	$C_{th}$	W s K <sup>-1</sup>
spezifische Wärmekapazität	$c_p$	W s kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Wärmemenge, Wärmeenergie, Wärme	$Q$	W s
Wärmeübertragungskoeffizient	$\alpha$	W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
charakteristische Länge	$l_w$	m
Oberfläche für den Wärmeübergang	$O$	m <sup>2</sup>
Emissionsgrad einer Oberfläche	$\varepsilon_1$	-
resultierender Emissionsgrad zwischen zwei Oberflächen	$\varepsilon_{12}$	-
Wärmewiderstand	$R_{th}$ oder $R$	K W <sup>-1</sup>
Index	th	thermisch
	I	Leitung
	K	Konvektion
	S	Strahlung
	1; 2	Nummer der Körper

Anlage 2: Parameterliste von Backenschiene und Heizstab

Parametername	Wert	Einheit	Bedeutung
conductivity_steam	45	$\text{W} (\text{m K})^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit Schienenmaterial
conductivity_rod	15	$\text{W} (\text{m K})^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit Heizstab
eps_stock	0,835		Emissionsgrad Backenschiene
eps_rod	0,23		Emissionsgrad Heizstab
foot_width	0,15	m	Breite Abschnitt Fuß
foot_height	0,0169	m	Höhe Fuß
foot_width_1	0,0645	m	Breite Abschnitt Fuß
foot_width_2	0,021	m	Breite Abschnitt Fuß
foot_width_3	0,0125	m	Breite Abschnitt Fuß
rod_width	0,013	m	Breite Heizstab
rod_height	0,0055	m	Höhe Heizstab
web_height	0,1176	m	Höhe Steg
web_width	0,021	m	Breite Steg
head_width	0,072	m	Breite Abschnitt Kopf
head_width_1	0,0255	m	Breite Abschnitt Kopf
head_width_2	0,021	m	Breite Abschnitt Kopf
head_height	0,0375	m	Höhe Kopf
foot_width_4	0,039	m	Breite Abschnitt Fuß
entire_height	0,172	m	Gesamthöhe
c_1_stock	0,2		Ähnlichkeitsparameter
n_1_stock	0,25		Ähnlichkeitsparameter

### Anlage 3: Auszug der technischen Zeichnung der Zungenschiene



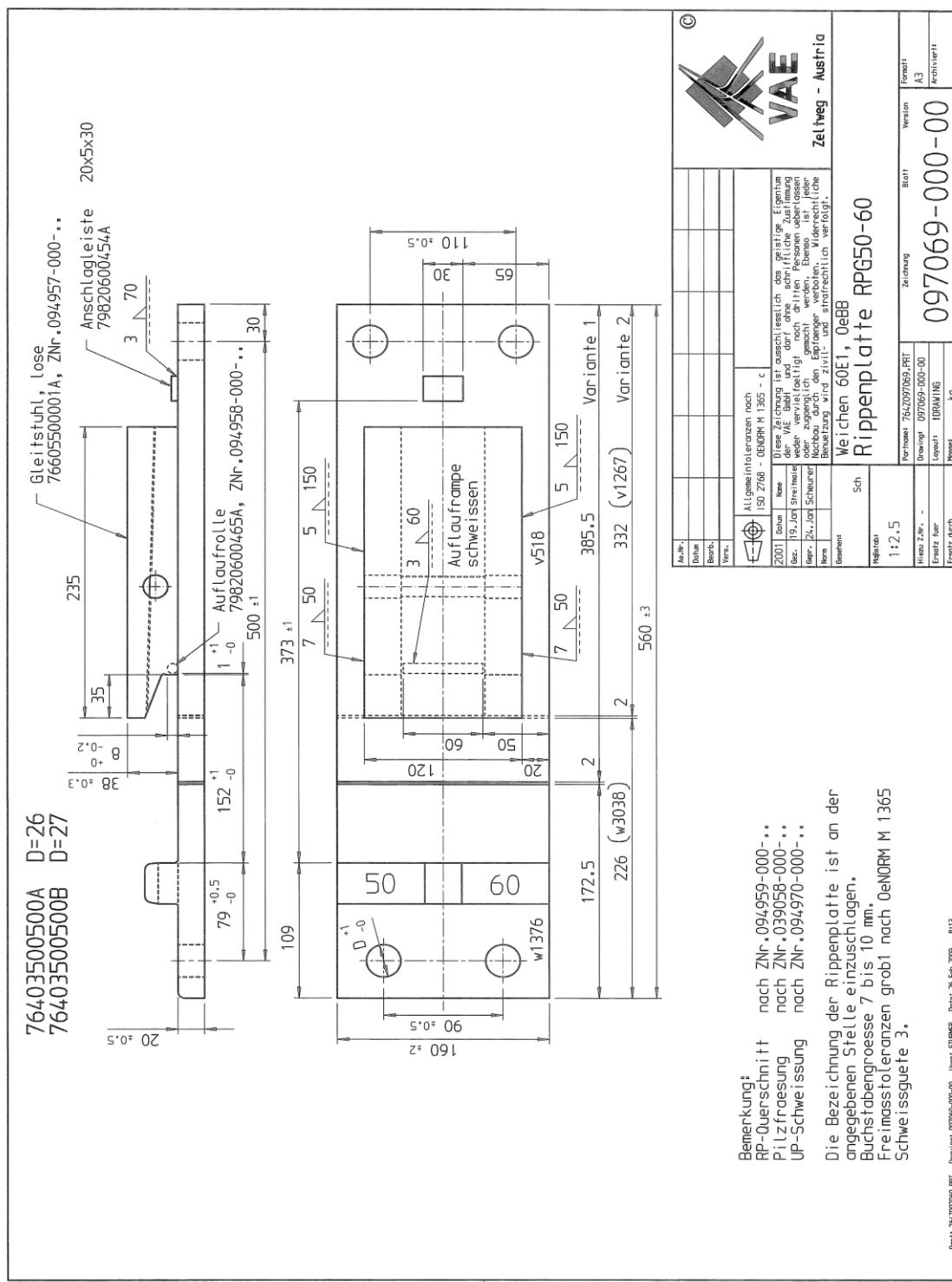
Anlage 4: Parameterliste für Zungenschiene

Parametername	Wert	Einheit	Bedeutung
length_A	0,25/2	m	Länge Unterabschnitt
length_B	0,88/3	m	Länge Unterabschnitt
length_C	1,4/4	m	Länge Unterabschnitt
length_D	1,309/4	m	Länge Unterabschnitt
width_A_1	0,018	m	Breite
width_A_2	0,026	m	Breite
width_A_3	0,076	m	Breite
width_A_11	0,0045	m	Breite Kopf
height_A_1	0,027	m	Höhe Kopf
height_A_2	0,058	m	Höhe Steg
height_A_3	0,023	m	Höhe Fuß
eps_tongue	0,835		Emissionsgrad
l_ref_A	0,108	m	charakter. Länge
l_triangle_A	0,02846	m	Länge Kante Kopf
lamda_rail	45	W (m K) <sup>-1</sup>	Wärmeleitfähigkeit
c_tongue	0,2		Ähnlichkeitsparameter
n_tongue	0,25		Ähnlichkeitsparameter
rad_trA_head	0,057*length_A*global_rad	W	auf treffende Globalstrahlung
rad_trA_web	0,142*length_A*global_rad	W	auf treffende Globalstrahlung
rad_trA_foot	0,122*length_A*global_rad	W	auf treffende Globalstrahlung
rain_f_par	0,1		Regen Anteil Zungenschiene
rain_tongue	5		Regen Anteil Zungenschiene
width_B_1	0,022	m	Breite
width_B_2	0,022	m	Breite

width_B_3	0,076	m	Breite
width_B_11	0,0055	m	Breite Kopf
height_B_1	0,030		Höhe Kopf
height_B_2	0,058		Höhe Steg
height_B_3	0,023		Höhe Fuß
l_ref_B	0,111	m	charakter. Länge
l_triangle_B	0,03195	m	Länge Kante Kopf
rad_trB_head	$0,064 * \text{length}_B * \text{global\_rad}$		auf treffende Globalstrahlung
rad_trB_web	$0,138 * \text{length}_B * \text{global\_rad}$		auf treffende Globalstrahlung
rad_trB_foot	$0,122 * \text{length}_B * \text{global\_rad}$		auf treffende Globalstrahlung
width_C_1	0,023	m	Breite
width_C_2	0,021	m	Breite
width_C_3	0,076	m	Breite
width_C_11	0,00575	m	Breite Kopf
height_C_1	0,037	m	Höhe Kopf
height_C_2	0,058	m	Höhe Steg
height_C_3	0,023	m	Höhe Fuß
l_ref_C	0,118	m	charakter. Länge
l_triangle_C	0,03875	m	Länge Kante Kopf
rad_trC_head	$0,077 * \text{length}_C * \text{global\_rad}$		auf treffende Globalstrahlung
rad_trC_web	$0,137 * \text{length}_C * \text{global\_rad}$		auf treffende Globalstrahlung
rad_trC_foot	$0,122 * \text{length}_C * \text{global\_rad}$		auf treffende Globalstrahlung
width_D_1	0,030	m	Breite
width_D_2	0,014	m	Breite
width_D_3	0,076	m	Breite
width_D_11	0,00525	m	Breite Kopf
height_D_1	0,043	m	Höhe Kopf

height_D_2	0,058	m	Höhe Steg
height_D_3	0,023	m	Höhe Fuß
l_ref_D	0,124	m	charakter. Länge
l_triangle_D	0,04426	m	Länge Kante Kopf
rad_trD_head	$0,0975 * \text{length\_D} * \text{global\_rad}$		auf treffende Globalstrahlung
rad_trD_web	$0,130 * \text{length\_D} * \text{global\_rad}$		auf treffende Globalstrahlung
rad_trD_foot	$0,122 * \text{length\_D} * \text{global\_rad}$		auf treffende Globalstrahlung
trapezoid_D	0,009	m	Breite Abschnitt Kopf

## Anlage 5: Technische Zeichnung von Rippenplatte und Gleitstuhl



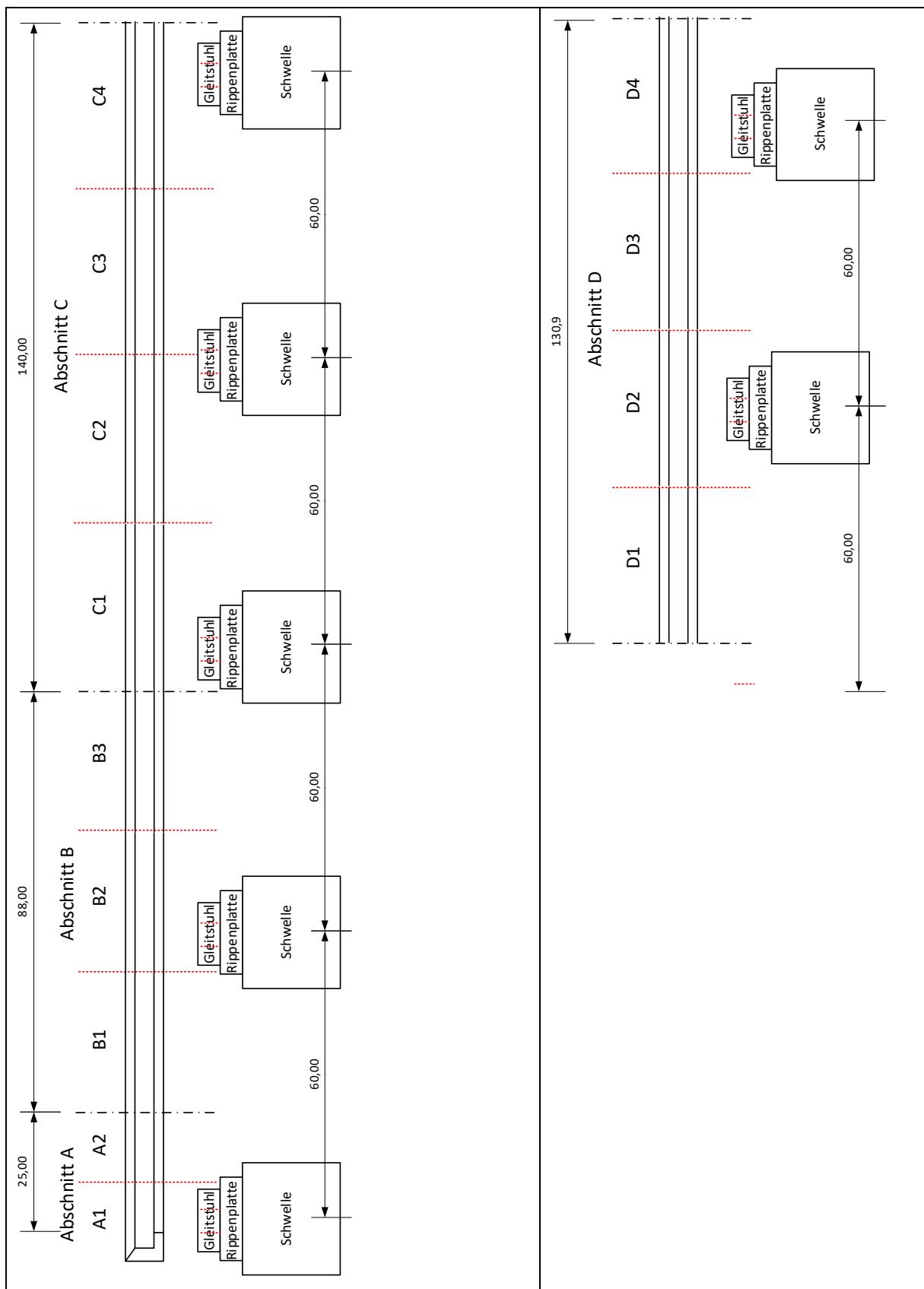
Anlage 6: Parameterliste für Rippenplatte und Gleitstuhl

Parametername	Wert	Einheit	Bedeutung
thermal_conductivity	52	W (m K) <sup>-1</sup>	spez. Wärmeleitfähigkeit
eps_assembly	0,89		Emissionsgrad
c1_assembly	0,555		Parameter für Konvektion
n1_assembly	0,25		Parameter für Konvektion
characteristic_length	0,56	m	charakteristische Länge
assembly_width_1	0,02	m	Breite Abschnitt
assembly_width_2	0,0285	m	Breite Abschnitt
assembly_width_3	0,063	m	Breite Abschnitt
assembly_width_1_half	0,01	m	Breite Abschnitt
assembly_width_2_half	0,01425	m	Breite Abschnitt
assembly_width_3_half	0,0315	m	Breite Abschnitt
rip_plate_length_1	0,076	m	Länge Abschnitt
rip_plate_length_2	0,033	m	Länge Abschnitt
rip_plate_length_3	0,117	m	Länge Abschnitt
rip_plate_length_4_1	0,0225	m	Länge Abschnitt
rip_plate_length_4_2	0,12	m	Länge Abschnitt
rip_plate_length_4_3	0,0575	m	Länge Abschnitt
slide_chair_high_1	0,019	m	Höhe Gleitstuhl
slide_chair_high_2	0,019	m	Höhe Gleitstuhl
rip_plate_length_5	0,099	m	Länge Abschnitt
slide_chair_length_1	0,0225	m	Länge Abschnitt
slide_chair_length_2	0,12	m	Länge Abschnitt
slide_chair_length_3	0,0575	m	Länge Abschnitt
rip_plate_high	0,02	m	Höhe Abschnitt
rip_plate_high_2	0,038	m	Höhe Abschnitt
rip_plate_length_4	0,035	m	Länge Abschnitt
slide_chair_length_0	0,035	m	Länge Abschnitt

Anlage 7: Parameterliste für die Schwelle

Parametername	Wert	Einheit	Bedeutung
laenge	2,6	m	Länge Schwellenstück
hoehe	0,22	m	Höhe Schwellenstück
breite	0,18	m	Breite Schwellenstück
H	0,22	m	Länge Schwellenstück
B	0,3	m	Breite Schwellenstück
nx	13		Unterteilung Länge
ny	4		Unterteilung Breite
nz	1		Unterteilung Höhe
lambda	2,3		
temp_zero	theta_amb	°C	
konvc1	0,15		
dichte_beton	2600		
charlen	0,0605		
konvn1	0,33		
eps1	0,94		
breitev	0,055	m	
lambda_h_vh	2,94	m	

Anlage 8: Zuordnung von Rippenplatte und Gleitstuhl zu den Unterabschnitten der Schienen



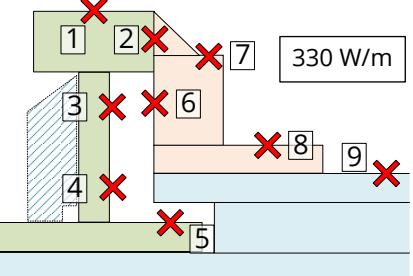
Anlage 9: Zuordnung der Komponenten zu den entsprechenden Bibliotheken im Wärmenetzmodell

Komponente	Bibliothek	Name
Backenschiene	stock_rail_hierch	Stock_Rail_A etc.
Zungenschiene	tongue_rail_a_hierch etc.	A_section etc.
Rippenplatte und Gleitstuhl	base_plate_slide_chair	slide_chair_base_plate_hierch
Schwelle	sleeper	sleeper_half

Anlage 10: Berechnete Temperaturen für die X-Seite der Weiche bei den ÖBB-Szenarien (Szenarien mit Backenschieneisolation sind **fett** markiert)

	Position								
	$\vartheta_1$ in °C	$\vartheta_2$ in °C	$\vartheta_3$ in °C	$\vartheta_4$ in °C	$\vartheta_5$ in °C	$\vartheta_6$ in °C	$\vartheta_7$ in °C	$\vartheta_8$ in °C	$\vartheta_9$ in °C
ÖBB 1: 0 °C; 24 km/h; 30 cm / 12 h	1,8	2,0	4,1	7,0	12,7	0,0	0,0	0,0	0,9
ÖBB 2: 0 °C; 30 km/h; 40 cm / 12 h	0,9	1,0	2,8	5,4	10,4	0,0	0,0	0,0	0,6
ÖBB 3: 0 °C; 30 km/h; 30 cm / 12 h	1,5	1,6	3,4	6,1	11,4	0,0	0,0	0,0	0,8
ÖBB 4: 0 °C; 30 km/h; 50 cm / 12 h	0,4	0,6	2,3	4,8	9,4	0,0	0,0	0,0	0,4
ÖBB 5: -5 °C; 50 km/h; 10 cm / 12 h	-2,6	-2,6	-1,3	1,0	6,1	-4,6	-4,5	-4,6	-3,1
ÖBB 6: -5 °C; 10 km/h; 50 cm / 12 h	0,2	0,3	2,6	5,8	12,0	-5,0	-5,0	-5,0	-2,4
<b>ÖBB 7: -5 °C; 10 km/h; 50 cm / 12 h</b>	0,8	0,9	3,6	7,1	12,8	-5,0	-5,0	-5,0	-1,9
ÖBB 8: -5 °C; 24 km/h; 10 cm / 12 h	0,5	0,5	2,2	5,2	11,6	-4,3	-4,3	-4,3	-1,1
<b>ÖBB 9: -5 °C; 24 km/h; 10 cm / 12 h</b>	1,8	1,8	4,0	7,2	13,1	-4,3	-4,2	-4,2	-0,7
ÖBB 10: -10 °C; 24 km/h; 10 cm / 12 h	-3,3	-3,3	-1,7	1,3	8,0	-8,0	-7,9	-7,9	-5,3
<b>ÖBB 11: -10 °C; 24 km/h; 10 cm / 12 h</b>	-1,2	-1,2	0,9	4,0	10,1	-7,9	-7,8	-7,7	-4,7

Anlage 11: Berechnete Temperaturen für die Y-Seite der Weiche bei den ÖBB-Szenarien (Szenarien mit Backenschieneisolation sind **fett** markiert)

	Position								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\vartheta_1$ in °C	$\vartheta_2$ in °C	$\vartheta_3$ in °C	$\vartheta_4$ in °C	$\vartheta_5$ in °C	$\vartheta_6$ in °C	$\vartheta_7$ in °C	$\vartheta_8$ in °C	$\vartheta_9$ in °C
ÖBB 1: 0 °C; 24 km/h; 30 cm / 12 h	3,2	2,6	7,9	13,7	24,4	1,3	0,9	0,6	2,7
ÖBB 2: 0 °C; 30 km/h; 40 cm / 12 h	2,3	1,9	6,8	12,2	22,8	0,8	0,4	0,2	2,0
ÖBB 3: 0 °C; 30 km/h; 30 cm / 12 h	2,9	2,4	7,4	12,9	23,5	1,1	0,8	0,5	2,5
ÖBB 4: 0 °C; 30 km/h; 50 cm / 12 h	1,8	1,5	6,3	11,6	22,2	0,5	0,1	0,0	1,7
ÖBB 5: -5 °C; 50 km/h; 10 cm / 12 h	-0,5	-1,0	2,6	7,1	16,8	-1,9	-2,0	-2,4	-1,1
ÖBB 6: -5 °C; 10 km/h; 50 cm / 12 h	1,3	1,0	5,9	11,3	22,0	-0,1	-0,3	-1,2	-0,5
<b>ÖBB 7: -5 °C; 10 km/h; 50 cm / 12 h</b>	2,3	1,8	7,8	13,9	24,3	0,4	0,1	-0,3	1,0
ÖBB 8: -5 °C; 24 km/h; 10 cm / 12 h	2,2	1,6	6,0	11,2	21,4	0,5	0,3	-0,1	1,0
<b>ÖBB 9: -5 °C; 24 km/h; 10 cm / 12 h</b>	4,8	3,9	10,2	16,2	26,1	2,0	1,8	1,0	2,4
ÖBB 10: -10 °C; 24 km/h; 10 cm / 12 h	1,2	0,4	5,0	10,3	20,5	-1,0	-1,1	-1,9	-1,5
<b>ÖBB 11: -10 °C; 24 km/h; 10 cm / 12 h</b>	4,4	3,3	9,5	15,3	24,6	1,3	1,2	0,0	0,6

Anlage 12: Berechnete Temperaturen für die X-Seite der Weiche bei den SBB-Szenarien

	Position								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\vartheta_1$ in °C	$\vartheta_2$ in °C	$\vartheta_3$ in °C	$\vartheta_4$ in °C	$\vartheta_5$ in °C	$\vartheta_6$ in °C	$\vartheta_7$ in °C	$\vartheta_8$ in °C	$\vartheta_9$ in °C
SBB 1: 0 °C; 0 km/h; kein Schnee	32,9	33,0	34,5	37,6	44,7	7,9	8,0	8,3	16,4
SBB 2: 0 °C; 0 km/h; starker Regen	5,8	6,1	10,1	14,8	22,4	0,2	0,2	0,3	2,6
SBB 3: 0 °C; 0 km/h; 30 cm / 12 h	6,9	7,2	11,1	16,0	23,6	0,0	0,0	0,0	2,5
SBB 4: 0 °C; 15 km/h; 30 cm / 12 h	2,4	2,6	4,8	8,0	13,8	0,0	0,0	0,0	1,1
SBB 5: 0 °C; 30 km/h; 30 cm / 12 h	1,2	1,3	3,0	5,5	10,3	0,0	0,0	0,0	0,6
SBB 6: -5 °C; 0 km/h; kein Schnee	28,9	28,9	30,4	33,5	40,5	3,8	3,8	4,1	12,0
SBB 7: -5 °C; 0 km/h; 30 cm / 12 h	5,7	6,0	9,6	14,1	21,6	-4,9	-4,9	-4,6	1,6
SBB 8: -5 °C; 15 km/h; 30 cm / 12 h	0,1	0,2	2,0	4,9	10,6	-5,0	-5,0	-5,0	-2,1
SBB 9: -5 °C; 30 km/h; 30 cm / 12 h	-2,4	-2,4	-0,9	1,6	6,7	-5,0	-5,0	-5,0	-3,8
SBB 10: -10 °C; 0 km/h; kein Schnee	24,8	24,8	26,3	29,3	36,3	-0,5	-0,4	-0,1	7,5
SBB 11: -10 °C; 0 km/h; 30 cm / 12 h	4,5	4,7	8,1	12,4	19,7	-9,2	-9,2	-8,8	2,4
SBB 12: -10 °C; 15 km/h; 30 cm / 12 h	-4,1	-4,0	-2,1	0,8	6,9	-10,0	-10,0	-10,0	-7,0
SBB 13: -10 °C; 30 km/h; 30 cm / 12 h	-7,4	-7,4	-5,8	-3,3	1,8	-10,0	-10,0	-10,0	-8,7

Anlage 13: Berechnete Temperaturen für die Y-Seite der Weiche bei den SBB-Szenarien

	Position								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\vartheta_1$ in °C	$\vartheta_2$ in °C	$\vartheta_3$ in °C	$\vartheta_4$ in °C	$\vartheta_5$ in °C	$\vartheta_6$ in °C	$\vartheta_7$ in °C	$\vartheta_8$ in °C	$\vartheta_9$ in °C
SBB 1: 0 °C; 0 km/h; kein Schnee	25,9	24,8	29,7	34,4	42,6	22,6	22,6	21,0	17
SBB 2: 0 °C; 0 km/h; starker Regen	4,4	3,7	10,1	16,3	26,5	2,0	1,6	1,2	3,9
SBB 3: 0 °C; 0 km/h; 30 cm / 12 h	4,8	4,0	10,5	16,7	26,9	2,1	1,7	1,1	4,0
SBB 4: 0 °C; 15 km/h; 30 cm / 12 h	3,3	2,7	8,0	13,6	23,5	1,4	1,0	0,6	2,8
SBB 5: 0 °C; 30 km/h; 30 cm / 12 h	2,5	2,1	6,7	11,7	21,36	1,0	0,7	0,4	2,2
SBB 6: -5 °C; 0 km/h; kein Schnee	21,8	20,7	25,6	30,3	38,4	18,5	18,5	16,9	12,7
SBB 7: -5 °C; 0 km/h; 30 cm / 12 h	3,9	3,2	9,2	15,1	24,9	1,6	1,2	0,6	2,2
SBB 8: -5 °C; 15 km/h; 30 cm / 12 h	1,4	1,0	5,3	10,2	19,7	0,0	-0,1	-0,9	0,4
SBB 9: -5 °C; 30 km/h; 30 cm / 12 h	-0,6	-1,1	2,9	7,5	16,8	-2,2	-2,4	-2,9	-1,4
SBB 10: -10 °C; 0 km/h; kein Schnee	17,7	16,6	21,5	26,4	34,2	14,5	14,5	12,8	8,3
SBB 11: -10 °C; 0 km/h; 30 cm / 12 h	3,1	2,5	7,9	13,5	22,9	1,0	0,7	0,1	0,7
SBB 12: -10 °C; 15 km/h; 30 cm / 12 h	-2,3	-3,0	1,6	6,6	16,1	-4,4	-4,6	-5,4	-4,1
SBB 13: -10 °C; 30 km/h; 30 cm / 12 h	-5,2	-5,6	-1,7	2,8	12,1	-6,6	-6,9	-7,4	-6,2

Anlage 14: Berechnete Temperaturen für die X-Seite der Weiche bei den ProRail-Szenarien

	Position								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\vartheta_1$ in °C	$\vartheta_2$ in °C	$\vartheta_3$ in °C	$\vartheta_4$ in °C	$\vartheta_5$ in °C	$\vartheta_6$ in °C	$\vartheta_7$ in °C	$\vartheta_8$ in °C	$\vartheta_9$ in °C
ProRail 1: 0 °C; 19,4 km/h; 1 cm/h	7,1	7,2	10,6	15,7	26	0,0	0,1	0,2	2,4
ProRail 2: -5 °C; 28,4 km/h; -	3,6	3,5	5,9	10,3	20,1	-3,5	-3,4	-3,3	1,0
ProRail 3: -10 °C; 38,5 km/h; -	-3,7	-3,8	-1,7	2,3	11,2	-8,2	-8,1	-8,0	-5,2
ProRail 4: -10 °C; 38,5 km/h; 1 cm/h	-4,6	-4,6	-2,4	1,5	10,2	-8,9	-8,8	-8,8	-5,9

Anlage 15: Berechnete Temperaturen für die Y-Seite der Weiche bei den ProRail-Szenarien

	Position								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\vartheta_1$ in °C	$\vartheta_2$ in °C	$\vartheta_3$ in °C	$\vartheta_4$ in °C	$\vartheta_5$ in °C	$\vartheta_6$ in °C	$\vartheta_7$ in °C	$\vartheta_8$ in °C	$\vartheta_9$ in °C
ProRail 1: 0 °C; 19,4 km/h; 1 cm/h	8,8	7,5	16,1	25	41,1	4,9	4,4	3,5	7,2
ProRail 2: -5 °C; 28,4 km/h; -	9,3	8,1	15,0	22,8	38,1	5,9	5,9	4,9	6,4
ProRail 3: -10 °C; 38,5 km/h; -	2,1	1,1	7,5	14,9	30,1	-0,7	-0,8	-1,6	0,2
ProRail 4: -10 °C; 38,5 km/h; 1 cm/h	-1,2	-2,0	3,8	10,9	25,9	-3,5	-3,7	-4,2	-2,6